

Ontwerp grofzandbarrière pilot Gameren

Aanzet tot ontwerp- en beoordelingsrichtlijn GZB



Ontwerp grofzandbarrière pilot Gameren
Aanzet tot ontwerp- en beoordelingsrichtlijn GZB

Auteur(s)

Andre Koelewijn

Ontwerp grofzandbarrière pilot Gameren
 Aanzet tot ontwerp- en beoordelingsrichtlijn GZB

Opdrachtgever	Waterschap Rivierenland
Contactpersoon	Bastiaan Heutink
Referenties	-
Trefwoorden	Piping, grofzandbarrière, Gameren, pilot, veiligheidsanalyse, foutenboom, faalpadanalyse

Documentgegevens

Versie	2.0
Datum	24-8-2021
Projectnummer	11200952-070
Document ID	11200952-070-GEO-0002
Pagina's	364
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Andre Koelewijn	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Andre Koelewijn	Arno Rozing Wim Kanning Vera van Beek Adam Bezuijen	Goaitske de Vries	
2.0	André Koelewijn 	Arno Rozing b/a Ulrich Forster  Wim Kanning  Adam Bezuijen 	Goaitske de Vries 	

Samenvatting

Het faalmechanisme piping vormt een belangrijk risico langs veel dijken in het Nederlandse rivierengebied. Traditionele versterkingsmethoden zoals pipingbermen en damwanden zijn duur en bermen vergen bovendien veel ruimtebeslag. Een innovatieve versterkingsmethode die aan deze bezwaren tegemoet komt, is de grofzandbarrière.

De grofzandbarrière bestaat uit een zandlichaam van grof zand die wordt aangebracht in het bovenste gedeelte van een pipinggevoelige zandlaag en daar ook iets bovenuit steekt tot in de deklaag. Waterschap Rivierenland heeft besloten om de grofzandbarrière als innovatieve oplossing toe te passen over een afstand van 1 km in de primaire waterkering nabij Gameren, aan de Waal.

Om dit mogelijk te maken is een veelomvattend onderzoeksproject opgezet langs een drietal lijnen:

- Experimenteel onderzoek met verschillende schaalgroottes om te bepalen hoe een grofzandbarrière precies werkt.
- Numeriek onderzoek, waarmee de experimenten zijn nagebootst, een rekenmethode is opgezet en de invloed van zijwaartse toestroming met driedimensionale modellen is onderzocht.
- Analyse van de toepasbaarheid in de praktijk, om te beginnen in Gameren.

Voor de toepasbaarheid in de praktijk is in Gameren onderzoek uitgevoerd naar de bodemeigenschappen, met een focus op de laagopbouw, doorlatendheden en korrelverdelingen van het aanwezige zand. Daarnaast is in meer algemene zin beschouwd hoe een grofzandbarrière kan falen. Daartoe is de methode van de faalpadanalyse toegepast, waaruit enkele tientallen reeksen van opeenvolgende gebeurtenissen voortkwamen waarlangs falen onder uiteenlopende condities theoretisch zou kunnen optreden. In deze faalboom is onderscheid gemaakt naar verschillende bezwijkvormen, waarbij naast het optreden van een hoogwater ook andere factoren noodzakelijk zijn om daadwerkelijk tot falen te kunnen komen. Deze beïnvloedende factoren kunnen in veel gevallen echter worden uitgesloten bij het ontwerp, tijdens de aanleg of in het beheer. Dit heeft ook geleid tot een concrete handreiking voor het ontwerp van een grofzandbarrière.

Voor het ontwerp van de grofzandbarrière bij Gameren is de ontwikkelde rekenmethode toegepast en is een analyse uitgevoerd welke faalpaden hiermee niet kunnen worden uitgesloten en waar derhalve rekening mee gehouden moet worden. Het ontwerp blijkt een marge van tenminste 20% te hebben voor het primaire faalpad, een marge die echter met maximaal 6% wordt verkleind indien diverse faalpaden optreden die leiden tot het partieel falen benedenstrooms van de grofzandbarrière, dus aan de landzijde ervan. De overige faalpaden die in de concrete situatie van Gameren niet al op voorhand zijn uit te sluiten, zijn beheersbaar door keuzes bij de uitvoering en bij het beheer. Hierdoor vormt de grofzandbarrière een methode waarmee deze kering voldoet aan de gestelde eisen voor wat betreft het faalmechanisme piping.

De grofzandbarrière vormt daarmee een oplossing voor het pipingrisico bij Gameren en is naar verwachting ook elders in het rivierengebied goed toepasbaar. Ter verdere verbetering van deze toepasbaarheid zijn in het laatste hoofdstuk een aantal concrete aanbevelingen gegeven.

Inhoud

Samenvatting	4	
1	Inleiding	12
1.1	Haalbaarheidsonderzoek grofzandbarrière	12
1.2	Wat is een grofzandbarrière en hoe werkt die?	13
1.3	Faalpaden, gebeurtenissenbomen en veiligheidsanalyses	17
1.4	Leeswijzer	19
2	Veiligheidsfilosofie	20
2.1	Aanpak	20
2.1.1	Aansluiting bij WBI en OI	20
2.1.2	Semi-probabilistische veiligheidsbenadering	21
2.1.3	Schadefactor γ_n	23
2.1.4	Mate waarin onzekerheden zijn afgedekt in het veiligheidsformat	25
2.2	Veiligheidsbenadering voor de grofzandbarrière	25
2.2.1	Inleiding	25
2.2.2	Partiële factoren bij het falen van de grofzandbarrière door overbelasting	26
2.3	Concretisering voor de grofzandbarrière bij Gameren	29
2.3.1	Korte toelichting op de situatie	29
2.3.2	Falen van de grofzandbarrière door overbelasting	31
2.4	Tot slot	32
3	Vormen van falen bij de grofzandbarrière	33
3.1	Inleiding	33
3.2	Achterloopsheid	33
3.3	Doorloopsheid	35
3.4	Bovenloopsheid	35
3.5	Onderloopsheid	36
3.6	Voorloopsheid	37
4	Beïnvloedende factoren	38
4.1	Inleiding	38
4.2	Ontwerpfase	38
4.3	Uitvoeringsfase	40
4.4	Beheerfase	41
5	Faalpaden en foutenboom	43
5.1	Inleiding	43
5.2	De foutenboom voor de grofzandbarrière	44

5.3	Voorbeeld van doorloopsheid: de primaire vorm van bezwijken	46
5.4	Voorbeeld van achterloopsheid: pipegroei voorbij het uiteinde	57
5.5	Voorbeeld van bovenloopsheid: uittredepunt te dichtbij	59
5.6	Voorbeeld van onderloopsheid: ontgraving niet diep genoeg	61
5.7	Voorbeeld van voorloopsheid: barrière is benedenstrooms van het uittredepunt	64
6	Ontwerp van een grofzandbarrière	66
6.1	Inleiding	66
6.2	Samenstelling barrièrezand	66
6.3	Positie GZB in dwarsprofiel	70
6.4	Diepte GZB in zandlaag	71
6.5	Vlak of ingekast?	72
6.6	Hoogte inkassing	73
6.7	Breedte barrière	73
6.8	Toe te passen 3D-factor	73
6.9	Waarborgen vereiste heavehoogte	74
6.10	Opbarstveiligheid bovenstrooms van de grofzandbarrière	75
6.11	Uiteinden	75
7	Veiligheidsanalyse voor de pilot Gameren	76
7.1	Inleiding	76
7.2	Veiligheidsniveau voor het primaire faalpad bij het Definitief Ontwerp	76
7.3	Beïnvloedende factoren	78
7.3.1	Ontwerpfase	78
7.3.2	Uitvoeringsfase	80
7.3.3	Beheerfase	82
7.4	Faalpaden	83
7.4.1	Ontwerpfase	83
7.4.2	Uitvoeringsfase	84
7.4.3	Beheerfase	84
7.5	Samenvatting en conclusie	85
7.5.1	Overgebleven faalpaden	85
7.5.2	Discussie	86
7.5.3	Conclusie	88
8	Aanbevelingen voor verdere toepassing	89
	Referenties	91
A	Beïnvloedende factoren en maatregelen daartegen	95
A.1	Ontwerpfase	95
A.1.1	O1 Barrière is niet lang genoeg in de lengterichting van de waterkering	95
A.1.2	O2 Geen scherpe grenslaag tussen de pipinggevoelige zandlaag en de deklaag	98
A.1.3	O3 Barrièrezand is intern instabiel	100

A.1.4	O4 Barrièrezand is te grof in relatie tot achtergrondzand	103
A.1.5	O5 Opdrijven van de deklaag bovenstrooms van de grofzandbarrière	103
A.1.6	O6 Grenslaag met veel silt	104
A.1.7	O7 Afstand van barrière tot uittredepunt is klein	107
A.1.8	O8 Te los gepakt achtergrondzand	108
A.1.9	O9 Sterk doorlatende (grind)laag onderaan barrière	109
A.1.10	O10 Grofkorrelige discontinuïteit in ondergrond bij barrière	110
A.1.11	O11 Barrièrezand is te fijn in relatie tot achtergrondzand	111
A.1.12	O12 In hoogteligging variërende grenslaag tussen de pipinggevoelige zandlaag en de deklaag	111
A.1.13	O13 Slechtdoorlatende discontinuïteit in ondergrond bij barrière	112
A.1.14	O14 3D-factor is onderschat	113
A.1.15	O15 Diepte bovenstroomse afdichting is onvoldoende	113
A.1.16	O16 Tussenzandlaag direct bovenstrooms van de barrière	114
A.1.17	O17 Cakevorming door uitspoeling van fijne fractie uit achtergrondzand in bovenstroomse zijde barrière	115
A.1.18	O18 Drainage via aanvulling boven barrière	116
A.1.19	O19 Barrière is te ondiep	117
A.1.20	O20 Barrière is benedenstrooms van uittredepunt	119
A.2	Uitvoeringsfase	119
A.2.1	U1 Onvoldoende aansluiting tussen discontinu geproduceerde barrièredelen	119
A.2.2	U2 Aanvulklei wordt te dun aangebracht, bevat holle ruimtes en/of wordt in onvoldoende mate aangevoerd en/of verdicht	122
A.2.3	U3 Grofzandbarrière is onvoldoende verdicht	122
A.2.4	U4 Onvoldoende aanvoer van barrièrezand	123
A.2.5	U5 Aanvulklei zwelt te sterk in de holle ruimte die boven het zand ontstaat	123
A.2.6	U6 Extreme verdichting achtergrondzand	125
A.2.7	U7 Aanvulklei is erosiegevoelig	125
A.2.8	U8 Aanvulklei is bij aanbrengen te nat	126
A.2.9	U9 Ontgraving is onvoldoende diep	127
A.2.10	U10 Ontmenging van het barrièrezand	127
A.2.11	U11 Toepassing van verkeerd materiaal als barrièrezand	128
A.2.12	U12 Vermenging van barrièrezand met achtergrondzand	128
A.3	Beheerfase	128
A.3.1	B1 Toekomstig gebrek aan kennis over de aanwezigheid en werking van de grofzandbarrière	128
A.3.2	B2 Doorgraven van de barrière door mens of dier	128
A.3.3	B3 Macroinstabiliteit leidt tot beschadiging van de barrière	129
A.3.4	B4 Na hoogwater nazakken van de deklaag in de pipe in de zandlaag	131
A.3.5	B5 Naverdichten barrière	134
A.3.6	B6 Erosie van de grofzandbarrière zelf bij hoogwater	134
A.3.7	B7 Mechanische, chemische of biologische verstopping	139
A.3.8	B8 Bij een eerder hoogwater is de grofzandbarrière door piping bloot komen te liggen	141
A.3.9	B9 Afkalving van de deklaag benedenstrooms van de barrière	141
A.3.10	B10 Pipe slijt de bovenliggende deklaag uit	142
B	Foutenboom	144
B.1	Inleiding	144
B.2	Overzicht van gebeurtenissen	146
B.2.1	Gebeurtenissen richting falen	146
B.2.2	Ongevaarlijke zij- of eindtak	147

B.2.3	Gebeurtenissen die een ja/nee-keuze betreffen	147
B.3	Overzicht van beïnvloedende factoren (naast een groot verval over de kering)	148
B.3.1	Factoren die bij het ontwerp dienen te worden geadresseerd	148
B.3.2	Factoren die bij de uitvoering dienen te worden geadresseerd	148
B.3.3	Factoren die bij het beheer dienen te worden geadresseerd	149
B.4	Schematisch overzicht	149
C	Alle 78 afzonderlijke paden uit de foutenboom	151
C.1	Paden die in het ontwerp geadresseerd kunnen worden	151
C.1.1	Pad 1 Pipegroei voorbij het uiteinde	151
C.1.2	Pad 2 Barrière sluit niet goed aan op hoge grond	155
C.1.3	Pad 3 Barrière sluit niet goed aan op een andere waterdoorlatende pipingmaatregel	156
C.1.4	Pad 4 Geen scherpe grenslaag en pipe kan bovenlangs door sleuuaanvulling heengroeien	159
C.1.5	Pad 5 Barrièrezand is intern instabiel, fijne fractie spoelt uit en korrelmatrix stort in	160
C.1.6	Pad 6 Barrièrezand is intern instabiel, fijne fractie spoelt uit en achtergrondzand wordt doorgelaten	161
C.1.7	Pad 7 Barrièrezand is te grof: barrière laat achtergrondzand door	162
C.1.8	Pad 8 Deklaag bovenstrooms van barrière drijft op, waarna holle ruimte leidt tot pipeontwikkeling	163
C.1.9	Pad 9 Barrièrezand is te grof en achtergrondzand is gevoelig voor suffosie	165
C.1.10	Pad 10 Silt uit grenslaag spoelt uit en maakt barrière instabiel	166
C.1.11	Pad 11 Uittredpunt ligt dicht bij barrière, processen bij uittredpunt ondermijnen barrière	169
C.1.12	Pad 12 Losse pakking achtergrondzand leidt tot nazakken barrière en daardoor gebrek aan voldoende hoogte barrière	171
C.1.13	Pad 13 Sterke aanvoer van water via grindlaag onderaan barrière	173
C.1.14	Pad 14 Grote discontinuïteit (geul) voert extra veel water aan	176
C.1.15	Pad 15 Barrièrezand heeft te lage doorlatendheid; barrière raakt relatief zwaar belast	178
C.1.16	Pad 16 Hoogte grenslaag varieert, maar is bovenstrooms niet hoger: eventueel gunstiger	181
C.1.17	Pad 17 Grote discontinuïteit (geul) onderbreekt dwarsontwikkeling pipes aan benedenstroomse zijde	182
C.1.18	Pad 18 Slechtdoorlatende discontinuïteit onderbreekt dwarsontwikkeling pipes aan benedenstroomse zijde	185
C.1.19	Pad 19 Complexe geohydrologische situatie leidt tot onderschatting stroming	188
C.1.20	Pad 20 Complexe geohydrologische situatie leidt tot overschatting stroming	190
C.1.21	Pad 21 Geen scherpe grenslaag en kleiaanvulling steekt effectief naar beneden, daardoor ongunstiger stroming en sneller falen	190
C.1.22	Pad 22 Geen scherpe grenslaag waardoor hoogte inkassing kleiner is, daardoor sneller falen	192
C.1.23	Pad 23 Afdichting als aanvullende maatregel bij een dunne barrière is onvoldoende hoog, daardoor sneller falen	196
C.1.24	Pad 24 Grenslaag ligt bovenstrooms hoger, daardoor minder heave-hoogte en sneller falen	198
C.1.25	Pad 25 Grenslaag bevat veel silt dat doorspoelt en waardoor pipe bovenstrooms hoger verdergaat: daardoor minder heave-hoogte en sneller falen	201
C.1.26	Pad 26 Tussenwandlaag bovenstrooms van barrière leidt tot extra erosie bij doorloopsheid	205
C.1.27	Pad 27 Barrière raakt door cakevorming aan bovenstroomse rand en onderrand verstopt	209

C.1.28	Pad 28 Barrière raakt door cakevorming aan alleen de bovenstroomse rand verstopt	213
C.1.29	Pad 29 Kleiaanvulling in sleuf leidt tot drainage, erosie tot bezwijken sleufaanvulling	217
C.1.30	Pad 30 Nabijheid van uittredepunt leidt tot aanvullende problemen	220
C.1.31	Pad 31 Barrière is te ondiep waardoor piping onder de barrière door kan optreden	224
C.1.32	Pad 32 Onduidelijke grenslaag, waarbij de barrière te ondiep blijkt en piping onder de barrière door kan optreden	227
C.1.33	Pad 33 Barrière raakt door cakevorming aan alle kanten verstopt, werkt daardoor als kwelscherm	229
C.1.34	Pad 34 Barrière raakt door cakevorming aan bovenstroomse rand verstopt, waardoor bovenstroomse drukopbouw te groot wordt en bovenstrooms opbarsten en heave optreden	231
C.1.35	Pad 35 Deklaag bovenstrooms van de barrière drijft op, waarna bovenstrooms ook opbarsten en heave optreden	232
C.1.36	Pad 36 Grofzandbarrière ligt te ver achter de waterkering en is daardoor niet functioneel	233
C.2	Paden die in de uitvoering geadresseerd kunnen worden	234
C.2.1	Pad 37 Niet in één gang geproduceerde barrièredelen sluiten niet goed op elkaar aan, zodat pipe ertussendoor kan groeien	234
C.2.2	Pad 38 Aanvulklei is niet goed, daardoor holle ruimte direct boven barrièrezand	237
C.2.3	Pad 39 Barrière is onvoldoende verdicht, door nazakken neemt heave-hoogte af	238
C.2.4	Pad 40 Barrière is onvoldoende verdicht en daardoor zwakker	239
C.2.5	Pad 41 Aanvoer van barrièrezand is onvoldoende in verhouding tot de voortgangssnelheid	242
C.2.6	Pad 42 Aanvulklei zwelt te sterk en belemmert ontwikkeling vrije helling aan bovenzijde barrière	244
C.2.7	Pad 43 Achtergrondzand raakt in extreme mate verdicht: deel met lage porositeit erodeert wel: doorloopsheid	247
C.2.8	Pad 44 Achtergrondzand raakt in extreme mate verdicht: deel met vermalen korrels erodeert wel: doorloopsheid	250
C.2.9	Pad 45 Aanvulklei is niet goed waardoor sleufaanvulling bezwijkt	253
C.2.10	Pad 46 Aanvulklei is niet goed waardoor er een holle ruimte is boven het barrièrezand en de sleufaanvulling bezwijkt	256
C.2.11	Pad 47 Aanvulklei is erosiegevoelig waardoor de sleufaanvulling bezwijkt	259
C.2.12	Pad 48 Zwelvermogen aanvulklei is te groot waardoor deze te snel erodeert en sleuf bezwijkt	263
C.2.13	Pad 49 Te nat aangebrachte klei in sleuf erodeert gemakkelijk	267
C.2.14	Pad 50 Te nat aangebrachte klei in sleuf droogt uit en bovenloopsheid ontstaat via krimpscheuren	270
C.2.15	Pad 51 Ontgraving is niet diep genoeg, waardoor de pipe onder de barrière door kan	273
C.2.16	Pad 52 Achtergrondzand raakt in extreme mate verdicht: deel met lage porositeit erodeert niet: schermwerking	276
C.2.17	Pad 53 Achtergrondzand raakt in extreme mate verdicht: deel met vermalen korrels erodeert niet: schermwerking	277
C.2.18	Pad 54 Achtergrondzand raakt in extreme mate verdicht: door verlaagde porositeit drukopbouw bovenstrooms: voorloopsheid	279
C.2.19	Pad 55 Achtergrondzand raakt in extreme mate verdicht: vanwege vermalen korrels drukopbouw bovenstrooms: voorloopsheid	280
C.3	Paden die in het beheer geadresseerd kunnen worden	281
C.3.1	Pad 56 De grofzandbarrière raakt vergeten en doorgraven	281
C.3.2	Pad 57 Barrière wordt doorgraven	283
C.3.3	Pad 58 Macroinstabiliteit met glijvlak onder grensvlak bij bovenstroomse zijde inkassing: geen negatieve invloed	285

C.3.4	Pad 59 Macroinstabiliteit met glijvlak boven bovenstroomse zijde inkassing: geen invloed	286
C.3.5	Pad 60 Macroinstabiliteit met glijvlak door inkassing aan bovenstroomse zijde, waardoor heavehoogte afneemt	286
C.3.6	Pad 61 Pipe komt bij opeenvolgende hoogwaters steeds dieper te liggen waardoor de resterende heavehoogte afneemt	288
C.3.7	Pad 62 Barrière raakt verdicht in beheerfase waardoor resterende hoogte afneemt	290
C.3.8	Pad 63 De primaire bezwijkvorm door doorloopbaarheid, zonder verdere bijzonderheden	291
C.3.9	Pad 64 Verstopping aan alleen onderrand barrière	297
C.3.10	Pad 65 Verstopping aan bovenstroomse rand en onderrand: toename van sterkte	299
C.3.11	Pad 66 Verstopping aan bovenstroomse rand: toename van sterkte	303
C.3.12	Pad 67 Grove deel dubbel filter raakt na blootlegging bij hoogwater door omgekeerde stroming verstopt, verstopping breekt niet af: doorloopbaarheid	306
C.3.13	Pad 68 Grove deel dubbel filter raakt na blootlegging bij hoogwater door omgekeerde stroming verstopt, verstopping breekt af: doorloopbaarheid	309
C.3.14	Pad 69 Barrière raakt na blootlegging bij hoogwater door omgekeerde stroming (deels) gevuld met achtergrondzand, dit vormt geen risico	313
C.3.15	Pad 70 Uittredepunt verplaatst door afkalving in bovenstroomse richting en bereikt sleuf	313
C.3.16	Pad 71 Pipe slijt bovenliggende deklaag volledig uit, waardoor uittredepunt meer bovenstrooms komt te liggen, uiteindelijk bij sleuf	318
C.3.17	Pad 72 Verstopping vindt alleen plaats in de gehele barrière, pipe groeit onder dichte barrière door	322
C.3.18	Pad 73 Verstopping vindt alleen plaats aan de benedenstroomse rand van de barrière en verstopte deel breekt niet af	323
C.3.19	Pad 74 Inspoeling van achtergrondzand in binnenste laag dubbel filter	324
C.3.20	Pad 75 Inspoeling van achtergrondzand in enkelvoudig filter of buitenste laag van dubbel filter	327
C.3.21	Pad 76 Verstopping vindt alleen plaats aan alle randen van de barrière	327
C.3.22	Pad 77 Verstopping vindt alleen plaats in de gehele barrière, drukopbouw bovenstrooms wordt fataal	328
C.3.23	Pad 78 Verstopping vindt zo massaal plaats dat piping niet meer kan optreden	330
D	Bepaling 3D-factor	331
D.1	Inleiding	331
D.2	Invloedsfactoren volgens de verkennende berekeningen	331
D.3	3D-factoren voor Gameren	336
E	Definitief Ontwerp en aanvullende berekeningen	341
E.1	Inleiding	341
E.2	Berekeningen maatgevende doorsneden op basis van oude inzichten	341
E.2.1	Verkennende berekeningen	341
E.2.2	Uitgangspunten voor berekeningen	342
E.2.3	Resultaten van berekeningen	343
E.2.4	Toepassing van partiële veiligheidsfactoren	343
E.2.5	Conclusie ten aanzien van het Voorlopig Ontwerp	343
E.3	Definitief Ontwerp	344
E.3.1	Aanvullend grondonderzoek	344
E.3.2	Principe-doorsnede met bovenstroomse afdichting	350
E.3.3	Aanvullende berekeningen	352

E.3.4	Conclusie	361
F	Overzicht van keuzes en onzekerheden	362
F.1	Inleiding	362
F.2	Veldsituatie	362
F.3	Onderliggende laboratoriumproeven / modelfactor en modelonzekerheid	362
F.4	3D-factor	363
F.5	Schadefactor	363
F.6	Uitvoering-gerelateerde aspecten	363

1 Inleiding

1.1 Haalbaarheidsonderzoek grofzandbarrière

De huidige beoordelingsmethoden voor piping leiden op veel dijktrajecten langs de grote rivieren tot grote veiligheidstekorten bij de primaire keringen. Langs dijktraject 38-1, nabij het dorp Gameren in de Bommelerwaard, was een gedeelte van 300 m afgekeurd in de derde veiligheidsbeoordeling van de primaire keringen van Nederland, in de periode 2006 – 2011. De afgekeurde vakken liggen ter hoogte van dijkpaal RW137 (200 m) en dijkpaal RW143 (100 m). Een indicatieve analyse met de huidige, strengere veiligheidseisen voor piping (WBI 2017), strenger dan voor de derde veiligheidsbeoordeling, laat zien dat nu het grootste deel van het 1,0 km lange traject voor Gameren niet voldoet (Bisschop & Hofschreuder, 2016). Dit is echter lang niet het enige traject dat voor piping versterkt zal moeten worden. Indicatieve studies laten zien dat in de komende 30 jaar in het Nederlandse rivierengebied ruim 800 km dijk versterkt zal moeten worden voor het faalmechanisme piping (De Grave, 2020).

Traditionele versterkingsmethoden, zoals het aanleggen van een berm om de kwelweglengte te vergroten, worden door de lange benodigde kwelweglengtes en door veelal aanwezige bebouwing steeds minder aantrekkelijk. Er zijn verschillende alternatieve en innovatieve methoden die minder ruimtebeslag vergen en goedkoper zijn dan een traditionele oplossing zoals een binnendijkse pipingberm of een stalen damwand. Eén van de nieuwe innovatieve methodes is de grofzandbarrière. Deze methode bestaat uit het creëren van een zandlichaam van grof zand in het bovenste gedeelte van een pipinggevoelige zandlaag, afgedekt met klei (zie figuur 1).

Waterschap Rivierenland heeft de wens om de grofzandbarrière bij Gameren als innovatieve maatregel toe te passen. Hoewel eerdere proeven in het laboratorium en op de IJkdijk de kansrijkheid van deze methode aangaven (Van Beek et al., 2015b), was het nodig om een haalbaarheidsonderzoek uit te voeren om aan te tonen dat deze maatregel voldoende veiligheid biedt, zowel op de pilot-locatie als meer generiek voor andere dijkversterkingstrajecten – naar schatting totaal ruim 400 km (De Grave, 2020).

Het haalbaarheidsonderzoek bestaat uit de volgende onderdelen:

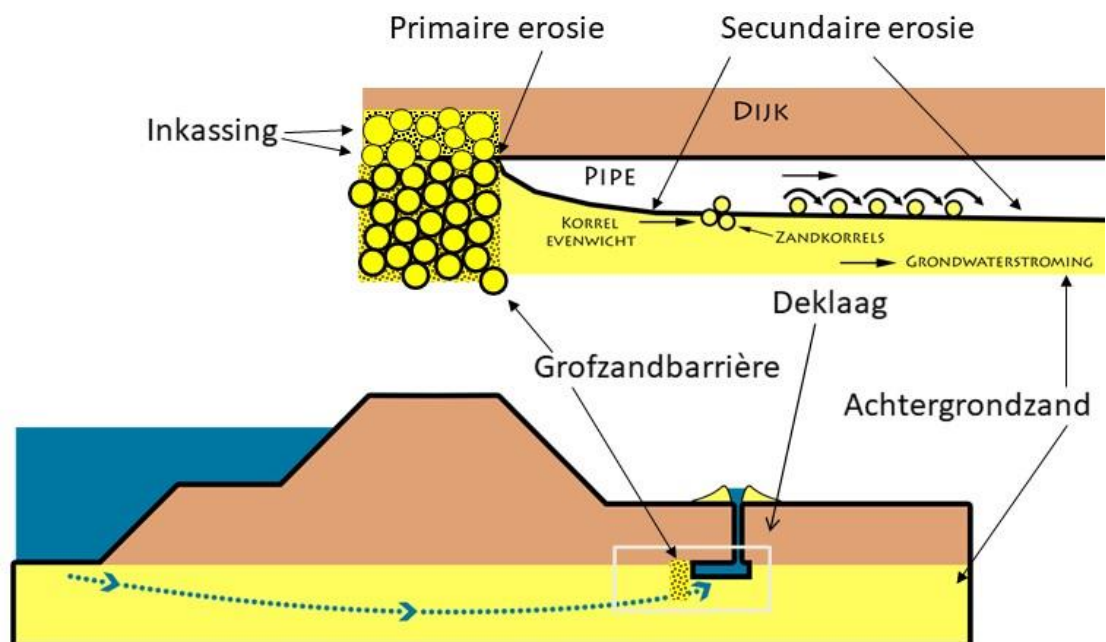
- 1 Filtreisen en barrièremateriaal: literatuuronderzoek om geschikt barrièremateriaal vast te stellen.
- 2 Kleine-schaal experimenten en simulaties: kwalitatief onderzoek van optredende processen en het bepalen van een sterktecriterium.
- 3 Medium-schaal experimenten en simulaties: schaalears effecten van de optredende processen en nadere bepaling van het sterktecriterium.
- 4 Deltagootexperimenten en simulaties: ter validatie, met een grofzandbarrière en een verval op vergelijkbare schaal als bij Gameren, maar met een dunner en korter zandpakket (waardoor de schaalears effecten optimistischer uitpakken).
- 5 Aanvullende medium-schaal experimenten en simulaties: naar aanleiding van de uitkomsten van de voorgaande onderzoeken.
- 6 Foutenboom en veiligheidsanalyse: een analyse van de factoren bij ontwerp, uitvoering en beheer die het goed functioneren van de grofzandbarrière beïnvloeden en een beoordelingswijze die past binnen de systematiek van het vigerende Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium.
- 7 Predictie voor Gameren: toepassing voor de concrete pilottoepassing.
- 8 Ondersteuning van maakbaarheidsproeven en pilottoepassing.

De eerste vier onderdelen zijn uitgevoerd in de periode 2017-2019 en de resultaten zijn samengevat door Van Beek & Rosenbrand (2019). Het vijfde onderdeel, dat zowel proeven omvat met de bovenzijde van de grofzandbarrière gelijk aan de bovenkant van de pipinggevoelige zandlaag (de 'vlakke grofzandbarrière'), als proeven waarbij de grofzandbarrière boven deze laag uitsteekt (de zogenoemde 'inkassing'), is vooralsnog in meerdere delen gerapporteerd, in respectievelijk Rosenbrand & Van Beek (2020) en Förster (2021a). Het zesde onderdeel betreft deze rapportage, het zevende onderdeel is uitgewerkt in Koelewijn et al. (2021) en in deze rapportage.

1.2 Wat is een grofzandbarrière en hoe werkt die?

Onderstaande toelichting op de werking van een grofzandbarrière is mede gebaseerd op Van Beek & Rosenbrand (2019).

Bij het faalmechanisme piping kunnen tijdens een hoogwater ten gevolge van grondwaterstroming zandkorrels worden meegenomen vanuit de bovenzijde van een watervoerende laag onder het afsluitende slappe-lagenpakket. Er ontstaat dan een holle ruimte in de ondergrond, die overgaat in een pipe. Bij voldoende waterstandsverschil kan de pipe geleidelijk groeien in de richting van het buitenwater. Na kortsluiten van de pipe met het buitenwater kan na het ruimingsproces bezwijken van de waterkering optreden.



Figuur 1 Faalmechanisme piping gehinderd door een grofzandbarrière (situatie met inkassing).

De essentie van het pipingproces is dat zandkorrels op het grensvlak van de pipinggevoelige zandlaag en de bovenliggende deklaag worden meegevoerd door grondwaterstroming. Bij de grofzandbarrière (zie Figuur 1) wordt aan de landzijde van een dijk ondergronds een 'muur' van grof zand aangebracht die uitsteekt boven én onder het grensvlak (of zone) waarlangs piping kan ontstaan. De hoogte h bedraagt typisch 1 tot 2 m en de breedte w 0,3 tot 1,5 m. De samenstelling van de grofzandbarrière wordt afgestemd op de samenstelling van de pipinggevoelige zandlaag, zodat dat zand goed wordt tegengehouden en er tegelijkertijd sprake is van een zo groot mogelijke doorlatendheid van de grofzandbarrière.

Het pipingproces wordt op twee manieren bemoeilijkt, waardoor een groter waterstandsverschil (verval) kan worden gekeerd voordat bezwijken door piping optreedt ten opzichte van een situatie zonder GZB. De eerste is dat het barrièremateriaal een grotere weerstand tegen erosie heeft omdat de korrels groter zijn, de tweede reden is dat de

stromingsbelasting op de korrels in de barrière relatief klein is, ten gevolge van de relatief hoge doorlatendheid van het barrièremateriaal ten opzichte van het omringende zand (hier verder aangeduid als achtergrondzand). Daarbij zal het overgrote deel van het verval worden opgenomen door het relatief fijne achtergrondzand bovenstreams van de grofzandbarrière, dus tussen de grofzandbarrière en het buitenwater. Daardoor is een situatie met achtergrondzand en grofzandbarrière ook sterker dan een (fictieve) ondergrond die alleen uit barrièremateriaal zou bestaan.

Hoe groter het contrast in doorlatendheid, hoe effectiever de barrière werkt. Dit komt doordat er dan een nóg kleiner gedeelte van de totale gradiënt door de zeer doorlatende barrière hoeft te worden opgenomen, terwijl de weerstand ervan tegen erosie door de grovere korrels relatief groot is.

Het ontstaan van zandmeevoerende wellen wordt met een grofzandbarrière niet tegengegaan (hier verandert in essentie niets aan), maar zodra pipes bij de grofzandbarrière aankomen, voorkomt deze dat de pipes verder onder de dijk doorgroeien en de waterkering ondergraven. Er kan dan met een rekenkundig te kleine kwelweglengte (bijvoorbeeld volgens de methode van Sellmeijer¹) toch voldoende veiligheid tegen piping worden gecreëerd.

De grofzandbarrière (GZB) heeft als voordeel dat er met een natuurlijk materiaal meer weerstand tegen piping kan worden gecreëerd. Echter, in tegenstelling tot bijvoorbeeld de situatie bij een verticaal zanddicht geotextiel (VZG) kan een pipe bij te sterke waterstroming tot gedeeltelijke erosie van de barrière leiden, waarbij in eerste instantie de waterkerende functie nog behouden blijft. Maar bij verdere vergroting van de waterstroming kan de barrière wel doorbreken. In de haalbaarheidsstudie is onderzocht of de barrière voldoende sterkte biedt bij de maatgevende omstandigheden. Is dit het geval, dan voldoet de kering aan de eisen die gesteld worden aan piping.

De grofzandbarrière is niet hetzelfde als een conventioneel granulair filter, waarbij aan het maaiveld gecontroleerd water wordt afgelaten. Een grofzandbarrière is afgedekt met een kleilaag en maakt dus niet direct contact met het maaiveld. Zonder afdeklaag zou een grofzandbarrière als filter fungeren, waarbij het ontstaan van zandmeevoerende wellen wordt voorkomen. Bij een dergelijk filter aan het maaiveld is er echter een niet-verwaarloosbaar risico op verstopping door bijvoorbeeld biologische oorzaken en op ongewenste kwel (voorafgaand aan het ontstaan van pipes). Net als bij een filter is het bij de grofzandbarrière echter nodig om rekening te houden met filterwetten (Rosenbrand, 2017): het achtergrondmateriaal mag niet door de barrière heen kunnen stromen. Bij een juiste keuze van het barrièremateriaal, conform de eisen zoals beschreven in dit document (zie §6.2), kan dit echter uitgesloten worden.

De sterkte van de barrière is dan geheel afhankelijk van condities waaronder de pipe door de barrière heen groeit. In het haalbaarheidsonderzoek (zie §1.1) is onderzocht hoe deze sterkte bepaald kan worden. De erosiemechanismen die voor groei van een pipe zorgen spelen hierbij voor een grofzandbarrière die aan de bovenzijde tot in de cohesieve deklaag steekt een belangrijke rol, terwijl dit voor een grofzandbarrière met een hoge inkassing niet belangrijk is. Bij een grofzandbarrière met een beperkte inkassing kan er tijdelijk een fase optreden waarbij het bovenstroomse gedeelte van de inkassing nog tegen de afdekkende kleilaag steekt, maar bij een toenemend verval ontstaat dan uiteindelijk dezelfde situatie als bij een hoge inkassing het geval is (zie §6.6).

¹ Omdat de methode van Sellmeijer is afgeleid voor een in horizontale richting onveranderlijke bodemsamenstelling en de bijbehorende grondwaterstroming in deze methode is geïntegreerd, is deze methode onbruikbaar om een grofzandbarrière mee door te rekenen.

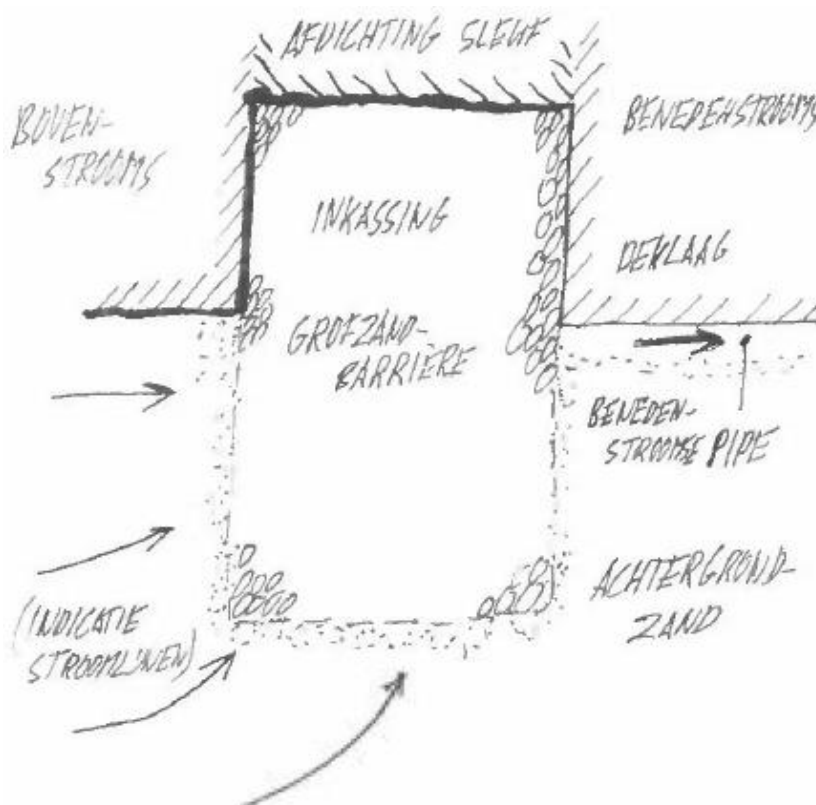
De sterkte van de barrière is voor een deel af te leiden door te kijken naar het erosiemechanisme. Op basis van beschikbare literatuur kan afgeleid worden welke erosiemechanismen een rol zullen spelen. Verschillende onderzoeken (Hanses, 1985; Robbins et al., 2018; Van Beek et al., 2015a) tonen aan dat voor de groei van een pipe twee mechanismen van belang zijn:

- Primaire erosie: het losmaken van korrels aan de kop van de pipe, door het fluidiseren van een groep korrels, gedreven door de lokale hydraulische gradiënt.
- Secundaire erosie: het eroderen van korrels op de bodem en wanden van de pipe, waardoor de pipe dieper (en breder) wordt. De diepte van de pipe bepaalt de drukval in de pipe.

Voor piping zonder barrière is de secundaire erosie erg belangrijk: de drukval in het reeds gevormde deel van de pipe bepaalt in grote mate het uiteindelijke kritiek verval. In het model van Sellmeijer bijvoorbeeld is alleen de secundaire erosie meegenomen.

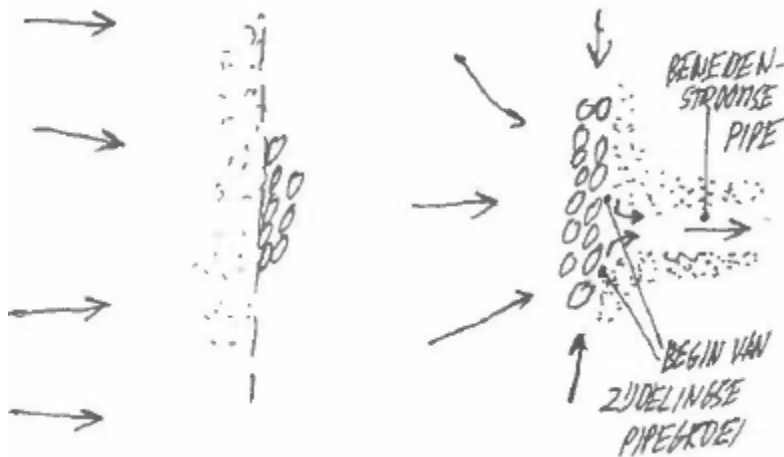
De sterkte van de barrière berust, afhankelijk van de situatie, soms in grote mate op primaire erosie. Dit hangt af van de mate van inkassing van de barrière in de bovenliggende deklaag en de mate waarin de verschillende erosieprocessen achterlangs en in de barrière kunnen optreden, ongehinderd door eventuele obstakels aan vooral de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière, zoals in §2.2.2.2 en §2.3.2 is uitgewerkt. Zonder obstakels en een inkassing die hoog genoeg steekt om daarin over de volle dikte van de barrière een helling onder natuurlijk talud te laten ontstaan, levert de primaire erosie geen aanvullende sterkte. Maar bij obstakels of als de inkassing relatief laag is, speelt de primaire erosie wel een significante rol, zo is uit het eerdere deel van het haalbaarheidsonderzoek gebleken.

Wanneer de pipe bij de barrière aankomt en diep genoeg is geworden, dan zullen de hooggelegen grove korrels in het reeds gevormde deel van de pipe gaan rollen, zie Figuur 2.



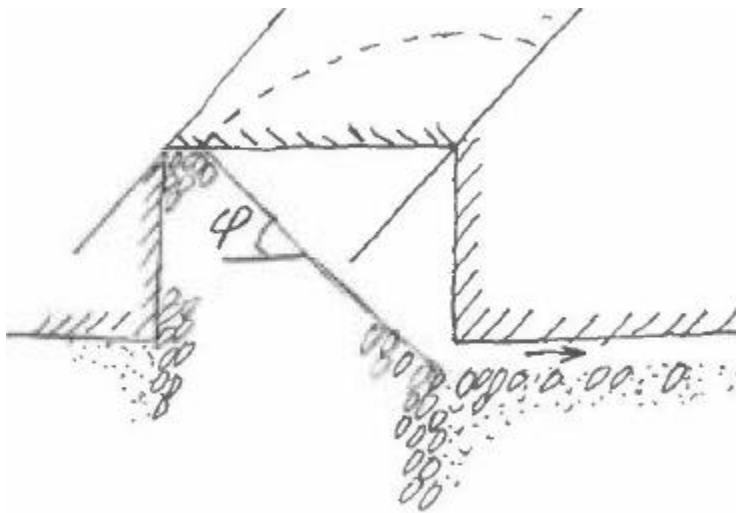
Figuur 2 Zijaanzicht van een grofzandbarrière waar een pipe volledig naar toe is gegroeid vanaf het benedenstroomse uittredepunt.

Dit proces kost niet alleen tijd, maar vergt ook een geleidelijk iets hoger verval: de pipe zal verdiepen en als het ware geplaveid raken met het grove zand, waar een wat hogere stromingsweerstand bij hoort. Ook zal er in zijdelingse richting pipegroei ontstaan langs de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière, in het achtergrondzand. Dit is geïllustreerd in Figuur 3. In proeven bleek de toename van het verval in deze fase echter relatief beperkt.



Figuur 3 Bovenaanzicht met het eerste begin van zijdelingse pipegroei.

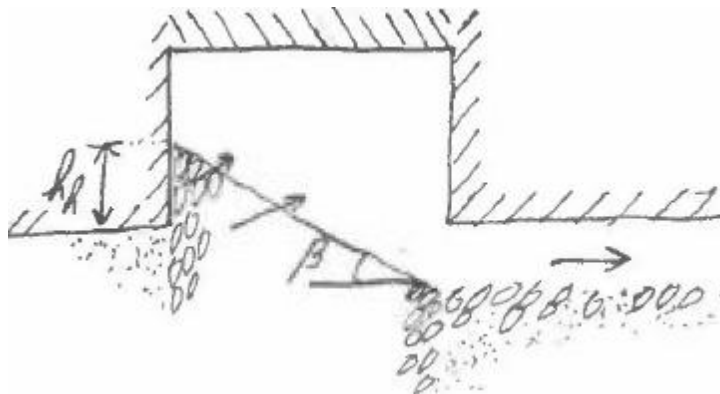
In de inkassing van de barrière zelf zal zich een helling vormen, aanvankelijk ongeveer onder natuurlijk talud met als basis de bodem van de pipe, zie Figuur 4.



Figuur 4 Uitspoeling van een gedeelte van de inkassing van de grofzandbarrière, aansluitend op de benedenstroomse pipe tot een hellingshoek ongeveer gelijk aan de hoek van inwendige wrijving (natuurlijk talud) van het barrièrezand. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting)

Dit proces alsmede de navolgend beschreven processen zijn verderop, met name in hoofdstuk 5 en in bijlagen A en C, uitgebreider toegelicht en geïllustreerd.

Wanneer de helling geheel gevormd is, zal deze bij een relatief hoge inkassing aan de bovenstroomse zijde raken aan de deklaag bovenstrooms. Daarna zal de helling bij een verder groeiend verval flauwer worden waarbij aan de bovenstroomse zijde uiteindelijk slechts een zogenoemde heavehoogte h_h resteert bij een kritieke hoek β , zie Figuur 5 (de gebruikte termen worden in hoofdstuk 2 toegelicht). In deze fase is een sterke toename van het verval mogelijk, zonder dat de grofzandbarrière bezwijkt.



Figuur 5 Kritieke helling na verder verflauwen, met de minimale heavehoogte h_h en hoek β .

Vervolgens zal bij een verdere toename van het verval het resterende gedeelte van de grofzandbarrière instabiel worden onder de verder gegroeide stromingsdruk en bezwijken optreden. Het bezwijkproces is in meer detail als volgt: Op het lagere gedeelte van de helling zal opnieuw een kleine afschuiving plaatsvinden, waarna plotseling een groter gedeelte van de hoger gelegen helling afschuift. Vervolgens is aan de bovenstroomse rand onvoldoende weerstand tegen heave en treedt daar bezwijken door heave op (Förster, 2021a). Hierna kan de pipe verder groeien door het achtergrondzand richting het buitenwater.

Bij een relatief lage inkassing zal er overigens eerst nog sprake zijn van een tussenfase waarbij primaire erosie een grote rol speelt: er is dan nog sprake van een horizontaal bovengedeelte van de barrière, onder het plafond van de inkassing, waar de pipe niet in kan groeien zolang de weerstand tegen pipevorming (door primaire erosie) niet overschreden wordt. De sterkte van de barrière berust dan op primaire erosie zolang het resterende barrièredeel niet bezwijkt onder de stromingsdruk. In het haalbaarheidsonderzoek is primaire erosie nader bestudeerd en gekwantificeerd, met name bij de aanvullende medium-schaalexperimenten zoals die zijn gerapporteerd door Rosenbrand & Van Beek (2020). Ook kan er bij een relatief lage inkassing zorgen voor een kortsluiting als het talud zodanig flauw wordt dat dit onder of nabij de deklaag komt.

1.3 Faalpaden, gebeurtenissenbomen en veiligheidsanalyses

Voor deze nieuwe dijkversterkingsmethode is gezocht naar een manier om het functioneren ervan te beschrijven en een aanzet op te stellen voor een richtlijn voor ontwerp en beoordeling. Hierbij is voortgebouwd op de ervaringen met de ontwikkeling van de ontwerp- en beoordelingsrichtlijn voor het VZG (Taal, 2017), waarin een volledig ontwikkeld kwantitatief raamwerk nog ontbreekt.

Voor de grofzandbarrière is gebruik gemaakt van hetgeen door Te Nijenhuis et al. (2020) beschreven is over faalpaden, gebeurtenissenbomen en foutenbomen:

- Faalpad: een beschrijving van de opeenvolging van gebeurtenissen die leidt tot een overstroming. Alle gebeurtenissen in het faalpad moeten optreden om een overstroming te veroorzaken.
- Gebeurtenissenboom: een beschrijving van alle gebeurtenissen vanaf een initiërende gebeurtenis die kan leiden tot falen. Tussen initiatie en einduitkomst zitten doorgaans meerdere gebeurtenissen (ook wel aangeduid als ‘knopen’) die een discreet aantal mogelijke uitkomsten (‘takken’) hebben. De verschillende takken in een knoop moeten zo gedefinieerd zijn dat de uitkomsten elkaar uitsluiten en samen alle mogelijkheden afdekken, dus de som van de voorwaardelijke kansen op elk van de takken is altijd 1. Het gaat om voorwaardelijke kansen: de voorwaarde daarbij is dat de knoop bereikt wordt. Doorgaans ligt de focus op de op de gebeurtenissen die leiden tot falen, maar door de

nagestreefde volledigheid kan een gebeurtenissenboom gemakkelijk explosief in omvang toenemen naarmate er meer in detail naar de mogelijke gebeurtenissen (en hun onderlinge combinaties) wordt gekeken.

- Foutenboom: bij een foutenboom wordt vanuit de topgebeurtenis (falen) teruggedeneerd naar de (combinaties van) gebeurtenissen die tot falen leiden. Gebeurtenissen kunnen wél of níet optreden, al dan niet in combinatie met elkaar. Wanneer slechts één van de onderliggende gebeurtenissen hoeft op te treden om tot de vervolgebeurtenis te leiden, dan wordt gesproken van een 'OF-poort', wanneer alle onderliggende gebeurtenissen moeten optreden dan is er sprake van een 'EN-poort'.

Het primaire faalpad voor een goed ontworpen, goed aangebrachte en goed beheerde dijk met een grofzandbarrière² zoals beschreven in de vorige paragraaf, laat zich beschrijven met de volgende 20 opeenvolgende stappen:

- A. Buitenwaterstand stijgt en de waterspanningen in het watervoerend pakket aan de rivierzijde van de kering stijgen.
- B. Waterspanningen in het watervoerend pakket aan de polderzijde stijgen.
- C. Opbarsten en geconcentreerde verticale stroming.
- D. Heave.
- E. Horizontaal zandtransport door het optreden van zandmeevoerende wellen tot aan de grofzandbarrière bij hoogwater.
- F. Erosie van de grofzandbarrière zelf, in het algemeen ook in lengterichting van de dijk door het ontstaan van zijdelingse pipes langs de benedenstroomse kant van de grofzandbarrière in het achtergrondmateriaal.
- G. Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft overeenkomstig de hoek van natuurlijk talud van het barrièremateriaal.
- H. Afname van de hellingshoek bovenin barrière ten gevolge van toenemende stroming (bij toenemend verval).
- I. Heavehoogte neemt af³.
- J. Instabiliteit van het resterende, onder een helling liggende, grof zand.
- K. Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen.
- L. Doorloopsheid: een doorgaande pipe door de barrière heen.
- M. Bezwijken van de grofzandbarrière⁴.
- N. Horizontaal zandtransport door het optreden van zandmeevoerende wellen tussen grofzandbarrière en het buitenwater.
- O. Doorgaande pipe tussen buitenwater en uittredepunt binnendijs.
- P. Ruimen van de pipe.
- Q. Kruinverlaging.
- R. Noodmaatregelen blijken ineffectief⁵.
- S. Bresgroei.
- T. Inundatie.

² Wat in deze zin onder 'goed' verstaan moet worden, is nader uitgewerkt in deze rapportage en is naast inzicht in de werking van de grofzandbarrière ook gebaseerd op gedegen werk van de kant van de betrokken ingenieurs, aannemers en beheerders – waarbij bedacht moet worden dat nooit alles in regels en protocollen kan worden ondervangen.

³ Voor dit faalpad is de afname van de heavehoogte feitelijk hetzelfde als de vorige stap (afname van de hellingshoek). Voor andere faalpaden (zoals verdichting van het zandpakket tijdens hoogwater) is hier sprake van een aparte stap, daarom zijn deze twee aspecten hier afzonderlijk benoemd.

⁴ Voor dit faalpad geldt dat het optreden van stap J ook het optreden van stappen K, L en M impliceert, er zijn echter ook andere faalpaden die direct aansluiten op stap K of L, omwille van de algemene beschrijving zijn deze stappen hier ook apart genoemd. Stap M is feitelijk geen aparte knoop, maar wordt hier al overkoepelende gebeurtenis wel apart genoemd.

⁵ Eventuele noodmaatregelen zullen, om effectief te kunnen zijn, over het algemeen al eerder genomen moeten zijn. Hier is aangesloten bij Rosenbrand & Knoeff (2020) om dit pas kort voor het einde op te nemen.

Hierbij zijn stap A t/m D en stap O t/m T overgenomen uit Rosenbrand & Knoeff (2020), terwijl de daarin opgenomen stap 'horizontaal zandtransport' hier voorzien is van het intermezzo samenhangend met de grofzandbarrière in stap E t/m N. Een uitgebreide toelichting op dit faalpad is gegeven in §5.3. Dit betreft het faalpad waarbij de sterkte van de grofzandbarrière optimaal wordt benut. De berekening van de bezwijksterkte is primair gerelateerd aan stap J.

Voor de grofzandbarrière is, net als eerder voor het VZG, een foutenboom opgesteld op basis van redeneringen zoals die eigenlijk eerder bij een gebeurtenissenboom horen. Voortbouwend op de foutenboom van het VZG is in meerdere brainstormsessies met deskundigen (zie §B.1 in bijlage B voor details) en andere bijeenkomsten nagedacht welke initiële gebeurtenissen eventueel tot falen zouden kunnen leiden. Om tot een werkbaar eindresultaat te komen, zijn uiteindelijk de meeste takken waarvan met voldoende zekerheid is aangetoond of kan worden aangenomen dat deze niet tot falen kunnen leiden geschrapt. Overigens zijn enkele takken en zelfs initiële gebeurtenissen die niet tot falen leiden toch opgenomen, omdat de afwezigheid van uiteindelijk gevaar (kans op falen) van die takken niet al meteen evident bleek te zijn. Met de opname van deze niet tot falen leidende takken in de uiteindelijke 'foutenboom' wordt beoogd om een herhaling van discussies hierover te vermijden.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de veiligheidsfilosofie beschreven waarmee de aansluiting op het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium beoogd wordt. In hoofdstuk 3 worden de verschillende vormen van falen bij de grofzandbarrière op hoofdlijnen beschreven. Hoofdstuk 4 gaat in op de verschillende factoren die, naast een hoogwater, invloed hebben op het falen van de grofzandbarrière. Daarbij wordt ook een onderscheid gegeven naar het relatieve belang van iedere factor. In hoofdstuk 5 wordt de foutenboom gegeven, met vijf voorbeelden van faalpaden, waaronder het hiervoor in het kort beschreven faalpad. In hoofdstuk 6 wordt een ontwerpaanpak beschreven, op basis van de opgedane ervaring voor de pilotcase bij Gameren. Hoofdstuk 7 bevat de veiligheidsanalyse voor die case, inclusief een conclusie. In hoofdstuk 8 worden aanbevelingen gedaan voor de verdere toepassing en ontwikkeling van de grofzandbarrière.

In bijlage A zijn alle initiële gebeurtenissen uit de foutenboom beschreven, inclusief mogelijke maatregelen om deze gebeurtenissen tegen te gaan. In bijlage B is de volledige foutenboom weergegeven, inclusief een omschrijving van alle (gecodeerde) factoren en gebeurtenissen. In bijlage C zijn alle faalpaden afzonderlijk benoemd en in het kort beschreven, waar nodig voorzien van toelichtende schetsen. Bijlage D geeft een onderbouwing van de 3D-factor voor de situatie bij Gameren. Bijlage E bevat de laatste berekeningen voor zowel het Voorlopig Ontwerp als het Definitief Ontwerp en bijlage F gaat in op de mate waarin de verschillende parameters in de berekeningen conservatief zijn ingeschat.

2 Veiligheidsfilosofie

2.1 Aanpak

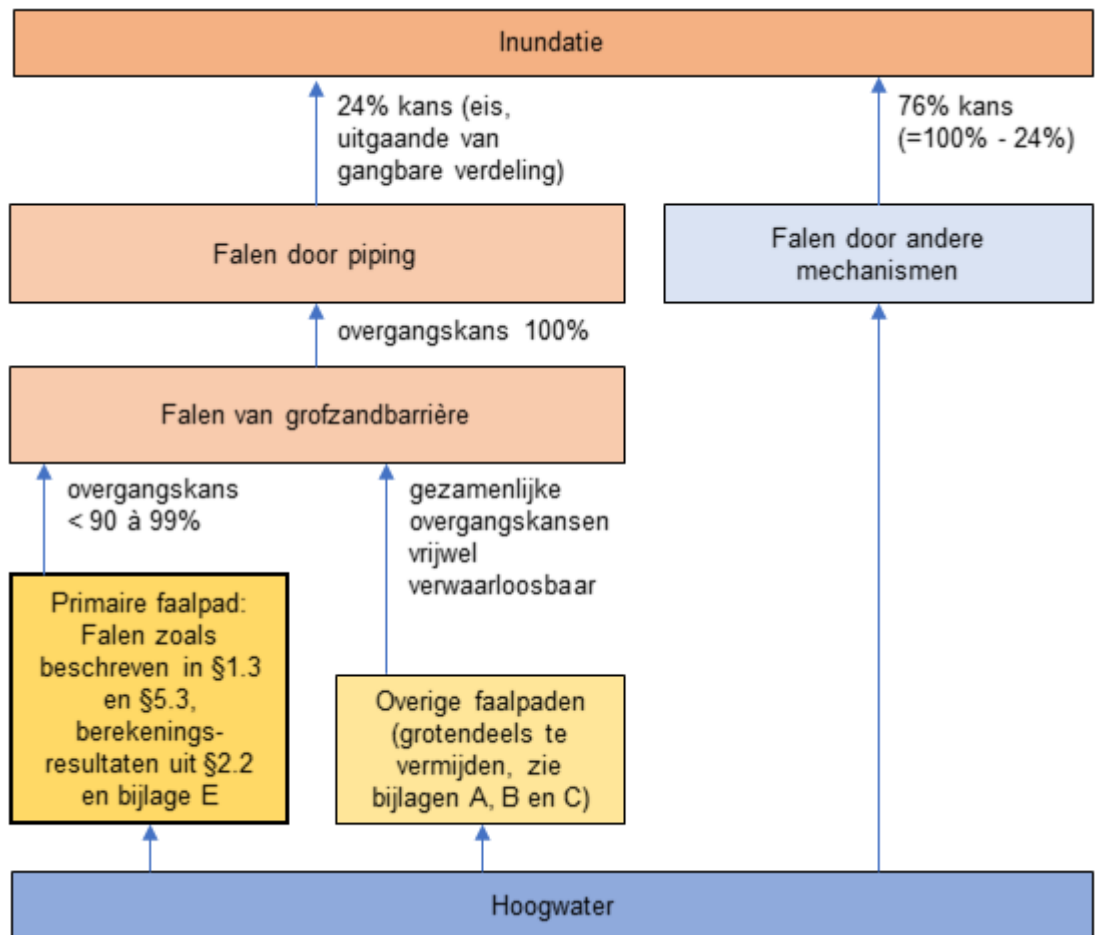
2.1.1 Aansluiting bij WBI en OI

De veiligheidsbenadering voor de grofzandbarrière zal moeten aansluiten bij het Wettelijk BeoordelingsInstrumentarium voor primaire waterkeringen, het WBI2017 (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016a) en het beschikbare ontwerpinstrumentarium OI2014v4 (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016b). Daarin is voor een aantal faalmechanismen, waaronder piping, een eis gesteld aan de benodigde veiligheidsfactoren als functie van de benodigde veiligheid; op basis van een probabilistische analyse. Voor de grofzandbarrière is deze aanpak in eerste instantie niet haalbaar, alleen al vanwege het gebrek aan een veelheid van cases die doorgerekend kan worden. Daarom is hier voor een alternatieve benadering gekozen, die overigens ook voor een aantal andere faalmechanismen gehanteerd wordt, zoals bijvoorbeeld heave bij damwandschermen.

Deze benadering kent een semi-probabilistische aanpak en bestaat uit twee hoofdonderdelen:

- Aantonen dat de grofzandbarrière voldoende sterkte bezit ten aanzien van het primaire faalpad (falen van de grofzandbarrière door overbelasting).
- Aantonen dat andere faalpaden een ondergeschikte, daarmee te verwaarlozen, kans van optreden hebben (en daarnaast ook geen wezenlijk ongunstige bijdrage leveren aan overbelasting via het primaire faalpad).

Dit is geïllustreerd met een eenvoudige foutenboom, weergegeven in Figuur 6, waarbij uitgegaan is van de standaardwaarde van 24% voor de faalruimte voor piping. Dit sluit aan bij de beleidskeuze van Waterschap Rivierenland om over het algemeen uit te gaan van de standaardwaarden voor de toelaatbare faalkansen per faalmechanisme. De veiligheid tegen piping wordt hierin eenvoudigweg verondersteld geheel gewaarborgd te worden door de grofzandbarrière, daarnaast moet er voldoende veiligheid zijn tegen falen door andere mechanismen (zoals macrostabiliteit en erosie door golfoverslag en overloop). Voor het falen van de grofzandbarrière geldt dat aan het primaire faalpad gerekend kan worden. Is de veiligheid daarvan voldoende én zijn de bijdragen van alle andere faalpaden bij elkaar klein genoeg doordat deze kunnen worden uitgesloten dan wel dat het aannemelijk is dat het optreden ervan (zeer) onwaarschijnlijk is, dan biedt de grofzandbarrière voldoende veiligheid tegen falen door piping, anders gezegd: er wordt dan voldaan aan de gestelde eisen tegen piping.



Figuur 6 Foutenboom met onderscheid naar het primaire faalpad van de grofzandbarrière (meest linkse route van onder naar boven), overige faalpaden van de grofzandbarrière (midden) en falen door andere mechanismen (rechts), leidend tot een volgens de vigerende normen acceptabel geachte kans op inundatie door hoogwater.

Hierna wordt eerst de semi-probabilistische veiligheidsbenadering in grote lijnen geschetst (zie §2.1.2 t/m §2.1.6, ook voor omgang met onzekerheden en de mate van conservatisme bij de gemaakte inschattingen). Daarna wordt deze in §2.2 in algemene zin uitgewerkt voor het genoemde primaire faalpad van de grofzandbarrière. In §2.3 wordt dit al voor een deel geconcretiseerd voor de situatie bij Gameren. Een aanzienlijk deel van de rest van deze rapportage (hoofdstuk 4 met bijlage A, en hoofdstuk 5 met bijlage C) gaat over hoe bereikt kan worden dat de overige faalpaden een verwaarloosbare rol spelen. In hoofdstuk 6 wordt, op basis hiervan, ingegaan op het ontwerp van een grofzandbarrière. Vervolgens komen in hoofdstuk 7 alle sporen weer bij elkaar, zodat conclusies kunnen worden getrokken over het veiligheidsniveau tegen piping dat in Gameren bereikt kan worden met de daarvoor ontworpen grofzandbarrière.

2.1.2 Semi-probabilistische veiligheidsbenadering

Binnen het WBI2017 en het OI2014v4 wordt uitgegaan van een vereist veiligheidsniveau per dijktraject, waarbij op doorsnedeniveau wordt bepaald of voldaan wordt aan de maximaal toelaatbare faalkans per faalmechanisme. Hiervoor geldt de volgende formule:

$$P_{eis,dsn} = \omega * P_{eis,traject} / N \quad (2.1)$$

Hierin is $P_{eis,dsn}$ de vereiste (maximale) faalkans op doorsnedeniveau voor het beschouwde faalmechanisme, ω de faalkansruimte voor het beschouwde faalmechanisme, $P_{eis,traject}$ de vereiste (maximale) faalkans op dijktrajectniveau en N de lengte-effectfactor – het aantal als onderling onafhankelijk beschouwde doorsneden op het gehele dijktraject.

Voor de faalkansruimte ω wordt uitgegaan van de standaard faalkansruimtebegroting uit het OI2014v4 (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016b). Deze bedraagt 0,24 voor piping bij dijken, zoals ook al vermeld is in Figuur 6. Voor de faalkans op dijktrajectniveau geldt voor het traject 38-1, waar Gameren deel van uitmaakt, $P_{eis,traject} = 1/10.000$ per jaar. Voor de lengte-effectfactor N geldt:

$$N = 1 + a * L_{traject} / b \quad (2.2)$$

Hierin is a de fractie van de trajectlengte die gevoelig is voor het beschouwde faalmechanisme, $L_{traject}$ is de lengte van het dijktraject en b is de lengte van onderling onafhankelijk te beschouwen delen voor wat betreft het betreffende faalmechanisme.

Voor a geldt als defaultwaarde voor het bovenrivierengebied $a = 0,90$ en voor b geldt als defaultwaarde $b = 300$ m. De lengte van dijktraject 38-1 bedraagt 29,6 km. Invullen van alle waarden levert $N = 88,8$.

De vereiste betrouwbaarheidsindex per faalmechanisme op doorsnedeniveau, $\beta_{eis,dsn}$, wordt afgeleid van de maximaal toelaatbare faalkans per faalmechanisme volgens

$$\beta_{eis,dsn} = -\Phi^{-1}(P_{eis,dsn}) \quad (2.3)$$

Bij Gameren geldt voor het faalmechanisme piping bij dijken $\beta_{eis,dsn} = 5,01$. De voor piping faalkansruimte kan verder worden opgedeeld, naar onderdelen zoals het primaire faalpaden en diverse overige faalpaden, waarbij onderdelen ook weer samengenomen kunnen worden. Voor elk van die onderdelen geldt dan weer een aparte vereiste betrouwbaarheidsindex. Dit komt hierna terug bij de bepaling van de schadefactor (§2.1.4) en geeft ook eisen aan een aspect als de veiligheid tegen opbarsten (§A.1.20). Een voor de situatie in Gameren werkbare opdeling wordt gegeven in §7.5.2.

De ontwerpwaterstand voor piping is gelijk aan de waterstand met een overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan de maximaal toelaatbare overstromingskans van het dijktraject. Conform de verdere uitgangspunten in Bisschop & Hofschreuder (2016) voor wat betreft de afvoerstatistiek en het gekozen klimaatveranderingsscenario, en de keuze voor een ontwerplevensduur van 50 jaar voor de grofzandbarrière zoals vermeld door De Wit (2017), geldt voor de ontwerpwaterstand een niveau van NAP +8,97 m voor het dijkvak RW135 – RW137 en een niveau van NAP +9,00 m voor het dijkvak RW137 – RW145. Het polderpeil bedraagt NAP +1,80 m over het gehele dijkgedeelte bij Gameren.

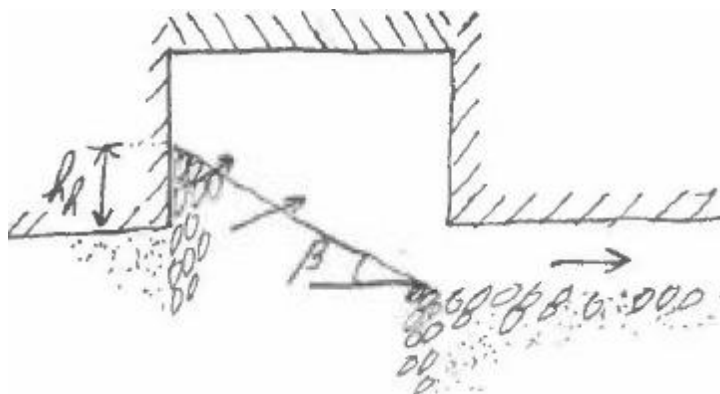
2.1.3 Invulling veiligheidsbenadering voor het primaire faalpad van de grofzandbarrière

Een cruciaal onderdeel van het reeds in §1.3 geschetste primaire faalpad betreft de instabiliteit van het resterende, onder een helling liggende, grof zand in de barrière waarna fluïdisatie optreedt van het zand aan de bovenstroomse rand van de barrière, leidend tot falen. Dit zal niet optreden zolang de in de modellering berekende gradiënt i_{calc} in de grofzandbarrière kleiner is dan de gradiënt i_{crit} waarbij falen optreedt.

Uitgaande van Kanning (2019), een eerste opzet op basis van het faalmechanisme voor een vlakke grofzandbarrière, kan in het ontwerp voor de gradiënt in de grofzandbarrière met inkassing als criterium worden gesteld:

$$i_{calc,d} < i_{crit,d} \quad (2.4)$$

waarin $i_{calc,d}$ de rekenwaarde is van de maximale berekende gradiënt langs de helling van de grofzandbarrière onder maatgevende omstandigheden (dus bij de kort hiervoor genoemde ontwerpwaterstand en het geldende polderpeil) en $i_{crit,d}$ de rekenwaarde is van de kritieke gradiënt. Voor $i_{calc,d}$ wordt de gemiddelde gradiënt genomen over de middelste 20 cm van de helling onder kritieke omstandigheden (zie Figuur 7, overgenomen uit §1.2), zoals onderbouwd in Förster (2021a).



Figuur 7 Kritieke helling met de minimale heavehoogte h_h en hoek β (NB: voor de stroming vanuit het talud geldt dat deze loodrecht op het talud staat, anders dan in deze schets (en meerdere andere schetsen) is aangegeven).

De rekenwaarde van de kritieke gradiënt kan worden bepaald met een overall-modelleringsfactor γ_d , waarin alle modelleringsonzekerheden worden verwerkt, en een betrouwbaarheidsniveau-afhankelijke schadefactor γ_n waarin alle niet-modelonzekerheden en de overall veiligheid worden verwerkt:

$$i_{crit,d} = i_{crit,rep} / (\gamma_d * \gamma_n) \quad (2.5)$$

Hierin is $i_{crit,rep}$ een representatieve waarde van i_{crit} (5% ondergrenswaarde). De overall-modelleringsfactor γ_d kan nader opgebouwd worden uit diverse partiële factoren. Dit is nader uitgewerkt in §2.2.2, waarin drie partiële factoren worden onderscheiden: de 3D-factor γ_{3D} , de specifieke modelfactor γ_m en de schematiseringsfactor γ_b :

$$\gamma_d = \gamma_{3D} * \gamma_m * \gamma_b \quad (2.6)$$

2.1.4 Veiligheidsbenadering voor de overige faalpaden

Voor de overige faalpaden is een uitgebreide inventarisatie gemaakt, die stap voor stap uiteengezet is in hoofdstuk 3, 4 en 5, en in detail is uitgewerkt in bijlage A via de beïnvloedende factoren die naast hoogwater tot falen kunnen leiden, in bijlage B in een bijbehorende gedetailleerde foutenboom en in bijlage C via alle afzonderlijke faalpaden.

Voor de concrete situatie in Gameren, met het ontwerp zoals beschreven in bijlage E en uitvoering met een tweetal varianten van de open sleufmethode, is bepaald in hoeverre de verschillende beïnvloedende factoren relevant zijn en in hoeverre de verschillende faalpaden relevant mogen worden geacht, of (praktisch) kunnen worden uitgesloten. Daarbij zijn ook pragmatische keuzes gemaakt of te maken, zoals een zeker veiligheidsniveau tegen opbarsten tussen de binnenteen van de dijk en de grofzandbarrière, en toepassing van een bovenstroomse afdichting nabij de bovenkant van de inkassing om variaties in de ligging van

de bovenkant van de pipinggevoelige zandlaag op te vangen (toepassing van het zogenoemde 'kleimuurtje').

Het voert hier te ver om dit onderdeel hier al helemaal uit te werken. Dit komt aan de orde in hoofdstuk 7. Voor nu wordt slechts benadrukt dat voor de 'overige faalpaden' per situatie op een pragmatische wijze keuzes zullen moeten worden gemaakt waarmee afdoende kan worden aangetoond dat aan de gestelde eisen wordt voldaan. Dit zal per toepassingslocatie van de grofzandbarrière verschillen, alleen al vanwege de uitvoeringsmethode en plaatselijke condities⁶.

2.1.5 Schadefactor γ_n

Voor de schadefactor geldt dat deze bijvoorbeeld bij heave achter damwandschermen effectief op 1 wordt gesteld en dat de faalkans voor het betreffende dijktraject verwerkt zit in de bepaling van het hydraulisch belastingniveau (HBN), dat hoger is naarmate er een hoger veiligheidsniveau wordt nagestreefd. Idealiter wordt echter voor de bepaling van de schadefactor een kalibratie gedaan waarbij het hele veiligheidsformat wordt geëvalueerd met semi-probabilistische en probabilistische analyses. Dit is in het WBI2017 bijvoorbeeld gedaan voor het model van Sellmeijer. Dit was tot dusverre voor de grofzandbarrière nog niet mogelijk en werd nog niet uitvoerbaar geacht, mede vanwege het gebrek aan praktische ervaring met de methode.

Als tussenweg wordt hier voor de schadefactor een pragmatische maar niet gevalideerde aanpak gehanteerd waarbij gebruik gemaakt wordt van de afleiding van partiële factoren volgens ISO 2394 zoals beschreven in CUR-publicatie 2008-2 (CUR, 2008). De onzekerheid in de weerstand van de grofzandbarrière tegen de optredende gradiënt, met name de sterkte van de helling die in de inkassing ontstaat, lijkt sterk dominant te zijn. Volgens CUR (2008) kan dan een waarde van 0,8 worden gehanteerd voor de invloedsfactor α_R , welke kan worden ingevuld in de volgende algemene formule voor de bepaling van de schadefactor (Kanning, 2019):

$$\gamma_n = \exp(-(1,65 - \beta_{vereist} * \alpha_R) * \sqrt{\ln(1 + V_R^2)}) \quad (2.7)$$

Hierin is $\beta_{vereist}$ het vereiste niveau van de betrouwbaarheidsindex en V_R de variatiecoëfficiënt van de kritische gradiënt. Deze variatiecoëfficiënt kan worden bepaald op basis van proeven of goed-gedocumenteerde praktijksituaties van falen. De laatste zijn niet beschikbaar en de twee geanalyseerde laboratoriumproeven met een grofzandbarrière op medium schaal vertonen slechts een betrekkelijk kleine variatie (Förster, 2021a).

Een andere set van enigszins vergelijkbare proeven is te vinden in Van Rhee & Bezuijn (1992). Dit betreft drie proeven, met wat meer variatie. Nog wat meer variatie is te vinden in de resultaten van de 11 proeven op medium schaal met een vlakke grofzandbarrière (dus zonder inkassing), aangehaald door Kanning (2019). Hij noemt daarvoor een variatiecoëfficiënt van 0.20. Uitgaande van deze laatstgenoemde variatie (meest conservatieve van de proeven) levert dit ingevuld in vergelijking (2.7) bij verschillende betrouwbaarheidsniveaus de waarden voor γ_n op zoals vermeld in Tabel 1. Voor Gameren geldt $\beta_{eis, dsn} = 5,01$, dit levert $\gamma_n = 1.60$. Hierbij wordt opgemerkt dat deze schadefactoren niet op zichzelf staan maar onderdeel zijn van een veiligheidsformat op basis van karakteristieke

⁶ Als voorbeeld voor wisselende plaatselijke condities kunnen hier de graverijen worden genoemd. In Gameren geldt, zoals in detail betoogd in §A.3.2, dat dit met name voor dierlijke graverijen ter plaatse een goed beheersbaar risico is, omdat dierlijke graverijen die de werking van de grofzandbarrière kunnen bedreigen uitsluitend onder (zeer) droge omstandigheden zullen optreden, waardoor deze tijdig opgemerkt kunnen worden en er ook tijdig passende maatregelen kunnen worden getroffen. Elders kunnen dierlijke graverijen evenzeer bedreigend zijn voor de grofzandbarrière als voor andere onderdelen van de waterkering.

waarden en veiligheidsfactoren van alle belangrijke belasting- en sterkteparameters. Vandaar ook het belang om dit bij meer kennis nader integraal te valideren.

Tabel 1 Schadefactor bij verschillende betrouwbaarheidsniveaus

Betrouwbaarheidsindex $\beta_{vereist}$	γ_n
3	1.16
4	1.36
5	1.59
6	1.87

2.1.6 Mate waarin onzekerheden zijn afgedekt in het veiligheidsformat

Een cruciaal punt is in hoeverre de voorgestelde aanpak veilig is; zijn de gemaakte aannames realistisch, conservatief of niet-conservatief? Deze keuzes komen verspreid over de rest van deze rapportage aan de orde en zijn samengevat in bijlage F. Kort samengevat: veel parameters worden op een conservatieve wijze bepaald, van andere wordt een verwachtingswaarde onderbouwd. Slechts enkele aspecten worden mogelijk niet-conservatief meegenomen of zijn onbekend. Alles bij elkaar mag worden verondersteld dat de voorgestelde aanpak voor deze nieuwe dijkversterkingsmethode aan de conservatieve kant is, dus veilig.

Aangezien onnodige veiligheid binnen zowel het WBI als het OI als ongewenst wordt beschouwd, wordt aanbevolen om tot een update over te gaan zodra er meer ervaring met de grofzandbarrière is opgedaan. Dit kan een herziening inhouden volgens de lijn die in dit hoofdstuk is uitgezet, maar het kan ook bestaan uit een probabilistische analyse zoals in de aanloop naar het WBI2017 voor het model van Sellmeijer is uitgevoerd.

2.2 Invulling van de veiligheidsbenadering voor het primaire faalpad van de grofzandbarrière

2.2.1 Inleiding

De veiligheidsbenadering voor de grofzandbarrière richt zich primair op het falen van de barrière zelf als gevolg van overbelasting. Met een tweedimensionaal grondwaterstromingsmodel kan worden berekend welke gradiënt $i_{calc,d}$ zal ontstaan onder maatgevende omstandigheden, gegeven de gemaakte keuzes over de samenstelling en de afmetingen van de barrière. Overeenkomstig vergelijking (2.4) moet deze kleiner zijn dan de kritieke gradiënt, gecorrigeerd voor de modelleringfactor en de schadefactor. De schadefactor is hiervoor al in algemene zin bepaald, zie §2.1.4. In deze paragraaf wordt ingegaan op de verschillende partiële factoren waaruit de modelleringfactor wordt opgebouwd, namelijk:

- Een specifieke modelfactor γ_m voor bezwijken van de grofzandbarrière als gevolg van een sterke opwaartse stroming, om tot een karakteristieke waarde te komen vanuit de beschikbare proefresultaten.
- Een factor waarmee gecorrigeerd wordt voor de verschillen tussen een tweedimensionale grondwaterstroming en de piekdrukken die onder verschillende omstandigheden kunnen optreden bij de driedimensionale grondwaterstroming zoals in de praktijk optreedt: de 3D-factor γ_{3D} .
- En tot slot de schematiseringsfactor γ_b .

Hierbij zijn pragmatische keuzes gemaakt, rekening houdend met de thans weinige beschikbare data. In een later stadium kan dit worden herzien.

Daarnaast zijn er andere factoren die van invloed kunnen zijn op het functioneren van de grofzandbarrière, aangegeven als de middelste route in Figuur 6. Deze worden meer in

kwalitatieve zin beschouwd in de hoofdstukken 3 tot en met 5 en de bijbehorende bijlagen A tot en met C. In hoofdstuk 7 wordt hier in de concrete veiligheidsanalyse voor Gameren op teruggekomen, met als centrale vraag of de bijdragen hiervan aan de kans op falen alles bij elkaar inderdaad relatief klein zijn. Wanneer dit het geval is, dan mag worden aangenomen dat aan de in Figuur 6 gestelde eis dat deze ‘vrijwel verwaarloosbaar’ zijn, wordt voldaan. Als dan ook de kans op het optreden van het primaire faalpad voldoen klein is, dan voldoet de methode.

2.2.2 Partiële factoren bij het falen van de grofzandbarrière door overbelasting

2.2.2.1 Specifieke modelfactor bij het bezwijkmodel γ_m

Förster (2021a) heeft de twee medium-schaalproeven met een grofzandbarrière met inkassing die tot bezwijken zijn gebracht, uitvoerig geanalyseerd. Daaruit komt naar voren dat een betrouwbare waarde voor de maatgevende kritische gradiënt i_{crit} in twee-dimensionale grondwaterstromingsberekeningen kan worden bepaald ter plaatse van het midden van de grofzandbarrière. Over een brede zone varieert de berekende waarde op basis van de uitstroomsnelheid v en de hydraulische doorlatendheid k dan nauwelijks. Dit is van groot praktisch belang, omdat dit de afhankelijkheid verkleint van betrekkelijk toevallige factoren als het gehanteerde eindige-elementennet of een afstand van x cm loodrecht op het talud (of verticaal) waarover het verhang bepaald zou kunnen worden.

Voor de twee proeven zijn waarden voor de kritische gradiënt gevonden en 0,64 en 0,78. Door Kanning (2021) is hieruit op basis van engineering judgment een karakteristieke waarde $i_{crit,rep}$ van 0,55 vastgesteld. In het vervolg wordt voor situaties, waarin hetzelfde barrièrezand (GZB3) met dezelfde verdichtingsgraad (95% relatieve dichtheid) wordt gebruikt, uitgegaan van deze waarde voor $i_{crit,rep}$, waar de specifieke modelfactor γ_m in verwerkt zit. Dit houdt dus in $\gamma_m = 1$; hiervoor is gekozen omdat er verder niet meer informatie beschikbaar is, de proeven representatief worden geacht en omdat de invloed van de 3D factor dominant is.

Voor situaties met een andere verdichtingsgraad en een ander type barrièrezand zal een correctiefactor moeten worden toegepast. Voor deze correctie kan gebruik worden gemaakt van de volgende formule uit het model van Van Rhee & Bezuijen (1992):

$$i_{crit} = v / k = - (1 - n) * \Delta * \sin (\phi - \beta) / \sin \phi \quad (2.8)$$

met v = stroomsnelheid van het uittrekkende kwelwater, k = hydraulische doorlatendheid van de grofzandbarrière, n = porositeit, Δ = relatieve dichtheid van het korrelmateriaal = $(\rho_s - \rho_w) / \rho_w = 1,65$ voor kwartzand in zoet water, ϕ = hoek van interne wrijving van het barrièrezand en β = kritieke hellingshoek (zie Figuur 7 in §2.1.2).

Bij de omrekening moeten veilige keuzes in worden gemaakt. Voor de genoemde proeven (Förster, 2021a) geldt $i_{crit,zand,ref} = 1,04$. Voor andere situaties kan worden gecorrigeerd door $i_{crit,rep}$ te vermenigvuldigen met de verhouding $i_{crit,zand} / i_{crit,zand,ref}$. Wat betreft die veilige keuzes de volgende kanttekening: in §C.2.4 is een tabel (Tabel 9) opgenomen met zowel waarden voor de factor $(1-n) * \Delta$ als voor de doorlatendheid k voor verschillende dichtheden van het barrièrezand. Er is een bijna lineaire relatie tussen de kritieke gradiënt en de doorlatendheid, waarbij de waarde van de genoemde factor veel minder snel toeneemt bij hogere dichtheid dan dat de doorlatendheid afneemt. Omdat het meer moeite kost om een hogere dichtheid te bereiken, lijkt de keuze voor de minimale voorgeschreven relatieve dichtheid van 80% in eerste instantie conservatief. Maar een keuze voor de in het veld met de grofzandbarrière maximaal haalbare relatieve dichtheid van circa 90% is in werkelijkheid juist veiliger.

2.2.2.2 3D-factor γ_{3D}

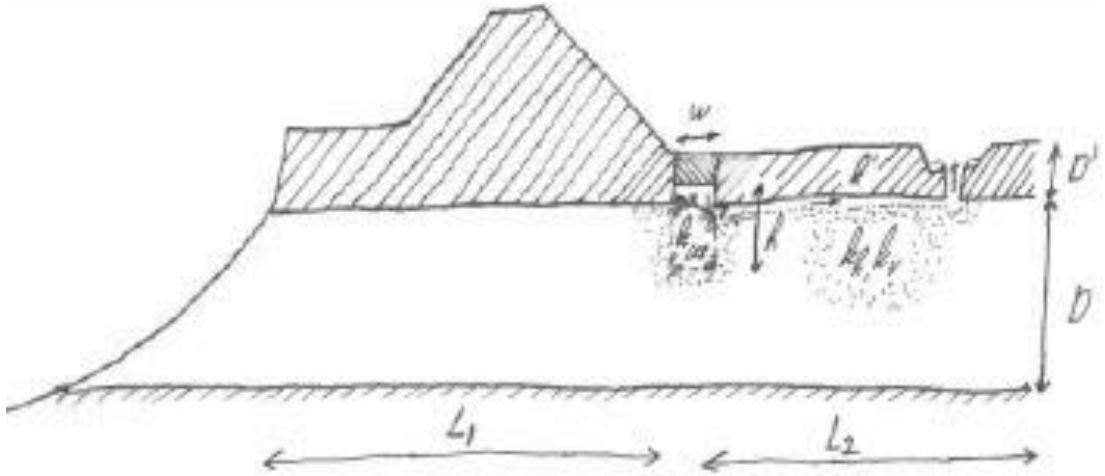
De berekeningen van de optredende gradiënt worden gedaan op basis van een tweedimensionaal (2D) model. Ook de proeven waarop $i_{crit,rep}$ is gebaseerd, hebben een 2D-karakter en zijn door Förster (2021a) ook geanalyseerd zonder 3D-invloeden mee te nemen. Echter, de werkelijkheid is 3D, wat veel ongunstiger kan uitpakken omdat er van opzij veel meer water kan toestromen met hogere optredende gradiënten tot gevolg. De 3D factor verdisconteert dit.

Deze factor is uitgebreid onderzocht door Rosenbrand et al. (2021). Naast kennis over het pipingmechanisme in het algemeen en de processen die bij een grofzandbarrière spelen in het bijzonder, verkregen uit experimenten op verschillende schalen zoals beschreven in §1.1, hebben zij vooral gebruik gemaakt van numerieke modellen om de invloed van verschillende parameters te onderzoeken. Daarnaast is in beperkte mate gebruik gemaakt van analytische methoden. Daarbij is een vergelijking gemaakt tussen de situatie waarbij er onbeperkte groei kan plaatsvinden van de pipes in zijdelingse richting aan de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière, en de situatie waarbij deze groei beperkt wordt door een obstakel. Voor de situatie in Gameren blijkt de 3D-factor van sterk dominante invloed.

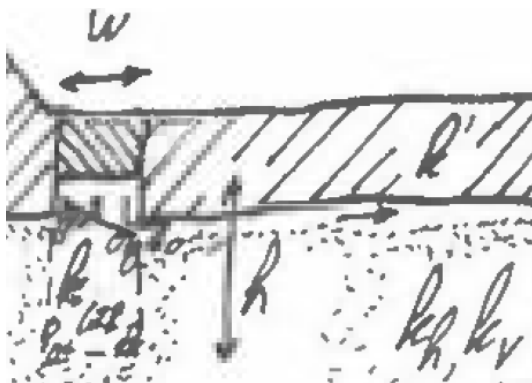
De 3D-factor is gedefinieerd als de verhouding tussen de piekwaarde van de gradiënt die optreedt bij beperkte zijdelingse groei (in sterke mate een 3D-stromingssituatie) en de gradiënt die optreedt bij onbeperkte zijdelingse groei (afgezien van de ene benedenstroomse pipe is er dan sprake van een pure 2D situatie). In alle gevallen is uitgegaan van één pipe in benedenstroomse richting die aantakt op de grofzandbarrière; waardoor er altijd enigszins sprake is van een 3D-karakter zoals bij piping onvermijdelijk is. Wanneer er sprake is van meerdere benedenstroomse pipes die aansluiten op de grofzandbarrière, dan neemt de 3D-factor af. De aanname dat er maar één pipe aansluit op een gedeelte van de grofzandbarrière tussen een tweetal obstakels is daardoor óf realistisch, óf conservatief.

In Figuur 8 tot en met Figuur 11 zijn principe-schetsen weergegeven waarin de gebruikte geometrische parameters zijn aangegeven. Uit voornoemde studie komt naar voren dat er veel parameters zijn die per concrete situatie kunnen verschillen (al binnen een dijkvak van 1 kilometer zoals bij Gameren), die een sterke invloed hebben op de waarde van de 3D-factor. Deze zijn:

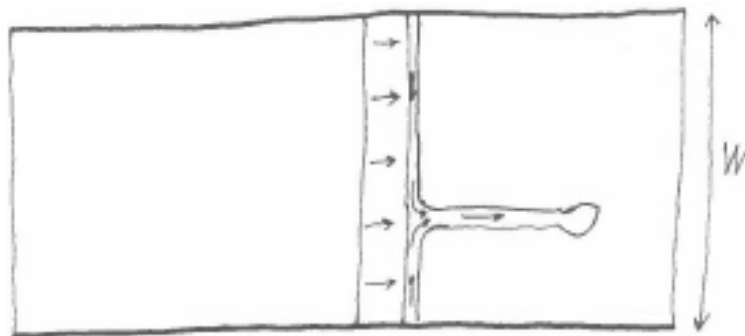
- De leklengte aan de landzijde van de waterkering: een grote leklengte λ leidt tot een sterkere concentratie van de stroming naar de pipe en daardoor een hogere 3D-factor. De leklengte λ is gedefinieerd als $\lambda = \sqrt{(k * D * D' / k')}$, met k = doorlatendheid van het zandpakket, D = dikte van het zandpakket, D' = dikte van de deklaag en k' = doorlatendheid van de deklaag.
- De geometrie, met als belangrijkste parameters de dikte van het watervoerend pakket D , de kenmerkende breedte W en de lengte van het voorland en de dijkbasis bovenstrooms van de grofzandbarrière L_1 :
 - een kleinere D geeft een hogere 3D-factor;
 - een grotere W geeft een hogere 3D-factor, tot aan een situatie-afhankelijke grenswaarde;
 - een grotere L_1 versterkt de effecten van beide voorgaande parameters.
- De lengte l_z waarlangs de zijwaartse pipe kan groeien langs de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière: hoe verder de pipe kan groeien, hoe kleiner de 3D-factor.
- De anisotropie $A = k_h / k_v$ van het watervoerend pakket: hoe groter A , hoe groter de 3D-factor.
- Het doorlatendheidscontrast $C = k_{GZB} / k_h$ tussen de grofzandbarrière en het watervoerend pakket: hoe groter C , hoe effectiever de grofzandbarrière, maar ook hoe groter de 3D-factor.



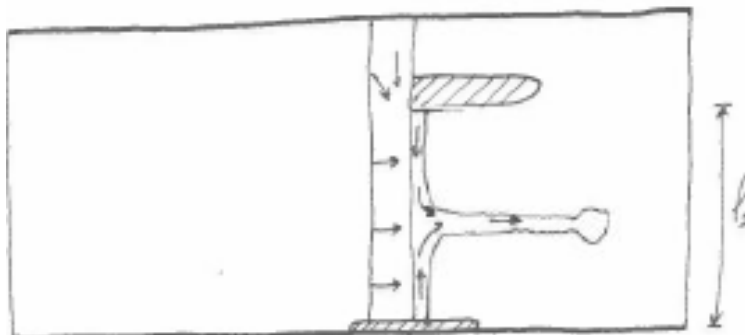
Figuur 8 Schematische dwarsdoorsnede van een waterkering met een grofzandbarrière.



Figuur 9 Detail uit voorgaande figuur, met als symbolen van links naar rechts, van boven naar beneden achtereenvolgens w , k' , k_{GZB} , h , k_h en k_v .



Figuur 10 Schematisch bovenaanzicht van een waterkering met een grofzandbarrière, "2D"-situatie (voor zover mogelijk bij piping).



Figuur 11 Schematisch bovenaanzicht van een waterkering met een grofzandbarrière, 3D-situatie met obstakels (gearceerd) in lengterichting van de kering.

De grootste stromingsconcentratie doet zich voor in de situatie van Figuur 11 bij het gearceerde obstakel bovenin de figuur. Hier kan met name van opzij vanuit de grofzandbarrière veel water toestromen waardoor de berekende gradiënt toeneemt en vooral lokaal bij het obstakel veel groter is dan bij de onbelemmerde zijdelingse pipegroei in Figuur 10. Voor de 3D-factor γ_{3D} worden getalswaarden van boven de 3 mogelijk geacht, zie hiervoor ook §2.3.2 en bijlage D.

De moeilijkheid is dat de relatieve invloed van deze parameters varieert in afhankelijkheid van de waarden van de overige parameters. Daardoor is er geen algemene 3D-factor vast te stellen die in alle situaties kan worden toegepast en zal deze factor telkens opnieuw moeten worden bepaald. Daarbij kan wel gebruik worden gemaakt van de bepaling van deze factor voor de situatie bij Gameren (zie bijlage D): aan de hand van voornoemde algemene kenmerken, met de details zoals deze te vinden zijn in Rosenbrand et al. (2021), kan worden ingeschat of de situatie-specifieke 3D-factor ongeveer gelijk of kleiner zal zijn als de waarde die afgeleid is voor Gameren (of eventuele andere situaties die later kunnen zijn geanalyseerd), of dat deze (eventueel) groter kan zijn. In het laatste geval zal de 3D-factor concreet moeten worden bepaald, anders kan de eerder bepaalde waarde als bovengrenswaarde worden gehanteerd. Als hiermee een veilig ontwerp kan worden verkregen, dan is een nadere analyse niet noodzakelijk.

2.2.2.3 Schematiseringsfactor γ_b

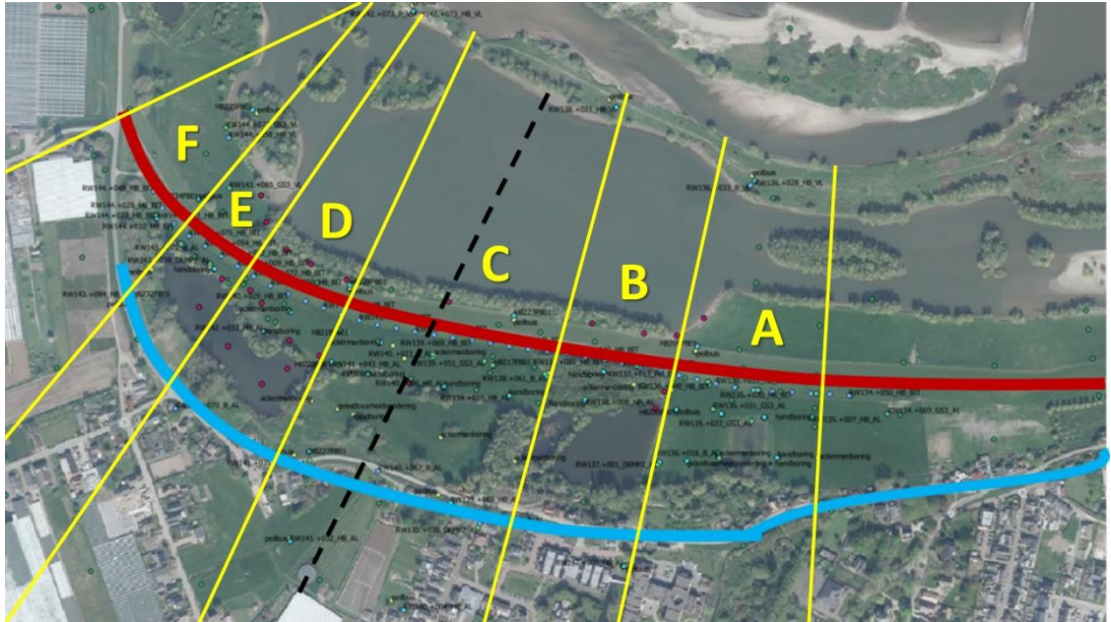
Met de schematiseringsfactor worden onzekerheden in onder meer de geometrie, bodemopbouw en de waterspanningen in rekening gebracht (Niemeijer, 2010; Calle et al., 2011). Deze onzekerheden kunnen bijvoorbeeld betrekking hebben op de dikte van de pipinggevoelige zandlaag of de aanwezigheid en uitgestrektheid van een veenlaag, die deze zandlaag al dan niet in tweeën splitst.

2.3 Concretisering voor de grofzandbarrière bij Gameren

2.3.1 Korte toelichting op de situatie

De locatie voor de pilot-toepassing van de grofzandbarrière is uitgebreid beschreven in Koelewijn et al. (2021). In deze paragraaf worden naast enkele algemene kenmerken verder alleen de kenmerken genoemd die van belang zijn voor de afleiding van de locatie-specifieke 3D-factor.

In Figuur 12 is een satellietfoto van de dijken bij Gameren weergegeven. Onderaan is een deel van het dorp zichtbaar. De blauwe lijn geeft de oude Waalbandijk aan, die tot het begin van de 21^e eeuw de primaire waterkering vormde. De rode lijn geeft de huidige primaire kering weer. De pilot bestaat uit 1 km dijk, van waar de beide dijken samenkomen in het westen tot aan de begrenzing van vak A in het oosten. Volgens de huidige regelgeving en na verwerking van het grondonderzoek in het kader van de versterking met een grofzandbarrière voldoet dit gedeelte in zijn geheel niet aan eisen die voor het faalmechanisme piping worden gesteld. Het berekende tekort aan kwelweglengte varieert tussen 28 en 171 m; op meerdere plaatsen is dat meer dan de helft van het gebied tussen de beide dijken (zie §5.3 in Koelewijn et al., 2021).

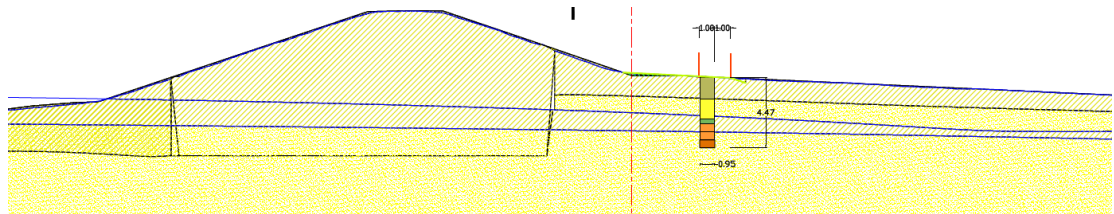


Figuur 12 Satellietfoto van de dijken bij Gameren met een indeling in zes vakken met verschillende geohydrologische eigenschappen.

De geohydrologische situatie is vrij complex. Dit komt zowel door de natuurlijke afzettingen als door menselijke ingrepen in het gebied. Het dorp Gameren en de oude Waalbandijk zijn gebouwd op een kleiige oeverwal, met daaronder afzettingen van voornamelijk zand en grind. Ten noorden van de Waalbandijk zijn er hoofdzakelijk afzettingen van zand en grind op grotere diepte, een veenlaag in een deel van het gebied en verder zand- en kleiafzettingen tot aan de oppervlakte. In vak E is een vroeg-historische doorbraak van de toenmalige oeverwal geweest en in dit gebied is een ongeveer twee maal hogere doorlatendheid gevonden voor het zand. De belangrijkste menselijke ingrepen betreffen kleiputten in het gebied tussen beide dijken in en een voormalige zandwininput ten noorden van de nieuwe dijk met een nevengeul naar en van die zandwininput. De zandwininput is grotendeels gedempt. De samenstelling van het materiaal is niet goed bekend, maar het betreft restmateriaal van baggerwerkzaamheden en daarom waarschijnlijk een mengsel van zandig en kleiig materiaal.

Voor de 3D-analyse is een vakindeling gemaakt zoals weergegeven in de voorgaande figuur. Hierbij is rekening gehouden met de samenstelling van het buitendijkse gebied (voorland met nevengeul, of opge vulde zandwininput) en de samenstelling van het tussendijkse gebied (weiland, kleiput, of afwezigheid). Dit levert de zes vakken A t/m F op zoals aangegeven in de figuur, waarbij geldt dat vak B en vak D in grote lijnen aan elkaar gelijk zijn.

De afmetingen van de grofzandbarrière zijn over de gehele lengte gelijk en overal komt de grofzandbarrière op circa 5 m uit de binnenteen van het huidige dijkprofiel te liggen. Dit is op basis van een afspraak tussen het waterschap en de gemeente, uit de periode van de verkenningsfase (De Wit, 2017). Ter oriëntatie is in Figuur 13 een dwarsdoorsnede gegeven ter plaatse van dijkvak RW 140+000. Dit ligt in vak C uit Figuur 12. De breedte van de grofzandbarrière is naar verwachting 1,00 m, met een minimum van 0,95 m en een maximum van 1,20 m. De onderkant steekt 1,00 m uit onder de bovenkant van de pipinggevoelige zandlaag, terwijl de bovenkant (de inkassing) daar 1,00 m bovenuit steekt. Dáárboven wordt eerst een laag klei aangebracht met een beperkt zwelvermogen en de rest van de sleuf kan met willekeurige grond worden gevuld.



Figuur 13 Dwarsdoorsnede primaire kering bij Gameren, profiel RW 140 (gele lagen: zand, grauwege lagen en groen: klei, oranje: grofzandbarrière; Van Schaick & De Wit, 2020).

Er is voor gekozen om de barrière zelf uit het materiaal GZB3 te laten bestaan. Dit is een grof zand met een steile korrelverdelingscurve ($d_{50} = 0.912$ mm, $U = d_{60}/d_{10} = 1.3$), waarvoor betrekkelijk makkelijk kan worden voldaan aan een verdichtingsgraad van 80% relatieve dichtheid. Bij die verdichtingsgraad bedraagt de doorlatendheid van de grofzandbarrière k_{GZB} circa 304 m/dag (bij 10 graden Celsius).

Voor de pipinggevoelige zandlaag is op basis van het uitgevoerde onderzoek, waaronder enkele HPT-AMPT-sonderingen, en analyse daarvan (Rosenbrand, 2020; Rosenbrand & Koelewijn 2020ab) geconcludeerd om een horizontale doorlatendheid k_h van 32 m/dag te hanteren voor het grootste deel van het gebied, en $k_h = 64$ m/dag voor vak E. Gezien alle onderzoek en de uitgevoerde kalibraties mogen deze waarden worden beschouwd als vrij nauwkeurige verwachtingswaarden. Voor de verticale doorlatendheid kan in het hele gebied een licht conservatieve waarde voor de anisotropiefactor $A = k_h / k_v$ van 5 worden gehanteerd, terwijl de verwachtingswaarde 7 à 12 bedraagt.

2.3.2 Falen van de grofzandbarrière door overbelasting

2.3.2.1 3D-factor γ_{3D}

Voor de 3D-factor γ_{3D} wordt een relatief ongunstige waarde verkregen wanneer er zowel sprake is van een (geohydrologisch gezien) breed voorland als een grote leklengte. Voor vak C komen beide factoren samen, daarom is in de locatie-specifieke berekeningen in Rosenbrand et al. (2021) van dit gebied uitgegaan. De zwarte onderbroken lijn in Figuur 12 is daarbij als symmetrieas gehanteerd.

Vanwege praktische beperkingen aan het aantal elementen in de numerieke modellering zijn er verschillende modellen gebruikt, telkens met een andere beperkende factor (namelijk omvang gemodelleerde gebied, samenstelling gebied en detaillering van de barrière), zodat de verkregen resultaten nog een vertaalslag behoeven. Dit is uitgewerkt in bijlage D. In deze bijlage is ook de 3D-factor bepaald voor de drie dwarsdoorsneden met de naar verwachting meest ongunstige berekende gradiënt. In Tabel 2 zijn voor vier profielen de waarden van de 3D-factor aangegeven.

Tabel 2 3D-factor voor enkele vakken binnen Gameren (ontleend aan Tabel 12 in §D.3).

Profiel RW ...	Vak	3D-factor γ_{3D}
140+050 (basis)	C	2.4
136+050	A	2.3
138+050	B	3.1
143+050	E	2.0

2.3.2.2 Schematiseringsfactor γ_b

In samenhang met de relatief omvangrijke hoeveelheid grondonderzoek, de gehanteerde wijze van schematiseren en de uitkomsten van de uitgevoerde gevoeligheidsanalyses is voor

deze factor in Koelewijn et al. (2021) een waarde van 1,1 vastgesteld. Dit is in die rapportage nader onderbouwd in §7.2.11.

2.3.2.3 Schadefactor γ_n

Zoals reeds aangegeven aan het einde van §2.1.4 bedraagt de schadefactor γ_n in Gameren 1,6.

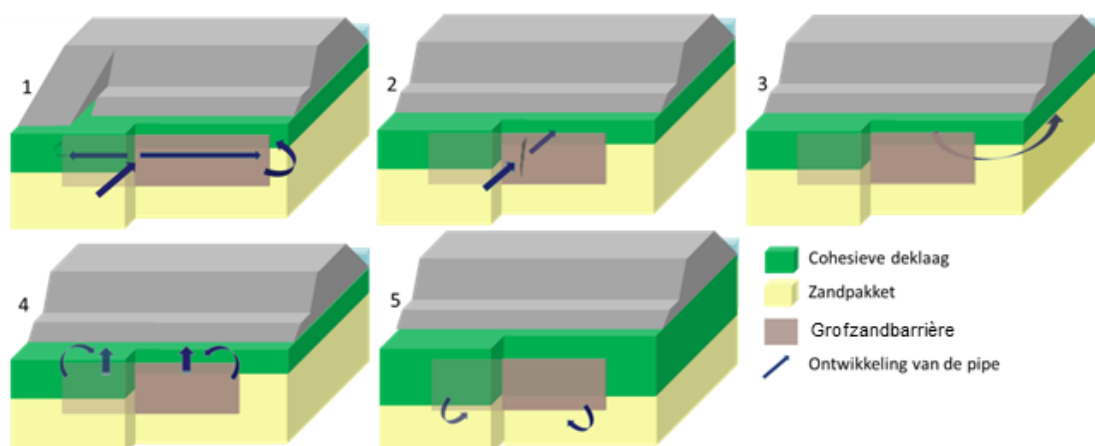
2.4 Tot slot

Tot slot van dit hoofdstuk wordt opgemerkt dat voor het hier geschetste veiligheidsformat slechts in beperkte mate data beschikbaar is voor de concrete invulling ervan. Wel komt duidelijk naar voren dat de invloed van de toestroming van het grondwater via de 3D-factor sterk dominant is. Op basis van het gehanteerde conservatisme in de diverse factoren, en het uitsluiten of minimaliseren van andere faalpaden dan het reeds geschetste dominante faalpad, zou de veiligheid van een concreet ontwerp aangetoond moeten kunnen worden. Dit wordt in hoofdstuk 7 verder geconcretiseerd voor de pilot bij Gameren.

3 Vormen van falen bij de grofzandbarrière

3.1 Inleiding

De grofzandbarrière als maatregel tegen piping wordt vaak vergeleken met het Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG). Beide maatregelen zijn gebaseerd op het principe van het doorlaten van water maar tegengaan van verdere terugschrijdende erosie. Voor de hoofdvormen van falen kan bij de grofzandbarrière eenzelfde indeling in vijf typen '-loopsheid' worden onderscheiden als gebeurd is bij het VZG (Taal, 2017). Door het ontbreken van een doek als continu element zijn er toch belangrijke verschillen, hoewel de terminologie steeds hetzelfde lijkt. De vijf typen zijn weergegeven in Figuur 14.

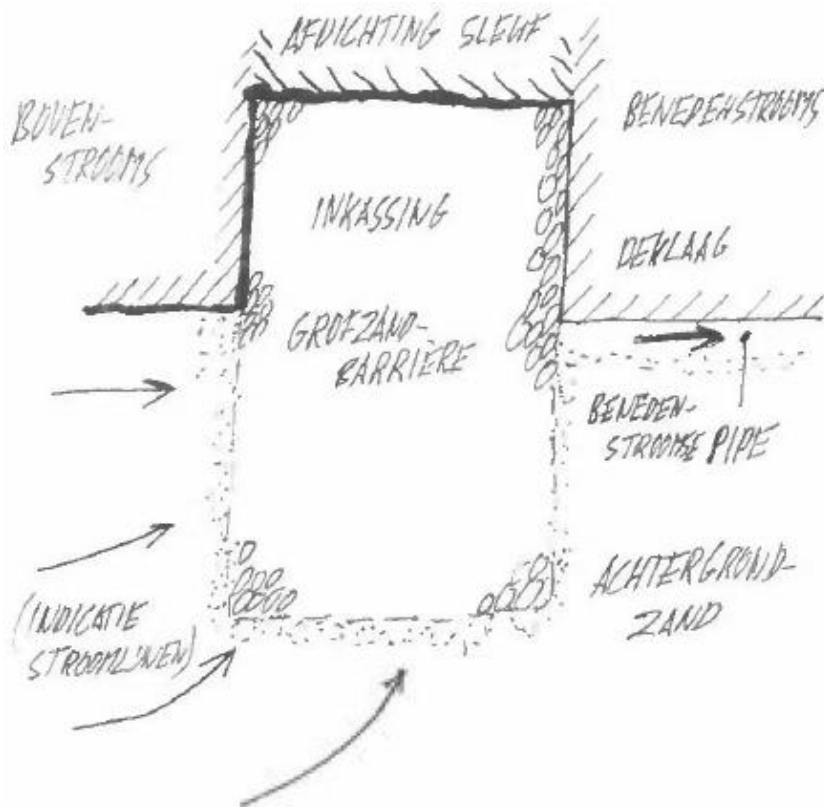


Figuur 14 Hoofdvormen van falen bij de grofzandbarrière: 1. Achterloopsheid, 2. Doorloopsheid, 3. Voorloopsheid, 4. Bovenloopsheid en 5. Onderloopsheid (vrij naar Taal, 2017).

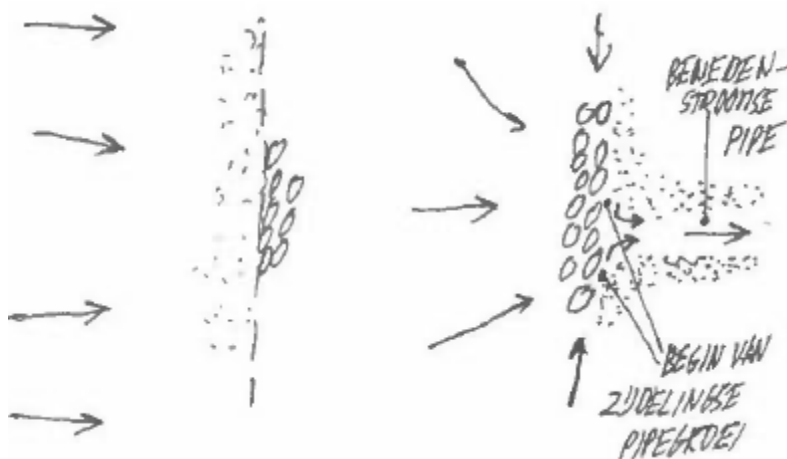
Ook bij de grofzandbarrière geldt dat na optreden van één van de hoofdvormen, 'slechts' de grofzandbarrière bezweken is, maar de waterkering nog niet. Op het vervolgtraject wordt ingegaan in een voorbeeld in §5.3. Het belangrijkste faalpad voor de grofzandbarrière, dat in het inleidende hoofdstuk al is beschreven, betreft doorloopsheid. In dit hoofdstuk worden de vijf hoofdvormen kort beschreven, waarbij er steeds vanuit is gegaan dat er een voldoende groot verval over de waterkering ontstaat om piping te veroorzaken.

3.2 Achterloopsheid

Nadat de pipe de grofzandbarrière aan de benedenstroomse zijde bereikt heeft, dus aan de landzijde (zie Figuur 15), kan zijdelingse pipegroei ontstaan achter de barrière langs (zie Figuur 16). Verdere groei van de pipe, de barrière in, wordt naast de relatief grote doorlatendheid en het daardoor geringe verhang, ook bemoeilijkt door de grotere korrels en de aanwezigheid van de inkassing. De pipe trekt echter ook water aan van opzij, waarbij aan de benedenstroomse rand van de grofzandbarrière het fijnere materiaal waar het achtergrondzand uit bestaat kan worden afgevoerd richting de benedenstroomse pipe, die in deze fase over voldoende sedimentafvoercapaciteit beschikt. Deze raakt benut voor de fijnere korrels van het achtergrondmateriaal en hierdoor kan in beide richtingen achterlangs de grofzandbarrière een zijdelings groeiende pipe ontstaan. Door kleine lokale variaties hoeft dit niet in beide richtingen in gelijke mate op te treden.

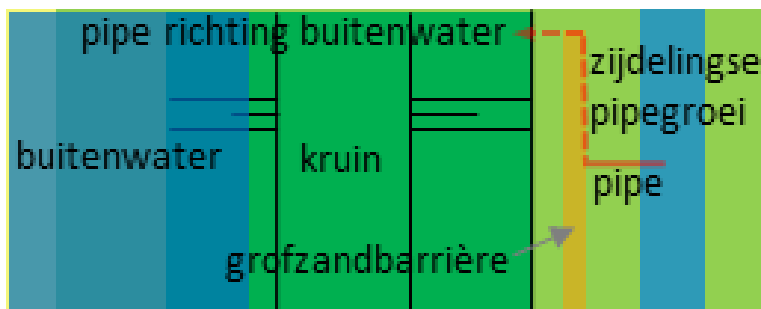


Figuur 15 Zijaanzicht met grofzandbarrière waar een pipe volledig naar toe is gegroeid vanaf het benedenstroomse uittredepunt. De pijlen duiden grondwaterstroming aan, de arceringen klei.



Figuur 16 Bovenaanzicht met beginnende zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière.

Zo'n zijdelings groeiende pipe zal, na over enige afstand gegroeid te zijn, het uiteinde (in langsrichting gezien) van de grofzandbarrière bereiken. Dan kan de pipe opnieuw in de richting van het buitenwater gaan groeien, zie Figuur 17.

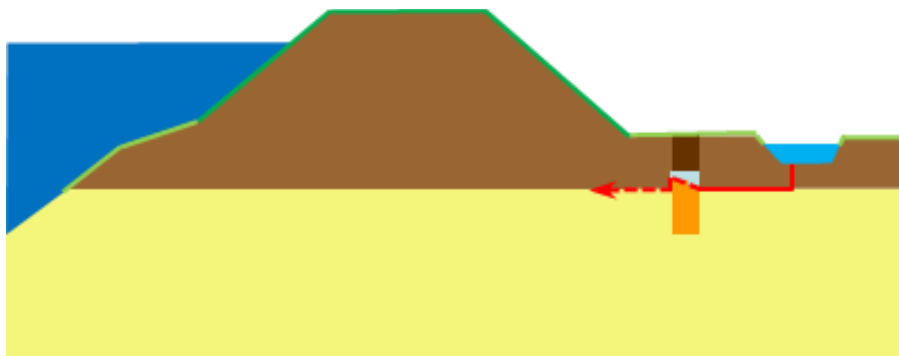


Figuur 17 Achterloopsheid (bovenaanzicht).

Door de grote doorlatendheid van de grofzandbarrière en de relatieve zwakheid daarvan in vergelijking met gesloten constructies, zijn er echter wel belangrijke verschillen met achterloopsheid bij gesloten constructies. Bij gesloten constructies, zoals een keermuur bij een sluis, neemt de resterende stromingsweerstand van de ondergrond, richting het buitenwater, bij voortgaande pipegroei alleen maar af waardoor de aanvoer van water, zowel van onder de constructie door als zijdelings achter de constructie langs, alleen maar toeneemt. Bij een grofzandbarrière is er bovendien aanvoer van water door de barrière heen. En waar een constructie zoals een keermuur gesloten blijft, zal bij de grofzandbarrière de zijdelingse groei beperkt blijven doordat de grofzandbarrière zelf aangetast raakt in het verlengde van de benedenstroomse pipe, zoals hierna beschreven onder doorloopsheid. Dit leidt daar tot een toename van het debiet vanuit de resterende barrière. Doordat de benedenstroomse pipe een beperkte afvoercapaciteit heeft, zal het debiet vanuit de zijdelingse pipe(s) daardoor in eerste instantie afnemen. Door verdere erosie zal de benedenstroomse pipe vervolgens verder in omvang groeien, zie ook Van Beek (2019). De zijdelingse pipes zullen echter pas weer gaan groeien als deze weer meer debiet kunnen afvoeren dan voorheen. Of dit gebeurt, hangt niet alleen af van de toename van het verval over de waterkering, maar ook van de processen rond doorloopsheid in het verlengde van de benedenstroomse pipe.

3.3 Doorloopsheid

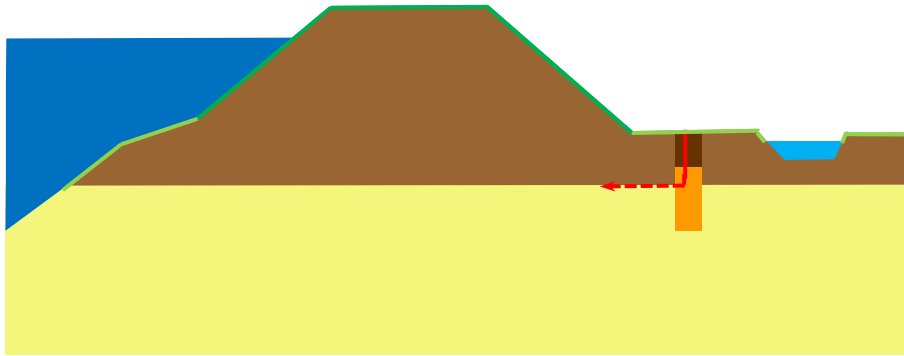
Bij doorloopsheid ontwikkelt de pipe zich vanaf de benedenstroomse zijde door de barrière heen, zie Figuur 18. Dit is de bezwijkvorm zoals beschreven in §1.3.



Figuur 18 Doorloopsheid.

3.4 Bovenloopsheid

Bij bovenloopsheid ontstaat een kortsluiting door de kleiafsluiting boven de grofzandbarrière naar het maaiveld door. Dit kan bijvoorbeeld ontstaan door opbarsten of via droogtescheuren in de kleiaanvulling, als deze te nat is aangebracht en daardoor onvoldoende is verdicht. Daarna vindt verdere doorgroei plaats zoals bij doorloopsheid. Dit is geschetst in Figuur 19.



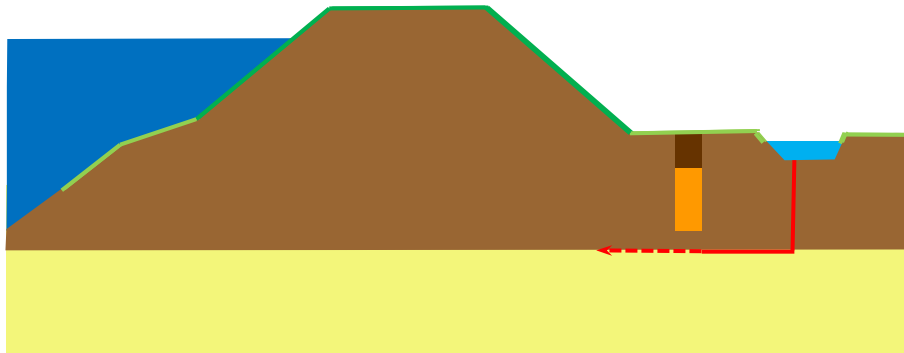
Figuur 19 Bovenloopsheid.

Voor het functioneren van de grofzandbarrière zelf maakt het direct uit of het water benedenstrooms van de uiteindelijke barrière via een benedenstroomse pipe wegstroomt, via de bovenzijde of door een combinatie van beide. Wel geldt natuurlijk dat het water via de weg van de minste weerstand zal wegstromen en minder weerstand benedenstrooms van de barrière betekent dat een (iets) groter deel van het verval gekeerd zal moeten worden door de barrière zelf (het grootste deel van het verval zal nog steeds worden gekeerd door het fijne zand bovenstrooms van de barrière, tot aan het buitenwater).

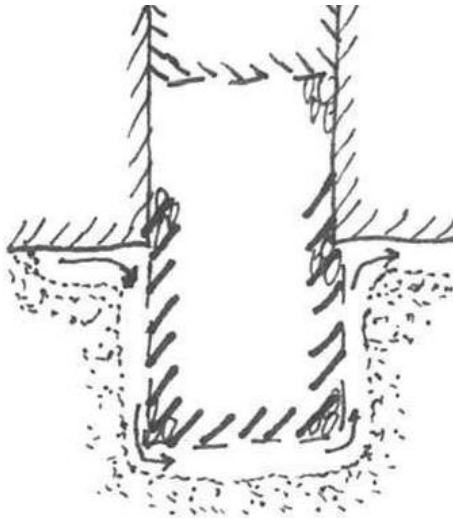
De situatie dat de pipe via de klei direct bovenstrooms van de barrière doorgroeit naar de pipinggevoelige zandlaag wordt hier gerekend onder voorloopsheid, zie daarvoor §3.6.

3.5 Onderloopsheid

Bij onderloopsheid ontwikkelt de pipe zich onder de barrière door, zie Figuur 20. De barrière is dan niet effectief, of in beperkte mate effectief – namelijk in het hypothetische geval dat de barrière wél tot in de pipinggevoelige zandlaag steekt, maar geheel verstopt raakt en dan als scherm zal functioneren, zoals geschetst in Figuur 21. De mate waarin dit scenario zou kunnen optreden, wordt in de bijlagen zowel besproken bij de faalorzaken die tot verstopping leiden (§§A.1.17, A.2.6, A.3.7 en A.3.8) als bij de faalpaden die hieraan gerelateerd zijn (§§C.1.33, C.2.16, C.2.17, C.3.18 t/m C.3.22) – zoals ook de meer belangrijk geachte faalorzaken en faalpaden in de bijlagen allemaal aan de orde komen.



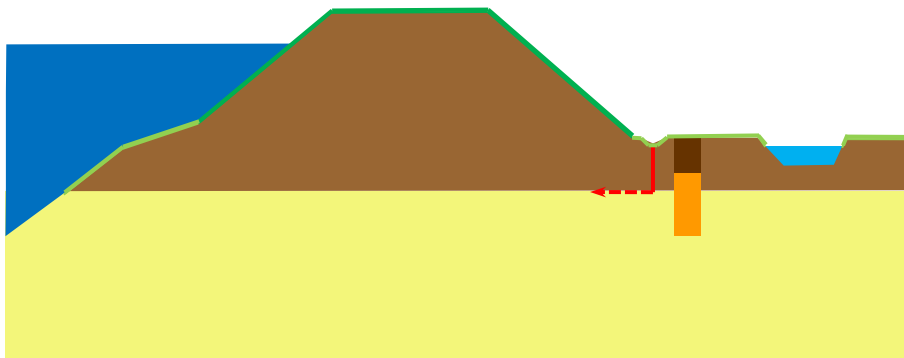
Figuur 20 Onderloopsheid bij een te ondiep aangebrachte grofzandbarrière.



Figuur 21 Onderloopsheid door verstopping, in het hier geschetste geval van de zij- en onderranden van de grofzandbarrière.

3.6 Voorloopsheid

Bij voorloopsheid ontstaat piping geheel bovenstrooms van de grofzandbarrière, zodanig dat de grofzandbarrière daar geen invloed op heeft, zie Figuur 22. Het uittredepunt ligt dan tussen de grofzandbarrière en het buitenwater in en de barrière is geheel ineffectief door deze verkeerde positie.



Figuur 22 Voorloopsheid.

De overgang tussen bovenloopsheid en voorloopsheid ligt direct aan de bovenstroomse zijde van de barrière: loopt het pad via het grove zand, zodat de barrière de ontwikkeling remt, dan is er sprake van bovenloopsheid, loopt het via de klei direct bovenstrooms van de barrière, dan betreft het voorloopsheid.

4 Beïnvloedende factoren

4.1 Inleiding

Voor de grofzandbarrière is in de afgelopen jaren een groot aantal factoren onderkend waarvan beargumenteerd is dat deze invloed hebben op het falen van de grofzandbarrière. Deze worden hier beïnvloedende factoren genoemd, ook wel gebeurtenissen in een foutenboomanalyse. In alle gevallen is een hoogwater vereist om uiteindelijk tot falen te komen, dit is verder (meestal) niet expliciet benoemd, maar mag als vanzelfsprekend worden verondersteld bij falen door piping.

Overeenkomstig de opzet van de ontwerp- en beoordelingsrichtlijn voor het VZG (Taal, 2017) is voor de beïnvloedende factoren onderscheid gemaakt naar ontwerp-, uitvoerings- en beheerfase. Alle factoren worden op zich pas een probleem tijdens de beheerfase omdat dan pas door een hoogwater falen kan optreden, maar sommige factoren kunnen of moeten al in een eerdere fase worden aangepakt. Dit betekent overigens niet dat latere fasen aanvankelijk geheel veronachtzaamd kunnen worden. Zo valt het primaire faalpad (zie §1.3 en §5.3 voor de beschrijving daarvan) weliswaar onder de beheerfase, maar dit is wel bepalend voor de afmetingen, samenstelling en locatie van de grofzandbarrière en dit zal dus al in de ontwerpfase moeten worden meegenomen.

In dit hoofdstuk worden alle nu bekende beïnvloedende factoren kort benoemd en toegelicht, telkens voorafgegaan door de code waarmee ze kortweg zijn aangeduid in de rest van het document en in de foutenboom. In §4.2 worden de 20 factoren uit de ontwerpfase beschreven, inclusief mogelijke maatregelen. In §4.3 komen de 12 factoren uit de uitvoeringsfase aan bod, en in §4.4 de 10 factoren uit de beheerfase. In bijlage A zijn alle 42 factoren uitgebreider toegelicht, inclusief een beschrijving van maatregelen die getroffen kunnen worden om de kans van voorkomen te bepalen, te verkleinen of zelfs uit te sluiten. Overigens wordt de kans niet groot geacht dat er nog resterende factoren met een relevante bijdrage aan de kans op falen over het hoofd zijn gezien, al kan dat natuurlijk nooit volledig worden uitgesloten.

De beïnvloedende factoren vormen telkens het startpunt voor één of meer faalpaden, die in het volgende hoofdstuk (en bijlage C) nader zijn uitgewerkt. Falen door een dergelijk faalpad moet worden voorkomen, dit kan zowel door aan het begin de oorzaak weg te nemen, als door in de loop van het faalpad de verdere ontwikkeling tot falen tegen te gaan. Onderdeel van de veiligheidsfilosofie is om er voor te zorgen dat de invloed van de overige faalpaden (naast het primaire faalpad) voldoende klein is, liefst door deze te kunnen uitsluiten (zie ook Figuur 6 in §2.1.1). Voor de volledigheid komt ook de beïnvloedende factor van het primaire faalpad aan de orde, onder beheer (beïnvloedende factor B6).

4.2 Ontwerpfase

In de ontwerpfase dienen de 20 beïnvloedende factoren die in Tabel 3 zijn vermeld te worden geadresseerd. De code in de tabel wordt gebruikt in de grafische weergave van de faalboom, omdat daarin soms onvoldoende ruimte is voor de volledige tekst. Verder is aangegeven tot welke hoofdvorm(en) van bezwijken, zoals beschreven in het vorige hoofdstuk, iedere factor kan leiden. Tot slot is aangegeven met welk aspect de beïnvloedende factor het meest verband houdt. Daarbij is onderscheid gemaakt naar de aspecten ondergrond, barrièremateriaal, en detaillering van de grofzandbarrière.

Tabel 3 Beïnvloedende factoren te adresseren in de ontwerpfase (tabel loopt door op de volgende pagina).

Code	Beschrijving beïnvloedende factor ontwerpfase met toelichting	Relevant voor	Verband met vooral
O1	Barrière is niet lang genoeg in de lengterichting van de waterkering <i>Een goede aansluiting of afsluiting ontbreekt.</i>	achterloopsheid	detaillering
O2	Geen scherpe grenslaag tussen de pipinggevoelige zandlaag en de deklaag <i>Deze interface kan enige dikte kennen en bestaan uit materiaal waarvan de pipinggevoeligheid onduidelijk is.</i>	door- en onderloopsheid	ondergrond
O3	Barrièrezand is intern instabiel <i>De fijnere fractie kan uitspoelen, met eventueel instorten van de matrix van grotere korrels tot gevolg.</i>	doorloopsheid	barrière-materiaal
O4	Barrièrezand is te grof in relatie tot achtergrondzand <i>Het achtergrondzand kan door de barrière heen.</i>	doorloopsheid	barrière-materiaal
O5	Opdrijven van de deklaag bovenstrooms van de grofzandbarrière	door- en voorloopsheid	ondergrond
O6	Grenslaag met veel silt <i>Dit vormt een extra complicatie voor het ontwerp van de samenstelling van het barrièrezand.</i>	doorloopsheid	ondergrond
O7	Afstand van barrière tot uittredepunt is klein <i>Dit leidt tot interferentie van processen bij een uittredepunt met die bij de benedenstroomse zijde van een grofzandbarrière.</i>	doorloopsheid	detaillering
O8	Te los gepakt achtergrondzand <i>Wanneer dit later verdicht, kan nazakken van de grofzandbarrière optreden.</i>	doorloopsheid	ondergrond
O9	Sterk doorlatende (grind)laag onderaan barrière <i>Dit leidt tot extra aanvoer van water naar de barrière, met een negatieve invloed op de efficiëntie van de barrière.</i>	doorloopsheid	ondergrond
O10	Grofkorrelige discontinuïteit in achtergrondzand bij barrière <i>Bijvoorbeeld een geul met extra grof materiaal ter hoogte van de barrière, waardoor de zijdelingse pipegroei verhinderd raakt. Dit kan sterk van invloed zijn op de stromingsconcentratie en daarmee op de 3D-factor.</i>	doorloopsheid	ondergrond
O11	Barrièrezand is te fijn in relatie tot achtergrondzand <i>De doorlatendheid van de grofzandbarrière is dan te laag, zodat deze niet goed functioneert.</i>	doorloopsheid	barrière-materiaal
O12	In hoogteligging variërende grenslaag tussen de pipinggevoelige zandlaag en de deklaag <i>Een richting buitenwater oplopende interface maakt de effectieve hoogte van de barrière in de eindfase kleiner.</i>	doorloopsheid	ondergrond
O13	Cohesieve discontinuïteit in ondergrond bij barrière <i>Bijvoorbeeld een kleilens ter hoogte van de barrière. Dit kan sterk van invloed zijn op de stromingsconcentratie en daarmee op de 3D-factor.</i>	doorloopsheid	ondergrond
O14	3D-factor is onderschat <i>Er is een complexe situatie met bijvoorbeeld geulen, zandwinputten en kleiputten waardoor met een ongunstiger 3D-factor voor de grondwaterstroming rekening moet worden gehouden (dit in aanvulling op O10 en O13 die de 3D-factor ook in ongunstige zin beïnvloeden).</i>	doorloopsheid	ondergrond
O15	Diepte bovenstroomse afdichting is onvoldoende <i>Een aanvullende maatregel om te forceren dat de effectieve hoogte van de barrière in de eindfase voldoende is, kan ook tekortschieten.</i>	doorloopsheid	detaillering
O16	Tussenzandlaag bovenstrooms van de barrière	doorloopsheid	ondergrond

	<i>De barrière sluit aan op een bovenstrooms gelegen tussenzandlaag die voor extra wateraanvoer zorgt en daardoor tot een hogere optredende gradiënt in de barrière.</i>		
O17	Cakevorming door uitspoeling van fijne fractie uit achtergrondzand in bovenstroomse zijde barrière <i>Een proces dat in het begin van het laboratoriumonderzoek optrad en (nog) niet goed voorspelbaar bleek, maar wat alleen maar gunstig kan uitpakken.</i>	door-, onder- en voorloopsheid	ondergrond
O18	Drainage via kleiaanvulling boven barrière <i>Water dat door de barrière stroomt kan ook bovenlangs weg, dit vereist wel een stijghoogte tot aan het maaiveld.</i>	bovenloopsheid	detailtering
O19	Barrière is te ondiep <i>Wanneer de barrière niet tot in de pipinggevoelige zandlaag steekt, kunnen pipes er onderdoor groeien.</i>	onderloopsheid	detailtering
O20	Barrière is benedenstrooms van uittredepunt <i>Een pipingmaatregel benedenstrooms van het uittredepunt kan niet effectief zijn.</i>	voorloopsheid	detailtering

Deze factoren zijn niet allemaal even belangrijk. De factoren O3, O4, O11 en O14 zijn altijd relevant. Soms, dus afhankelijk van de situatie, zijn ook de factoren O1, O2, O6, O7, O9, O10, O12, O13, O15 en O16 belangrijk. De laatste drie factoren uit de tabel, O18, O19 en O20, zullen alleen belangrijk zijn als deze worden veronachtzaamd – bij een goed doordacht ontwerp wordt hier ‘als vanzelf’ wel aan voldaan. De factoren O5, O8 en O17 zijn in de praktijk altijd onbelangrijk. Voor de motivatie van dit laatste wordt verwezen naar §A.1.5, §A.1.8 en §A.1.17. In bijlage A, en soms aanvullend in de aan deze factoren gerelateerde faalpaden in bijlage C, is voor elk van de factoren, ook die uit de uitvoeringsfase en de beheerfase, uitgebreid aangegeven wat deze inhouden en waarom deze al dan niet van belang kunnen zijn.

4.3 Uitvoeringsfase

In de uitvoeringsfase dienen de 12 beïnvloedende factoren die in Tabel 4 zijn vermeld te worden geadresseerd. Deze tabel is op dezelfde manier opgebouwd als de vorige tabel. In de laatste kolom is het aspect ‘uitvoering’ toegevoegd.

Tabel 4 Beïnvloedende factoren te adresseren in de uitvoeringsfase.

Code	Beschrijving beïnvloedende factor uitvoeringsfase met toelichting	Relevant voor	Verband met vooral
U1	Onvoldoende aansluiting tussen discontinu geproduceerde barrièredelen <i>Piping kan dan tussen de barrièredelen door optreden.</i>	doorloopsheid	detailtering
U2	Aanvulklei wordt te dun aangebracht, bevat holle ruimtes en/of wordt in onvoldoende mate aangevoerd en/of verdicht	door- en bovenloopsheid	uitvoering
U3	Grofzandbarrière is onvoldoende verdicht <i>Hierdoor kan later nog verdichting plaatsvinden en daarmee verlaging van de bovenzijde. Dit is extra problematisch wanneer dit gebeurt na een hoogwater waarbij al een helling is gevormd.</i>	doorloopsheid	barrièremateriaal
U4	Onvoldoende aanvoer van barrièrezand <i>De voortgangssnelheid is in dit geval te groot, zodat het ontwerp-profiel onvolledig wordt aangebracht.</i>	doorloopsheid	uitvoering
U5	Aanvulklei zwelt te sterk in de holle ruimte die boven het zand ontstaat <i>De holle ruimte wordt als het ware direct dichtgedrukt, waardoor het zand en/of de zwelklei te sterk erodeert.</i>	boven- en doorloopsheid	detailtering

U6	Extreme verdichting achtergrondzand <i>Dit heeft betrekking op een uitvoeringstechniek waarbij zandpalen worden aangebracht als alternatief voor een continue 'muur' van barrièrezand, of meer in het algemeen: bij toepassing van een grondverdringende aanlegmethode. NB: Voor de pilot bij Gameren is deze uitvoeringstechniek al voorafgaand aan de maakbaarheidsproeven afgefallen.</i>	door-, boven-, onder- en voorloopsheid	detaillering
U7	Aanvulklei is erosiegevoelig <i>Hierdoor verdwijnt de sleufaانvulling met het langstromende water.</i>	bovenloopsheid	detaillering
U8	Aanvulklei is bij aanbrengen te nat <i>Hierdoor is het meer gevoelig voor erosie en is ook de vereiste verdichting moeilijker te realiseren.</i>	bovenloopsheid	uitvoering
U9	Ontgraving is onvoldoende diep <i>Door problemen die optreden met het gebruikte materieel.</i>	bovenloopsheid	uitvoering
U10	Ontmenging van het barrièrezand <i>Hierdoor is de barrière ongelijkmatig van samenstelling en is deze her en der te grof of te fijn van samenstelling, of intern instabiel (zie O3, O4 en O11).</i>	doorloopsheid	barrièremateriaal en uitvoering
U11	Toepassing van verkeerd materiaal als barrièrezand <i>Bijvoorbeeld doordat op aangrenzende deeltrajecten verschillende typen barrièrezand moeten worden toegepast en deze omgewisseld raken (dit kan leiden tot O4 en/of O11).</i>	doorloopsheid	uitvoering
U12	Vermenging van barrièrezand met achtergrondzand <i>Dit kan leiden tot een onduidelijke overgangszone die gevoelig is voor erosie en/of leiden tot de factoren O3 en O11. Deze oorzaak is met name mogelijk bij grondverdringende aanlegmethoden.</i>	doorloopsheid	detaillering

Van deze factoren zijn U1, U9 en U10 altijd relevant, soms ook U2, U3, U6, U8 en U11. De factoren U4, U5, U7 en U12 zijn alleen van belang wanneer deze worden veronachtzaamd – bij een goede voorbereiding en een goede uitvoering wordt hier 'als vanzelf' wel aan voldaan, wat overigens wel duidelijk en navolgbaar zal moeten worden vastgelegd in een ontwerprapportage en een rapportage inclusief alle relevante metingen behorend bij de uitvoeringsmonitoring.

4.4 Beheerfase

In de beheerfase dienen de 10 aspecten die in Tabel 5 zijn vermeld te worden geadresseerd. Deze tabel is op dezelfde manier opgebouwd als de vorige tabel. In de laatste kolom is het aspect 'beheer' toegevoegd.

Tabel 5 Beïnvloedende factoren te adresseren in de beheerfase

Code	Beschrijving beïnvloedende factor beheerfase met toelichting	Relevant voor	Verband met vooral
B1	Toekomstig gebrek aan kennis over de aanwezigheid en werking van de grofzandbarrière <i>Uit onwetendheid wordt de grofzandbarrière onbewust geheel of gedeeltelijk verwijderd.</i>	achter-, door-, boven- en voorloopsheid	beheer
B2	Doorgraven van de barrière door mens of dier <i>In tegenstelling tot bijvoorbeeld een stalen damwand kan dit betrekkelijk makkelijk onbedoeld en ongemerkt gebeuren. (Door de lokale situatie is dit voor de pilot bij Gameren waarschijnlijk geen probleem.)</i>	achter-, door-, boven- en voorloopsheid	beheer
B3	Macroinstabiliteit leidt tot beschadiging van de barrière <i>Of dit een probleem oplevert hangt af van de locatie van het glijvlak door de barrière heen.</i>	doorloopsheid	ondergrond

B4	Na hoogwater nazakken van de deklaag in de pipe in de zandlaag <i>Dit kan zowel benedenstrooms van de barrière plaatsvinden (zodat de pipe dieper komt te liggen waardoor er effectief minder heavehoogte overblijft) als in de barrière zelf (waardoor de barrière gaat functioneren als een minder effectieve maatregel, namelijk een 'vlakke grofzandbarrière' onder een gunstige hoek).</i>	doorloopsheid	ondergrond
B5	Naverdichten barrière <i>Hierdoor neemt de hoogte af. Wanneer dit na 'leeglopen' van de inkassing gebeurt, dan kan dit een probleem opleveren.</i>	doorloopsheid	uitvoering en beheer
B6	Erosie van de grofzandbarrière zelf bij hoogwater <i>Het primaire faalmechanisme waarbij de sterkte van de grofzandbarrière maximaal wordt aangesproken.</i>	doorloopsheid	barrièremateriaal
B7	Mechanische, chemische of biologische verstopping <i>Dit zal in de Nederlandse situatie niet optreden.</i>	door-, onder- en voorloopsheid	ondergrond
B8	Bij een eerder hoogwater is de grofzandbarrière door piping bloot komen te liggen <i>Dit is alleen relevant bij een dubbel filter (twee opeenvolgende filters, waarbij het grofste, binnenste filter gevuld raakt met achtergrondmateriaal bij een stroming vanuit de polder richting het buitenwater, voor een nadere uitleg zie §A.3.8). (Voor de pilot bij Gameren is niet voor deze sterktevergroten variant gekozen).</i>	door- en onderloopsheid	barrièremateriaal
B9	Afkalving van de deklaag benedenstrooms van de barrière <i>Vooraf een potentieel probleem als het uittredepunt dichtbij ligt.</i>	bovenloopsheid	detaillering
B10	Pipe slijt de bovenliggende deklaag uit <i>Hierdoor kan de pipe uiteindelijk tot aan het maaiveld groeien in het gebied tussen barrière en uittredepunt, waardoor dit laatste feitelijk verlegd raakt.</i>	bovenloopsheid	ondergrond

Van deze factoren zijn B2, B4 en B6 altijd belangrijk. Soms zullen ook B3, B8, B9 en B10 belangrijk zijn. B5 is alleen belangrijk wanneer hier onvoldoende aandacht aan is en wordt besteed. B7 kan onder de omstandigheden zoals die zich in Nederland voordoen niet optreden, zoals toegelicht in §A.4.3.7. Met factor B1 kan strikt genomen geen rekening worden gehouden, omdat dit zich alleen voordoet na een totale ontwrichting van de maatschappij, waarbij zaken als leggers, beheerplannen en vakkennis verloren zijn gegaan⁷, in de situatie waarbij de wederopbouw bovendien alweer vergevorderd is. Opname in leggers en beheerplannen is vooraf de best mogelijke remedie hiertegen.

⁷ Een vergelijking kan worden gemaakt met de situatie in voormalig Joegoslavië, waar na enkele jaren vol oorlogshandelingen niet meer bekend was waar de stortplaatsen van gevaarlijk chemisch afval zich bevonden.

5 Faalpaden en foutenboom

5.1 Inleiding

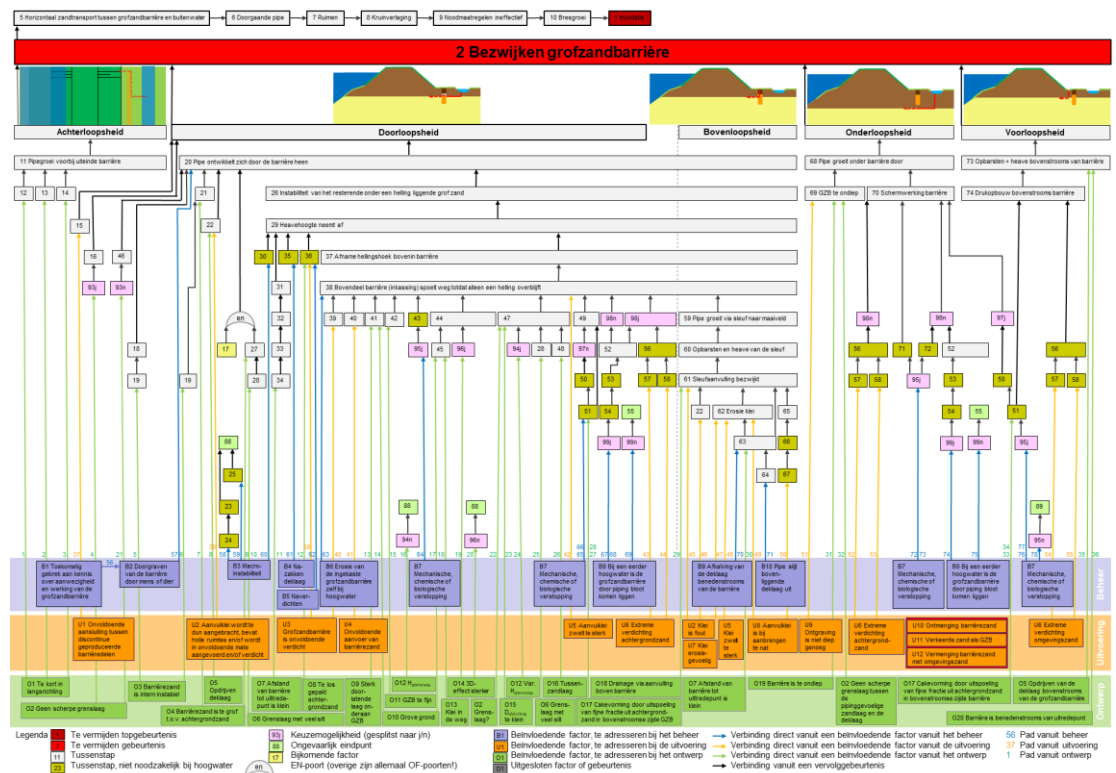
Door combinatie van de elementen uit de beide voorgaande hoofdstukken en kennis over alle mogelijke tussenstappen (gebeurtenissen) kan tot een foutenboom voor de grofzandbarrière worden gekomen. Hierin worden voor alle beïnvloedende factoren (initiële gebeurtenissen, in combinatie met het optreden van een maatgevend hoogwater) alle mogelijke opeenvolgende stappen beschreven tot aan het bezwijken van de grofzandbarrière, gevolgd door de stappen tot aan inundatie van het door de waterkering beschermde gebied. Elke afzonderlijke reeks van opeenvolgende stappen vormt een faalpad.

Dit geeft invulling aan het middelste gedeelte van Figuur 6, 'falen door alle andere mogelijke oorzaken'. Door ontwerp, uitvoering en beheer moet er voor worden gezorgd dat het primaire faalpad een acceptabel veiligheidsniveau biedt, terwijl alle andere faalpaden in de foutenboom elk een verwaarloosbaar kleine kans van optreden hebben, voor zover deze al niet kunnen worden uitgesloten. Uitsluiting van een faalpad is overigens al te bereiken door het optreden ervan op één van de opeenvolgende stappen (of knopen) uit te sluiten, hetzij door de beïnvloedende factor (zie hoofdstuk 4) uit te sluiten, hetzij door een latere stap te blokkeren. Als hieraan wordt voldaan, dan biedt de grofzandbarrière voldoende veiligheid tegen het falen van de waterkering als gevolg van piping.

Om tot deze foutenboom te komen is in de afgelopen jaren meerdere keren overlegd met een groep deskundigen vanuit de Projectoverstijgende Verkenning Piping (POV Piping) van het Hoogwaterbeschermingsprogramma en is daarnaast diverse keren overlegd met diverse experts van waterschappen, ingenieursbureaus, aannemers en Deltares. Het resultaat is beknopt weergegeven in §5.2. In §5.3 wordt het primaire faalpad beschreven wat in §1.3 al kort genoemd is. In §5.4 t/m §5.7 worden verschillende voorbeelden gegeven van andere paden die tot falen leiden. Hiermee wordt een voorbeeld gegeven voor elk van de vijf hoofdvormen van falen zoals beschreven in hoofdstuk 3.

5.2 De foutenboom voor de grofzandbarrière

De volledige foutenboom is weergegeven in Figuur 23. Een beter leesbare versie, inclusief een korte beschrijving van alle elementen, is te vinden in bijlage B.



Figuur 23 Volledige foutenboom grofzandbarrière.

Bijna geheel bovenaan staan de vijf vormen van falen (de vijf figuren) zoals beschreven in hoofdstuk 2: achterloopsheid, doorloopsheid, bovenloopsheid, onderloopsheid en voorloopsheid. Bijna geheel onderaan, net boven de legenda, staan de verschillende beïnvloedende factoren, gerangschikt naar ontwerp (O: de groene balk), uitvoering (U: de oranje balk) en beheer (B: de blauwe balk), zoals weergegeven in hoofdstuk 4. Vanuit deze beïnvloedende factoren lopen pijlen naar vervolgebeurtenissen, die uiteindelijk uitkomen bij één van de vormen van falen, of, bij uitzondering, bij niet-falen. Een voorbeeld van niet-falen is het inspoelen van achtergrondzand in de barrière na afloop van een hoogwater waarbij de inkassing gedeeltelijk is leeggestroomd, bij een grondwaterstroming vanuit het achterland richting het buitenwater. Bij een normale grofzandbarrière opgebouwd als een enkelvoudig filter, vormt dit geen probleem. Bij toepassing van een dubbel filter kan dit een probleem vormen als het grofste filter vrij is komen te liggen, waardoor er niet meer aan de filterregels zal worden voldaan (bij beïnvloedende factor B8). Opgemerkt wordt dat deze figuur als *gebeurtenissenboom* (zie §1.3) verre van volledig is waar het gaat om de mogelijkheden die niet tot falen leiden. De zeven paden die niet tot falen leiden die wél zijn opgenomen, staan vermeld om op deze punten duidelijkheid te bieden en herhaling van discussies in de toekomst te vermijden.

De beïnvloedende factoren U10, U11 en U12 zijn wel benoemd (nabij de rechterkant van de oranje balk), maar vanwege de impact op diverse ontwerpuitgangspunten zijn deze verder niet in het schema opgenomen. Het optreden van elk van deze factoren is dermate desastreus dat dit te allen tijde voorkomen dient te worden.

Vanaf de hoofdvormen van falen van de grofzandbarrière is vervolgens nog het vervolgpad tot inundatie weergegeven (dit is de bovenste regel in de foutenboom). Dit is, inclusief de nummering van de knopen, overgenomen uit Rosenbrand & Knoeff (2020). Bij dit gedeelte van het faalpad is geen volledigheid nagestreefd; de nadruk ligt hier op de grofzandbarrière en hoe deze tot bezwijken kan komen. Voor de volledigheid is ook de invloed van landwaartse macroinstabiliteit meegenomen (B3). Hoewel dit binnen de WBI-systematiek onder een ander faalmechanisme valt, leek het zinvol om hier aan te geven wanneer dit wel of geen invloed heeft op het functioneren van de grofzandbarrière als maatregel tegen piping.

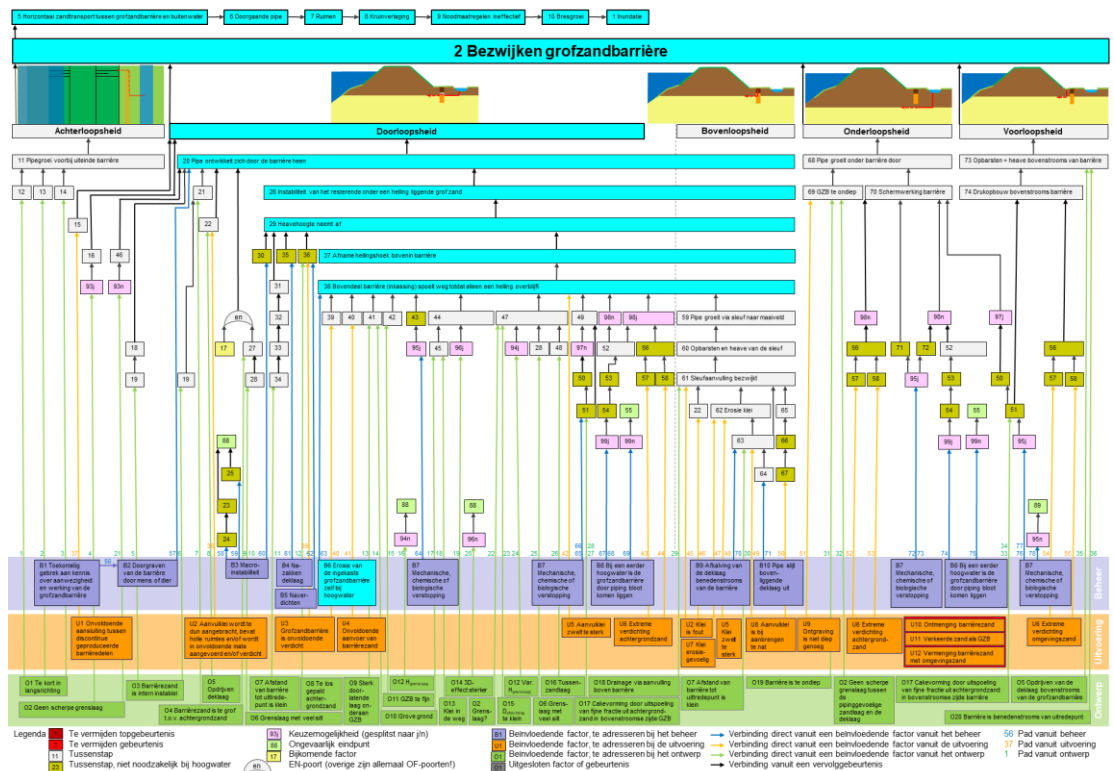
In het midden van de foutenboom zijn alle gebeurtenissen of knopen met een nummer weergegeven, in beperkte mate zijn hier ook omschrijvingen bij gegeven. Voor een omschrijving van alle gebeurtenissen wordt verwezen naar bijlage B. Op één expliciet vermelde uitzonderingen na (17 in combinatie met 27), zijn alle poorten in deze foutenboom OF-poorten, dus als slechts één van de onderliggende gebeurtenissen optreedt, dan kan de vervolgebeurtenis al optreden. 'Kan', dat wil zeggen dat de overgangskansen over het algemeen (veel) kleiner zijn dan 1 (een overgangskans van 1 wil zeggen: zodra dit punt wordt bereikt, dan zal het met zekerheid worden gepasseerd). Hierbij dient ook te worden bedacht dat meerdere faalpaden elkaar kunnen versterken. Andersom geldt dat in dit geval als één van de poorten een voldoende kleine kans heeft, het hele faalpad deze voldoende kleine kans heeft, ook al hebben de andere poorten kans 1.

Een ietwat bijzonder element aan deze foutenboom betreft de weergave van de ja/nee-keuzes. Normaal worden deze als één knoop weergegeven, waar verschillende takken vandaan lopen, al dan niet richting falen. Hier zijn deze keuzeknopen gesplitst en weergegeven als afzonderlijke knopen, met een roze achtergrondkleur, waarin naast het nummer van de gebeurtenis een 'j' (ja) of een 'n' (nee) is aangegeven. Ook komen dezelfde knopen en startpunten (de beïnvloedende factoren) soms meermalen voor. Dit is gedaan om een 'spaghettistructuur', die eerdere versies van deze foutenboom voor de grofzandbarrière kenmerkten, te vermijden en daarmee de overzichtelijkheid te vergroten.

In de rest van dit hoofdstuk worden vijf voorbeelden van faalpaden op een uitgebreidere manier beschreven, waarbij elk van de hoofdvormen van falen (van achterloopsheid t/m voorloopsheid) aan bod komt. In bijlage C zijn alle 71 faalpaden die tot bezwijken kunnen leiden kort beschreven, evenals de 7 in de foutenboom opgenomen paden die niet tot bezwijken leiden.

5.3 Voorbeeld van doorlooptheid: de primaire vorm van bezwijken

Het eerste voorbeeld betreft de situatie van doorlooptheid die als de primaire vorm van bezwijken van de grofzandbarrière wordt beschouwd en reeds beschreven is in met name het laatste gedeelte van §1.2 en stapsgewijs benoemd is in de tweede opsomming in §1.3. Dit betreft pad 63 in de foutenboom, dat in lichtblauw is weergegeven in Figuur 24.



Figuur 24 Faalpad 63: de primaire bezwijkvorm door doorlooptheid, zonder verdere bijzonderheden.

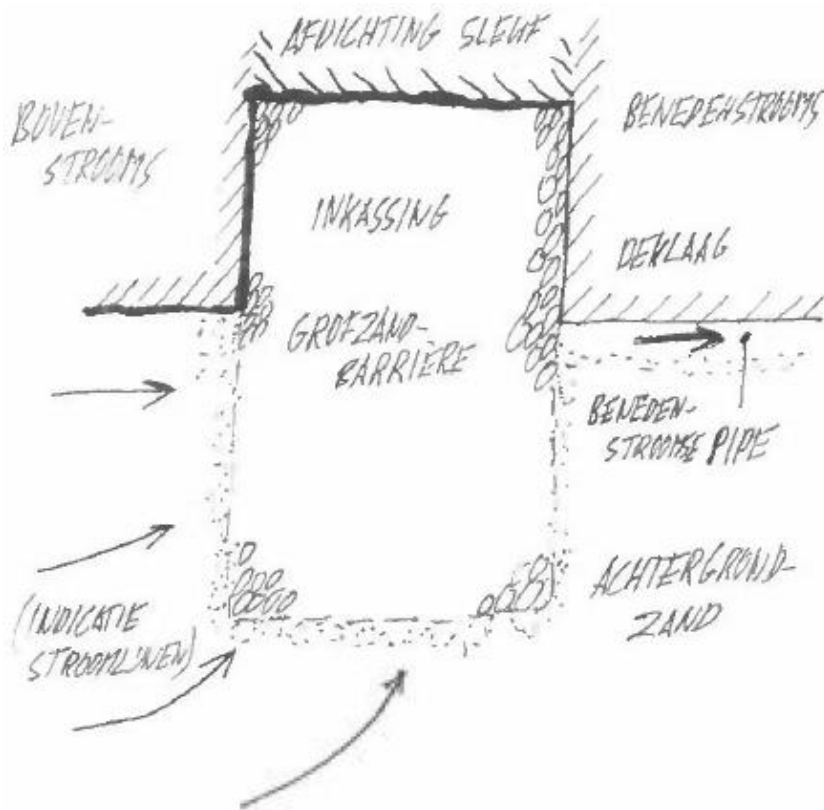
Dit faalpad bestaat uit de volgende onderdelen:

Eerst een vijftal onderdelen die niet specifiek zijn voor de grofzandbarrière, maar algemeen zijn voor piping. Deze onderdelen zijn overgenomen uit Rosenbrand & Knoeff (2020) en staan niet vermeld in bovenstaande foutenboom. Hiervoor is dezelfde aanduiding gebruikt als eerder in §1.3.

- Buitenwaterstand stijgt en de waterspanningen in het watervoerend pakket aan de rivierzijde van de kering stijgen
- Waterspanningen in het watervoerend pakket aan de polderzijde stijgen
- Opbarsten en geconcentreerde verticale stroming
- Heave
- Horizontaal zandtransport door het optreden van zandmeervoerende wellen tot aan de grofzandbarrière bij hoogwater

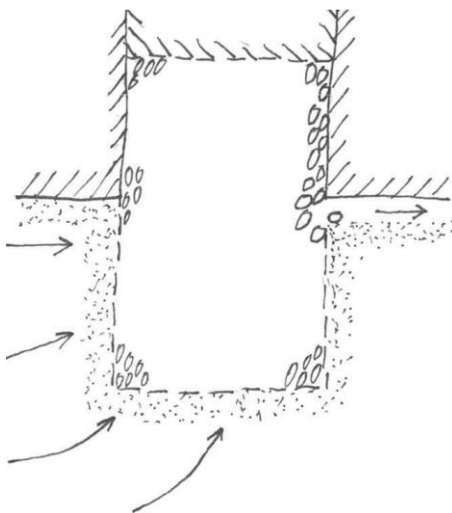
Het laatste onderdeel is in twee delen opgesplitst en komt verderop, na '2 Bezwijken grofzandbarrière, weer terug als eerste van de laatste zeven stappen.

- B6 Erosie van de ingekaste grofzandbarrière zelf bij hoogwater
Een pipe die vanaf de benedenstroomse kant de grofzandbarrière bereikt (zie Figuur 25) maakt het mogelijk dat er korrels vanuit de grofzandbarrière in de aangrenzende pipe rollen.



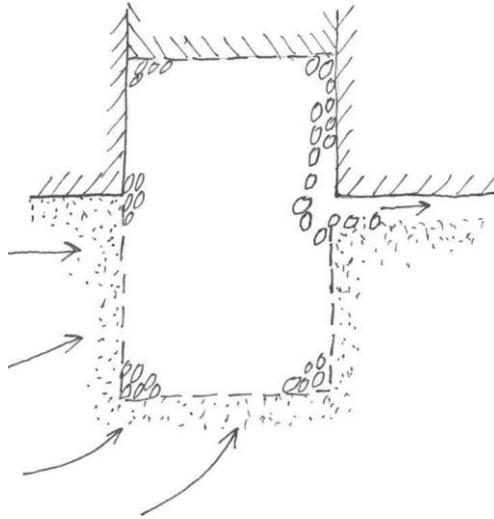
Figuur 25 Zijaanzicht met grofzandbarrière waar een pipe volledig naar toe is gegroeid vanaf het benedenstroomse uittredepunt.

Dit is een kwestie van evenwicht op korrelniveau: wanneer in de situatie van Figuur 25 een korrel uit de grofzandbarrière de zijdelingse steun van het achtergrondzand ontbeert doordat dat zand geërodeerd is, dan zal deze korrel kunnen vallen en mede onder invloed van de stroming zal dit dan ook gebeuren, zie Figuur 26.



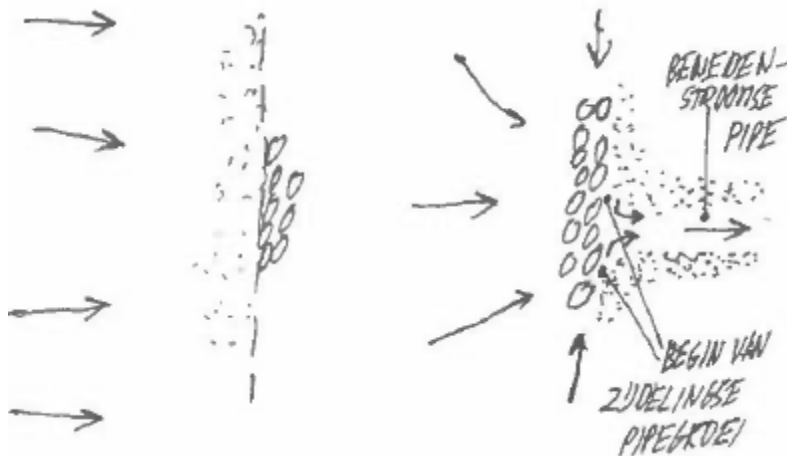
Figuur 26 Zijaanzicht met grofzandbarrière waarvan een eerste korrel is geërodeerd.

Daarna kunnen de volgende korrels volgen, mede geholpen door de zwaartekracht, zie Figuur 27.



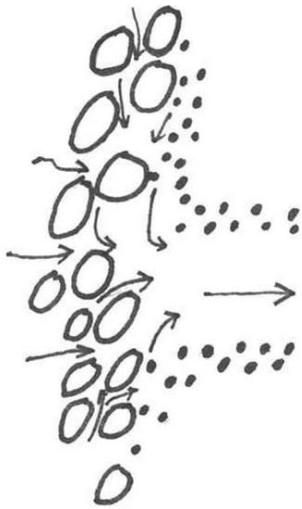
Figuur 27 Zijaanzicht met grofzandbarrière met drie geërodeerde korrels.

Overigens zal er ook erosie optreden in zijwaartse richting, langs de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière. Zie het bovenaanzicht in Figuur 28: het water zal van alle kanten door de barrière naar de pipe toestromen en ook door het achtergrondzand heen gaan.



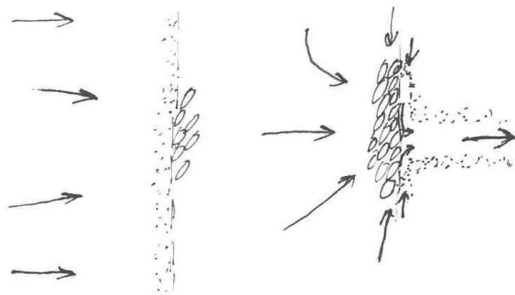
Figuur 28 Boveenaanzicht met allereerste begin van pipegroei in zijwaartse richting.

Hier zal op korrelniveau ook een vorm van contacterosie optreden: korrels behorend bij het achtergrondzand zullen als het ware worden meegezogen door de stroming door het achtergrondzand. Daar passen ze niet door de poriën (er wordt immers voldaan aan de filterregels voor geometrisch dichte filters), maar dit levert wel een zodanige druk op die ene korrel van het achtergrondzand die op de hoek ligt, dat deze als eerste zal eroderen, zie Figuur 29. Daarna zullen de achterliggende korrels van het achtergrondzand stuk voor stuk gemakkelijker getransporteerd kunnen worden dan de grotere korrels van de grofzandbarrière.



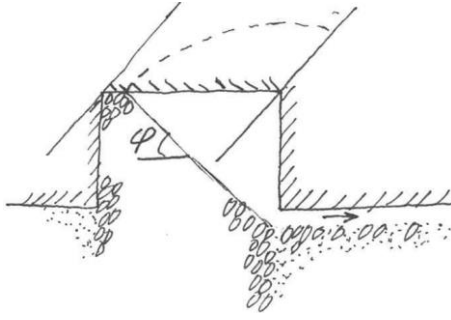
Figuur 29 Schematisch detail van de situatie bij het begin van pipegroei in zijwaartse richting (bovenaanzicht).

Als er eenmaal enkele korrels van het achtergrondzand aan de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière zijn afgevoerd, zal er een begin van een zogenoemde zijdelingse pipe zijn ontstaan, waardoor over het algemeen de kleine korrels van het achtergrondzand gemakkelijker zullen worden afgevoerd dan de korrels van de barrière. Daardoor zullen twee zijdelingse pipes ontstaan, aan weerszijden van de pipe die aansluit op de pipe richting het uittredepunt (deze laatste wordt ook wel aangeduid als 'de benedenstroomse pipe'), zie Figuur 30.



Figuur 30 Verdere zijdelingse pipegroei in het achtergrondzand direct benedenstrooms van de barrière (bovenaanzicht).

- 38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft
 Nadat de eerste korrel in de pipe is gevallen, zullen zoals hiervoor geschetst de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit zandtransport kan zowel korrels uit de grofzandbarrière betreffen als korrels die tot het achtergrondzand behoren. De laatste zijn grotendeels kleiner dan de eerste en zullen daarom gemakkelijker en ook verder getransporteerd worden.
 Mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende afvoer van materiaal plaatsvindt, zal dit proces waarbij korrels uit het bovenste deel van de grofzandbarrière verdwijnen doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfrond mini-amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie het zijaanzicht met enige 3D-suggestie in Figuur 31.



Figuur 31 Uitspoeling van bovendeel barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

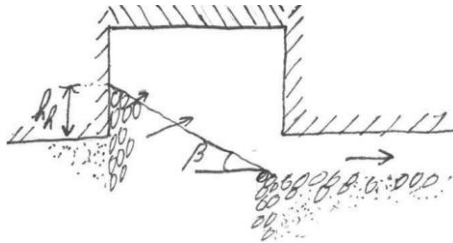
De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen naar verwachting pas in een laat stadium het uittredpunt bereiken. Ondertussen raakt de bodem van de pipe in de nabijheid van de grofzandbarrière meer en meer 'geplaveid' met grovere korrels, hetgeen de stromingsweerstand doet toenemen. Deze hogere weerstand kan er toe leiden dat deze benedenstroomse pipe enigszins zijdelings groeit, met achterlating van een mogelijk grotendeels verstopt gedeelte met meer grof zand, ten gunste van een route waar (vooralsnog) meer achtergrondzand aanwezig is. Hierdoor kan ook het punt waar de benedenstroomse pipe aansluit op de grofzandbarrière in de loop van de tijd variëren, hetgeen er dan ook toe leidt dat de uitspoeling vanuit de grofzandbarrière geometrisch minder fraai gevormd wordt. In plaats van een klassieke halfronde vorm als bij een Romeins amfitheater, raakt dit meer langgerekt in de lengterichting van de dijk, hetgeen gunstig uitpakt.

Bovendien zullen de korrels uit het bovenste gedeelte van de grofzandbarrière ook op enige afstand van de aansluiting op de benedenstroomse pipe(s) naar beneden rollen in de daar gevormde zijdelingse pipe. Daardoor zal de situatie ondergronds steeds een vorm hebben tussen een halfrond mini-amfitheater en een 2D-doorsnede met één enkele helling in. De omvang van de zijdelingse pipes is enerzijds afhankelijk van de daadwerkelijke afvoer van zand (fijn en grof), hetgeen behalve voldoende verval en daarmee gepaard gaande stroming ook tijd vergt, anderzijds neemt de stroomsnelheid aan de randen af naarmate de pipe groter wordt. Dit kan er toe leiden dat uiteindelijk eerder sprake zal zijn van een enigszins verwijd mini-amfitheater bij de aansluiting op een benedenstroomse pipe. Daarbij is er verder (grotendeels) een zijdelingse pipe met slechts beperkte instorting van de inkassing met daardoor mogelijk een tweede doorgaande holte bovenin. Deze tweede holte bevindt zich dan rechtsboven in de hoek van de inkassing in bijvoorbeeld Figuur 31. Dit zal eerder optreden dan dat er over de hele lengte van de grofzandbarrière sprake zal zijn van een volledig ontwikkelde helling.

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992).

Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud zoals geschetst in Figuur 31, het gaat hier om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 32.



Figuur 32 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

De verflauwing van de hellingshoek in Figuur 32 leidt ook tot een afname van de zogenoemde "heavehoogte", de verticale afstand tussen de bovenkant van de resterende grofzandbarrière en de onderkant van de deklaag aan de bovenstroomse zijde van de grofzandbarrière, in de voorgaande figuur aangegeven met h_h .

NB: Bij dit faalpad komen dit knooppunt en het voorgaande knooppunt met elkaar overeen, maar er zijn ook andere oorzaken waardoor de heavehoogte kleiner kan zijn of worden⁸, daarom zijn beide omschrijvingen hier uit elkaar getrokken.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. Voor de kritieke uitstroomb gradiënt op de helling is door Van Rhee & Bezuijen (1992) de volgende vergelijking gegeven:

$$i_{crit} = v / k = - (1 - n) \Delta \sin (\phi - \beta) / \sin \phi \quad (5.1)$$

Dit is dezelfde vergelijking als vergelijking (2.8) in §2.2.2.1, waar alle gebruikte symbolen al zijn toegelicht. De hoek β is aangegeven in Figuur 32.

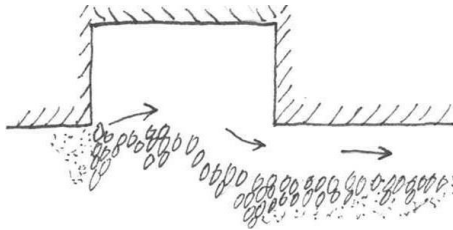
De toepasselijkheid van deze vergelijking voor de situatie van de grofzandbarrière met inkassing is bevestigd door een tweetal validatie-experimenten op medium schaal (Terwindt et al., 2020) en de analyse daarvan, beschreven in Förster (2021a). Het gaat hierbij om de gradiënt welke optreedt in het midden van de helling. Deze helling verloopt niet recht, doch concaaf, maar voor de analyse kan worden gewerkt met één hellingshoek β .

Voor het in de beschreven proeven gebruikte zand geldt een hoek van inwendige wrijving ϕ van 35 graden en een evenwichtshoek β van 10 graden. Voor andere zanden, geschikt voor een grofzandbarrière, zullen deze waarden over het algemeen niet heel anders zijn.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zoals geschetst in Figuur 33.

⁸ Dit betreft grotendeels oorzaken die samenhangen met nazakken. Het gaat om beïnvloedende factoren O7, O8, U3, B3, B4 en B5 (nader beschreven in §§A.1.7, A.1.8, A.2.3, A.3.3, A.3.4 en A.3.5), met de faalpaden 11, 12, 39, 60, 61 en 62 (nader beschreven in §§C.1.11, C.1.12, C.2.3, C.3.5, C.3.6 en C.3.7).



Figuur 33 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie §3.3).

2 Bezwijken grofzandbarrière

De grofzandbarrière als waterkerend element is dan bezwiken.

Het navolgende is weer gebaseerd op Rosenbrand & Knoeff (2020), met enkele aanvullingen die specifiek betrekking hebben op de grofzandbarrière en/of de pilotlocatie bij Gameren.

5 Horizontaal zandtransport tussen grofzandbarrière en buitenwater (stap N in de opsomming in §1.3)

Wanneer de hydraulische gradiënt vanuit het buitenwater hoog genoeg is om korrels te eroderen, dan zal de pipe groeien richting het buitenwater. Hierbij kunnen overigens meerdere pipes ontstaan vanaf het punt waar de grofzandbarrière is gepasseerd. Boven de pipe is een doorgaande cohesieve deklaag nodig. Is deze deklaag ten dele onderbroken door granulaire materiaal, dan zal de pipe niet horizontaal verder groeien, maar dan zal het bovenliggende materiaal worden afgevoerd (zie Figuur 34), hetgeen mogelijk tot tijdelijke verstopping van de pipe en tot vertraging leidt. Hierbij kan de pipe overigens ook een andere route nemen.



Figuur 34 Onderbroken deklaag – pipe groeit niet verder, maar voert bovenliggend (granulair) materiaal af.

Is er wel sprake van een doorgaande cohesieve deklaag, dan kan deze zo nu en dan instorten, zeker naarmate de pipe in omvang toeneemt. Dit vertraagt het proces: het ingestorte materiaal moet namelijk telkens worden afgevoerd. Ook hierbij kan de pipe een andere route nemen.

6 Doorgaande pipe (stap O in de opsomming in §1.3)

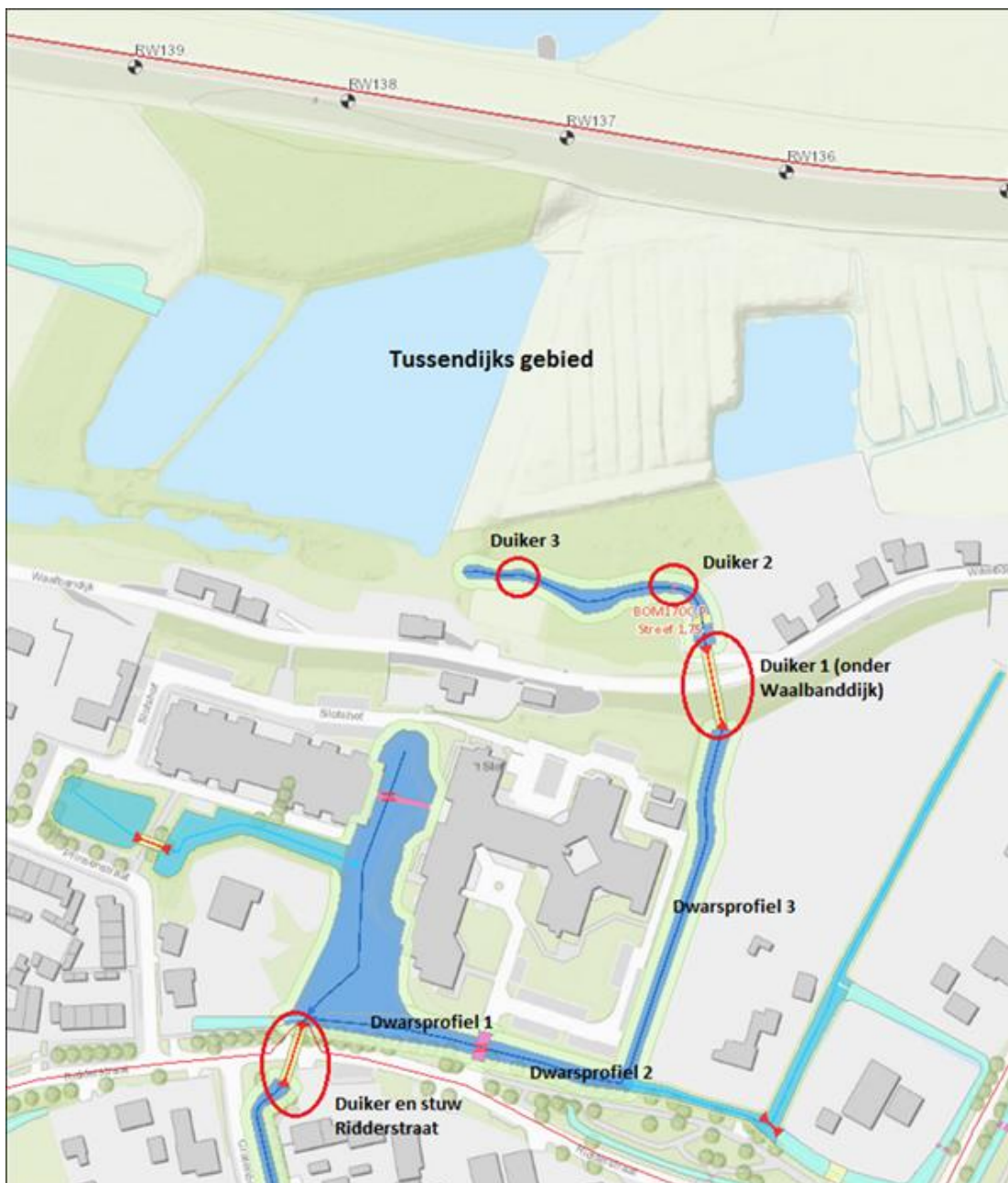
Wanneer de pipe vormt, kan deze bij gelijkblijvend verval een evenwichtssituatie bereiken en dan groeit de pipe alleen verder als het verval toeneemt. Bij overschrijding van een zeker verval, het kritische verval, bereikt de pipe een lengte waarbij deze bij gelijkblijvend verval zal doorgroeien, tenzij bijzondere omstandigheden de pipegroei verstoren, zoals het niet-doorlopen van het pipinggevoelige zandlichaam met een deklaag erboven. De pipe maakt uiteindelijk kortsluiting met het buitenwater bij het intredepunt.

7 Ruimen (stap P in de opsomming in §1.3)

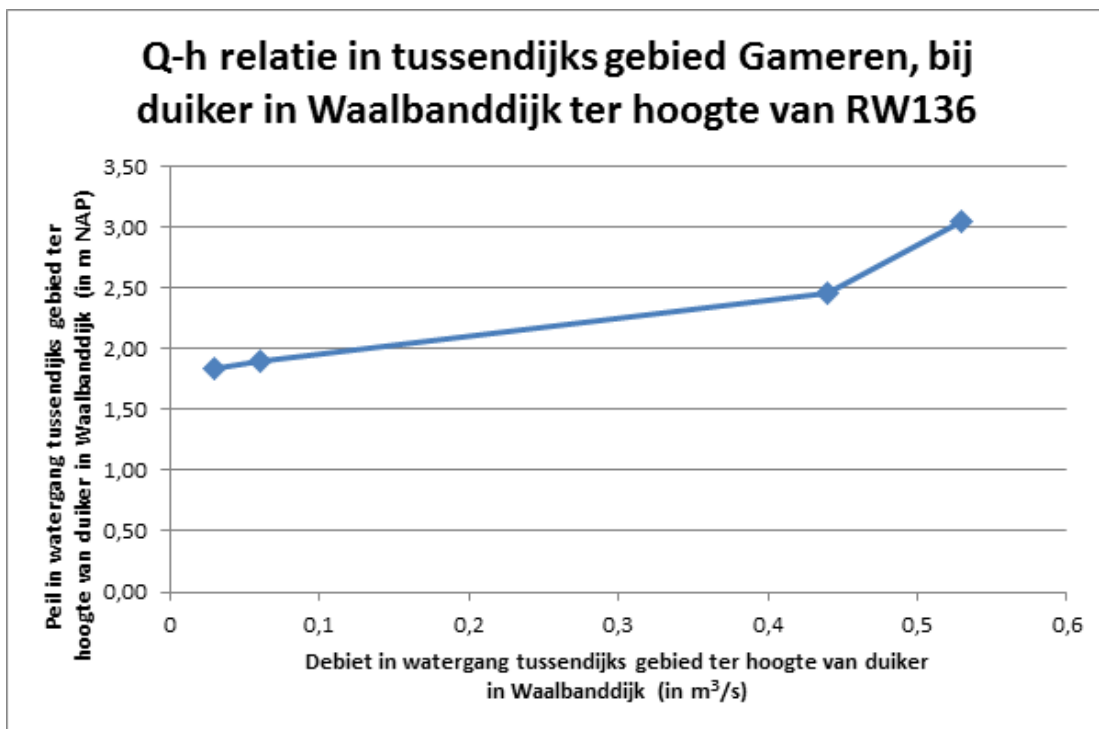
Wanneer de pipe, of pipes, kortsluiting maken met het buitenwater neemt de erosiecapaciteit van het water sterk toe en wordt de pipe verbreed en verdiept. Voorwaarde voor dit proces van 'ruimen' is wel dat het verval hoog blijft. De instroom

van water erodeert het zand in het bovenstroomse, al vergrote deel van de pipe zodanig dat de pipe benedenstrooms af en toe verstopt raakt, maar dergelijke verstoppingen zijn tijdelijk zolang het verval groot genoeg blijft. De pipe raakt telkens weer open doordat de verstopping wordt afgevoerd, of de pipe kiest een andere weg. Door dit proces wordt de pipe van bovenstrooms naar benedenstrooms steeds omvangrijker. Hierdoor zal de deklaag ook gemakkelijker kunnen instorten, maar ook hiervoor geldt dat dit alleen tot vertraging leidt, maar niet tot het stoppen van het proces – tenzij het verval over de kering voldoende klein wordt doordat de buitenwaterstand voldoende daalt en/of de binnenwaterstand voldoende stijgt.

Specifiek voor de situatie bij Gameren geldt dat het peil in het gebied tussen de huidige primaire waterkering en de oude Waalbandijk onder de huidige omstandigheden uiterlijk in deze fase enerzijds niet op het polderpeil gehouden zal kunnen worden, maar anderzijds ook maar in beperkte mate zal stijgen. De onvermijdelijke stijging heeft te maken met de beperkte afvoercapaciteit vanuit dit ‘tussengebied’ naar de achtergelegen polder via de duiker bij RW 136, zie Figuur 35 en Figuur 36.

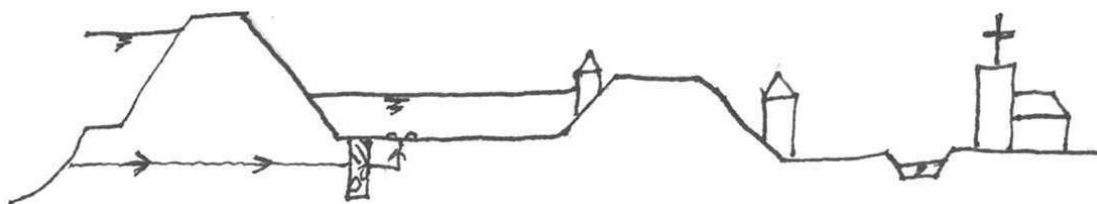


Figuur 35 Polderwaartse afwatering van het gebied tussen de nieuwe dijk (huidige primaire kering, bovenin aangeduid met de doorlopende rode lijn) en de oude Waalbanddijk (halverwege de figuur) bij Gameren (Damen, 2017).



Figuur 36 Verband tussen waterpeil en debiet in duiker onder Waalbanddijk (Damen, 2017).

Dat de stijging van het waterpeil in het tussengebied slechts beperkt zal zijn, heeft te maken met de geohydrologische eigenschappen van het gebied; het peil in het tussengebied zal hierdoor niet veel verder stijgen dan halverwege het verval tussen de Waal en het polderpeil in Gameren, zoals indicatief weergegeven in Figuur 37. Dit betekent weliswaar dat het peil in dit gebied veel hoger zal komen te staan dan het polderpeil, maar lager dan het historische peil dat in 1995 tegen de Waalbanddijk aan stond. Deze dijk is weliswaar niet meer opgenomen in de legger van het waterschap, maar is nog wel aanwezig. Er loopt ook nog steeds een ontsluitingsweg overheen, die lokaal als onmisbaar kan worden gezien. Daardoor is het ook zeer waarschijnlijk dat (in de dwarsdoorsnede) het grootste deel van dit dijklichaam ook in de toekomst aanwezig zal blijven, zonder wezenlijke aantasting van het vermogen om een zeker verval te keren.



Figuur 37 Globale waterpeilen bij Gameren zolang er geen sprake is van een grote open verbinding met het buitenwater.

- 8 Kruinverlaging (stap Q in de opsomming in §1.3)
De holte onder de dijk leidt tot verzakking van de dijk. Daarmee hoeft het proces van erosie via één of meer pipes niet te stoppen; dat is primair afhankelijk van het verval over de dijk. Dat proces kan doorgaan, met verdere verzakkingen tot gevolg.

- 9 Noodmaatregelen ineffectief (stap R in de opsomming in §1.3)
Wanneer pipingverschijnselen op tijd worden waargenomen en effectieve beheersmaatregelen tijdig ingezet worden, in verschillende van de hiervoor genoemde fasen (ook bij andere faalpaden), dan kan het proces richting falen hiermee worden

gestopt. Deze noodmaatregelen zullen dan over het algemeen eerder genomen moeten worden.

De mogelijkheid tot het nemen van maatregelen wordt mede beïnvloed door factoren als de aanwezigheid van voldoende materiaal, materieel en mensen, en het leggen van de juiste prioriteiten daarbij. In het geval van een extreem hoge waterstand en tot dan toe goede ervaringen met de grofzandbarrière, kan er voor worden gekozen om de beperkte beschikbare middelen elders in te zetten. Dan mag worden verwacht dat er bij de grofzandbarrière weinig inzet van noodmaatregelen nodig zal zijn. Dit uitgaande van een goed ontwerp, goede uitvoering en goed beheer van de grofzandbarrière onder dagelijkse omstandigheden.

10 Bresgroei (stap S in de opsomming in §1.3)

Indien de kruinverlaging zodanig is dat er water over de kruin heen stroomt, dan is er sprake van een beginnende bres. Vervolgens zal deze snel of wat langzamer kunnen groeien, afhankelijk van de eigenschappen van de aan de stroming blootgestelde materialen – klei zal minder snel eroderen dan zand. Hierbij moet wel bedacht worden dat een situatie van een gescheurde kleilaag met daaronder een zandkern kan leiden tot uitspoeling van het zand, waarmee er sprake kan zijn van een snelle bresgroei. In de situatie dat er een dunne laag pipinggevoelig zand bovenop een grove laag ligt, is de erosie van alleen de pipinggevoelige zandlaag mogelijk onvoldoende om tot bresvorming te komen.

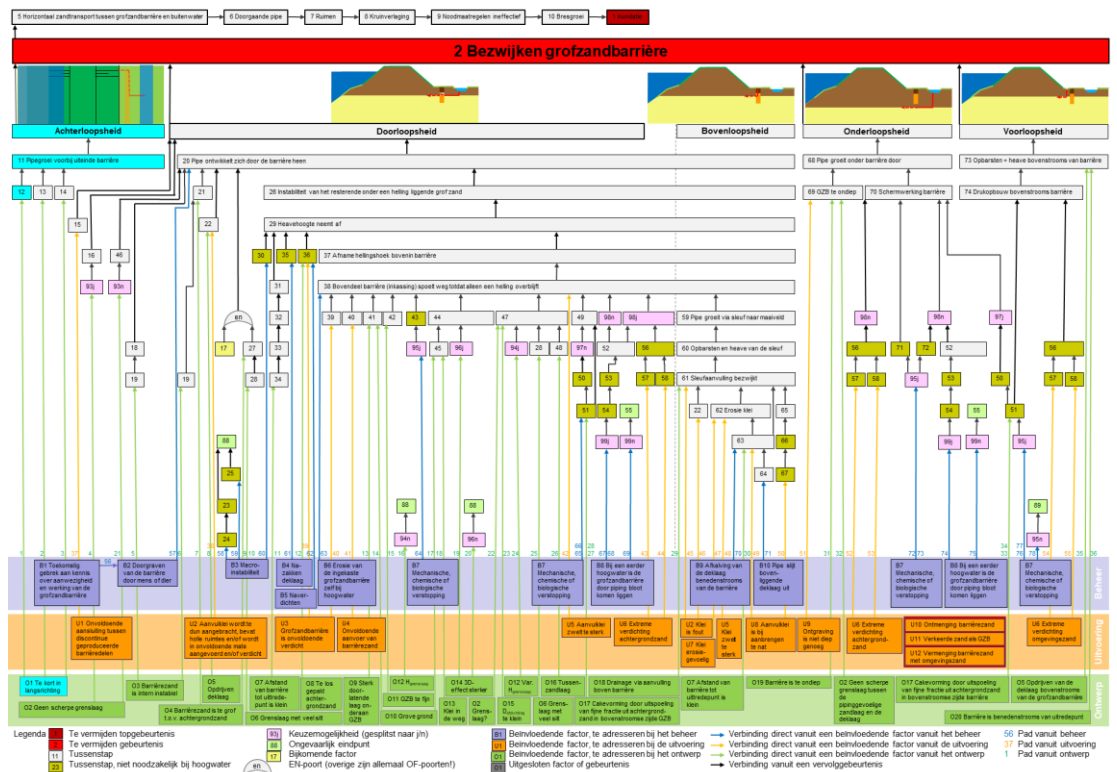
1 Inundatie (topgebeurtenis, stap T in de opsomming in §1.3)

Inundatie betreft de te vermijden topgebeurtenis, die na bresgroei zeker zal optreden. Overigens zijn er vanuit het buitenland ook situaties bekend waarbij een cohesief dijklichaam intact bleef ondanks een metersgroot erosiekanaal eronder. In zo'n situatie leidt knooppunt 7 (ruimen) tot knooppunt 1 (inundatie) en worden de knopen 8, 9 en 10 omzeild.

In alle gevallen geldt dat het passeren van de verschillende knooppunten doorgaans enige tijd vergt. Het is bij veel knopen echter nog niet goed mogelijk om een goede schatting te maken van de tijdscomponent.

5.4 Voorbeeld van achterloopsheid: pipegroei voorbij het uiteinde

Het tweede voorbeeld betreft het faalpad dat uiterst links in de foutenboom staat en tot falen door achterloopsheid kan leiden. Dit betreft 'faalpad 1' en is in lichtblauw uitgelicht in Figuur 38.



Figuur 38 Faalpad 1: achterloopsheid door pipegroei voorbij het uiteinde van de grofzandbarrière.

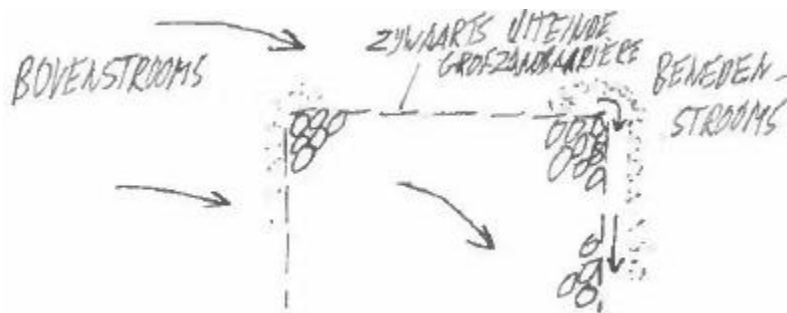
Dit faalpad bestaat uit de volgende onderdelen:

- O1 Barrière is niet lang genoeg in de lengterichting van de waterkering

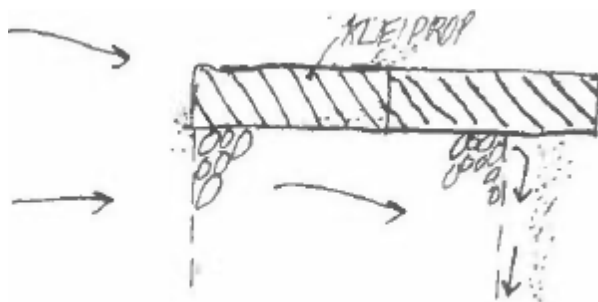
De grofzandbarrière biedt aan het uiteinde de mogelijkheid om gepasseerd te worden door pipegroei; een afdoende afsluiting tegen bijvoorbeeld de zijdelingse pipegroei langs de benedenstroomse zijde (zie Figuur 28) of aansluiting op andere constructies ontbreekt. Vanwege de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière is het ver genoeg doorzetten van de grofzandbarrière tot een plaats waarbij piping zonder grofzandbarrière is uit te sluiten of voldoet niet zo eenvoudig als dat op het eerste gezicht lijkt. Deze pipegroei wordt primair aangedreven door de hoge doorlatendheid van de grofzandbarrière en zal zich daardoor voortzetten tot in het gebied dat aanvankelijk voldeed tegen piping. Hierdoor is het proces van achterloopsheid bij een grofzandbarrière wezenlijk verschillend van achterloopsheid bij ondoorlatende constructies.

- 12 Eindafsluiting is te doorlatend

Wanneer er geen aanvullende maatregelen getroffen worden aan het uiteinde van de barrière, dan kan de zijdelingse pipegroei doorlopen tot aan het uiteinde en daar de hoek omgaan, zie Figuur 39. Als maatregel hiertegen kan bijvoorbeeld aan het uiteinde een slechtdoorlatende kleirop worden aangebracht, zoals aangegeven in Figuur 40. Bij deze maatregel is het van belang dat de kleirop uitsteekt in benedenstroomse richting om zo de kans op passage uit te sluiten. NB: In bijlage A zijn bij alle beïnvloedende factoren waar mogelijk voorbeelden van tegenmaatregelen aangegeven.



Figuur 39 Zijdelingse pipegroei bij uiteinde grofzandbarrière (bovenaanzicht).



Figuur 40 Klei prop ter afsluiting van uiteinde grofzandbarrière (doorgezet benedenstrooms van barrière; bovenaanzicht)

11 Pipegroei voorbij uiteinde barrière

De volgende stap, waarvan het begin eigenlijk al hiervoor is beschreven en geïllustreerd, is dat de pipegroei na een haakse bocht de barrière gaat passeren.

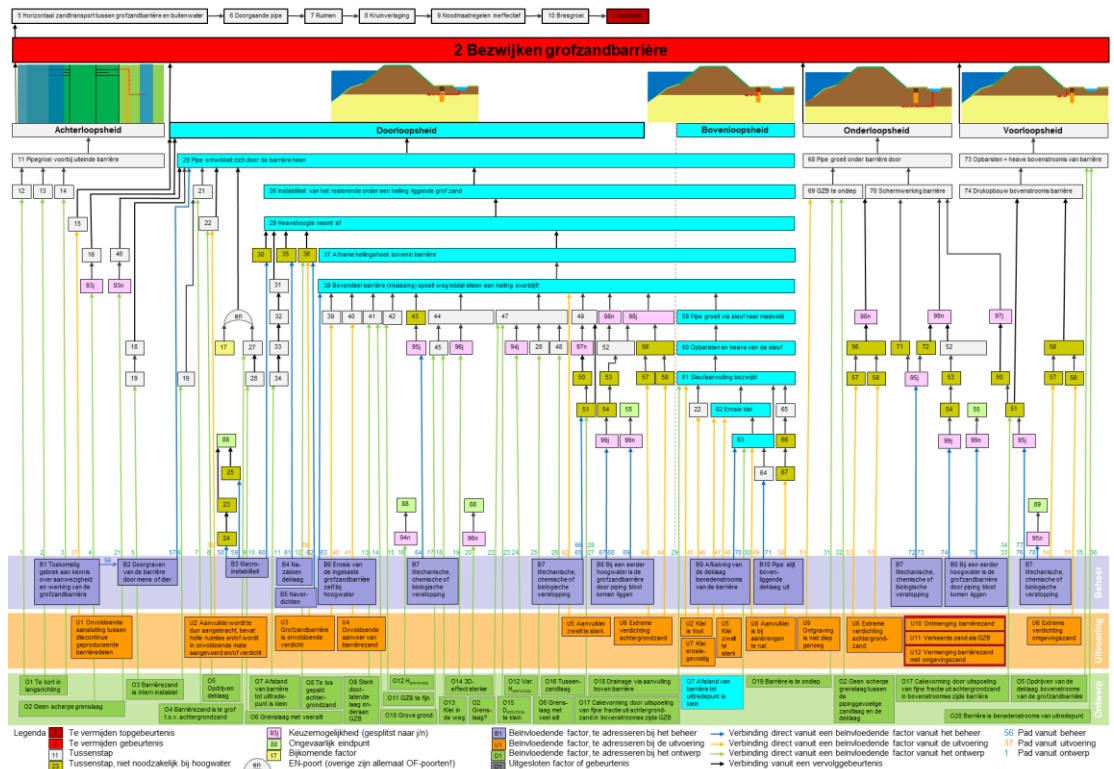
Achterloopsheid

De pipe groeit achter de grofzandbarrière langs en er is sprake van achterloopsheid (zie §3.2).

Zoals eerder aangegeven is het vervolg voor alle faalpaden in grote lijnen hetzelfde is en al beschreven in §5.3 vanaf 'doorloopsheid'.

5.5 Voorbeeld van bovenloopsheid: uittredepunt te dichtbij

Het derde uitgewerkte voorbeeld van een faalpad betreft een situatie waarin bovenloopsheid optreedt: boven de grofzandbarrière is er sprake van stroming naar het maaiveld, in plaats van dat deze lekgeweg afgesloten blijft door de klei in de sleufaanvulling. Hier wordt ingegaan op de situatie van bovenloopsheid die het gevolg is van een te kleine afstand tussen de grofzandbarrière en het uittredepunt. In de foutenboom is dit te vinden als faalpad 30. Dit is weer tot aan het bezwijken van de grofzandbarrière uitgelicht in blauw, zie Figuur 41. Het startpunt wordt gevormd door de beïnvloedende factor O7, die óók ten grondslag ligt aan faalpad 11, dat tot doorloopsheid leidt. Dat faalpad is beschreven in §C.1.11.



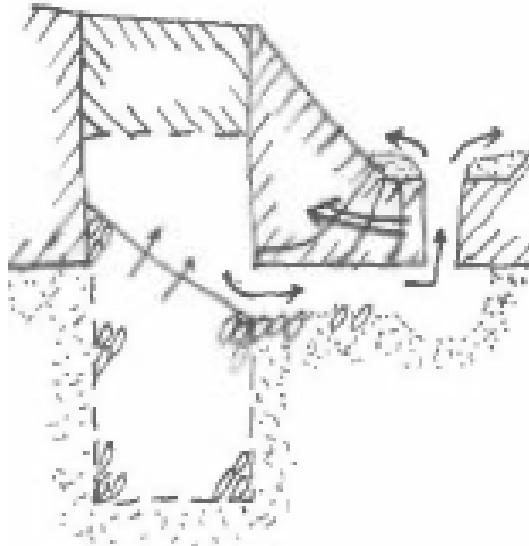
Figuur 41 Faalpad 30: Nabijheid van het uittredepunt leidt tot aanvullende problemen met bovenloopsheid.

O7 Afstand van barrière tot uittredepunt is klein

De nabijheid van het uittredepunt kan leiden tot aanvullende problemen, doordat verschillende erosieprocessen met elkaar gaan interfereren.

63 Erosie deklaag nabij barrière

De deklaag erodeert, bijvoorbeeld in de volgorde zoals aangeven in Figuur 42: eerst bij het uittredepunt (dat hierdoor in bovenstroomse richting opschuift), daarna ook langs de onderkant van de deklaag. Vanwege de korte afstand tot de barrière betreft dit allebei 'erosie nabij barrière'.



Figuur 42 Erosie deklaag bij een uittredepunt nabij de grofzandbarrière.

- 62 Erosie van klei uit aanvulling
Hierna kan de klei uit de sleufaanvulling eroderen (bij andere oorzaken kan dat overigens ook zonder dat de deklaag benedenstrooms verdwenen is).
- 61 Sleufaanvulling bezwijkt
De volgende stap is dat de sleufaanvulling bezwijkt, dat wil zeggen: geen volledige afsluiting meer vormt tussen barrièrezand en maaiveld. Dit kan gebeuren als de sleufaanvulling van onderaf verder erodeert. Het kan zich ook voordoen in de vorm van opbarsten, waarbij de waterdruk van onderaf de sleufaanvulling doet bezwijken. Dit kan optreden ondanks dat de sleufaanvulling op opbarsten ontworpen is, als gevolg van de erosie van onderaf. Dan valt dit feitelijk onder het volgende punt.
- 60 Opbarsten en heave van de sleuf
De vorige stap leidt, bij voldoende stromingsdruk, vervolgens tot heave van de sleuf, na eventueel opbarsten.
- 59 Pipe ontwikkelt zich door de sleuf naar het maaiveld
Hierna ontwikkelt de pipe zich via de sleuf naar het maaiveld. Bij deze oorzaak en het hiervoor beschreven faalpad zal op dit punt in één of meer doorsneden overigens een geheel open verbinding zijn ontstaan tussen het oorspronkelijke uittredepunt en de sleuf.

Bovenloopsheid

*Er ontstaat kortsluiting naar het maaiveld via de afdichting boven de grofzandbarrière (zie §3.4). Er is dan sprake van een kwelstroom via de sleuf. Dit leidt echter niet direct tot falen: de barrière biedt nog steeds weerstand. **Bovenloopsheid impliceert dus nog géén falen.** Wel zal de totale weerstand benedenstrooms (als in: stroomafwaarts) van de eigenlijke grofzandbarrière verkleind zijn (tenzij de bovenkant van de sleuf zo hoog ligt dat er uiteindelijk geen kwelstroming optreedt, doordat de stijghoogte ter plaatse lager is dan het maaiveld).*

Er treedt dan een herverdeling op van de waterdrukken, waarbij het gedeelte benedenstrooms van de eigenlijke grofzandbarrière (dus: de benedenstroomse pipe(s) en de sleuf samen) een kleiner deel van het verval keren, wat dan gecompenseerd zal moeten worden door het verval over de eigenlijke grofzandbarrière en het achtergrondzand bovenstrooms van de grofzandbarrière samen. De toename van het verval over de eigenlijke grofzandbarrière zelf zal relatief gering zijn: het grootste deel

van het verval zal nog steeds worden opgenomen door het gedeelte bovenstrooms van de grofzandbarrière.

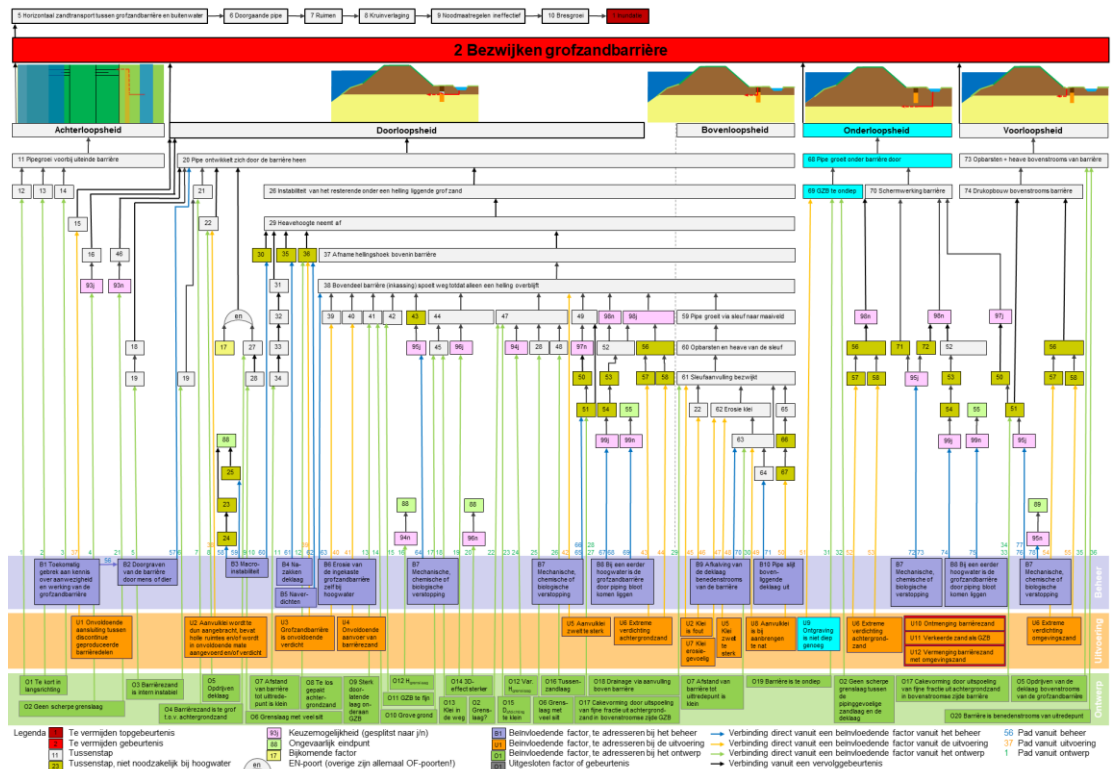
Om tot falen van de waterkering te komen is nog steeds de reeks van stappen nodig die in de vorige paragrafen is beschreven. Van de meeste daarvan zijn hieronder alleen de titels herhaald, tot aan 'doorlooptheid', de beschrijvingen zijn te vinden in §5.3.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft
Bij oorzaak O7 is er al sprake van een benedenstroomse pipe, daardoor ook van uitspoeling van de inkassing (zie Figuur 42). In andere gevallen die tot bovenlooptheid leiden, met name faalpaden 45 t/m 50 (zie §§C.2.9 t/m C.2.14), zal het betreffende faalpad wanneer dit als enige faalpad optreedt (dus zonder benedenstroomse pipe) slechts tot falen leiden indien er heave optreedt van de gehele, gevulde inkassing. Dit is echter zuiver theoretisch: wanneer een grofzandbarrière wordt toegepast als maatregel tegen piping, dan mag in de praktijk altijd pipevorming worden verwacht voordat er sprake zal zijn van bezwijken door heave via de sleuf. Dit is dan ook niet als apart faalpad opgenomen.

- 37 Afname hellingshoek bovenin barrière.
 - 29 Heavehoogte neemt af.
 - 26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand.
 - 20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen.
- Doorlooptheid.

5.6 Voorbeeld van onderlooptheid: ontgraving niet diep genoeg

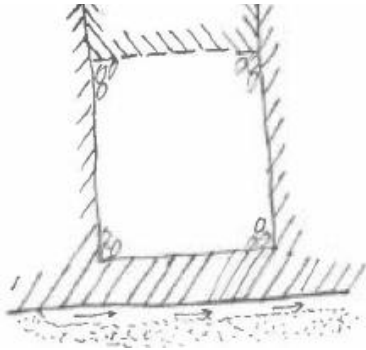
Het vierde uitgewerkte voorbeeld betreft faalpad 51, dat in lichtblauw is weergegeven in Figuur 43. Hierbij is de uitvoering niet goed gegaan en is daar niet op ingegrepen.



Figuur 43 Faalpad 51: In de uitvoering reikt de ontgraving niet diep genoeg, waardoor de pipe onder de barrière door kan groeien.

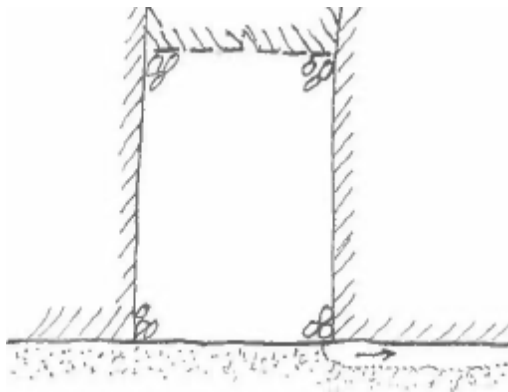
U9 Ontgraving is onvoldoende diep

Als bij de uitvoering onvoldoende diep wordt gegraven, dan is er sprake van de situatie zoals geschetst in Figuur 44: de grofzandbarrière steekt niet tot in de pipinggevoelige zandlaag.

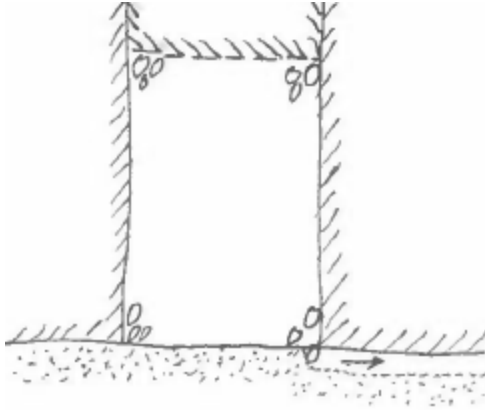


Figuur 44 Barrière is te ondiep en steekt niet tot in de pipinggevoelige zandlaag.

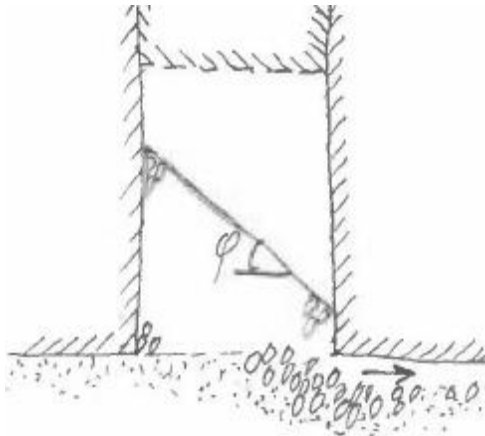
Als de grofzandbarrière juist tot aan de pipinggevoelige zandlaag steekt (zie Figuur 45), dan zal de pipe niet zomaar voorbij de grofzandbarrière kunnen groeien: de korrels van de grofzandbarrière zullen in de pipe vallen (zie Figuur 46). De grove korrels zullen net als anders niet ver weg getransporteerd worden, maar er zal een combinatie ontstaan van een 'plaveisel' in het meest nabije gedeelte van de benedenstroomse pipe (net als anders), en een verzakte grofzandbarrière doordat het fijne zand eronder deels zal eroderen (zie Figuur 47). Uiteindelijk ontstaat er net zo'n uiterste toestand als bij een grofzandbarrière die wél een eindje in de pipinggevoelige zandlaag steekt (zie Figuur 48), al zal het vanwege het deels wegzakken van de barrière in de ondergrond wat rommeliger uitzien en zijn tussenliggende fasen moeilijker te modelleren. De zijdelingse pipeontwikkeling aan de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière zal ook normaal kunnen plaatsvinden.



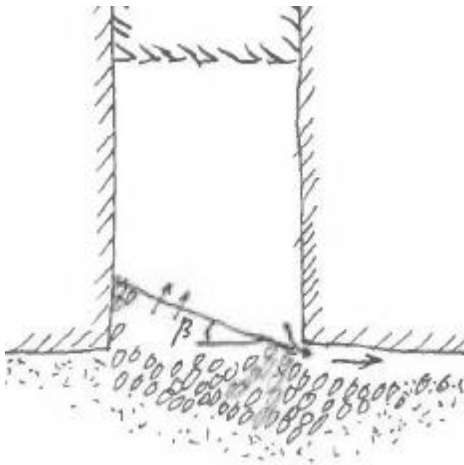
Figuur 45 Pipegroei tot aan een grofzandbarrière die net tot aan de pipinggevoelige zandlaag is aangebracht.



Figuur 46 Vervolg op voorgaande figuur: eerste korrel vanuit de grofzandbarrière in de benedenstroomse pipe.



Figuur 47 Vervolg op voorgaande figuur: deels verzakte grofzandbarrière, deels leeggelopen inkassing en plaveisel met grove korrels in de benedenstroomse pipe.



Figuur 48 Uiterste situatie bij een grofzandbarrière die net tot aan de pipinggevoelige zandlaag is aangebracht.

NB: vanwege de variatie in de ligging van de bovenzijde van de pipinggevoelige zandlaag, meetonnauwkeurigheden bij het grondonderzoek, meetonnauwkeurigheden in de uitvoeringsfase en materieeltoleranties zal er voor het ontwerp nog steeds moeten worden uitgegaan van een grofzandbarrière die enigermate tot in de pipinggevoelige zandlaag steekt. Aangezien een dieper gelegen grofzandbarrière meer water trekt van onderaf, is een zo ondiep mogelijke grofzandbarrière vanuit ontwerpogpunt het meest

gunstig. Dit is bovendien gunstiger voor de uitvoering, zowel qua kosten als voor de te leveren inspanning.
 Voor de pilot bij Gameren is geen nadere aandacht besteed aan deze optimalisatiemogelijkheid; dit zou bij een vervolgtoeepassing nader onderzocht kunnen worden.

69 Barrière steekt niet diep genoeg; niet tot in de pipinggevoelige zandlaag
 Deze stap is hiervoor bij de beschrijving van de 'beïnvloedende factor U9' al uitgebreid toegelicht.

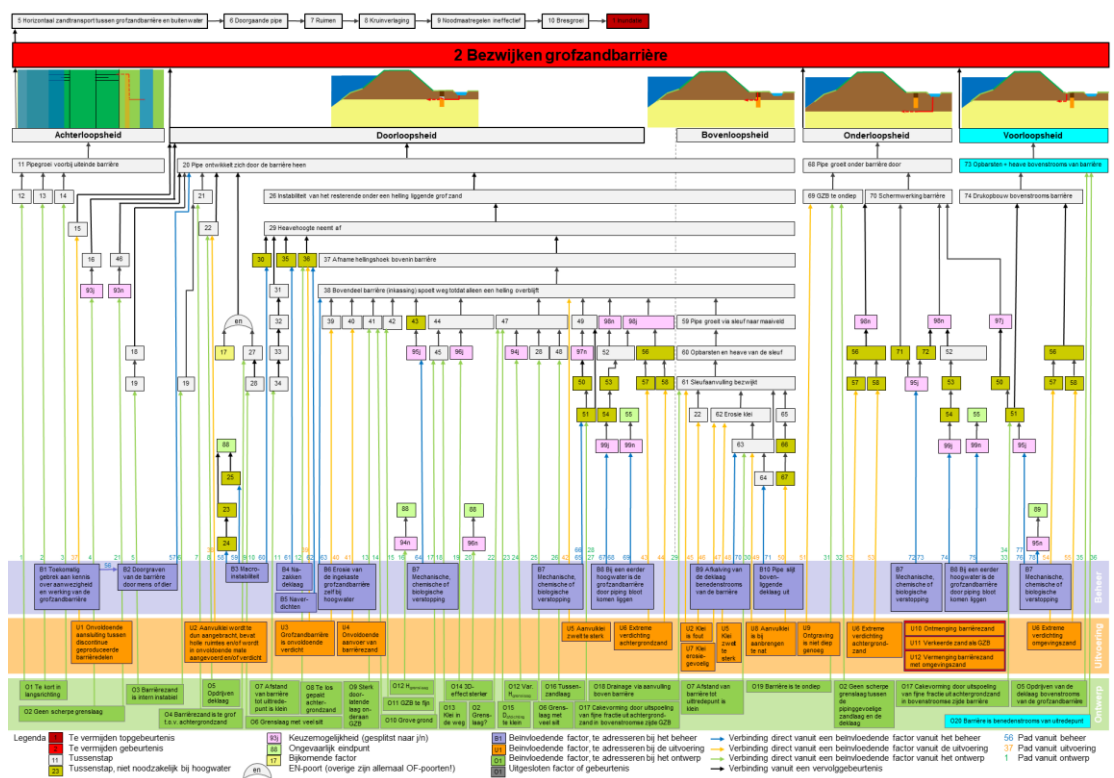
68 Pipe groeit onder de grofzandbarrière door
 De pipe zal onder een grofzandbarrière die niet tot in de pipinggevoelige laag reikt doorgroeien, zoals geschetst in Figuur 44.

Onderloopsheid

De pipe ontwikkelt zich onder de barrière door, zodat er sprake is van onderloopsheid (zie §3.5).

5.7 Voorbeeld van voorloopsheid: barrière is benedenstrooms van het uittredepunt

Het laatste voorbeeld dat hier nader is uitgewerkt betreft faalpad 36, dat in lichtblauw is weergegeven in Figuur 49. Hierbij is de grofzandbarrière ineffectief omdat falen door opbarsten, heave en/of piping eenvoudigweg plaatsvindt in het gedeelte tussen de dijk en de grofzandbarrière.



Figuur 49 Faalpad 36: De grofzandbarrière ligt benedenstrooms van het uittredepunt, waardoor voorloopsheid optreedt en de grofzandbarrière niet wordt aangesproken.

O20 Barrière is benedenstrooms van uittredepunt

Het uittredepunt voor piping of heave, nadat daarvoor zo nodig opbarsten is opgetreden, ligt bovenstrooms van de grofzandbarrière. Met andere woorden: de maatregel ligt te ver in de polder.

73 Opbarsten en heave bovenstrooms van de barrière

Voor zover nodig treden eerst opbarsten en eventueel heave op, bovenstrooms van de barrière.

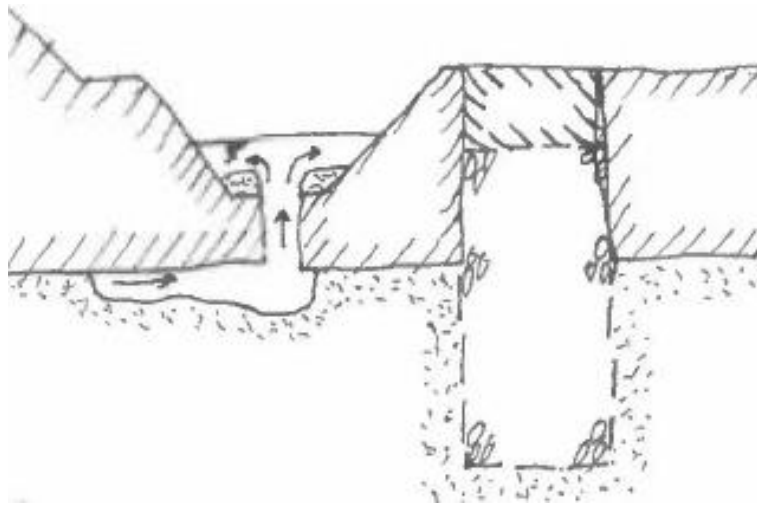
Om te voorkomen dat dit kan gebeuren, zal het gebied tussen de dijk en de grofzandbarrière gecontroleerd moeten worden op eventuele uittredepunten en de veiligheid tegen opbarsten en heave. Zo nodig moet een ophoging of grondverbetering worden toegepast teneinde dit te voorkomen. Mits inpasbaar, kan de grofzandbarrière het beste zo dicht mogelijk bij de dijk worden aangelegd als voor de uitvoering nog werkbaar is.

In Gameren lag de positie van de grofzandbarrière al in een vroeg stadium vast. Enkele verkennende berekeningen lieten echter zien dat een alternatieve locatie verder landinwaarts slechts weinig uitmaakte voor de efficiëntie van de maatregel (Koelewijn et al., 2021). In verband met opbarsten zouden hier echter wel aanvullende maatregelen moeten zijn getroffen.

De controle op opbarsten en heave heeft voor Gameren geleid tot de aanbevelingen om over een kleine afstand (minder dan 20 m) het bestaande maaiveld nabij het tracé van de grofzandbarrière met maximaal 0,3 m te verhogen en op een ander gedeelte, met een lengte van 100 m, het bestaande maaiveld met maximaal 1 m te verhogen. Deze berekeningen zijn gerapporteerd in Koelewijn (2021).

Voorloopsheid

Het faalmechanisme piping, of anders wel heave, treedt op bovenstrooms van de grofzandbarrière, zodat deze ineffectief is (zie Figuur 50). Daarmee treedt voorloopsheid op (zie §3.6).



Figuur 50 Voorloopsheid door grofzandbarrière benedenstrooms van het uittredepunt.

6 Ontwerp van een grofzandbarrière

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt het ontwerp van een grofzandbarrière behandeld, geïllustreerd aan de hand van het Definitief Ontwerp voor de grofzandbarrière bij Gameren. Zoals bij vrijwel ieder concreet ontwerp is ook hier sprake geweest van een iteratief proces: regelmatig zal er een stap (of meerdere stappen) terug moeten worden gezet. De hier aangegeven volgorde, in elf stappen, lijkt op basis van de ervaringen voor Gameren de meest logische volgorde – al is voor dat ontwerp, dat meer in detail beschreven is in Koelewijn et al. (2021) en in bijlage E, destijds deels een andere volgorde gehanteerd.

6.2 Samenstelling barrièrezand

De samenstelling van het barrièrezand moet aansluiten bij het aangrenzende achtergrondzand. Het mag niet té grof zijn, opdat het achtergrondzand er niet doorheen spoelt. Tegelijkertijd moet het wel een zo groot mogelijke doorlatendheid hebben, omdat dit de effectiviteit van een grofzandbarrière sterk vergroot. Tot slot moet het barrièrezand intern stabiel zijn: de fijnere fractie mag er niet uit kunnen spoelen.

Om te bepalen of het barrièrezand niet te grof is (dit betreft beïnvloedende factor O4), wordt gebruik gemaakt van de criteria voor geometrisch dichte filters van Terzaghi, zoals bijvoorbeeld vermeld door Lambe & Whitman (1979):

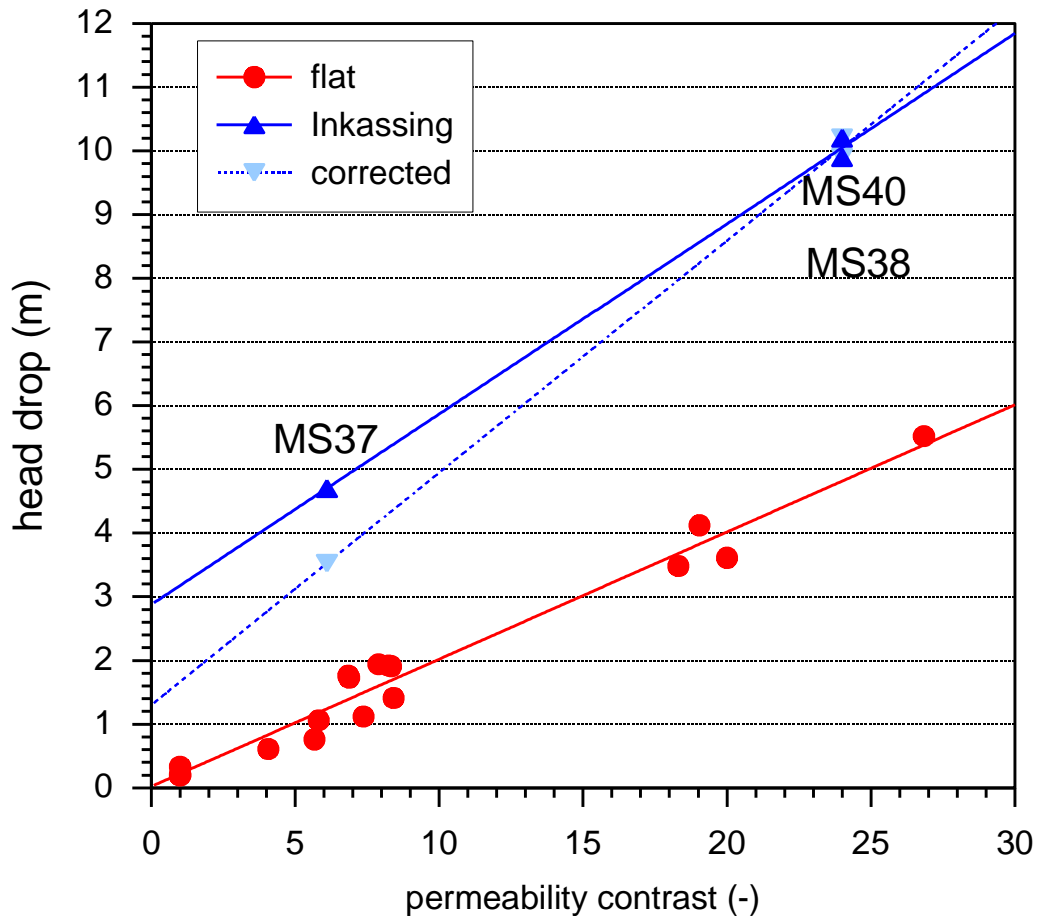
$$d_{15,GZB} < 5 * d_{85,a} \tag{6.1}$$

$$d_{15,GZB} < 20 * d_{15,a} \tag{6.2}$$

$$d_{50,GZB} < 25 * d_{50,a} \tag{6.3}$$

Hierin staat $d_{x,GZB}$ voor de x-percentielwaarde van de korrelverdeling van het barrièrezand, terwijl voor het achtergrondzand als subscript a wordt gebruikt. Voor verdere overwegingen wordt verwezen naar §A.1.4.

De effectiviteit van de grofzandbarrière hangt in belangrijke mate samen met het doorlatendheidscontrast: de verhouding tussen de doorlatendheid van de barrière en de doorlatendheid van het achtergrondzand, zie Figuur 51 voor dit verband bij de laboratoriumproeven op medium-schaal bij Deltares.



Figuur 51 Verband tussen keerbaar verval (verticale as) en doorlatendheidscontrast (horizontale as) voor de medium-schaal opstelling, voor zowel een vlakke grofzandbarrière als een grofzandbarrière met een inkassing (Förster, 2021a).

Hoe groter het doorlatendheidscontrast is, hoe groter naar verhouding de toelaatbare gradiënt bovenstrooms van de grofzandbarrière kan worden – bij eenzelfde toelaatbare gradiënt in de grofzandbarrière kan dan een hoger verval over de dijk worden gekeerd. Daarom is het van belang om bij de selectie van het barrièrezand te zoeken naar een mengsel dat een zo groot mogelijke doorlatendheid heeft.

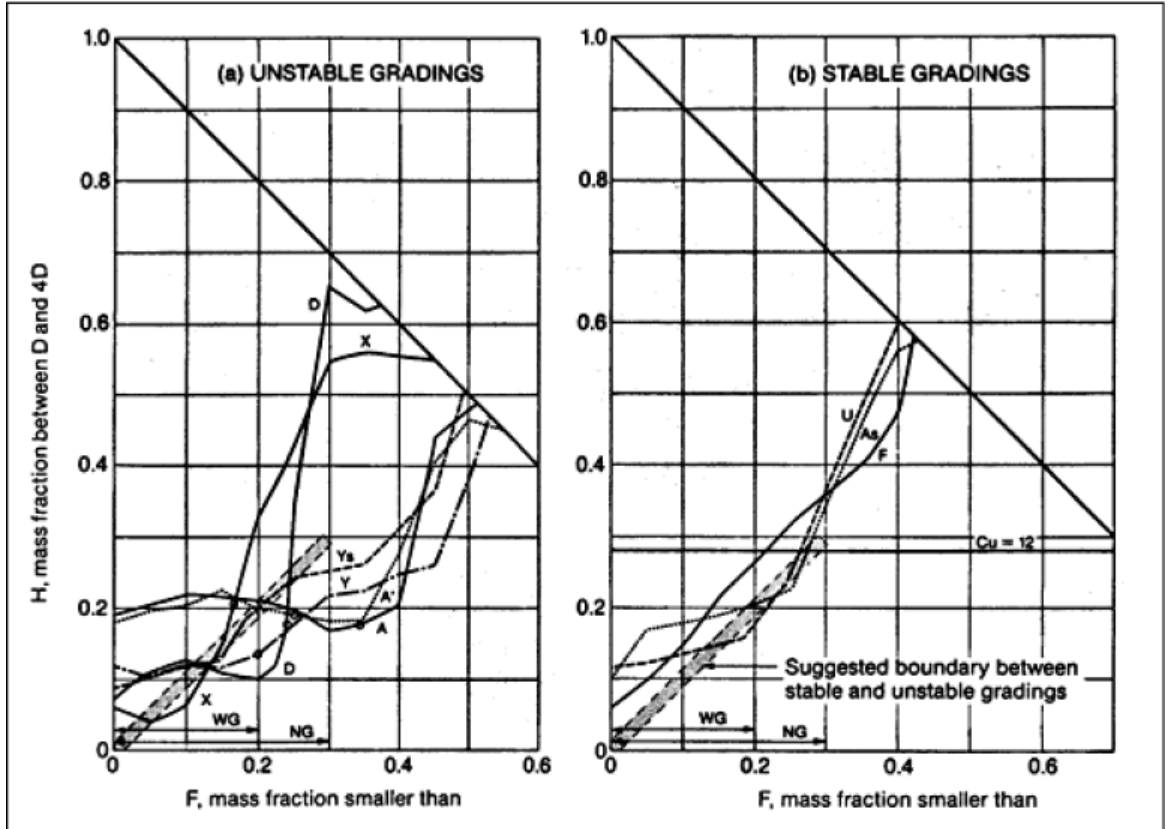
Tot slot moet het barrièrezand ook intern stabiel zijn. Interne instabiliteit wil zeggen dat de fijnste fractie van een zandmengsel kan uitspoelen door de poriën, waardoor in vervolg daarop ook een minder fijne fractie kan uitspoelen. In natuurlijke zanden zoals die in Nederland buiten Limburg worden aangetroffen vormt dit geen probleem, maar bij een kunstmatig samengesteld materiaal vormt dit wel een risico.

Voor interne stabiliteit zijn in de literatuur uiteenlopende criteria te vinden. Voor de grofzandbarrière is gekozen voor twee sets eisen waarmee bij Deltares ervaring is en die, in wisselende mate, ook internationaal worden gebruikt: de criteria van Kenney & Lau en van Burenkova.

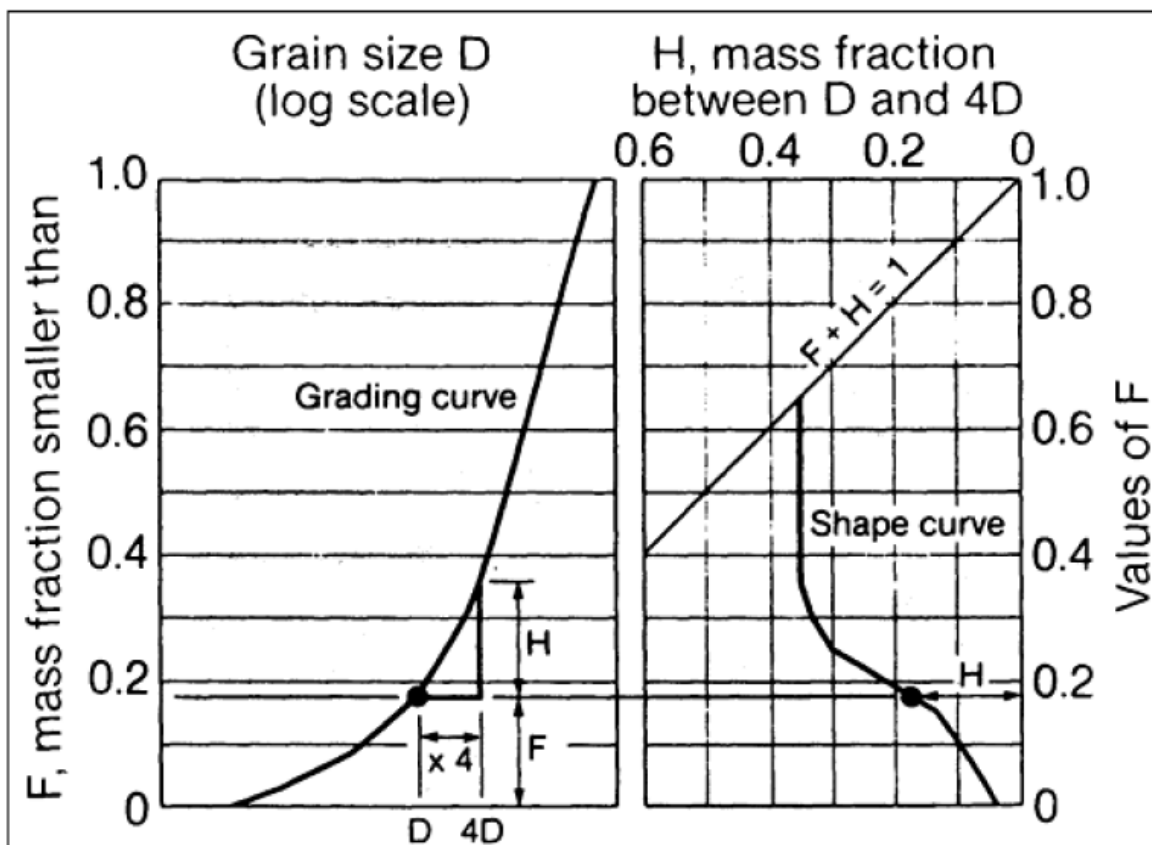
Kenney & Lau (1985, 1986) hebben experimenteel vastgesteld dat er *waarschijnlijk* interne instabiliteit zal optreden indien de massafractie in de korrelverdeling tussen korrelgrootte D^9 en $4D$, afgekort als H , kleiner is dan de massafractie kleiner dan D , afgekort als F , en het buigpunt in de korrelverdelingscurve kleiner is dan 0,2 voor ruime graderingen en 0,3 voor

⁹ In deze rapportage wordt verder voor de korrelgrootte, in afwijking van Kenney & Lau, een kleine letter d gebruikt.

uniforme graderingen. In Figuur 52 en Figuur 53 zijn voorbeelden gegeven van de toepassing van dit criterium (overgenomen uit ICOLD, 2017).



Figuur 52 Methode voor het bepalen van interne instabiliteit van Kenney & Lay (1985), met de aangepaste criteria uit Kenney & Lau (1986) – figuur overgenomen uit ICOLD (2017).



Figuur 53 Methode om de vorm van een korrelverdelingsdiagram te karakteriseren (Kenney & Lau, 1986) – figuur overgenomen uit ICOLD (2017).

Door Burenkova (1993) zijn op basis van een groot aantal experimenten twee nadere criteria voorgesteld. Deze geven grenzen aan de verhouding tussen de grovere fractie en het geheel; niet te grof, niet te fijn, gebaseerd op de korrelgroottefracties d_{15} , d_{60} en d_{90} :

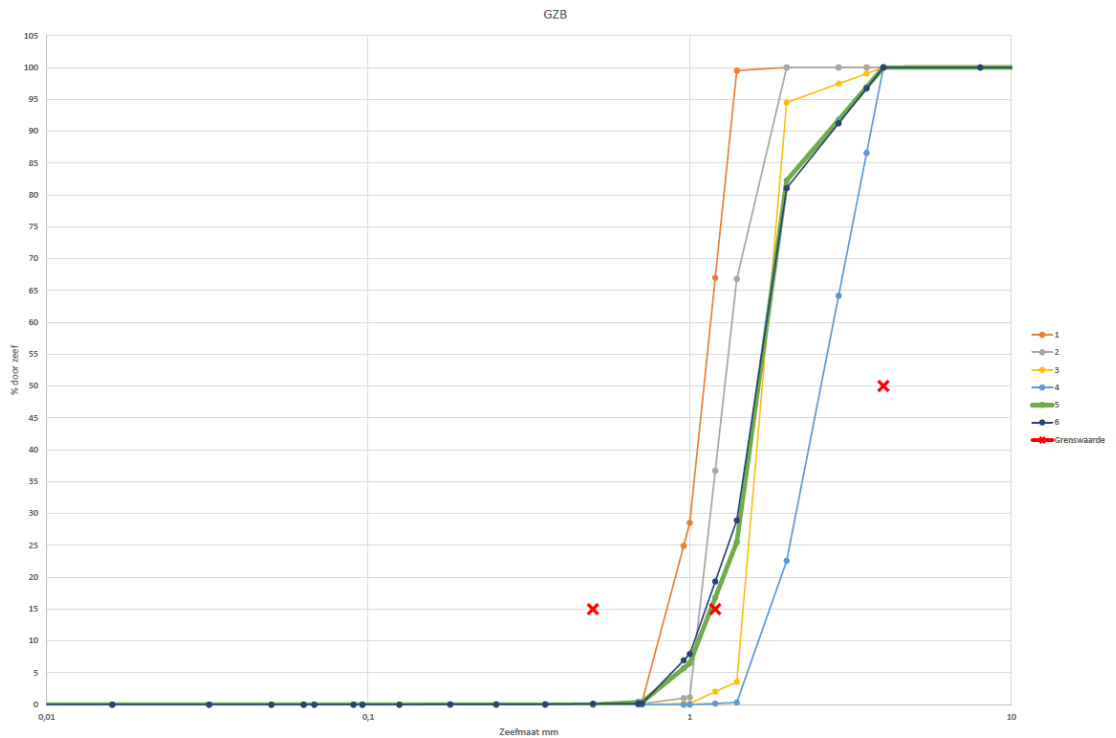
$$0.76 \log (d_{90,GZB}/d_{15,GZB}) + 1 < d_{90,GZB}/d_{60,GZB} \quad (6.4)$$

$$d_{90,GZB}/d_{60,GZB} < 1.86 \log (d_{90,GZB}/d_{15,GZB}) \quad (6.5)$$

Voor aanvullende details wordt verwezen naar §A.1.3.

De korrelverdeling van het grofzandmengsel dat voor Gameren is geselecteerd, is als dikke groene lijn weergegeven in Figuur 54. Het rode kruisje bij 50%, rechts van de lijnen, is de grenswaarde die volgt uit vergelijking (6.3) en het rechtse rode kruisje bij 15% is de grenswaarde die volgt uit vergelijking (6.2)¹⁰. Deze waarde is maatgevend ten opzichte van de waarde uit vergelijking (6.1) voor de beschikbare korrelverdelingen. De doorlatendheid daarvan is iets groter dan de waarde zoals bepaald voor het GZB3-mengsel, waarmee alle in deze rapportage vermelde berekeningen zijn uitgevoerd. Het toegepaste mengsel voldoet aan de eisen voor interne stabiliteit.

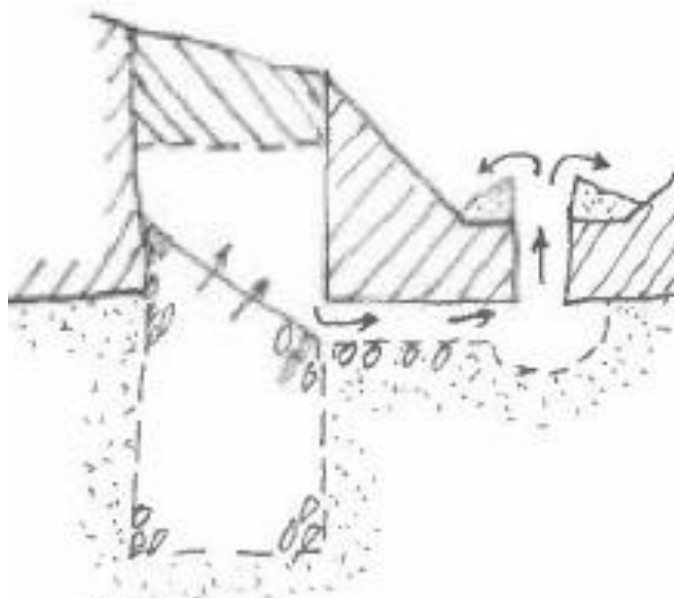
¹⁰ Het linkse rode kruisje houdt verband met een vuistregel voor voldoende doorlatendheid van een filter, maar de eisen aan de doorlatendheid van een grofzandbarrière liggen hoger dan de eisen aan een 'gewoon' filter, zie ook de passage rond Figuur 51.



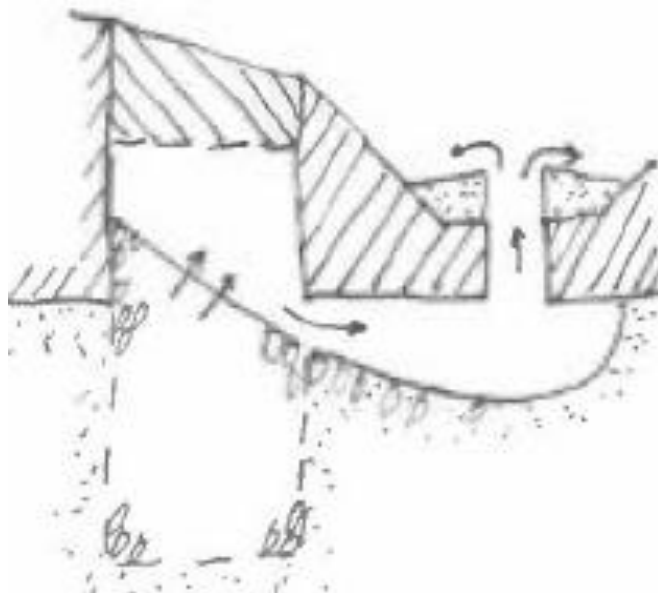
Figuur 54 Grenswaarden (rode kruisjes) en geselecteerde grofzandbarrière mengsel voor Gameren (groene lijn) (horizontale as: korreldiameter, op een logaritmische schaal verlopend van 0,01 mm naar 10 mm, verticale as: % door de bijbehorende zeef, op een lineaire schaal verlopend van 0 tot 110%).

6.3 Positie grofzandbarrière in dwarsprofiel

Voor de positie van de grofzandbarrière in het dwarsprofiel geldt allereerst dat interferentie van de erosieprocessen bij het uittredepunt en bij de grofzandbarrière vermeden moet worden. Het gaat hierbij in de eerste plaats om de erosielen in de zandlaag nabij het uittredepunt, zie Figuur 55. Bij een korte afstand tot de grofzandbarrière kan deze lens bij verdere groei direct invloed hebben op de helling in de grofzandbarrière, zie Figuur 56.



Figuur 55 Uittredepunt nabij de grofzandbarrière: beginnende erosielen onder uittredepunt.



Figuur 56 Uittredepunt nabij de grofzandbarrière: erosielenegegroeid tot aan benedenstroomse rand van grofzandbarrière.

Een vergelijkbaar probleem ontstaat wanneer het uittredepunt door erosie van de deklaag opschuift richting de waterkering.

Als praktische maat wordt voornamelijk nog aanbevolen om minimaal 5 m aan te houden tussen de grofzandbarrière en het uittredepunt, zodat de erosieleneg niet tot aan de grofzandbarrière reikt en ook de toepassing van een noodmaatregel als het storten van materiaal bij excessieve erosie tot aan het maaiveld nog uitvoerbaar blijft¹¹.

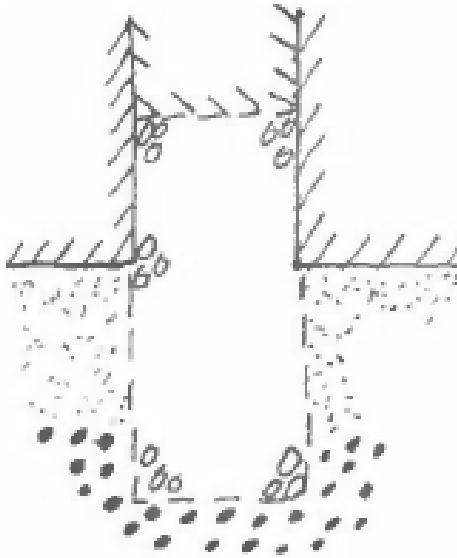
In Gameren ligt de grofzandbarrière op 5 meter uit de binnenteen van de dijk, dit op basis van een bestuurlijke afspraak. Het verwachte uittredepunt ligt overal tenminste 15 meter verder van de dijk af.

6.4 Diepte grofzandbarrière in zandlaag

De grofzandbarrière moet minimaal tot aan de pipinggevoelige zandlaag reiken, zoals uiteengezet in §A.1.19. Om praktische redenen, zoals de uitvoeringsnauwkeurigheid en het eventueel voorkomen van tussenzandlagen in de deklaag boven de pipinggevoelige zandlaag, is een voorziene diepte van 0,5 tot 2 m aan te bevelen. In Gameren is uitgegaan van een diepte van 1 m in de zandlaag, die navolgend is onderbouwd.

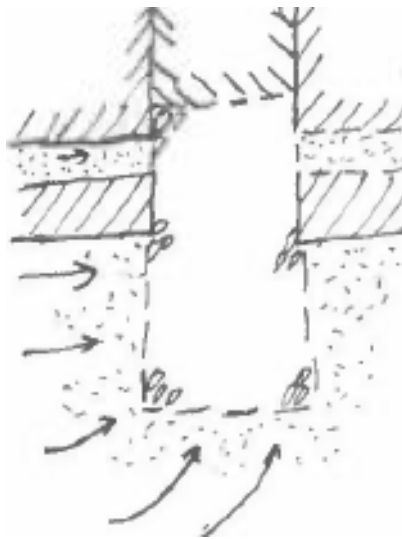
Een dieperliggende grofzandbarrière betekent niet alleen een grotere aanlegdiepte en een groter materiaalverbruik, maar ook dat er meer water wordt aangetrokken, hetgeen ongunstig is voor de optredende gradiënt in de grofzandbarrière. Dit geldt met name wanneer er sprake is van een sterk doorlatende (grind)laag die contact kan maken met het onderste gedeelte van de grofzandbarrière, zoals geschetst in Figuur 57. Bij de interpretatie van het grondonderzoek zal er aandacht aan moeten worden geschonken of er sprake is van een dergelijke laag. Deze ongunstige factor zal dan vervolgens eenvoudigweg in de tweedimensionale grondwaterstromingsberekeningen ten behoeve van het ontwerp worden meegenomen en leiden tot een hogere berekende gradiënt, die op de in hoofdstuk 2 aangegeven wijze kan worden getoetst aan de toelaatbare gradiënt. Naast materiaalverbruik (hoe dieper, hoe meer barrièrezand er nodig is), is dit de reden geweest om de grofzandbarrière in Gameren niet dieper te leggen.

¹¹ Zie §A.3.9.



Figuur 57 Sterk doorlatende laag onderaan de barrière.

Het doorsnijden van een tussenzandlaag, die door de geringe dikte of lage doorlatendheid niet maatgevend is voor piping, kan wel zorgen voor een aanvullende hydraulische belasting op de grofzandbarrière. Een voorbeeld waarbij dat het geval is, is geschetst in Figuur 58. Een dergelijke situatie kan effectief worden bestreden door de toepassing van een bovenstroomse afdichting, zoals hierna in §6.9 nader is beschreven en verderop, in §6.9 in Figuur 60 is weergegeven. Een wat grillig voorkomen van tussenzandlagen, zoals in Gameren het geval is, geeft ook onzekerheid of de maatgevende zandlaag wel is bereikt bij het ontgraven. Dit is Gameren de hoofdreden geweest om niet minder dan 1 m diepte toe te passen.



Figuur 58 Aansluiting van een tussenzandlaag op de inkassing van een grofzandbarrière.

6.5 Vlak of ingekast?

Vanwege de variabiliteit in de hoogteligging van de bovenkant van de pipinggevoelige zandlaag en de haalbare nauwkeurigheid in verticale richting bij de uitvoering is een vlakke aansluiting van de barrière op de deklaag praktisch niet haalbaar. Ook omdat een inkassing (groeve zand van de grofzandbarrière steekt tot in de bovenliggende deklaag) een veel gunstiger stroming oplevert dan een uitstulping (kleiaanvulling boven het grove zand van de

grofzandbarrière steekt tot in de onderliggende zandlaag), heeft een inkassing duidelijk de voorkeur.

6.6 Hoogte inkassing

Voor de hoogte van de inkassing spelen meetonnauwkeurigheden bij zowel het grondonderzoek als de uitvoering een rol, evenals de onzekerheid over de diepte van de grenslaag en de kritieke helling in combinatie met de breedte van de barrière.

De diepte van de grenslaag kan onduidelijk zijn door de grondopbouw, zo kan er sprake zijn van een diffuse overgangslaag tussen zand en klei. Zie hiervoor §A.1.2 en de nadere uitwerking voor vier verschillende situaties in §C.1.4, §C.1.21, §C.1.22 en §C.1.32. Wanneer er sprake is van een siltlaag is het door de bijbehorende lage doorlatendheid twijfelachtig of hierdoorheen wel piping zal optreden. Voor een uitgebreide beschouwing, concreet gemaakt voor de situatie bij Gameren, wordt verwezen naar §A.1.6. Verder zal de hoogte van de inkassing moeten worden afgestemd op de variatie in de hoogteligging van de grenslaag zoals die door de afzettingsgeschiedenis of menselijke ingrepen mag worden verwacht. Voor Gameren is dit bepaald op maximaal 30 cm over een afstand van 1 m, hetgeen zowel geleidelijk als abrupt kan optreden (zie §A.1.12 en Hijma (2020)). Tot slot heeft de hoogte van de inkassing invloed op de dikte van de kleiaanvulling bovenop het grove zand, wat weer van invloed is op mogelijke drainage en daarmee bovenloopsheid (zie §A.1.18) en ook op de opbarstveiligheid, zoals verderop besproken in §6.10.

6.7 Breedte barrière

De breedte van de barrière zal iteratief moeten worden bepaald door grondwaterstromingsberekeningen waarmee de te verwachten optredende gradiënt in de grofzandbarrière zoals genoemd in hoofdstuk 2 kan worden berekend. Voor Gameren is dit uitgewerkt in hoofdstuk 7 en bijlage E. Voldoende veiligheid wordt daar bereikt met een vrije breedte van 0,95 m waarover uitstroming in de inkassing plaatsvindt (veiligheidshalve is vanwege uitvoeringstoleranties de 1 m breedte in de berekeningen gereduceerd met 5 cm). Een iets kleinere breedte zou ook nog voldoende veiligheid opleveren, maar een dergelijke minimalisering wordt voor deze pilot niet zinvol geacht.

De benodigde breedte blijkt volgens parameterstudies (Koelewijn, 2020; Koelewijn et al, 2021) vooral bepaald te worden door de breedte waarover vrije uitstroming kan plaatsvinden op de helling die aan de bovenzijde van de grofzandbarrière ontstaat na het gedeeltelijk leeglopen van de inkassing. Een aanvullende zone met grof zand onder een bovenstroomse afdichting, zoals toegelicht in §6.9, lijkt amper invloed te hebben (zie hiervoor Tabel 16 in §E.3.4).

In dit verband wordt opgemerkt dat de uitvoeringstechniek ook van invloed kan zijn op de toegepaste breedte. Bij open-sleufmethoden bijvoorbeeld geldt dat een nauwe sleuf van 1 m breedte of minder zodanig vertragend werkt, dat ondanks een groter materiaalverbruik een ruimere sleuf van 1,5 m kostentechnisch aantrekkelijker kan zijn. Bovendien levert dit extra sterkte op, waarmee in de praktijk een langere levensduur kan worden bereikt (een voor 50 jaar ontworpen grofzandbarrière zal na die periode immers niet zijn vergaan).

6.8 Toe te passen 3D-factor

In en rond een grofzandbarrière zal sprake zijn van stromingsconcentraties, met name nabij de uiteinden van de zijdelingse pipes aan de benedenstroomse kant van de grofzandbarrière. De stromingsconcentratie is het grootst als deze zijdelingse pipegroei wordt verhinderd, bijvoorbeeld door een obstakel als een grofkorrelige geul waar de grofzandbarrière doorheen snijdt (zie §A.1.10) of juist een cohesieve laag waar de zijdelingse pipegroei op vastloopt (zie

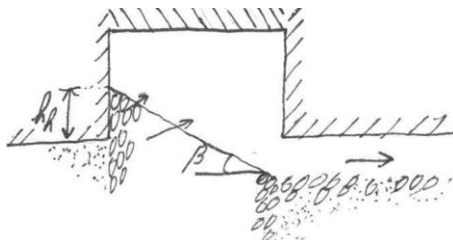
§A.1.13). Hiervoor zijn gedetailleerde, omvangrijke 3D-eindige elementenberekeningen uitgevoerd (Rosenbrand et al., 2021), waarvan de meest relevante uitkomsten zijn samengevat in bijlage D.

De stromingsconcentratie heeft een dominante invloed op de veiligheidsanalyse van een grofzandbarrière. Bij de gekozen semi-probabilistische aanpak heeft de partiële veiligheidsfactor die hierop betrekking heeft, vanwege die dominante invloed een relatief grote waarde.

De waarde van de 3D-factor wordt bepaald door een groot aantal factoren, die elkaar dusdanig beïnvloeden dat het niet mogelijk is om hiervoor een eenduidige relatie af te leiden. Desondanks is voor de situatie bij Gameren voor één dijkvak de 3D-factor berekend, waarna deze voor andere dijkvakken is afgeleid door verbanden die in de parameterstudies, zoals gerapporteerd in Rosenbrand et al.(2021), te lineariseren. Dit leidt voor een viertal doorsneden tot waarden variërend van 2,0 tot 3,1.

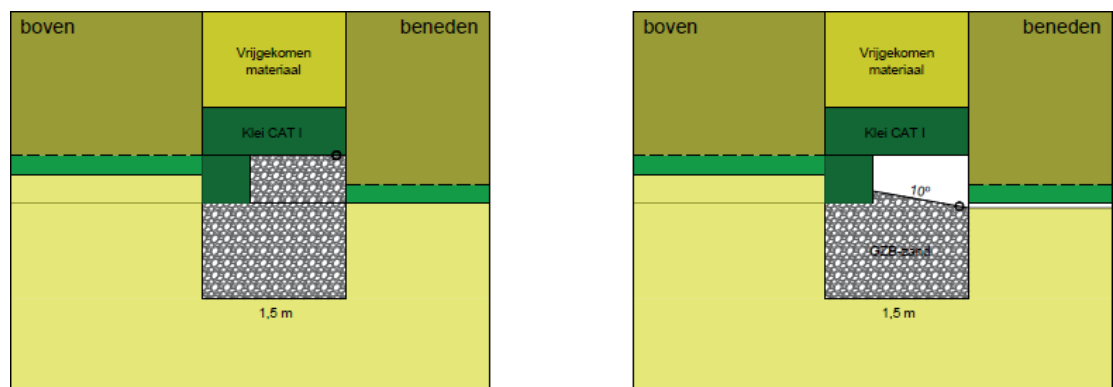
6.9 Waarborgen vereiste heavehoogte

De aanwezigheid van voldoende heavehoogte is uiteindelijk bepalend voor de sterkte van de grofzandbarrière, zie ook de schets in Figuur 59 voor een eenvoudige situatie waarbij er geen variatie is in de hoogte van de grenslaag en er ook sprake is van een scherpe grenslaag.



Figuur 59 Minimale heavehoogte h_n aan de bovenstroomse kant van de grofzandbarrière.

In werkelijkheid is er echter variatie in de hoogteligging te verwachten (zie ook §6.6 en Hijma (2020)) en kunnen er bijvoorbeeld tussenzandlagen zijn (zie ook §6.4). Een eenvoudige oplossing is dan het toepassen van een bovenstroomse afdichting, zoals geïllustreerd met het Definitief Ontwerp voor Gameren in Figuur 60; de klei naast de inkassing, aan de bovenstroomse kant, garandeert de benodigde heavehoogte ongeacht het niveau van de grenslaag aan de bovenstroomse kant. Deze klei wordt eerst over de volle breedte aangebracht en daarna deels verwijderd. Verdere optimalisatie van de breedte van de bovenstroomse afdichting, die immers slechts over een smalle verticale strook dicht hoeft te zijn, wordt nog mogelijk geacht.



Figuur 60 Definitief ontwerp grofzandbarrière Gameren na voltooiing (dwarsdoorsnede links) en in de uiterste situatie (dwarsdoorsnede rechts, met een helling van 10 graden en de minimale heavehoogte) (Boone, 2021b).

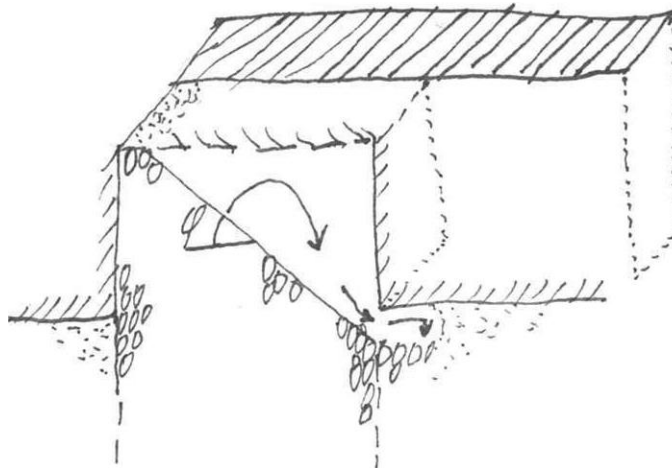
6.10 Opbarstveiligheid bovenstrooms van de grofzandbarrière

De grofzandbarrière zal daadwerkelijk tegen piping, opbarsten en heave moeten beschermen. Daarom mag er geen bezwijken door piping, opbarsten of heave plaatsvinden in het gedeelte tussen de dijk en grofzandbarrière. Dat kan allereerst door dit gedeelte qua omvang beperkt te houden. Vervolgens zal voldoende veiligheid tegen opbarsten moeten worden aangetoond, desnoods door toepassing van een ophoging of grondverbetering.

6.11 Uiteinden

De grofzandbarrière zal nergens oneindig lang zijn en falen via de uiteinden zal ook moeten worden voorkomen. Daarbij is het van groot belang te onderkennen dat de grofzandbarrière zelf sterk doorlatend is, anders dan de meeste verticale maatregelen tegen piping. De gangbare regels om achterloopsheid te voorkomen gaan daarom niet op. Door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de grofzandbarrière is het zelfs mogelijk om piping te krijgen via aansluitende hoge gronden of anderszins voor piping veilige gebieden, door de grofzandbarrière hier in te laten eindigen. Een dergelijke beëindiging kan wel, maar zal altijd gecombineerd moeten worden met een maatregel die doorgroei van de zijdelingse pipeontwikkeling stopt, zie §A.1.1.

Voor Gameren is daarvoor aan de oostzijde een kleiprop van een halve meter dikte bedacht, die aan de benedenstroomse kant nog een meter uitsteekt, zie Figuur 61. De zijdelingse pipegroei zal hierop vastlopen. Aan de westzijde is van nature een kleiprop aanwezig bij het voorziene uiteinde.

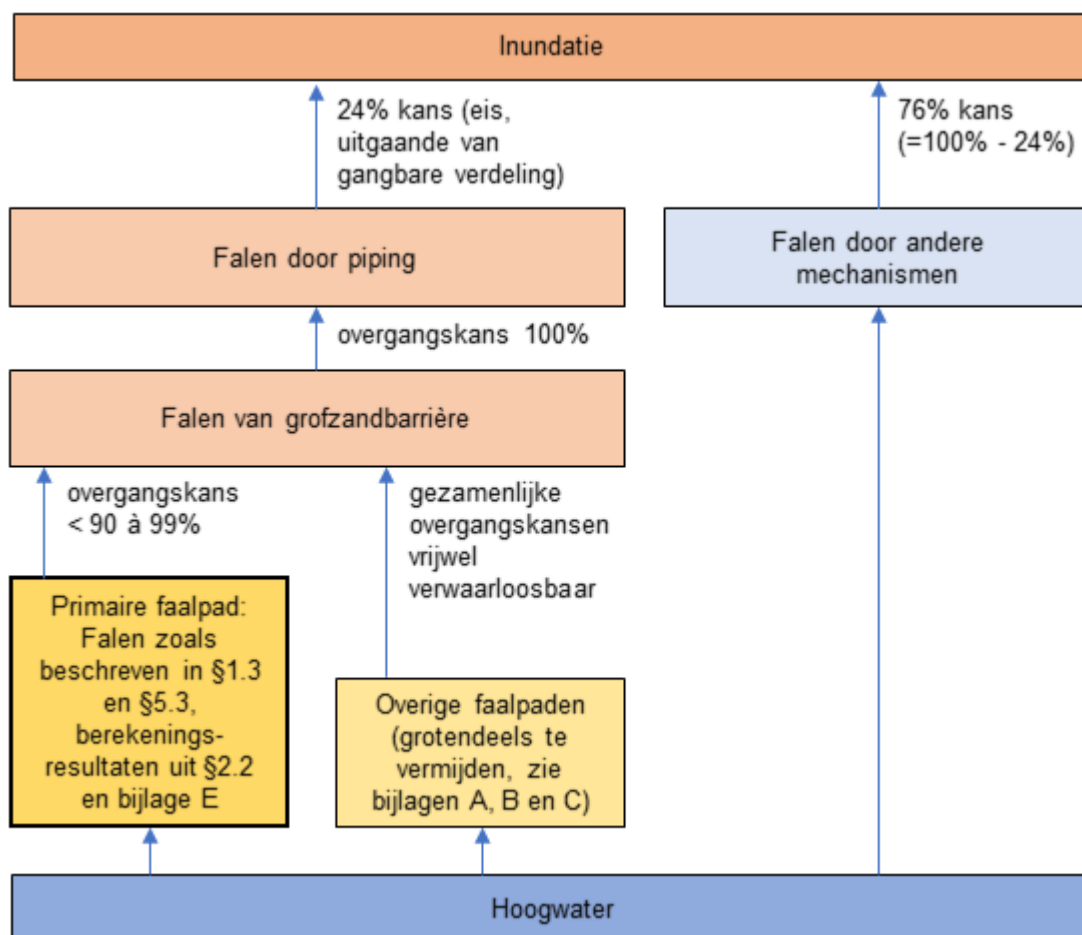


Figuur 61 Gedeeltelijk leeggelopen inkassing van de grofzandbarrière tot aan de kleiprop op het uiteinde (zijaanzicht met enige 3D-suggestie).

7 Veiligheidsanalyse voor de pilot Gameren

7.1 Inleiding

Als onderdeel van het voorlopig ontwerp voor de pilot bij Gameren wordt in dit hoofdstuk de veiligheidsanalyse voor die pilot doorlopen, waarmee ook de toepassing van de voorgaande beschouwingen verder wordt geconcretiseerd. Het gaat hier om de nadere invulling van het linkerpad en het middenpad uit Figuur 6 in hoofdstuk 2, hieronder herhaald als Figuur 62.



Figuur 62 Foutenboom met onderscheid naar het primaire faalpad van de grofzandbarrière (meest linkse route van onder naar boven), overige faalpaden van de grofzandbarrière (midden) en falen door andere mechanismen (rechts), leidend tot inundatie door hoogwater.

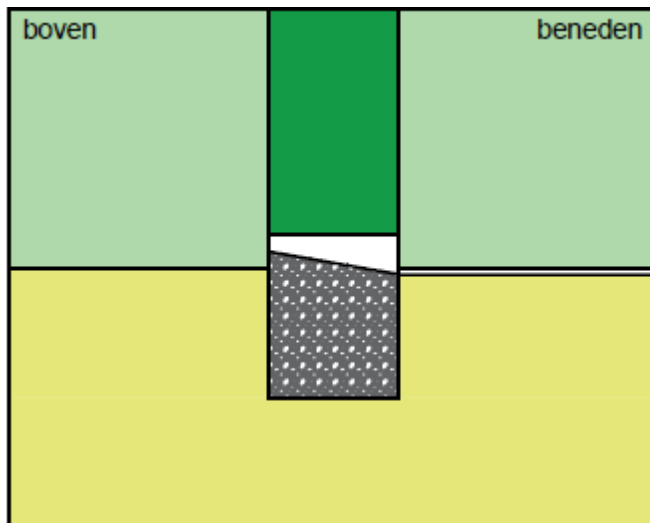
Op het linkerpad (het primaire faalpad) wordt hierna ingegaan in §7.2. Daarna wordt via twee invalshoeken stilgestaan bij het middenpad: via de beïnvloedende factoren in §7.3 en via de afzonderlijke faalpaden in §7.4. In deze beide paragrafen worden alle elementen afgelopen gegroepeerd naar fase: ontwerp, uitvoering en beheer. Tot slot volgen in §7.5 een discussie van de bevindingen, een samenvatting en een conclusie.

7.2 Veiligheidsniveau voor het primaire faalpad bij het Definitief Ontwerp

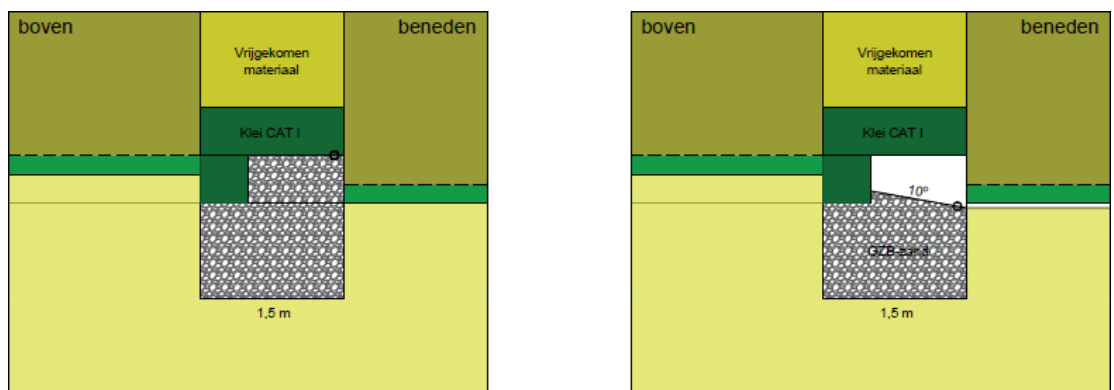
Voor het primaire faalpad geldt dat, met enkele vereenvoudigingen zoals het negeren van de benedenstroomse pipe, berekend kan worden wat de optredende gradiënt $i_{calc,d}$ is bij het maatgevende verval voor de situatie waarbij dit faalpad al vergevorderd is, namelijk knoop

26, 'Instabiliteit van het resterende, onder een helling liggende, grof zand' (knoop J in de opsomming in §1.3. Een marge in de waarde van de optredende gradiënt $i_{calc,d}$ ten opzichte van de toelaatbare gradiënt $i_{crit,d}$ (zie vergelijking (2.4)) betekent overigens alleen dat er een marge is, hoe groot deze is in termen van de faalkans, is daarmee nog niet bekend. Een marge van bijvoorbeeld 10% betekent dus niet dat daarmee de overgangskans voor deze knoop $100 - 10 = 90\%$ bedraagt. Verder wordt impliciet aangenomen dat de situatie van knoop 26 (knoop J) onder deze omstandigheden altijd wordt bereikt en wordt eveneens geen reserve aangenomen in het vervolgtraject tot aan inundatie (knoop 1 in de uitgebreide foutenboom, of knoop T uit §1.3). Een erg ruime marge hierin lijkt niet aannemelijk, wel is het aannemelijk dat het vervolgproces nog enige tijd zal vergen. Dit is nu nog niet goed te kwantificeren.

In bijlage E is met enig detail ingegaan op berekeningsresultaten voor het viertal doorsnedes die de meest kritieke doorsnedes zijn binnen het te versterken gedeelte. De berekeningen zijn deels uitgevoerd op basis van het Voorlopig Ontwerp (Figuur 63) en deels op basis van het Definitief Ontwerp (Figuur 64; met een bovenstroomse afdichting toegevoegd).



Figuur 63 Dwarsdoorsnede van het Voorlopig Ontwerp voor de grofzandbarrière – maatgevende situatie bij gelijk scheidingsniveau deklaag/zandlaag aan boven- en benedenstroomse zijde (geel: zandlaag, lichtgroen: deklaag, donkergroen: sleufaanvulling, grijs: barrièremateriaal, wit: deels leeggestroomde inkassing en benedenstroomse pipe).



Figuur 64 Definitief ontwerp grofzandbarrière Gameren (inclusief bovenstrooms 'kleimuurtje') na voltooiing (links) en in de uiterste situatie zoals berekend (rechts, met een helling van 10 graden en de minimale heavehoogte) (Boone, 2021b).

De resultaten zijn samengevat in Tabel 6. Voor het Voorlopig Ontwerp geldt op basis van deze uitkomsten (vermeld in de tweede kolom), met isotrope eigenschappen van de doorlatendheid van alle grondlagen, met name voor profiel RW138+050 dat er geen marge beschikbaar is voor de andere mogelijke faalpaden van de grofzandbarrière, omdat de optredende gradiënt gelijk is aan de toelaatbare gradiënt (vermeld in de laatste kolom). Alleen al daarom voldoet dit ontwerp dus niet. Daarnaast voldeed het Voorlopig Ontwerp niet vanwege het ontbreken van een voorziening die tegemoet komt aan de variatie in het niveau van de grenslaag. Het Definitief Ontwerp voldoet met het bovenstroomse 'kleimuurtje' wél aan dat laatste punt. Zoals aan de uitkomsten voor profiel RW136+050 te zien is, is het verschil in berekende en optredende gradiënt tussen beide varianten slechts klein (namelijk 2%: 0.100 versus 0.0981). Op basis van de vele sommen met variaties voor verschillende dwarsprofielen voor het voorlopig ontwerp (Koelewijn et al., 2021), wordt verondersteld dat voor de andere doorsneden een vergelijkbaar verschil zal worden gevonden. Bij toepassing van een licht conservatieve waarde van 5^{12} voor de verhouding tussen horizontale en verticale doorlatendheid voor de diepere (maatgevende) zandlagen worden voor de doorgerekende profielen RW136+050 en RW140+050 maar liefst 20 tot 25 procent lagere optredende gradiënten in de grofzandbarrière gevonden (vermeld in de voorlaatste kolom). Ook van dit verschil mag worden verwacht dat dit ook voor de andere doorsneden zal worden gevonden. Daarmee komt er een (ruime) marge beschikbaar voor de andere faalpaden, voor zover deze althans kunnen optreden bij het voorziene Definitief Ontwerp voor Gameren, in combinatie met de voorziene uitvoeringsmethode.

Tabel 6 Berekende gemiddelde optredende gradiënt $i_{crit,d}$ over de middelste 20 cm van de helling in de grofzandbarrière onder maatgevende omstandigheden, uitgaande van de uitstroomsnelheden, voor de berekende profielen, vergeleken met de toelaatbare waarde, $i_{crit,d}$ (met A = verhouding tussen horizontale en verticale doorlatendheid van het achtergrondzand, VO = Voorlopig Ontwerp en DO = Definitief Ontwerp).

Profiel	$i_{calc,d}$			$i_{crit,d}$ (zie §E.2.4)
	$A = 1, VO$	$A = 1, DO$	$A = 5, DO$	
RW136+050	0.100	0.0981	0.0804	0.135
RW138+050	0.100	-	-	0.100
RW140+050	-	0.1154	0.0863	0.129
RW143+050	0.117	-	-	0.155

7.3 Beïnvloedende factoren

7.3.1 Ontwerpfase

Voor de ontwerpfase gaat het om de factoren O1 t/m O20, zoals genoemd in §4.2 en die nader uitgewerkt zijn in §A.1. Hier is per factor telkens alleen de conclusie vermeld zoals die specifiek voor de situatie bij Gameren geldt, voor de details wordt verwezen naar §A.1. Deze paragraaf binnen bijlage A bestaat uit 20 subparagrafen, waarbij bijvoorbeeld de beïnvloedende factor O6 te vinden is in §A.1.6. De vermelde conclusie ten aanzien van iedere factor is dus alleen met een redelijke zekerheid geldig voor de situatie bij Gameren en kan niet voor alle gevallen worden veralgemeniseerd. In veel gevallen vereisen de conclusies wel diverse controles en keuringen tijdens de uitvoering, zoals nader uit te werken in het uitvoeringsontwerp.

O1 Barrière is niet lang genoeg in de lengterichting van de waterkering: aan de oostzijde wordt een kleiprop met ruime afmetingen aangebracht, aan de westzijde is een dergelijke kleiprop van nature al aanwezig. Deze factor is daarmee uit te sluiten.

¹² Zie hiervoor de laatste alinea van §2.3.1.

O2 Geen scherpe grenslaag tussen de pipinggevoelige zandlaag en de deklaag: voor Gameren is aanvullend grondonderzoek verricht (zie §E.3.1), waarmee een vrij nauwkeurig beeld is verkregen van de diepteligging. Ook is duidelijk geworden dat er hier en daar een sterke afwisseling is van dunne klei- en zandlaagjes. Met de open-sleufmethoden die zullen worden toegepast kan daarom bij het ontgraven niet volstaan worden met de constatering dat 'de zandlaag' is bereikt. Op basis van het aanvullende grondonderzoek is een langs het tracé variërende grenslaagdiepte bepaald en de ontgraving zal hier nog 1,0 meter onder steken. Daarmee mag voldoende zekerheid worden verwacht ten aanzien van het bereiken van de voor piping maatgevende zandlaag en kan ook deze factor worden uitgesloten. Hierbij wordt wel aangetekend dat dit op basis is van gedetailleerd aanvullend grondonderzoek en de toepassing van een Definitief Ontwerp waarbij de grofzandbarrière een volle meter uitsteekt onder het grenslaagniveau.

O3 Barrièrezand is intern instabiel: het toe te passen zand kent een steile korrelverdelingscurve en is daardoor niet gevoelig voor interne instabiliteit. Deze factor is daarmee uit te sluiten.

O4 Barrièrezand is te grof in relatie tot het achtergrondzand: er wordt gekozen voor een zand dat aan de gestelde eisen voldoet. Deze factor is daarmee uit te sluiten.

O5 Opdrijven van de deklaag bovenstrooms van de grofzandbarrière: deze factor vormt geen reëel risico en is ook in Gameren uit te sluiten, ook al omdat de vijf meter brede zone tussen de grofzandbarrière en de teen van de dijk waar nodig wordt opgehoogd om te voldoen aan de eisen ten aanzien van opbarsten (zie factor O20).

O6 Grenslaag met veel silt: dit is in Gameren op enkele plaatsen concreet aan de orde. In §A.1.6 is beargumenteerd waarom dit uiteindelijk geen probleem vormt, waarmee ook deze factor kan worden uitgesloten.

O7 Afstand van grofzandbarrière tot uittredepunt is te klein: interferentie van erosieprocessen is bij Gameren uit te sluiten vanwege de afstand van minimaal 15 meter tussen de grofzandbarrière en het uittredepunt. Deze factor is daarmee uit te sluiten.

O8 Te los gepakt achtergrondzand: deze factor vormt met name bij een grofzandbarrière met een inkassing geen reëel risico en kan daarom worden uitgesloten.

O9 Sterk doorlatende (grind)laag onderaan barrière: dit is een reële factor, die verwerkt is in het ontwerp, ook bij het primaire faalpad. Deze factor is daarmee niet uitgesloten, maar wel afgedekt.

O10 Grofkorrelige discontinuïteit in ondergrond bij barrière: dit betreft één van de oorzaken die tot een belemmering van de zijdelingse pipegroei leidt en daarmee van invloed is op de voor het ontwerp dominante 3D-factor. Hiermee is rekening gehouden in het ontwerp. Daarmee is ook deze factor niet uitgesloten, maar wel afgedekt.

O11 Barrièrezand is te fijn in relatie tot achtergrondzand: bij de keuze van het barrièrezand voor Gameren wordt uitdrukkelijk gezocht naar zand waarmee de doorlatendheid die in de ontwerpberekeningen is aangenomen, ook daadwerkelijk gerealiseerd zal worden. Deze factor is daarmee afgedekt.

O12 In hoogteligging variërende grenslaag tussen de pipinggevoelige zandlaag en de deklaag: ook dit is een reële factor, die verwerkt is in het ontwerp, ook bij het primaire faalpad. Deze factor is daarmee niet uitgesloten, maar wel afgedekt.

O13 Slechtdoorlatende discontinuïteit in ondergrond bij barrière: dit betreft de andere oorzaak (naast O10) die tot een belemmering van de zijdelingse pipegroei leidt en daarmee van invloed is op de voor het ontwerp dominante 3D-factor. Hiermee is rekening gehouden in het ontwerp. Daarmee is ook deze factor niet uitgesloten, maar wel afgedekt.

O14 3D-factor is onderschat: de nu gehanteerde factor is, met enige voorzichtigheid, zo goed mogelijk ingeschat (zie §D.3). Daarmee is deze factor afgedekt.

O15 Diepte bovenstroomse afdichting is onvoldoende: voor Gameren mag dit met het Definitief Ontwerp (zie §E.3) geacht worden te zijn afgedekt.

O16 Tussenzandlaag direct bovenstrooms van de grofzandbarrière: door de toepassing van de bovenstroomse afdichting in het Definitief Ontwerp is deze factor voor Gameren uitgesloten.

O17 Cakevorming door uitspoeling van fijne fractie uit achtergrondzand in bovenstroomse zijde barrière: op deze positief uitwerkende factor kan niet worden gerekend en deze is daarom veiligheidshalve uitgesloten.

O18 Drainage via aanvulling boven barrière: door erosie van onderaf zou dit uiteindelijk kunnen optreden. Indien de weerstand tegen afstroming bovenlangs kleiner is dan via de benedenstroomse pipe(s), dan zal hierdoor de totale weerstand benedenstrooms van de eigenlijke grofzandbarrière afnemen, hetgeen tot een beperkte vergroting van de gradiënt in de grofzandbarrière leidt. Deze factor is derhalve van invloed.

O19 Barrière is te ondiep: op basis van het aanvullende grondonderzoek en de daarmee samenhangende maatregelen om factor O2 uit te sluiten, zal de grofzandbarrière diep genoeg steken om ook deze factor uit te kunnen sluiten.

O20 Barrière is benedenstrooms van het uittredepunt: door passende aandacht voor en de (beperkte) maatregelen tegen opbarsten, berekend op basis van vigerende berekeningsvoorschriften met een aangepaste veiligheidsfactor op basis van concrete toedeling van de faalkansruimte (zie §7.5.2) geldt dat ook deze factor beheersbaar is.

Daarmee blijven van deze 20 factoren voor de concrete situatie in Gameren alleen O18 en O20 over. Hier wordt in §7.4.1 nader op ingegaan.

7.3.2 Uitvoeringsfase

Voor de uitvoeringsfase gaat het om de factoren U1 t/m U12, zoals genoemd in §4.3 en die nader uitgewerkt zijn in §A.2. Net als voor de ontwerpfase is hier per factor telkens alleen de conclusie vermeld zoals die specifiek voor de situatie bij Gameren geldt, voor de details wordt verwezen naar §A.2. Deze paragraaf binnen bijlage A bestaat uit 12 subparagrafen, waarbij bijvoorbeeld de beïnvloedende factor U6 te vinden is in §A.2.6.

Voor alle uitvoeringsgerelateerde factoren geldt dat met de uitvoeringsmonitoring zal moeten kunnen worden aangetoond dat aan de eisen is voldaan, bij voorkeur al tijdens de uitvoering en desnoods achteraf. Als dan uit de gegevens blijkt dat de uitvoering tekort schiet, dan zal het betreffende gedeelte alsnog goed moeten worden aangebracht. Met dit uitgangspunt zal er op zich dus altijd aan alle 12 factoren worden voldaan. Hierna wordt per factor nagegaan hoe gemakkelijk dat naar verwachting zal kunnen gebeuren.

U1 Onvoldoende aansluiting tussen discontinu geproduceerde barrièredelen: de uitvoering bij Gameren zal met open-sleufmethoden gebeuren, waarbij voor beide aannemerscombinaties geldt dat zij meerdere continu gekoppelde segmenten tegelijk in uitvoering zullen hebben, mits de grondwaterstand dit toelaat. Dan is er vanzelf al sprake van continu geproduceerde barrièredelen, met uitzondering van de drie overgangen tussen de vier secties, waarbij telkens tot in de reeds gemaakte sectie zal moeten worden gegraven. Daarmee zal deze factor zonder restrisico kunnen worden afgedekt.

U2 Aanvulklei wordt te dun aangebracht, bevat holle ruimtes en/of wordt in onvoldoende mate aangevoerd en/of verdicht: op dit punt is vooral een hoge kwaliteit vereist voor de bovenstroomse afdichting. Deze wordt eerst over de volledige breedte aangebracht, met tussentijdse verdichting, en daarna aan de benedenstroomse kant weggegraven, met achterlating van een gedeelte van 0,5 m, zie §E.3.2 of Figuur 60 in §6.9. Verwacht mag worden dat dit een betrouwbare afdichting oplevert en dat ook de bovenliggende aanvulklei goed kan worden aangebracht en verdicht, zodat ook deze factor geen restrisico hoeft op te leveren.

U3 Grofzandbarrière is onvoldoende verdicht: dit is uit te sluiten door tijdens de uitvoering voldoende energie te steken in de verdichting. Bij toepassing van een slecht gegradeerd zand zal betrekkelijk gemakkelijk aan de gestelde eis kunnen worden voldaan en levert deze factor geen risico op.

U4 Onvoldoende aanvoer van barrièrezand: bij de open-sleufmethoden is dit minder aan de orde dan bij een aanbrengmethode met bijvoorbeeld een kettingfrees. Bij de gehanteerde methode kan bij iedere sectie worden vastgelegd dat er voldoende barrièrezand is verwerkt voordat er verder wordt gegaan, zodat deze factor geen risico oplevert.

U5 Aanvulklei zwelt te sterk in de holle ruimte die boven het zand ontstaat: dit is op te lossen door voor de aanvulklei een kleisoort te gebruiken met een relatief gering zwelvermogen. Bijkomend voordeel is dat de erosiegevoeligheid na zwellings dan over het algemeen geringer is. Deze factor is nog niet goed uit te sluiten vanwege een gebrek aan voldoende bekendheid met het gedrag van de aanvulklei onder de omstandigheden bij een zwaarbelaste grofzandbarrière.

U6 Extreme verdichting achtergrondzand: dit is niet aan de orde voor de te hanteren open-sleufmethoden. Deze factor vormt daarom geen risico.

U7 Aanvulklei is erosiegevoelig: wanneer de aanvulklei erodeert, kan bovenloopsheid ontstaan. Net als bij O18 hiervoor, kan hierdoor de totale weerstand benedenstrooms van de eigenlijke grofzandbarrière afnemen, hetgeen tot een beperkte vergroting van de gradiënt in de grofzandbarrière leidt. Deze factor blijft daarom van invloed.

U8 Aanvulklei is bij aanbrengen te nat: hiervoor geldt hetzelfde als voor U7.

U9 Ontgraving is onvoldoende diep: er zal daadwerkelijk diep genoeg gegraven moeten worden om de grofzandbarrière voldoende diep aan te leggen. Een sterke aanvoer van grondwater zal bij Gameren daarbij een indicatie zijn dat de van belang zijnde laag is bereikt, zelfs als de ontwerpdiepte (die in principe een meter dieper reikt) nog niet is behaald. Deze factor kan derhalve in de uitvoering worden uitgesloten.

U10 Ontmenging van het barrièrezand: dit moet in de uitvoering worden vermeden en door middel van steekproeven worden gecontroleerd. Hiermee is deze factor in de praktijk van verwaarloosbare invloed te maken.

U11 Toepassing van verkeerd materiaal als barrièrezand: doordat in Gameren maar één type barrièrezand zal worden toegepast en geen andere zandsorten worden aangevoerd, is verwisseling zo goed als uit te sluiten en is deze factor ook zo goed als uit te sluiten.

U12 Vermenging van barrièrezand met achtergrondzand: doordat gewerkt wordt in een open ontgraving in onderling duidelijk gescheiden stappen, is vermenging voorbij de randen praktisch uitgesloten, deze factor dus ook.

Daarmee blijven van deze 12 factoren alleen U5, U7, U8 over. Deze afzonderlijke faalpaden worden in §7.4.2 nader behandeld.

7.3.3 Beheerfase

Voor de beheerfase gaat het om de factoren B1 t/m B10, zoals genoemd in §4.4 en die nader uitgewerkt zijn in §A.3. Net als voor de ontwerp- en uitvoeringsfasen is hier per factor telkens alleen de conclusie vermeld zoals die specifiek voor de situatie bij Gameren geldt, voor de details wordt verwezen naar §A.3. Deze paragraaf binnen bijlage A bestaat uit 10 subparagrafen, waarbij bijvoorbeeld de beïnvloedende factor B6 te vinden is in §A.3.6.

B1 Toekomstig gebrek aan kennis over de aanwezigheid en werking van de grofzandbarrière: deze factor valt feitelijk buiten de scope van de gehanteerde veiligheidsfilosofie en kan daarom buiten beschouwing worden gelaten.

B2 Doorgraven van de grofzandbarrière door mens of dier: bij doorgraven door de mens zal er sprake zijn van activiteiten die zonder of buiten vergunning zijn uitgevoerd. Hier zal op gehandhaafd moeten worden. Wanneer de barrière (mogelijk) doorgraven is, zal het betreffende gedeelte hersteld moeten worden voorafgaand aan een hoogwater waarvoor zónder grofzandbarrière onvoldoende veiligheid tegen piping bestaat, zie voor een indicatie §A.3.4. Het doorgraven door dieren lijkt thans uiterst onwaarschijnlijk, maar als dit toch gebeurt, dan zal dat onder thans nog uitzonderlijk droge omstandigheden plaatsvinden en zal dit betrekkelijk goed zichtbaar zijn bij inspectie. Dit hangt in belangrijke mate samen met de specifieke omstandigheden bij Gameren, waardoor moeilijk detecteerbare graverijen door bevers niet tot in de grofzandbarrière zullen reiken en andere diersoorten onder minder droge omstandigheden de grofzandbarrière ook niet zullen bereiken. Daarbij dient wel een voorzichtige marge gehanteerd te worden: bij twijfel in geval van een dierlijke graverij zal de omvang nader bepaald moeten worden. Deze factor kan dus niet worden uitgesloten, al is de kans klein dat dit optreedt zonder dat (nood)herstel mogelijk is voorafgaand aan een tot falen leidend hoogwater.

B3 Macroinstabiliteit leidt tot beschadiging van de barrière: dit is wat betreft het functioneren van de grofzandbarrière alleen een probleem wanneer het glijvlak precies door een zone van enkele decimeters hoogte rondom de kritieke helling en de minimale heavehoogte heengaat (faalpad 60), hoewel volgens de algemeen gehanteerde veiligheidsfilosofie dit secundaire falen dan onder 'macrostabiliteit binnenwaarts' valt. De kans dat er überhaupt een probleem met macrostabiliteit optreedt mag bij deze dijk erg klein worden geacht, zeker zodra er nabij de binnenteen een goede doorlatende laag is aangebracht in de vorm van een grofzandbarrière die tot nivellering van waterdrukken zal leiden en voor drainage zorgt zodra een pipe aantakt op de grofzandbarrière. Vanwege de formele categorisering hoeft het hier verder helemaal niet te worden meegenomen, maar als aandachtspunt wordt het toch meegenomen in de resterende lijst van factoren die van belang zijn. Een hoger of lager gelegen glijvlak (paden 58 en 59) heeft geen nadelige invloed (zie §C.3.3 en §C.3.4).

B4 Na hoogwater nazakken van de deklaag in de pipe in de zandlaag: dit vormt een reëel risico waarvoor monitoring wordt geadviseerd en na elk hoogwater van betekenis ook gericht

actie dient te worden ondernomen. Als risico is het echter wel beheersbaar: het treedt namelijk pas op na afloop van een hoogwater van betekenis, waarna er redelijkerwijs voldoende tijd beschikbaar zal zijn om passende actie te ondernemen. Indien dat gebeurt, dan is het risico beheersbaar.

B5 Naverdichten barrière: dit vormt alleen een risico als dit optreedt bij een (bijna-) maatgevend hoogwater. Dit betekent praktisch dat in de onmiddellijke nabijheid van de grofzandbarrière onder dergelijke omstandigheden geen noodmaatregelen zoals het intrillen van een damwand mogen worden uitgevoerd. Praktisch gezien kan dit worden uitgesloten.

B6 Erosie van de grofzandbarrière zelf bij hoogwater: dit vormt het startpunt van het primaire faalpad waarvoor de veiligheidsmarge is aangegeven in §7.2. Logischerwijs kan deze factor bij een grofzandbarrière nooit worden uitgesloten.

B7 Mechanische, chemische of biologische verstopping: deze factor kan worden uitgesloten, aangezien de grofzandbarrière voldoet aan de eisen voor geometrisch dichte filters en deze vormen van verstopping in het rivierengebied, dus ook bij Gameren, niet kunnen optreden.

B8 Bij een eerder hoogwater is de grofzandbarrière door piping bloot komen te liggen: deze factor is hooguit van belang bij toepassing van een dubbel filter. Dat is voor Gameren niet voorzien en daarom kan deze factor daar worden genegeerd.

B9 Afkalving van de deklaag benedenstrooms van de barrière: dit betreft het in bovenstroomse richting opschuiven van het uittredepunt. Hier zal desnoods tegen kunnen worden opgetreden door bij wijze van noodmaatregel grond te storten in het ontstane erosiegat. De kans van optreden wordt uiterst klein geacht, maar kan niet worden uitgesloten.

B10 Pipe slijt bovenliggende deklaag uit: door deze vorm van erosie kan het uittredepunt plotseling een stuk dicht bij de dijk komen te liggen. Hiertegen wordt dezelfde noodmaatregel voorgesteld als bij B9. Ook hierbij wordt de kans van optreden uiterst klein geacht.

Daarmee blijven van deze 10 factoren, de zes factoren B2, B3 (gedeeltelijk), B4, B6, B9 en B10 over. Deze afzonderlijke faalpaden worden in §7.4.3 nader behandeld.

7.4 Faalpaden

In deze paragraaf worden relevante faalpaden nader behandeld op basis van de niet ter verwaarlozende beïnvloedende factoren voor de ontwerp-, uitvoering- en beheerfase zoals die in de vorige paragraaf naar voren zijn gekomen.

7.4.1 Ontwerfase

Door de te verwaarlozen invloed of het kunnen uitsluiten van alle mogelijke beïnvloedende factoren behalve O18 en O20 (zie §7.3.1) blijken van de faalpaden 1 tot en met 36 alleen de faalpaden 29 en 36 relevant.

Faalpad 29 Tekortkomingen in de kleiaanvulling in de sleuf leiden tot drainage boven de barrière en erosie tot bezwijken van de sleufaanvulling: Hierdoor kan bovenloopsheid ontstaan, dus afstroming van water via de bovenkant van de sleuf. Als dit gebeurt (en de stijghoogte benedenstrooms van de eigenlijke grofzandbarrière dus hoger ligt dan de rand van de sleuf aan het maaiveld), dan zal de totale weerstand benedenstrooms van de eigenlijke grofzandbarrière afnemen, hetgeen door herverdeling leidt tot een beperkte vergroting van de gradiënt in de grofzandbarrière en daarmee tot een verzwaaring van de

belasting op de grofzandbarrière. Op de consequenties hiervan wordt in §7.5.2 nader ingegaan.

Faalpad 36 Barrière ligt te ver achter de waterkering waardoor tussen de waterkering opbarsten en/of heave kunnen optreden: Hierdoor kan voorloopsheid ontstaan. Dit is tegen te gaan door allereerst de afstand tussen de dijk en de grofzandbarrière te minimaliseren en vervolgens ervoor te zorgen dat op het overblijvende gedeelte wordt voldaan aan de vereiste veiligheid tegen opbarsten, desnoods door toepassing van een plaatselijke ophoging. Voor de toets op opbarsten kan worden aangesloten bij de hiervoor geldende rekenmethoden, met adequate aanpassing van het veiligheidsniveau waaraan getoetst wordt op basis van de faalkansverdeling. Voor Gameren is uitgegaan van 5% van de faalkansruimte voor piping, zie Figuur 66. Dit leidt in deze situatie tot een vereiste betrouwbaarheidsindex β voor opbarsten van 5,56.

7.4.2 Uitvoeringsfase

Door de te verwaarlozen invloed of het kunnen uitsluiten van alle beïnvloedende factoren behalve U5, U7 en U8 (zie §7.3.2) blijken van de faalpaden 37 tot en met 55 alleen de faalpaden 42 en 47 tot en met 50 relevant.

Faalpad 42 Aanvulklei zwelt te sterk en belemmert de ontwikkeling van vrije uitstroming uit de helling aan de bovenzijde van de barrière: Wanneer de aanvulklei zó sterk zwelt dat de holte die ontstaat door het gedeeltelijk leegstromen van de inkassing weer wordt dichtgedrukt, dan zal de helling meer eroderen waardoor deze dieper komt te liggen en/of flauwer wordt. Beide processen gaan ten koste van de benodigde heavehoogte. De vraag is echter wel hoe realistisch dit scenario is: zeker na forse zwelling is klei betrekkelijk gemakkelijk te eroderen of op te lossen, het wordt niet erg waarschijnlijk geacht dat de zwellende klei tot gevolg kan hebben dat het onderliggende zand gemakkelijker erodeert dan die klei. Echter, als dit scenario wél optreedt, dan leidt dat wel tot een duidelijke reductie van het keerbare verval.

Faalpad 47 Aanvulklei is erosiegevoelig waardoor de sleufaanvulling bezwijkt;
faalpad 48 Zwelvermogen aanvulklei is te groot waardoor deze te snel erodeert en de sleuf bezwijkt;
faalpad 49 Te nat aangebrachte klei in sleuf erodeert gemakkelijk;
faalpad 50 Te nat aangebrachte klei in sleuf droogt uit en bovenloopsheid ontstaat via krimpscheuren: Deze vier faalpaden (elk afzonderlijk in detail beschreven in §§C.2.11 tot en met C.2.14) komen er allemaal op neer dat de klei in de sleuf faalt en bovenloopsheid ontstaat, dus afstroming van water via de bovenkant van de ontgraven sleuf. Als dit gebeurt (en de stijghoogte benedenstrooms van de eigenlijke grofzandbarrière dus hoger ligt dan de rand van de sleuf aan het maaiveld), dan zal de totale weerstand benedenstrooms van de eigenlijke grofzandbarrière afnemen, hetgeen door herverdeling leidt tot een beperkte vergroting van de gradiënt in de grofzandbarrière en daarmee tot een verzwaring van de belasting op de grofzandbarrière, net als bij faalpad 29 in §7.4.2.

7.4.3 Beheerfase

Door de verwaarlozen invloed of het kunnen uitsluiten van de beïnvloedende factoren B1, B5, B7 en B8, en een deel van de paden bij B3 (zie §7.3.3) blijken van de faalpaden 56 tot en met 78 alleen de faalpaden 57, 60, 61, 63, 70 en 71 relevant.

Faalpad 57 Doorgraven van de grofzandbarrière door mens of dier: Zoals hiervoor aangegeven in §7.3.3 is de kans klein dat dit optreedt zonder dat herstel mogelijk is voorafgaand aan een tot falen leidend hoogwater.

Faalpad 60 Macrostabieleit met glijvlak door inkassing aan bovenstroomse zijde, waardoor de heavehoogte afneemt: Een glijvlak dat binnen de zone met de minimale heavehoogte de grofzandbarrière doorsnijdt (dus eigenlijk alleen door het onderste gedeelte van de inkassing aan bovenstroomse zijde loopt), zal een nadelig effect hebben op de veiligheid tegen piping. Dit secundaire effect valt formeel overigens binnen het faalmechanisme 'macrostabieleit binnenwaarts'.

Faalpad 61 Pipe komt bij opeenvolgende hoogwaters steeds dieper te liggen waardoor de resterende heavehoogte afneemt: Dit treedt pas op na afloop van een hoogwater waarbij de inkassing gedeeltelijk leegstroomt, dus een hoogwater waarbij pipegroei tot aan de grofzandbarrière optreedt. Dit is met monitoring te beheersen, bijvoorbeeld met een zettingsmeetslang bovenop de inkassing, nabij de benedenstroomse kant, die in elk geval wordt doorgemeten als er sprake is geweest van een hoogwater met aanzienlijke zandmeevoerende wellen. Als maatregel kan na gedeeltelijk leegstromen van de inkassing via een gerichte ontgraving de grofzandbarrière plaatselijk in de oorspronkelijke toestand worden hersteld. Zoals aangegeven in §A.3.4 zal dit bij Gameren vooralsnog niet vaker hoeven dan eens in de circa 20 jaar.

Faalpad 63 Het primaire faalpad van de grofzandbarrière: Hiervoor is in §7.2 het veiligheidsniveau aangegeven.

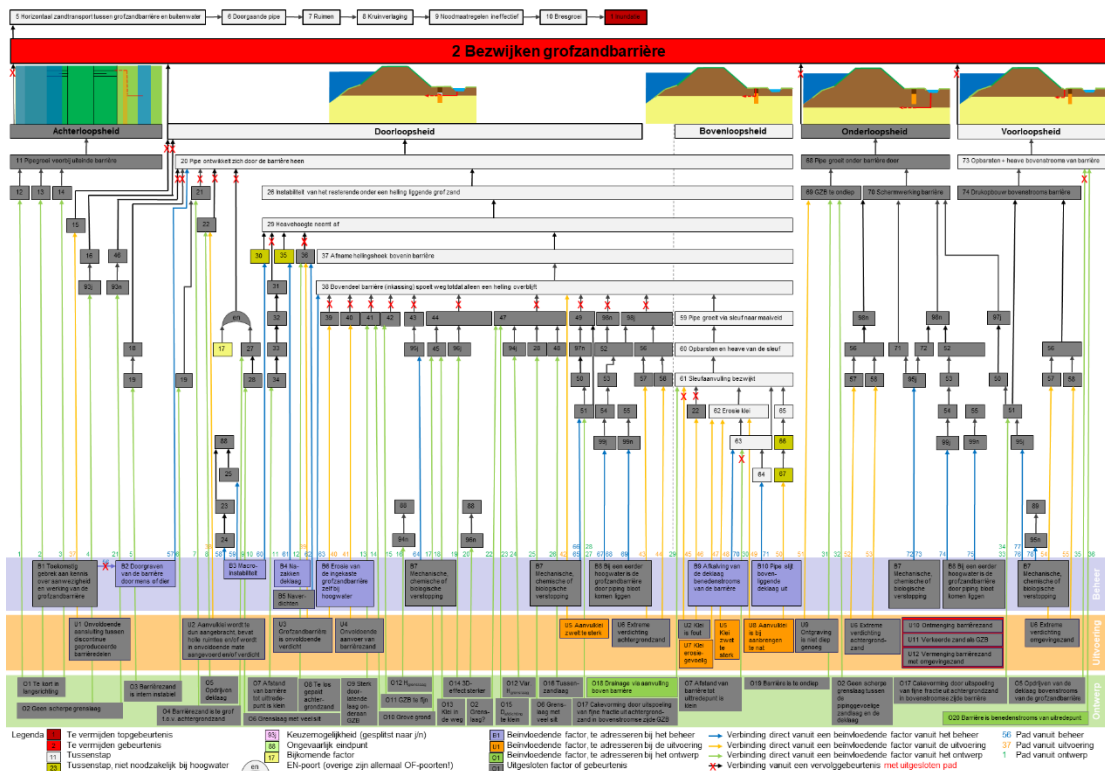
Faalpad 70 Uittredepunt verplaatst door afkalving in bovenstroomse richting en bereikt de sleuf: In de doorsnede waar de benedenstroomse pipe zich bevindt, erodeert bij dit faalpad uiteindelijk alle materiaal tussen de eigenlijke grofzandbarrière en het oorspronkelijke uittredepunt, tenzij tijdig wordt ingegrepen met een bijvoorbeeld een noodmaatregel als het storten van grond (klei en/of zand) of zelfs ander materiaal in het erosiekanaal, waardoor het erosieproces voldoende vertraagd wordt om doorgroei tot aan de grofzandbarrière voordat het hoogwater voorbij is, te vermijden. Als dit optreedt is het gevolg dat alle stromingsweerstand benedenstrooms van de grofzandbarrière verdwijnt. Voor deze stromingsweerstand is een reductie van 6% toegepast bij de bepaling van de 3D-factor, zie daarvoor §D.3, waar dit genoemd wordt in de alinea ná Tabel 11. Het te verrekenen effect op de optredende gradiënt is daarom niet groter dan 6%.

Faalpad 71 Pipe slijt de bovenliggende deklaag volledig uit, waardoor het uittredepunt meer bovenstrooms komt te liggen, uiteindelijk bij de sleuf. Hiervoor geldt in de uiterste situatie hetzelfde als voor het voorgaande faalpad.

7.5 Samenvatting en conclusie

7.5.1 Niet uitgesloten faalpaden

In Figuur 65 zijn de resterende faalpaden zichtbaar gemaakt door alle knopen waarvan de bijdrage verwaarloosd kan worden grijs te maken en de daaruit volgende takken van een rood kruisje te voorzien. Zoals al uit de beide vorige paragrafen naar voren kwam, betreffen de resterende faalpaden vooral de paden die onder bovenloopsheid zijn gecategoriseerd (faalpaden 29, 47, 48, 49, 50, 70 en 71). Daarnaast zijn er, naast het primaire faalpad (faalpad 63), nog de faalpaden 42 (erosie grove zand door te sterk zwellende aanvulklei), 57 (doorgraven), 60 (macrostabieleit met glijvlak door de minimale heavehoogte) en 61 (nazakken door verdichting onder kritische omstandigheden).



Figuur 65 Volledige foutenboom grofzandbarrière met grijsgemaakte vakjes voor knopen die voor Gameren praktisch kunnen worden uitgesloten of anderszins afgedekt zijn en rode kruisjes bovenaan grijsgemaakte takken bij de aansluiting op knopen die nog wél kunnen optreden.

7.5.2

Discussie en nadere opdeling faalkansen voor de grofzandbarrière bij Gameren

De veiligheid voor het primaire faalpad is gekwantificeerd in §7.2 en kent voldoende marge, op basis van de uitgevoerde berekeningen zeker 33% bij de maatgevende belastingssituatie.

Voor de faalpaden die met bovenloopsheid samenhangen, geldt dat door de genoemde toegepaste reductie van de 3D-factor met 6%¹³, de optredende gradiënt rekenkundig met maximaal 6% kan toenemen; groter kan de belastingtoename voor het primaire faalpad door het optreden van die faalpaden nooit zijn omdat de berekeningen zijn uitgevoerd met de aanname dat het polderpeil direct achter de grofzandbarrière aanwezig zou zijn. De daarvoor toegepaste correctie wordt zodoende ongedaan gemaakt. Een marge van 6% is in de maatgevende doorsnede wel beschikbaar¹⁴, en daarbuiten uiteraard ook.

Voor de resterende faalpaden geldt het volgende:

- Faalpad 36, opbarsten bovenstrooms van de grofzandbarrière: hierop kan worden getoetst met verrekening van een gedeelte van de faalkansruimte, waar nodig kan een grondverbetering worden aangebracht (zwaarder materiaal en/of verhoging van het maaiveld).
- Faalpad 42, te sterk zwellende aanvulklei: dit vormt potentieel wel een probleem, al mag verwacht worden dat dit zal worden voorkomen door erosie van de gezwollen klei. Dit is te vermijden door klei te gebruiken die niet sterk zwelt.
- Faalpad 57, doorgraven: zoals in §C.3.2 is onderbouwd, zal doorgraven door dieren in Gameren alleen door grotere gravers in langdurig droge periodes te verwachten zijn. De

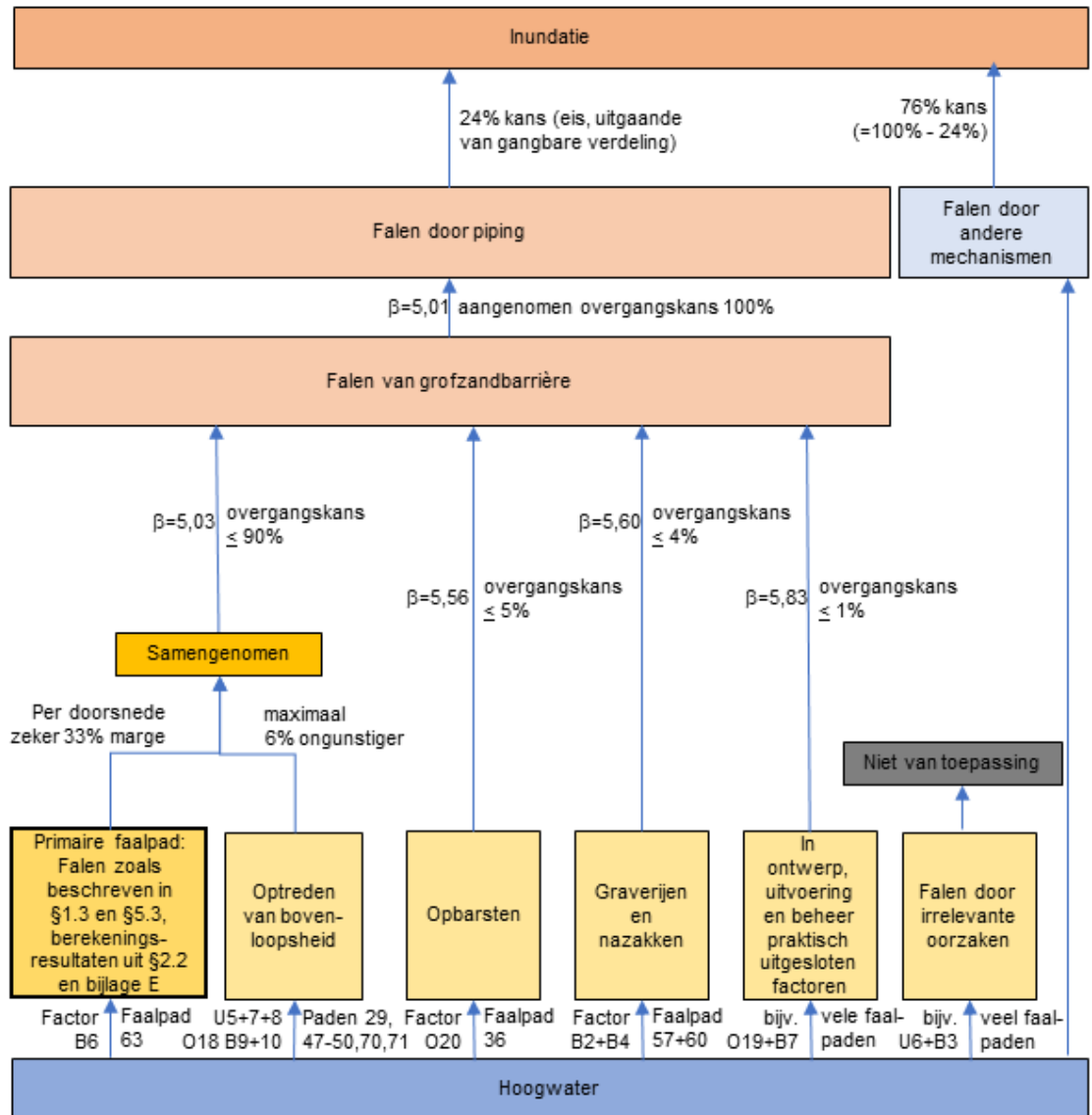
¹³ Zie §D.3, direct na Tabel 11.

¹⁴ De resterende marge inclusief het ongedaan maken van de correctie voor de weerstand in de benedenstroomse pipe van 6% bedraagt voor het maatgevende profiel bij RW140+050: $1 - i_{calc,d} / (1-6\%) / i_{crit,d} = 1 - (0,0863/0,94)/0,129 = 1 - 0,71 = 29\%$.

toegangen tot de hopen zullen dan goed zichtbaar zijn (veel vegetatie is door de droogte niet te verwachten). Tijdig herstel is dan nog goed mogelijk. Doorgraven door de mens, zonder vergunning, zal ook goed zichtbaar zijn.

- Faalpad 60, macrostabiliteit: dit is behalve onwaarschijnlijk, geen onderdeel van het faalmechanisme piping. Dit faalpad behoeft feitelijk dus niet te worden beschouwd.
- Faalpad 61, nazakken deklaag waardoor de heavehoogte afneemt: Dit kan optreden na ieder hoogwater waarbij de inkassing gedeeltelijk leegstroomt. Dit is met monitoring, eventueel slechts bestaande uit visuele inspectie, te detecteren en vereist dan lokaal herstel. Volgens de huidige hoogwaterstatistiek is dit gemiddeld eens in de twintig jaar te verwachten.

In Figuur 66 is de eerder gepresenteerde ‘kleine’ faalboom nader uitgewerkt en geconcretiseerd voor de situatie bij Gameren.



Figuur 66 Nadere concretisering van de foutenboom uit Figuur 6 / Figuur 62 met concrete getalswaarden voor verschillende takken.

De overall veiligheid tegen het faalmechanisme piping is gewaarborgd, gezien de marge op het primaire faalpad en de mate waarin andere faalpaden daadwerkelijk een bedreiging

kunnen vormen, mits de aangegeven maatregelen en waarborgen bij ontwerp, uitvoering en beheer worden getroffen.

7.5.3

Conclusie

Met het Definitief Ontwerp voor de grofzandbarrière, aanleg ervan conform de gegeven eisen en aanbevelingen, en goed beheer, met name bestaande uit controle op doorgraven en gericht herstel na zowel doorgraven als gedeeltelijk leeglopen van de inkassing (naar schatting bij een hoogwater dat vooralsnog gemiddeld eens in de pakweg twintig jaar verwacht mag worden, zoals nader onderbouwd is in §A.3.4) voldoet het dijkvak bij Gameren aan de gestelde eisen voor het faalmechanisme piping.

8 Aanbevelingen voor verdere toepassing

Het onderzoek dat in de afgelopen jaren is uitgevoerd, is voldoende gebleken om de grofzandbarrière met vertrouwen aan te brengen in de primaire kering bij Gameren en om een kansrijk alternatief te bieden in andere dijkversterkingsprojecten. Eén aspect dat in de afgelopen jaren voor de pilotlocatie bij herhaling nadrukkelijk naar voren kwam, betreft de doorlatendheid – van de pipinggevoelige zandlaag, van de overige grondlagen, en van de grofzandbarrière. Dit is een aspect dat in het algemeen van belang is bij piping, maar bij een grofzandbarrière van bovengemiddeld belang is. Voor Gameren is dit voor het ontwerp in voldoende mate opgelost (hoewel concrete tijdsafhankelijke waterspanningsmetingen op voldoende grote schaal bij een significant hoogwater nog steeds welkom zouden zijn, om de lokale kennis op dit punt aan te scherpen), maar elders zal dit hoogstwaarschijnlijk eveneens van belang zijn.

Andere punten waar bij de verdere toepassing van de grofzandbarrière, na de pilottoepassing bij Gameren, nadere aandacht aan zou kunnen worden besteed, zijn:

Voor de algemene veiligheidsanalyse van een grofzandbarrière:

1. Aanscherping van de in het ontwerp zeer dominante 3D-factor, waarvoor met het inzicht dat tot dusverre is opgedaan met vooral numerieke en theoretische analyses, nu eerst meer bereikt zou kunnen worden met experimenteel (laboratorium-) onderzoek (zie ook §F.4).
2. Kalibratie van de schadefactor door evaluatie van het hele veiligheidsformat, inclusief de overige partiële factoren, met semi-probabilistische en probabilistische analyses, zoals eerder is gedaan voor het model van Sellmeijer (zie ook §2.1.4).
3. Er zijn in het veiligheidsformat veel pragmatische keuzes gemaakt, ook voor het deel van de faalpaden wat een verwaarloosbaar kleine faalkansbijdrage zou moeten hebben. Deze zouden na het opdoen van meer ervaring verder aangescherpt moeten worden (bij voorkeur in samenhang met het vorige punt).

Voor verdere optimalisaties van de grofzandbarrière in zijn huidige vorm:

4. De minimale afstand tussen de grofzandbarrière en het uittredepunt (zie ook §6.3).
5. Een optimalisatie van de afmetingen van de kleiprop aan het uiteinde (zie ook §A.1.1).
6. Een optimalisatie van de diepteligging van de onderzijde van de grofzandbarrière, rekening houdend met de onzekerheden in de ligging van de bovenzijde van de pipinggevoelige zandlaag en de verminderde toestroming naarmate de grofzandbarrière minder diep in de zandlaag steekt.
7. Een optimalisatie van de dikte van de bovenstroomse afsluiting, voor als de toepassing daarvan net als in Gameren noodzakelijk blijkt te zijn (zie ook §6.9). Concrete praktijkproeven waarbij vastgesteld wordt hoe een voldoende betrouwbare, maar tevens zo smal mogelijke afdichting kan worden aangebracht lijken hierbij een eerste stap.

Met betrekking tot het barrièrezand:

8. Verkrijging van barrièrezand: hoe is op een efficiënte wijze aan een materiaal met de juiste gradering te komen, zonder te veel fijne deeltjes en zonder dure productiestappen zoals drogen?
9. De toelaatbaarheid van insluitingen van achtergrondzand en de toelaatbare omvang en ernst van ontmenging in de grofzandbarrière, mede in relatie tot de omvang van de grofzandbarrière (zie ook §A.1.10 en §A.2.1).

En verder:

10. Een inschatting van de benodigde tijd tot aan bresgroei na falen van de grofzandbarrière, rekening houdend met allereerst de benodigde tijd om tot de ontwikkeling en ruiming van een doorgaande pipe te komen.
11. Alternatieve uitvoeringen van het concept, zoals een grofzandbarrière die op orde een meter afstand benedenstrooms is van een ondiep heavescherm – te ondiep om op zichzelf voldoende veiligheid te bieden, maar in wisselwerking met de grofzandbarrière wel voldoende veiligheid biedt, waarbij de stroming onder het heavescherm door effectief wordt afgevangen door de grofzandbarrière en het tussenliggende achtergrondzand stabiel blijft, doordat de stroming daarin, direct achter het heavescherm, onvoldoende is om heave te veroorzaken, terwijl het aan de filterregels beantwoordende grove zand de erosie van dat tussenliggende zand tegengaat.

Deze punten zouden na de realisatie in Gameren verder kunnen bijdragen aan de grootschalige toepassing van de grofzandbarrière als een efficiënte maatregel tegen piping.

Referenties

- Akrami & Koelewijn, 2018. Sepideh Akrami & Andre Koelewijn, Sand selection, memo 11200952-007-GEO-0010, Deltares, Delft, 17 mei 2018, 5 pp.
- Van Beek et al., 2015a. V.M. van Beek, H.M. van Essen, K. Vandenboer & A. Bezuijen, Developments in modelling of backward erosion piping, *Géotechnique* 65:740-754, doi:10.1680/geot.14.P.119.
- Van Beek et al., 2015b. V.M. van Beek, A.R. Koelewijn, G. Negrinelli & U. Förster, A coarse sand barrier as an effective piping measure, *Geotechniek Special*, september 2015, 4-7.
- Van Beek, 2019. Vera van Beek, Pipe gradient estimate, memo, Deltares, Delft, 2 april 2019, 20 pp.
- Van Beek & Rosenbrand, 2019. V.M. van Beek & E. Rosenbrand, Eindrapportage eerste haalbaarheidsonderzoek (HBO1), rapportage 11200952-013-GEO-0003, Deltares, Delft, juni 2019, 58 pp.
- Bisschop & Hofschreuder, 2016. C. Bisschop & B. Hofschreuder, Veiligheidsanalyse Gameren, Geotechnische rapportage, projectnummer 110565, versie 3, definitief, Waterschap Rivierenland, Tiel, 15 april 2016, 45 pp.
- Boone, 2021a. Dennis Boone, Aangepaste ontwerpprincipes nav. GZB Gameren TO-5, e-mail, 24 maart 2021 19:54.
- Boone, 2021b. Dennis Boone, Definitief principe ontwerp GZB – Gameren, e-mail, 1 april 2021 17:30.
- Boone, 2021c. Dennis Boone, Korrelverdelingen Gameren – grafieken en excel, e-mail, 15 april 2021 12:14.
- Burenkova, 1993. V.V. Burenkova, Assessment of suffusion in non-cohesive and graded soils, In: *Filters in geotechnical and hydraulic engineering*, Brauns, Schuler & Heibaum (editors), Rotterdam: Balkema, 357-360.
- Burger & Waterloo, 2020. Sieger Burger & Maarten J. Waterloo, Verticaal Zanddicht Geotextiel, Lange termijn functionaliteit achter de dijken in het Rivierengebied, rapportage AW_002_SB_190987, definitief, Acacia Water, Gouda, 3 juni 2020, xii + 48 pp.
- Calle et al., 2011. Ed Calle, Werner Halter & Hans Niemeijer, Schematiseringsfactor maakt keuzes in geotechniek beter zichtbaar, *Geotechniek* juli 2011: 30-34.
- CUR, 2008. Van onzekerheid naar betrouwbaarheid, Handreiking voor geotechnisch ontwerpers, publicatie 2008-2, CUR Bouw & Infra, Gouda/Delft, juni 2008, 185 pp.
- Damen, 2017. Peter Damen, Peil-stijging tussendijs gebied VZG/GZB-Gameren bij grote kwelwater toestroming vanuit de Waal en buitendijkse plassen agv beperkte afvoer-capaciteit 800mm-duiker dijkpaal RW136, e-mail, 19 juli 2017 13:58.
- Förster, 2021a. Ulrich Förster, Analysis report coarse sand barrier verification tests, Analysis of medium-scale configuration with protuberance (phase 3), rapportage 11200952-063-GEO-0001, Deltares, Delft, 17 maart 2021, 145 pp.
- Förster, 2021b. Ulrich Förster, invloed tussenzandlaag, e-mail, 26 maart 2021 16 :47.

- Förster, 2021c. Ulrich Förster, Effect tussenzandlaag die met GZB in inkassings kortsluit.docx, e-mail, 28 maart 2021 19:21.
- Geurtjens, 2021. Erik Geurtjens, 02P013764-01 GZB Gameren, e-mail, 16 april 2021 14 :42.
- De Grave, 2020. Peter de Grave, Update businesscase grofzandbarrière (GZB), memo, Deltares, Delft, 6 april 2020, 6 pp.
- Groeneweg, 2020. Jacco Groeneweg, Hoogwaterstatistiek voor Gameren, e-mail, 27 oktober 2020 12:49.
- Hanses, 1985. Ullrich Karl Hanses, Zur Mechanik der Entwicklung von Erosionskanälen in geschichtetem Untergrund unter Stauanlagen, dissertatie Grundbauinstitut der Technischen Universität Berlin, Universitätsbibliothek der TU Berlin, Berlijn.
- Hijma, 2020. Marc Hijma, Variatie in hoogteligging grens deklaag/zandlaag langs en over de GZB, memo 11200952-000-GEO-0007, Deltares, Delft, 29 januari 2020, 5 pp.
- ICOLD, 2017. Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations, *Bulletin* **164**, Paris: International Commission on Large Dams, 2017, 288 pp.
- Kanning, 2019. Wim Kanning, Memo veiligheidsformat primaire erosie en modelfactor grofzandbarrière, versie 7, Deltares, Delft, 9 mei 2019, 10 pp.
- Kanning, 2021. Wim Kanning, mondelinge communicatie, 26 februari 2021.
- Kenney & Lau, 1985. T.C. Kenney & D. Lau, Internal stability of granular filters, *Canadian Geotechnical Journal* **22**:215-225, 1985.
- Kenney & Lau, 1986. T.C. Kenney & D. Lau, Closure to: internal stability of granular filters, *Canadian Geotechnical Journal* **23**:420-423, 1986.
- Koelewijn, 2015. Andre Koelewijn, Factsheet Grof Zand Barrière, memo 1220240-000-GEO-0002, Deltares, Delft, 26 september 2015, 8 pp.
- Koelewijn, 2017. Andre Koelewijn, LiveDijk Willemspolder, Praktijkproeven Verticaal Zanddicht Geotextiel, rapportage 1208555-000-GEO-0006, versie 2, Deltares, Delft, 22 december 2017, 273 pp.
- Koelewijn, 2020. Andre Koelewijn, Verkennende berekeningen fijngrindbarrière en kleimuurtje bij grofzandbarrière, memo 11200952-057-GEO-0006, Deltares, Delft, 10 april 2020, 33 pp.
- Koelewijn et al., 2020. André Koelewijn, Annette Kieftenburg & Lieke Hüsken, Graverij door dieren, Invloed op de veiligheid van waterkeringen, rapportage 11205235-003-ZWS-0001, Deltares, Delft, 18 december 2020, 44 pp.
- Koelewijn, 2021. André Koelewijn, Aandachtspunten grofzandbarrière Gameren t.b.v. Definitief Ontwerp, rapportage 11200952-057-GEO-0011, Deltares, Delft, 4 mei 2021, 26 pp.
- Koelewijn et al., 2021. André Koelewijn, Bernard van der Kolk & Aron Noordam, Voorlopig ontwerp grofzandbarrière bij Gameren, Schematiseringen en berekeningsresultaten, rapportage 11200952-0968-GEO-0001, Deltares, Delft, 17 juni 2021, 89pp.
- Lambe & Whitman, 1979. T.W. Lambe & R.V. Whitman, Soil mechanics, Chichester: Wiley, 1979.

- Lindenberg et al., 2002. J. Lindenberg, M.A. Van, A.R. Koelewijn, C. Zwanenburg, J.W.M. Lambert, M.T. van der Meer & P.A.A. Teunissen, Evaluatie rapport praktijkproef Bergambacht, rapportage 01.03.01/334, Delft Cluster, Delft, juni 2002, vii + 160 pp.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016a. Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Sterkte en Veiligheid, Den Haag, 2016, 148 pp.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016b. Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Handreiking ontwerpen met overstromingskansen, Veiligheidsnormen en belastingen bij nieuwe overstromingskansnormen, versie OI2014v4, Den Haag, december 2016, 71 pp.
- Niemeijer, 2010. J. Niemeijer, Stappenplan schematiseringsfactor, rapportage 074497336:A, Arcadis, Hoorn, 11 juni 2010, 42 pp.
- Te Nijenhuis et al., 2020. Anouk te Nijenhuis, Lieke Hüsken, Ferdinand Diermanse, Anton van der Meer, Ruben Jongejan & Joost Pol, Faalpaden, Conceptuele analyse van het gebruik van de faalpaden-methodiek voor het bepalen van overstromingskansen in Nederland, rapportage 11203719-024-GEO-0016, Deltares, Delft, 9 april 2020, 67 pp.
- Van Rhee & Bezuijen, 1992. C. van Rhee & A. Bezuijen, Influence of seepage on stability of sandy slope, *Journal of Geotechnical Engineering* 118(8):1236-1240, August 1992.
- Robbins et al., 2018. B.A. Robbins, V.M. van Beek, J.F. Lopez, A.M. Montalvo Bartolomei & J. Murphy, A novel laboratory test for backward erosion piping, *International Journal of Physical Modeling in Geotechnics* 18(5):266-279, september 2018, doi:10.1680/jphmg.17.00016.
- Rosenbrand, 2017. Esther Rosenbrand, Literatuurstudie filtercriteria ten behoeve van grofzandbarrière, memo 11200952-003-GEO-0001, Deltares, Delft, 19 september 2017, 12 pp.
- Rosenbrand & Van Beek, 2017. E. Rosenbrand & V.M. van Beek, Analysis report coarse sand barrier, rapportage 11200952-006-GEO-0006, Deltares, Delft, november 2017, 125 pp.
- Rosenbrand, 2020. Esther Rosenbrand, Uitgangspunten her-kalibratie Gameren profiel RW136+050, memo 11200952-067-GEO-0001, Deltares, Delft, 29 juni 2020, 15 pp.
- Rosenbrand & Van Beek, 2020. Esther Rosenbrand & Vera van Beek, Analysis report coarse sand barrier, Medium-scale experiments stage II, rapportage 11200952-052-GEO-0004, Deltares, Delft, 2 maart 2020, 295 pp.
- Rosenbrand & Knoeff, 2020. E. Rosenbrand & J.G. Knoeff, KvK 2019 onderzoek faalpaden en piping, rapportage 11203719-028-GEO-0009, Deltares, Delft, 1 mei 2020, 78 pp.
- Rosenbrand & Koelewijn, 2020a. Esther Rosenbrand & André Koelewijn, Analyse aanvullend grondonderzoek gameren, memo 11200952-067-GEO-0002, Deltares, Delft, 29 juni 2020, 11 pp.
- Rosenbrand & Koelewijn, 2020b. Esther Rosenbrand & André Koelewijn, Geveiligheidsanalyse profiel RW136+050, memo 11200952-067-GEO-0003, Deltares, Delft, 28 juli 2020, 17 pp.
- Rosenbrand et al., 2021. Esther Rosenbrand, Vera van Beek & Geeralt van den Ham, 3D effects for a coarse sand barrier, rapportage 11200952-060-GEO-0002, Deltares, Delft, 3 februari 2021, 118 pp.
- Van Schaick & De Wit, 2020. S. van Schaick & T. de Wit, Dwarsdoorsnedes Ontwerp Grofzand Barrière Open Methode, tekening BF6334-VO+ / 0000-05, RoyalHaskoningDHV, Nijmegen, 8 oktober 2020.

Stellema, 2019. G.A.F. Stellema, Geotechnisch en –fysisch onderzoek fase 1, 2 en 3, DAS bodemonderzoek Gameren 22E (dijkkring 38 traject 38-1), versie 1, definitief, projectnummer VN-699229-2, documentnummer R63853, Wiertsema en Partners, Tolbert, 27 mei 2019, 436 pp.

Taal, 2017. Laura Taal, Ontwerp- en beoordelingsrichtlijn Verticaal Zanddicht Geotextiel, Groene versie, POV-piping, Tiel, 14 juni 2017.

De Wit, 2017. Tom de Wit, Uitgangspuntenrapport Gameren, Ontwerp piping maatregelen: GZB, VZG en damwand-/pipingscherm, rapportage T&PBF6334R001F02, RoyalHaskoningDHV, Nijmegen, 24 november 2017, 23 pp.

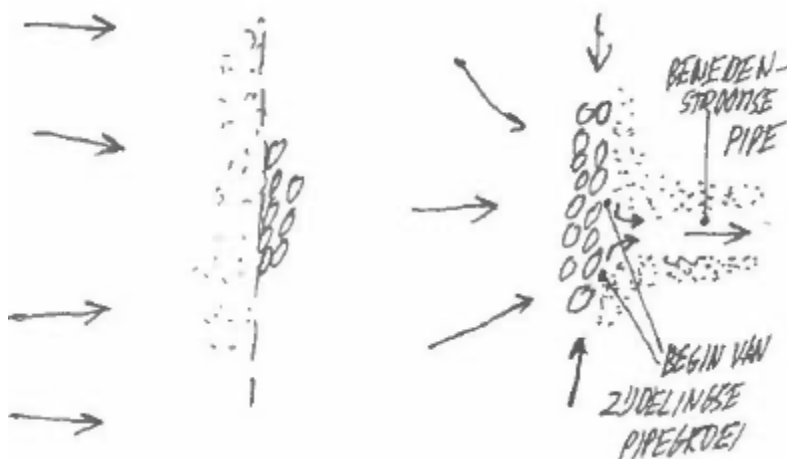
A Beïnvloedende factoren en maatregelen daartegen

A.1 Ontwerpfase

A.1.1 O1 Barrière is niet lang genoeg in de lengterichting van de waterkering

De grofzandbarrière heeft in de lengterichting van de waterkering altijd twee uiteinden. Hier kan een bijzondere vorm van achterloopsheid optreden als het uiteinde niet goed is afgewerkt en/of niet goed aansluit op hoge gronden of een andere pipingmaatregel.

De bijzondere vorm van achterloopsheid heeft te maken met de grote doorlatendheid van de barrière, die in tegenstelling staat met de gangbare constructies waarvoor regels met betrekking tot achterloopsheid zijn afgeleid, welke zelf waterdicht zijn. De kern van het probleem zit in de mogelijkheid van zijdelingse pipegroei in het achtergrondzand direct benedenstrooms van de barrière. Deze zijdelingse pipegroei kan relatief gemakkelijk optreden op de plaats waar een pipe, komend vanaf het uittredepunt, de barrière bereikt, doordat het grovere barrière materiaal niet gemakkelijk wordt meegevoerd en de erosiecapaciteit van de pipe wel aanwezig is. Door de alzijdige aanstroming van water naar de kop van de pipe, ook zijwaarts van de pipe, worden de korrels van het achtergrondzand direct aansluitend aan de grofzandbarrière gemakkelijk wél meegevoerd, zie ook Figuur 67 waarin de situatie is geschetst waarin er al sprake is van twee korte zijdelingse pipes.

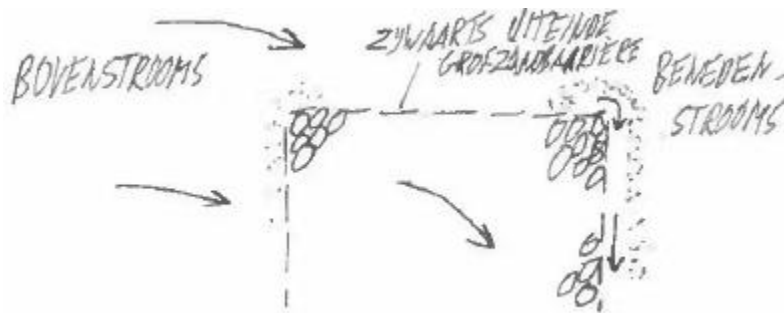


Figuur 67 Bovenaanzicht met beginnende zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière.

Deze zijdelingse groei wordt begrensd door de afvoercapaciteit van de pipe in benedenstroomse richting en het aantrekken van water uit de gehele omgeving bovenstrooms van, en onder, de sterk doorlatende grofzandbarrière. Dit vormt een groot verschil met achterloopsheid bij dichte constructies, met name als deze relatief diep in de watervoerende zandlaag steken: daarbij zal een zijdelingse pipe achterlangs de constructie vanaf een zeker verval alleen maar gemakkelijker naar het uiteinde toegroeien doordat de stroming (vrijwel) geheel ook daarvandaan komt.

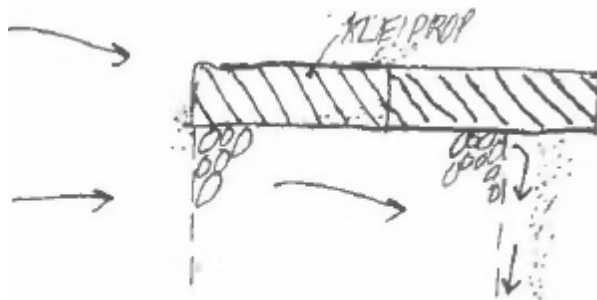
Bij de grofzandbarrière kan de zijdelingse pipegroei uiteraard ook het uiteinde van de grofzandbarrière bereiken, vooral als de benedenstroomse pipe de barrière relatief dichtbij dit uiteinde heeft bereikt. Zonder aanvullende maatregelen zal deze zijdelingse pipe bij het

uiteinde de hoek omgaan en verder bovenstrooms groeien, in de richting van het buitenwater, zie Figuur 68.



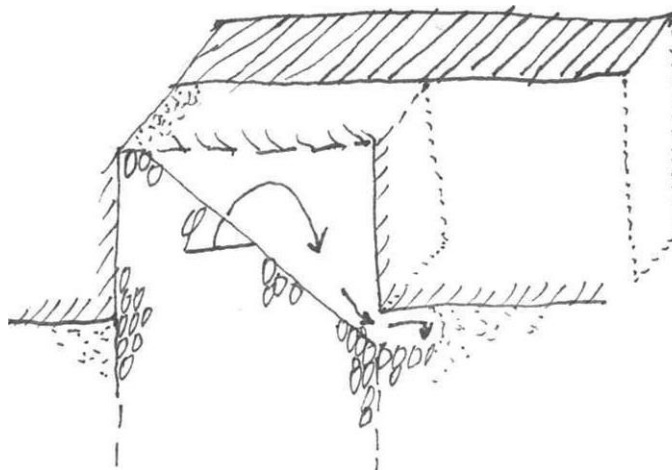
Figuur 68 Zijdelingse pipegroei bij uiteinde grofzandbarrière (bovenaanzicht).

Een mogelijke maatregel hiertegen kan gevonden worden in een slechtdoorlatende kleiprop aan het uiteinde, zoals aangegeven in Figuur 69. Bij deze maatregel is het van belang dat de kleiprop uitsteekt in benedenstroomse richting om zo iedere kans op passage uit te sluiten.



Figuur 69 Kleiprop ter afsluiting van uiteinde grofzandbarrière (doorgezet benedenstrooms van barrière; bovenaanzicht)

Omdat korrels vanuit de grofzandbarrière in de zijdelingse pipe zullen rollen, zal uiteindelijk over de gehele lengte van de grofzandbarrière een situatie *kunnen* ontstaan waarbij er een helling in de grofzandbarrière aanwezig is, tot aan de kleiprop aan toe, zoals geschetst in Figuur 70.



Figuur 70 Gedeeltelijk leeggelopen inkassing van de grofzandbarrière tot aan de kleiprop op het uiteinde(zijaanzicht met enige 3D-suggestie).

Factoren die dit proces van de vorming van een haast uniforme 2D-doorsnede zullen verhinderen, zijn locatie en aantal van de benedenstroomse pipe(s) richting uitredpunt(en) en beperkingen in de afvoer van de grove korrels, niet alleen bij de uiteinden van de

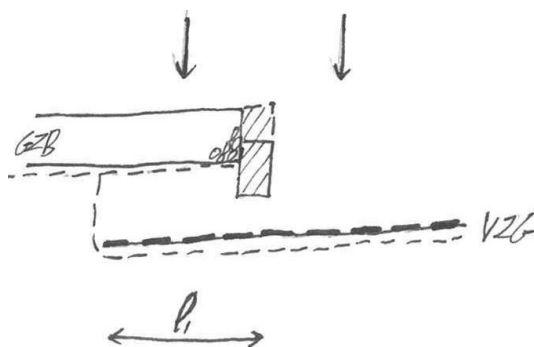
grofzandbarrière, maar ook tussen deze uiteinden en de benedenstroomse pipe(s). Zie voor deze beperkingen §A.1.10 en §A.1.13.

Voor Gameren is voor de afmetingen van de kleiprop gesteld dat deze even diep moet steken als de grofzandbarrière, aan de benedenstroomse zijde 1,0 meter moet uitsteken richting achterland en minimaal 0,5 m dik moet zijn. Bovendien moet het achtergrondzand aanwezig blijven in de hoek waar de kleiprop en de grofzandbarrière op elkaar aansluiten. De verwachting is dat dit ruimschoots voldoende veiligheidsmarge oplevert, maar hier zijn geen specifieke berekeningen voor gemaakt.

Vanwege de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière is het ver genoeg doorzetten van de grofzandbarrière tot in een aangrenzend gebied waar piping zonder grofzandbarrière was uit te sluiten of waar anderszins aan de eisen ter voorkoming van piping werd voldaan, niet zo eenvoudig als dat op het eerste gezicht mogelijk wel lijkt. De zijdelingse pipegroei wordt primair aangedreven door de hoge doorlatendheid van de grofzandbarrière en zal zich daardoor ook voortzetten tot in het gebied dat aanvankelijk voldeed tegen piping. Hierom is het proces van achterloopsheid bij een grofzandbarrière wezenlijk verschillend van achterloopsheid bij ondoorlatende constructies.

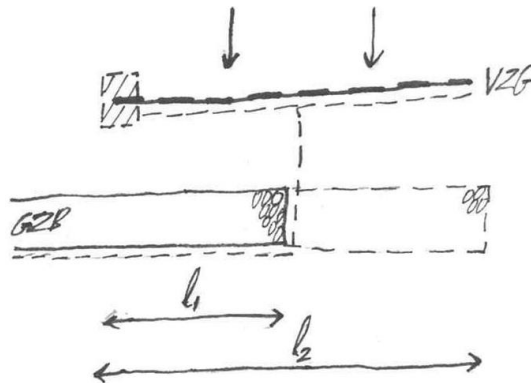
Voor de aansluiting op een 'klassieke' pipingberm of op hoge gronden kan daarom ook een dergelijke kleiprop worden toegepast. Bij een aansluiting op een ondoorlatende constructie, zoals een damwand of een diepwand, geldt dat die constructie als prop zal werken. In de detaillering zal er dan aandacht aan moeten worden besteed dat er geen spleet kan ontstaan tussen de constructie en de grofzandbarrière. Een open aansluiting van de grofkorrelige barrière werkt dan waarschijnlijk het beste. Opgemerkt wordt dat de hydraulische belasting op de grofzandbarrière naast zo'n ondoorlatende constructie wel wat hoger zal zijn.

Bij een aansluiting op een andere doorlatende pipingmaatregel, zoals een eerder aangelegde grofzandbarrière of een VZG, zijn er meerdere mogelijkheden. Bij een aansluiting op een andere grofzandbarrière kan de nieuwe barrière in en door de bestaande barrière worden aangelegd, zodat één doorgaande grofzandbarrière ontstaat. Bij een VZG is een directe aansluiting in principe ook denkbaar, maar dit moet dan wel zó worden uitgevoerd dat het geotextiel niet beschadigd raakt. Een alternatieve aansluitmogelijkheid is dan een korte overlap waarbij de grofzandbarrière net bovenstrooms van het VZG wordt aangebracht, zie Figuur 71, met een kleiprop aan het uiteinde van de grofzandbarrière. De overlappende lengte l_1 kan beperkt zijn, circa 1 meter mag naar verwachting vooralsnog als ruim voldoende worden verondersteld. Deze overlappende lengte is vooral nodig om uit te sluiten dat een pipe vanaf het uiteinde van het VZG schuin voorbij de kleiprop kan groeien, al dan niet langs ongelukkigerwijs bij de aanleg achtergebleven kleibrokken tussen barrière en geotextiel.



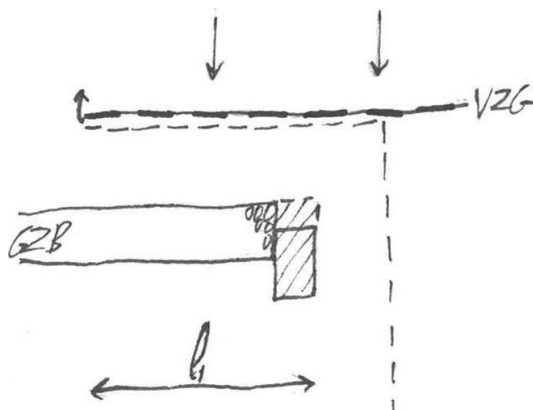
Figuur 71 Aansluiting van een grofzandbarrière bovenstrooms van een verticaal zanddicht geotextiel (bovenaanzicht).

Wanneer de grofzandbarrière net benedenstrooms van het VZG wordt aangebracht, zoals geschetst in Figuur 72, dan kan een korte overlappende lengte l_1 onvoldoende zijn wanneer het VZG zonder een eindafsluiting is aangebracht. In zo'n situatie zou een grotere overlappende lengte l_2 moeten worden toegepast. Een betrouwbare methode voor het bepalen van l_2 is momenteel echter niet beschikbaar.



Figuur 72 Aansluiting van een grofzandbarrière benedenstrooms van een verticaal zanddicht geotextiel (bovenaanzicht).

Een denkbare variant op de hiervoor genoemde situatie is geschetst in Figuur 73, met een kleirop bij een korte overlappende lengte l_1 . Hierbij is het echter denkbaar dat een benedenstroomse pipe de barrière (in de tekening) rechts passeert en om het geotextiel heengroeit.



Figuur 73 Benedenstroomse aansluiting van een grofzandbarrière met kleirop op een verticaal zanddicht geotextiel, met de mogelijkheid van passage door een pipe vanaf benedenstrooms (bovenaanzicht).

Het rekenen aan dergelijke drie-dimensionale stromingssituaties met zijdelingse pipegroei waarin erosie een dominante rol speelt, vormt ook voor specialisten nog een uitdaging (zie ter illustratie bijvoorbeeld de 3D-analyse van de grofzandbarrière (Rosenbrand et al., 2021)). Het bepalen van een 'veilige lengte' waarover een grofzandbarrière zonder eindafsluiting kan worden aangelegd, is daardoor nog niet goed mogelijk. Een eenvoudiger oplossing is te vinden in het constructief uitsluiten van deze mogelijke faaloorzaak, zoals hiervoor is geschetst. Hiervoor zal steeds naar de plaatselijke situatie moeten worden gekeken hoe dit het beste kan worden vormgeven.

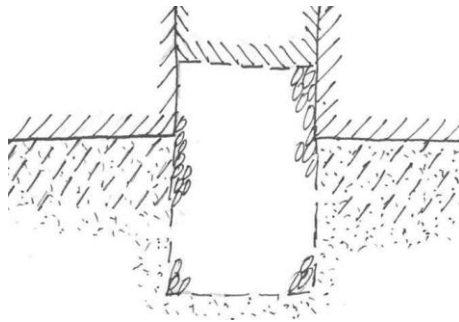
Deze faaloorzaak is bij een goed ontwerp én een goede uitvoering daarvan geheel uit te sluiten, mits de kleirop niet aan degradatie onderhevig is en van voldoende afmeting is.

A.1.2

O2 Geen scherpe grenslaag tussen de pipinggevoelige zandlaag en de deklaag

In de principe-schetsen over de werking van de grofzandbarrière wordt altijd uitgegaan van een scherpe overgang tussen een deklaag van klei met daaronder een pipinggevoelige

zandlaag. Dit komt in de praktijk vaak voor, maar evengoed zijn er situaties waarbij er sprake is van een meer diffuse overgang tussen de slechtdoorlatende deklaag en de pipinggevoelige zandlaag van soms wel meerdere meters hoog. Voor het ontwerp van een grofzandbarrière kan dan een onjuist niveau worden ingeschat op basis van boorbeschrijvingen en sondeerresultaten. Een dergelijke situatie is geschetst in Figuur 74, waar ten behoeve van deze uitleg een drielagensysteem is geschetst. De middelste laag kan bijvoorbeeld omschreven zijn als 'klei, sterk zandig' en een lage conusweerstand vertonen, terwijl de onderste laag een veel hogere conusweerstand laat zien. Voor het ontwerp kan dan de onderste 'laagovergang' als veilige grenslaag worden gehanteerd ter bepaling van de benodigde diepte van de barrière, terwijl de pipegroei in werkelijkheid mogelijk plaatsvindt op het niveau van de bovenste 'laagovergang'. Dit is van invloed op de keuze van de hoogte van de inkassing (zoals verder de vereiste heavehoogte, de meeton nauwkeurigheden bij het grondonderzoek en bij de uitvoering en de maaton nauwkeurigheden bij de uitvoering hiervoor bepalend zijn).



Figuur 74 Drielaagsysteem ter illustratie van 'geen scherpe grenslaag'.

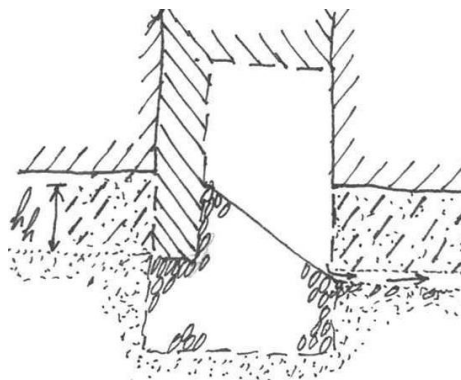
Het is ook denkbaar dat bij een diffuse overgang een pipe bovenstrooms op een hoger niveau verdergaat dan het niveau waarop een pipe vanaf het uittredepunt bij de barrière aankomt. Het stromingspatroon in de barrière zelf bevordert overigens een dergelijk vervolg op een hoger niveau (eventueel met een schuin naar beneden verlopende pipe), wat bij scherpe klei-zand overgang nooit zou plaatsvinden. De effectieve heave-hoogte wordt dan kleiner en falen treedt sneller op. Dit is nader uitgewerkt bij het bijbehorende faalpad in §C.1.22.

Drie meer extreme varianten waar deze situatie toe kan leiden, zijn:

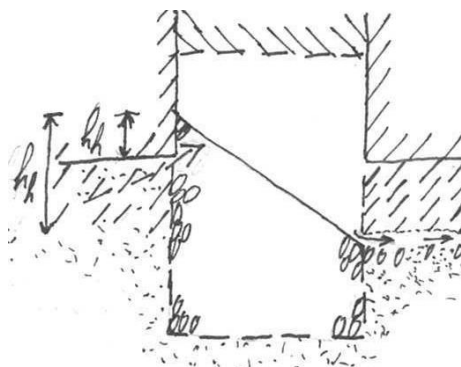
- De pipe groeit (min of meer) over de eigenlijke grofzandbarrière heen, door de onderkant van de sleufaanvulling (zie §C.1.4).
- De kleiaanvulling steekt effectief nog onder het niveau waarop piping plaatsvindt. Deze situatie is ook wel aangeduid als 'uitstulping' (zie §C.1.21). Hierbij zal geen zijdelingse pipegroei achter de grofzandbarrière langs optreden en ontstaat een extra ongunstig 3D-grondwaterstromingspatroon bij de barrière.
- De onderkant van de grofzandbarrière steekt niet diep genoeg en ligt nog boven het niveau waarop piping ontstaat. De pipe passeert dan ongehinderd onder de barrière door (zie §C.1.32).

De vereiste aandacht ter voorkoming van de eerstgenoemde mogelijkheid zal de drie meer extreme varianten in de praktijk kunnen uitsluiten. Het voorkomen van deze mogelijkheid vereist ten eerste een grondopbouw waarin dergelijke onscherpe overgangen daadwerkelijk voorkómen (op basis van geologische gebiedskennis is dit te detecteren) en ten tweede voorkómen dat hier bij het ontwerp onvoldoende aandacht voor is. Wanneer vanuit de geologie de kans bestaat dat dit voorkomt, zal hier bij ontwerp extra aandacht aan moeten worden besteed, hetgeen ook tot aanvullend grondonderzoek aanleiding kan zijn.

Op basis van de verkregen informatie uit het veld kan desnoeds worden overgegaan tot het toepassen van een bovenstroomse afdichting, soms ook wel aangeduid als een 'kleimuurtje': een kleilaag aan de bovenstroomse kant van de grofzandbarrière waarmee de vereiste heavehoogte geforceerd aanwezig zal zijn. Dit is aangegeven in Figuur 75 (vergelijk met Figuur 74 hiervoor en met Figuur 76 (gelijk aan Figuur 205 in §C.1.22)). De functionele eis aan de bovenstroomse afdichting luidt dat zich hierdoorheen geen pipe kan vormen. Een verticaal aaneengesloten kolom van goed verdichte klei van slechts enkele centimeters dikte, zonder doorgaande scheuren, volstaat hiervoor. Zie §E.3.2 voor een voorbeeld hoe dit in Gameren praktisch is uitgewerkt, met een afdichting van een halve meter dikte.



Figuur 75 Toepassing van een bovenstroomse afdichting om te kleine heavehoogte bij een onscherpe grenslaag uit te sluiten.



Figuur 76 Verschil in heavehoogte afhankelijk van gedrag bij bovenstroomse grenslaag (zie ook §C.1.22).

Voorsnog wordt geadviseerd om uit te gaan van een diepte van de onderkant van de grofzandbarrière van tenminste 1 m onder de onderkant van de diffuse grenslaag en een hoogte van de bovenkant van de grofzandbarrière van tenminste 0,5 m boven de bovenkant van de diffuse grenslaag. De eerder genoemde onnauwkeurigheden in grondonderzoek en uitvoering, evenals eventuele ongeziene variaties in de diepteligging kunnen dan naar verwachting worden opgevangen, met in het uiterste geval een grofzandbarrière die maar net aan de bovenkant van de pipinggevoelige zandlaag raakt (zie §5.6 of §§A.1.19 en A.2.9)

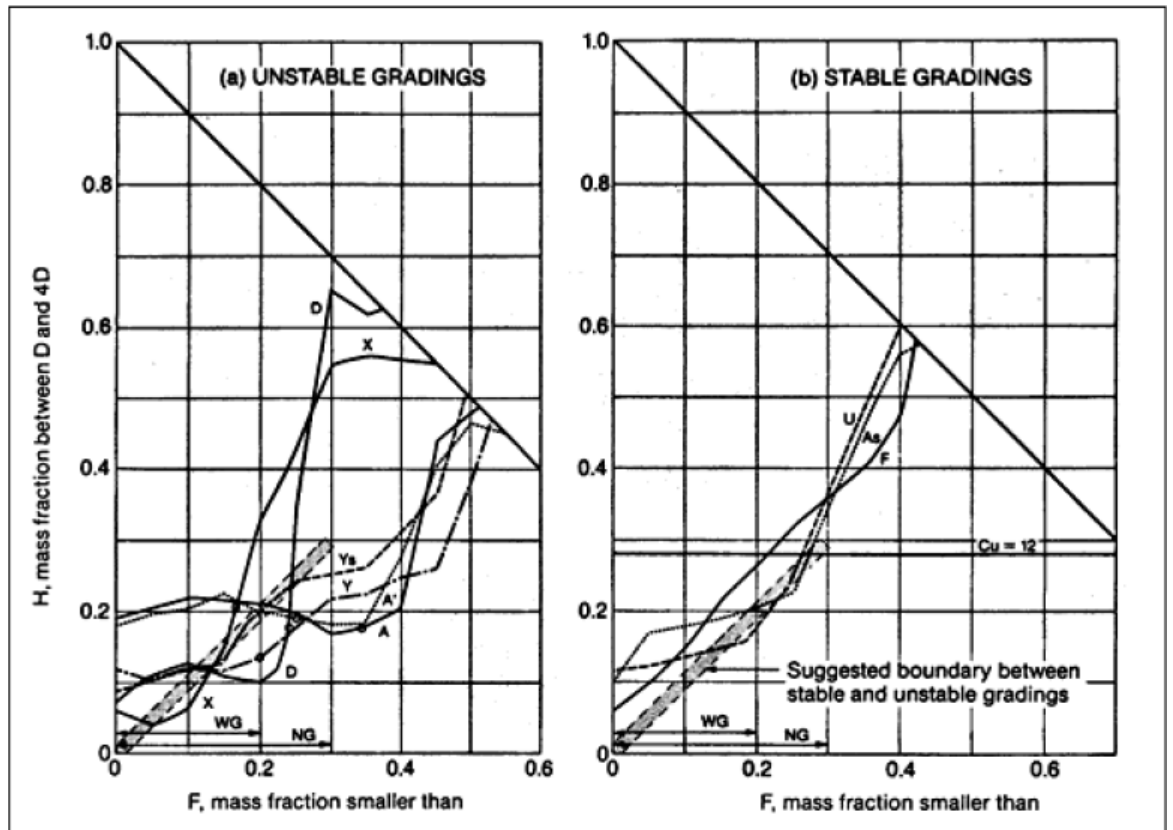
Deze faaloorzaak verdient nadrukkelijk de aandacht bij het grondonderzoek en afhankelijk van de uitkomst daarvan eventueel ook daarna.

A.1.3 O3 Barrièrezand is intern instabiel

Interne instabiliteit wil zeggen dat de fijnste fractie van een zandmengsel kan uitspoelen door de poriën, waardoor in vervolg daarop ook een minder fijne fractie kan uitspoelen. In natuurlijke zanden zoals die in Nederland buiten Limburg worden aangetroffen vormt dit geen probleem, maar bij een kunstmatig samengesteld materiaal vormt dit wel een risico.

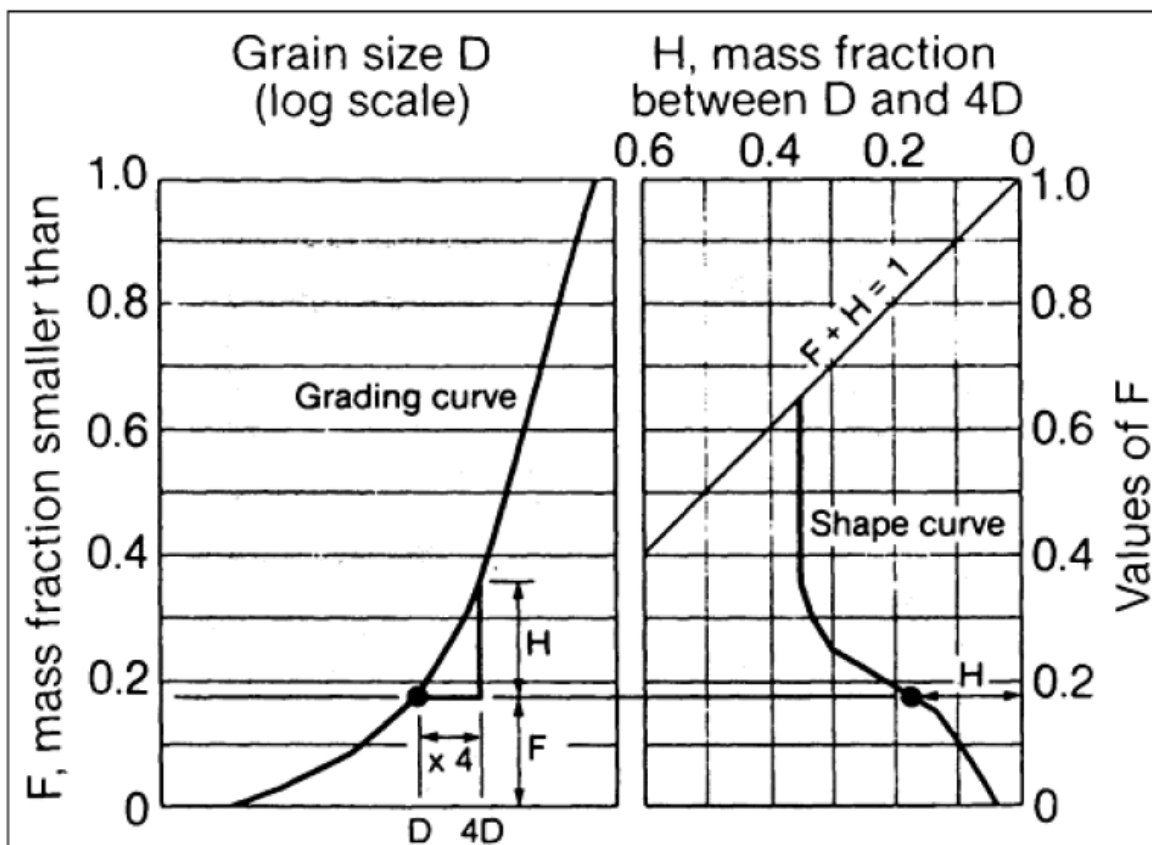
Voor interne stabiliteit zijn in de literatuur uiteenlopende criteria te vinden. Voor de grofzandbarrière is gekozen voor twee sets eisen waarmee bij Deltares ervaring is en die, in wisselende mate, ook internationaal worden gebruikt: de criteria van Kenney & Lau en van Burenkova.

Kenney & Lau (1985, 1986) hebben experimenteel vastgesteld dat er *waarschijnlijk* interne instabiliteit zal optreden indien de massafractie in de korrelverdeling tussen korrelgrootte D^{15} en $4D$, afgekort als H , kleiner is dan de massafractie kleiner dan D , afgekort als F , en het buigpunt in de korrelverdelingscurve kleiner is dan 0,2 voor ruime graderingen en 0,3 voor uniforme graderingen. In Figuur 77 en Figuur 78 zijn voorbeelden gegeven van de toepassing van dit criterium (overgenomen uit ICOLD, 2017).



Figuur 77 Methode voor het bepalen van interne instabiliteit van Kenney & Lay (1985), met de aangepaste criteria uit Kenney & Lau (1986) – figuur overgenomen uit ICOLD (2017).

¹⁵ In deze rapportage wordt verder voor de korrelgrootte in afwijking van Kenney & Lau een kleine letter d gebruikt.



Figuur 78 Methode om de vorm van een korrelverdelingsdiagram te karakteriseren (Kenney & Lau, 1986) – figuur overgenomen uit ICOLD (2017).

Door Burenkova (1993) zijn op basis van een groot aantal experimenten twee nadere criteria voorgesteld. Deze geven grenzen aan de verhouding tussen de grovere fractie en het geheel; niet te grof, niet te fijn, gebaseerd op de korrelgroottefracties d_{15} , d_{60} en d_{90} :

$$0.76 \log (d_{90,GZB}/d_{15,GZB}) + 1 < d_{90,GZB}/d_{60,GZB} \quad (\text{A.1.3.1})$$

$$d_{90,GZB}/d_{60,GZB} < 1.86 \log (d_{90,GZB}/d_{15,GZB}) \quad (\text{A.1.3.2})$$

Aanvankelijk is voor interne stabiliteit van een grofzandbarrière alleen van de criteria van Burenkova uitgegaan (Koelewijn, 2015). Deze zijn later vervangen door het criterium van Kenney & Lau, omdat dit van de vele criteria die in de literatuur in omloop zijn, het meest wordt gebruikt (Rosenbrand, 2017). In de kleinschalige laboratoriumproeven ontstond echter een filtercake bij de grofzandbarrière in combinatie met metselzand als achtergrondmateriaal: de fijnste fractie spoelde uit en werd tegengehouden door de grofzandbarrière (Rosenbrand & Van Beek, 2017). Dit metselzand voldeed wel aan het criterium van Kenney & Lau, maar niet aan het tweede criterium van Burenkova (Akrami & Koelewijn, 2018). Daarom is nadien besloten om ook te toetsen op de criteria van Burenkova, om mogelijke problemen met interne stabiliteit tijdig te onderkennen. De criteria van Burenkova leveren echter geen eenduidig resultaat: het destijds gebruikte barrièremateriaal GZB1 voldoet namelijk niet aan het eerste criterium, maar desondanks is er geen interne instabiliteit van het barrièremateriaal geconstateerd bij de experimenten met GZB1. De empirische criteria van Burenkova geven binnen de door haar gebruikte dataset ook geen scherpe scheidslijn tussen wel/niet instabiel materiaal; dit kan daarvoor de verklaring vormen. Overigens geven ook de criteria van Kenney & Lau geen scherpe scheidslijn op.

Bij de keuze van het barrièrezand dient er voor te worden gezorgd dat aan deze eisen wordt voldaan, zodat deze faaloorzaak niet kan optreden.

A.1.4 O4 Barrièrezand is te grof in relatie tot achtergrondzand

Het barrièrezand mag niet zo grof zijn dat het achtergrondzand er doorheen kan spoelen. Daarvoor zijn al door Terzaghi zogenoemde filtercriteria opgesteld. Deze zijn te vinden in allerhande grondmechanische standaardwerken, zoals Lambe & Whitman (1979).

De filtercriteria die garanderen dat er geen achtergrondzand uitspoelt in de barrière of daar doorheen gaat, luiden als volgt:

$$d_{15,GZB} < 5 * d_{85,a} \quad (A.1.4.1)$$

$$d_{15,GZB} < 20 * d_{15,a} \quad (A.1.4.2)$$

$$d_{50,GZB} < 25 * d_{50,a} \quad (A.1.4.3)$$

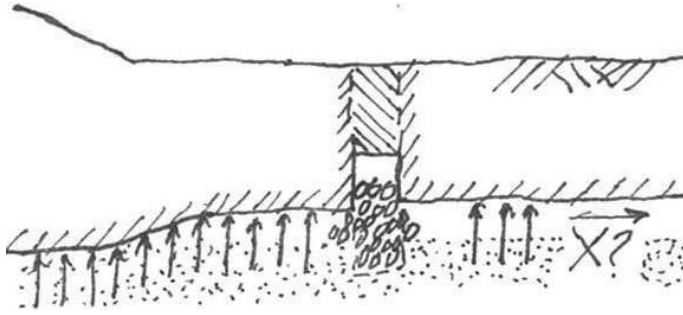
Er is gekozen voor de getalswaarden die horen bij geometrisch dichte filters. De factor 5 in vergelijking (A.1.4.1) is daarbij wel aan de bovengrens van de vaak genoemde range van 4 à 5. Een keuze voor de ruimere getalswaarden behorend bij geometrisch open filters (7 à 9) wordt nadrukkelijk afgeraden omdat er daarbij vrijwel altijd enig, en soms veel, materiaalverlies optreedt, waarna bij de configuratie behorend bij een grofzandbarrière progressief falen zal optreden.

Bij deze criteria dient de kleinst voorkomende waarde uit de beschikbare korrelverdelingen van het achtergrondzand te worden gekozen. Het gaat hier dan om de korrelverdelingen uit de pipinggevoelige zandlaag. Verdeeld over het dijktracé moeten er meerdere korrelverdelingen worden bepaald, wanneer er sprake is van verschillende geologische formaties moeten van elke formatie meerdere korrelverdelingen beschikbaar zijn. Ter illustratie: voor de pilot bij Gameren van 1 km lengte zijn in het uiteindelijke tracé 32 korrelverdelingen bepaald ten behoeve van het Definitief Ontwerp, waarbij uitgegaan is van de ongunstigste waarnemingen op zandig materiaal (Koelewijn, 2021).

Wanneer aan deze eisen wordt voldaan, dan kan deze faaloorzaak niet optreden. Een risico hierbij zijn de beschikbare korrelverdelingen: als deze onvoldoende representatief zijn en een gedeelte met pipinggevoelig fijn achtergrondzand is gemist bij het grondonderzoek, dan is er toch een kans dat hierdoor falen optreedt.

A.1.5 O5 Opdrijven van de deklaag bovenstrooms van de grofzandbarrière

Bij een voldoende hoge waterdruk in de pipinggevoelige zandlaag, in combinatie met een voldoende dikke deklaag *waarbij onvoldoende drukverlies richting het achterland optreedt*, kan de deklaag bovenstrooms van de grofzandbarrière gaan opdrijven: er ontstaat dan een waterlens tussen de bovenkant van het zandpakket en de onderkant van het slappe-lagenpakket. Dit betreft situaties waarin er sprake is van een aanzienlijke leklengte. Dit is bijvoorbeeld geconstateerd bij de macrostabiliteitsproef met opdrijven bij Bergambacht (Lindenberg et al., 2002). De gedachte, of vrees, hierbij is dat er dan ongehinderd erosie kan optreden richting het achterland en daarmee falen van de grofzandbarrière, zie Figuur 79.



Figuur 79 Opdrrijven van een deklaag met een grofzandbarrière.

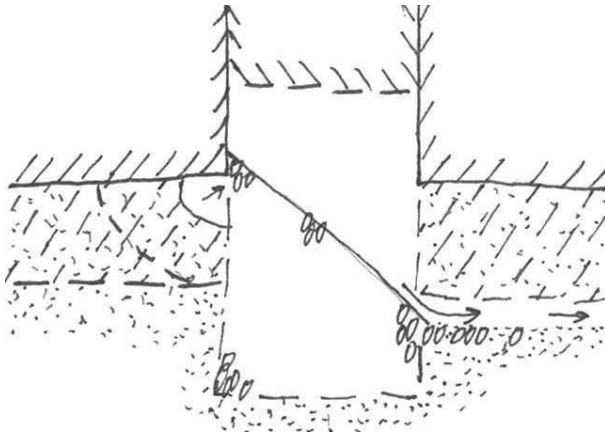
Met de verandering van een vlakke grofzandbarrière (bovenzijde gelijk aan niveau grenslaag) naar een grofzandbarrière met een inkassing lijkt dit scenario als oorzaak van falen onwaarschijnlijker te zijn geworden, maar de kans van optreden mocht toch al nihil worden geacht. Opdrrijven vergt immers een aanzienlijke opwaartse waterdruk, zeker indien de grofzandbarrière betrekkelijk dicht bij een dijk ligt, wat in het algemeen toch het geval zal zijn. Gesteld dat de sleufaanvulling deze opwaartse waterdruk zal weerstaan (zie anders knoop 60, 'opbarsten en heave van de sleuf', met onder andere O18, 'drainage via aanvulling boven barrière' als beïnvloedende factor, zie §A.1.18), dan mag er ook geen opbarsten van de deklaag of uitstroming bij een uittredepunt optreden, want dan is de voor opdrrijven vereiste druk immers weg (en neemt de lek lengte sterk af). In situaties waarin een pipingwerende maatregel zoals de grofzandbarrière wordt toegepast, ligt het voor de hand te veronderstellen dat er sprake is van een uittredepunt op een zodanige afstand dat opdrrijven bovenstrooms van de grofzandbarrière niet kan optreden.

Maar gesteld dat dit niet het geval is en de drukopbouw kan plaatsvinden: dan zal de grondwaterstroming in de ontstane waterlens onvoldoende zijn om tot erosie van zelfs maar het fijne zand te leiden, laat staan erosie van de grofzandbarrière. Zodra er wél een uittredepunt ontstaat benedenstrooms van de barrière, dan zal de druk zeer snel afnemen en er hooguit een begin van erosie ontstaan, het meeste nabij het ontstane uittredepunt. Van opdrrijven is dan al vrijwel direct geen sprake meer en de reële bedreigingen voor het functioneren van de grofzandbarrière daarbij zijn al afgedekt door de andere beïnvloedende factoren, waarbij in dit geval O20, 'barrière is benedenstrooms van uittredepunt' (zie §5.7 of §A.1.20) het meest relevant is.

Deze factor vormt géén reëel risico en kan daarom verder buiten beschouwing worden gelaten.

A.1.6 O6 Grenslaag met veel silt

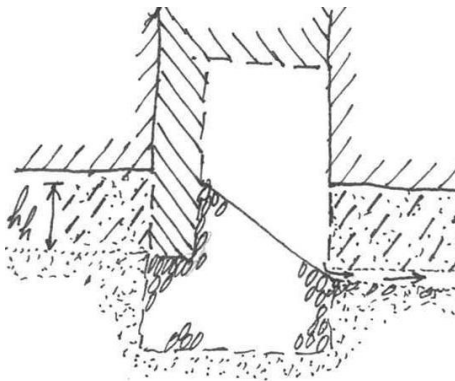
Een grenslaag met veel silt, bijvoorbeeld zoals geïllustreerd in Figuur 80, kan worden gezien als een variant op de situatie zonder scherpe grenslaag, hoewel dit ook een gevolg kan zijn van een onjuiste classificatie van de silthoudende laag direct boven de pipinggevoelige zandlaag. In Figuur 80 is aangenomen dat de siltlaag aan de benedenstroomse zijde niet erodeert, maar aan de bovenstroomse zijde zou dan toch een probleem kunnen ontstaan wanneer de samenstelling van de grofzandbarrière niet is afgestemd op de siltlaag: het silt zal door het grove zand heen uitspoelen en de kans bestaat dat er onvoldoende heavehoogte overblijft.



Figuur 80 Mogelijke situatie bij een grenslaag met veel silt, zonder daarop afgestemde grofzandbarrière bij een verval waarbij de inkassing zal leeglopen – ware het niet dat de benedenstroomse pipe in dit gedeelte niet zal ontstaan, zie hiervoor de tekst.

Wanneer de samenstelling van de grofzandbarrière mede zou moeten worden afgestemd op de siltlagen, dan leidt dit al snel tot een relatief fijne samenstelling van het zand van de grofzandbarrière: uit de eis voor een geometrisch dicht filter (vergelijking (6.2) in §6.2) volgt een lage maximale waarde voor de d_{15} van de grofzandbarrière, namelijk *maximaal* 5 maal de d_{85} van het achtergrondmateriaal. Daarentegen moet de grofzandbarrière om effectief te zijn over een relatief grote doorlatendheid beschikken, niet alleen ten opzichte van deze siltlagen, maar (vooral) ook ten opzichte van de doorsneden zandlagen, zowel in hetzelfde profiel als in aangrenzende profielen. Dit is tot uitdrukking gebracht in vergelijking (6.4) in §6.2: de d_{15} van de grofzandbarrière moet *minimaal* 4 maal groter zijn dan de d_{15} van het achtergrondmateriaal. Dit leidt al snel tot onderling onverenigbare eisen.

Wanneer de grofzandbarrière voldoende breed is en de siltlaag voldoende dun, dan is er uiteindelijk geen probleem, zelfs als de siltlaag lokaal of over de volle breedte volledig uitspoelt. Maar bij een dikkere siltlaag en een relatief smalle grofzandbarrière waarbij geen bovenstroomse afdichting is toegepast (zie Figuur 81), dan zou de sterkte van de grofzandbarrière onvoldoende zijn.



Figuur 81 Toepassing van een bovenstroomse afdichting om te kleine heavehoogte bij een onscherpe grenslaag, of bij een siltlaag, uit te sluiten.

Bovenstaande benadering zoomt echter te snel in op de situatie in de dwarsdoorsnede met de grofzandbarrière en de onmiddellijke omgeving daarvan. Belangrijker is daarom de constatering dat de aanwezigheid van een siltlaag niet tot onoverkomelijke problemen leidt, zelfs als de samenstelling van het barrièrezand hier niet op afgestemd wordt, vanwege de effecten die op wat grotere schaal plaatsvinden.

Ten eerste zal in het gedeelte waar de grofzandbarrière een siltlaag passeert, er geen pipegroei plaatsvinden vanuit het achterland tot aan de grofzandbarrière. Een eventuele beginnende pipe zal immers weinig aanvoer van water krijgen vanuit de siltlaag, vanwege de lage doorlatendheid daarvan. Pipegroei onder de siltlaag door, in de zandlaag, is niet mogelijk doordat het niet-cohesieve silt geen stabiel plafond zal vormen boven de pipe, maar in de pipe zal vallen. Doorgroei van de pipe vereist derhalve dat de hele siltlaag boven de pipe, met aan weerszijden een helling onder de hoek van inwendige wrijving ϕ van het silt, zal moeten worden afgevoerd – en gelet op de omvang van de holte die daarmee ontstaat, mogelijk ook de deklaag daarboven. Voordat dit al gebeurt is ontstaan en groei van een pipe (benedenstrooms van de grofzandbarrière) in aangrenzende gedeelten zonder siltlaag veel waarschijnlijker.

Ten tweede vormt de siltlaag geen beletsel voor het functioneren van de grofzandbarrière voor wat betreft de zijdelingse pipegroei in lengterichting van de dijk. Deze zijdelingse pipegroei maakt het mogelijk dat niet alleen op de plaats waar de benedenstroomse pipe bij de grofzandbarrière aankomt, maar ook verderop losse korrels uit de grofzandbarrière in de ontstane holle ruimte direct benedenstrooms van de barrière zullen vallen. Die ruimte wordt daardoor tijdelijk gedeeltelijk opgevuld, maar de vernauwing in combinatie met de blijvende stroming van water door de pipes zal leiden tot voortgaande erosie. Hierbij zullen de grotere korrels minder ver komen dan de kleinere korrels en treedt ook een soort ingraving van de grotere korrels op: kleinere korrels, al dan niet uit het achtergrondzand, naast en ook onder de grotere korrels eroderen en de moeilijker transporteerbare grotere korrels komen dieper te liggen en vormen zo geleidelijk aan een 'grof plaveisel' aan de onderzijde van de pipes, zoals toegelicht in §5.3.

De korrels die de grofzandbarrière verlaten, leiden in eerste instantie tot een holle ruimte bovenin de inkassing, aan de benedenstroomse zijde van de barrière. Immers, de ruimte die een korrel innam zal worden opgevuld door de korrel(s) erboven. Naarmate er meer zand uit de barrière wordt afgevoerd zal er een helling ontstaan in de grofzandbarrière onder een helling gelijk aan de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand. Onder invloed van de grondwaterstroming door de barrière heen zal deze helling nog wat verder verflauwen.

Door de hiervoor beschreven processen groeien er aan weerszijden van de aansluiting van iedere benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière twee holle ruimtes vrijwel recht boven elkaar (de zijdelingse pipe en de holte bovenin aan de benedenstroomse zijde), die naarmate het proces verder vordert één geheel vormen. Hierdoor wordt de stromingsweerstand in de langsrichting van de barrière, die bij een volledig intacte barrière natuurlijk al laag is, nog veel lager, waardoor de stijghoogte in de barrière in het gedeelte waar de inkassing gedeeltelijk is leeggelopen overal praktisch gelijk wordt.

Wanneer een zijdelingse pipe bij een siltlaag aankomt, dan zal het silt dat direct aan de barrière grenst relatief gemakkelijk eroderen: de niet-cohesieve siltdeeltjes worden immers gemakkelijk meegevoerd. De hiervoor beschreven processen treden dus ongehinderd ook op in en rond een deel van de grofzandbarrière dat in een siltlaag ligt. Wel zal de aanvoer van water van bovenstrooms hier kleiner zijn: de siltlaag is immers relatief slecht doorlatend. Hierdoor zal de hellingshoek in de barrière hier niet veel flauwer worden dan de hoek van inwendige wrijving van het materiaal.

Een ander verschil betreft het gedrag bij dunne obstakels aan de benedenstroomse zijde, zoals een plank of een stuk plastic loodrecht op de grofzandbarrière. Elders zal dit de doorgroei van de zijdelingse pipe doen stoppen, maar bij een siltlaag kan de groei doorgaan, juist doordat de siltdeeltjes door de feitelijk te grof ontworpen grofzandbarrière heen kunnen en er zo als het ware een by-pass kan ontstaan.

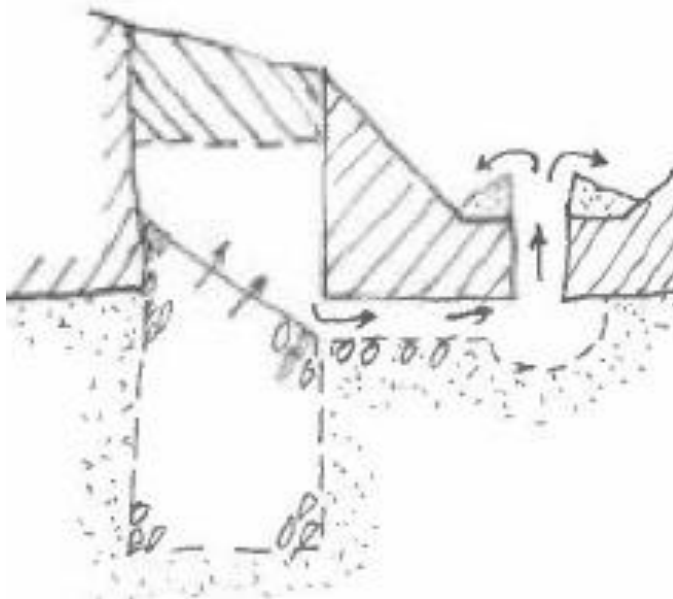
In Gameren is in meerdere boringen in het tracé van de grofzandbarrière voor het Definitief Ontwerp een hoog gehalte aan silt aangetroffen (meer dan 15%), direct boven de voor piping maatgevend beschouwde zandlaag. Dit is het geval bij RW 134+040, RW 138+011 en RW 138+066, zie ook §E.3.1 van deze rapportage en Koelewijn (2021). Dat gevoegd bij de extra grote afstand tussen de holle ruimte in de gedeeltelijk leeggelopen inkassing en de bovenstroomse siltlaag, mede door de aanwezigheid van de bovenstroomse kleiprop in het Definitief Ontwerp, zal ertoe leiden dat er geen erosie van de siltlaag bovenstrooms van de barrière plaats zal vinden. NB: zelfs wanneer dit wel zou plaatsvinden, dan zou er uiteindelijk geen piping optreden nadat de siltlaag is geërodeerd, omdat het bovenstroomse zand niet door de grofzandbarrière heen kan, omdat daarvoor weer wél aan de filtereisen wordt voldaan.

De aanwezigheid van een siltige grenslaag vormt uiteindelijk geen probleem, zoals voor de pilottoepassing bij Gameren nader is onderzocht.

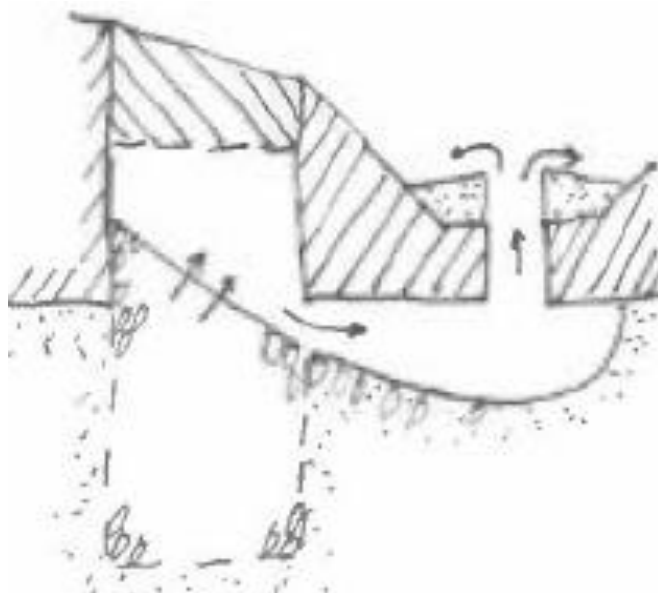
A.1.7

O7 Afstand van barrière tot uittredepunt is klein

Als de afstand tussen de barrière en het uittredepunt klein is, dan kunnen erosieverschijnselen bij het uittredepunt van invloed worden op het functioneren van de grofzandbarrière. Hierbij kan bijvoorbeeld worden gedacht aan terugschrijdende erosie van de deklaag, waardoor het uittredepunt wat opschuift richting de dijk en dus ook richting de grofzandbarrière, of aan de erosielens zoals deze wel gevonden wordt in de pipinggevoelige zandlaag onder een uittredepunt. Dit laatste is geïllustreerd in Figuur 82. Wanneer deze erosielens groeit en de afstand tot de grofzandbarrière klein is, dan ontstaat de situatie van Figuur 83. Bij verdere groei ontstaat daarna verdieping van de pipe aan de benedenstroomse rand van de grofzandbarrière, leidend tot een algehele verlaging van de helling (bij gelijkblijvende hellingshoek), hetgeen gelijk staat aan een afname van de heavehoogte.



Figuur 82 Uittredepunt nabij de grofzandbarrière: beginnende erosielens onder uittredepunt.



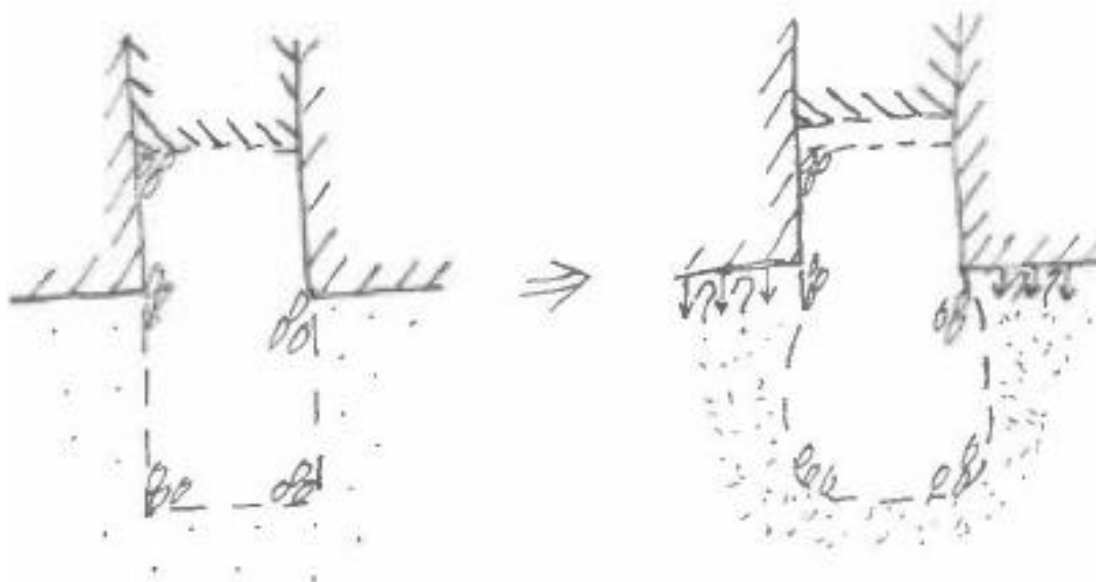
Figuur 83 Uittredepunt nabij de grofzandbarrière: erosielens gegroeid tot aan benedenstroomse rand van grofzandbarrière.

In Gameren bedraagt de afstand tussen de grofzandbarrière en het verwachte uittredepunt overall tenminste 15 m en is een dergelijke interferentie van erosieprocessen niet te verwachten.

Als praktische maat wordt vooralsnog aanbevolen om minimaal 5 m aan te houden tussen de grofzandbarrière en het uittredepunt. Dan is een noodmaatregel als het bijstorten van grond bij excessieve erosie nog denkbaar. Bij een kleinere afstand wordt aanbevolen nader naar de hiervoor genoemde problematiek (mogelijk opschuiven uittredepunt en omvang erosielens) te kijken.

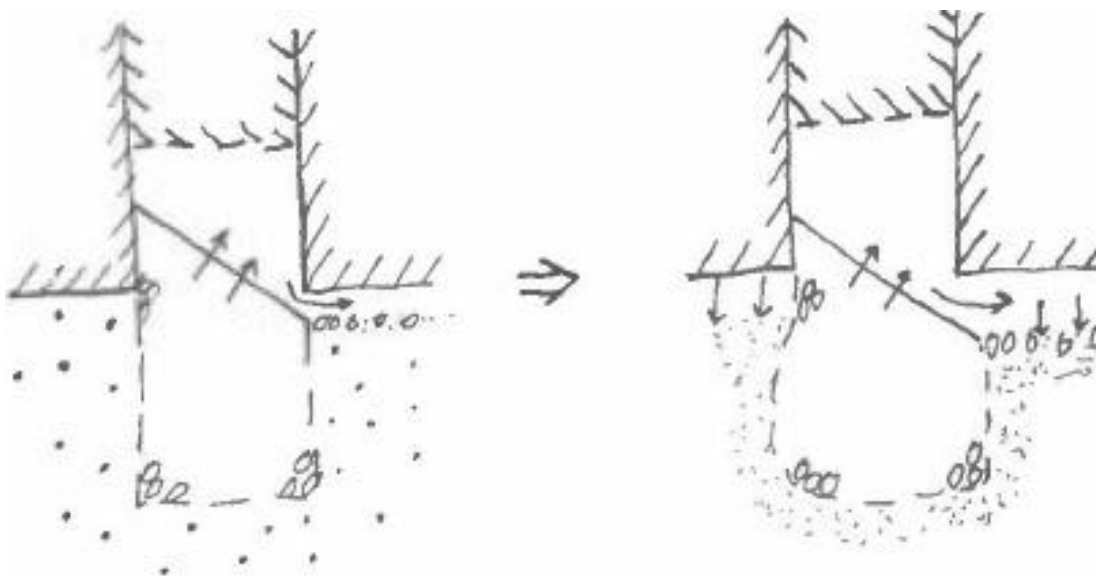
A.1.8 O8 Te los gepakt achtergrondzand

Wanneer het achtergrondzand (zeer) losgepakt is, dan is het denkbaar dat er ná aanbrengen van de grofzandbarrière verdichting optreedt, hetgeen tot nazakken van de grofzandbarrière kan leiden. Dit kan bijvoorbeeld de combinatie zijn van opzij uitzakken en naar beneden zakken die geschetst is in Figuur 84. Een praktische vraag die dit oproept is waarom dit dan niet al voor of desnoods tijdens de aanleg van de dijk of de grofzandbarrière zou zijn opgetreden? Bij een grofzandbarrière met een inkassing vormt dit echter geen enkel probleem, zoals in de figuur te zien is.



Figuur 84 Verzakking grofzandbarrière bij losgepakt achtergrondzand.

Een uitzondering hierop is de situatie waarbij er al een helling is ontstaan in de grofzandbarrière, zie Figuur 85. Dan vormt een kleine aanvullende verzakking mogelijk wél een probleem doordat de heavehoogte te veel afneemt. Dit scenario is echter uiterst onwaarschijnlijk, al kan gedacht worden aan het vlakbij intrillen van een stalen damwand als noodmaatregel tijdens een hoogwater.



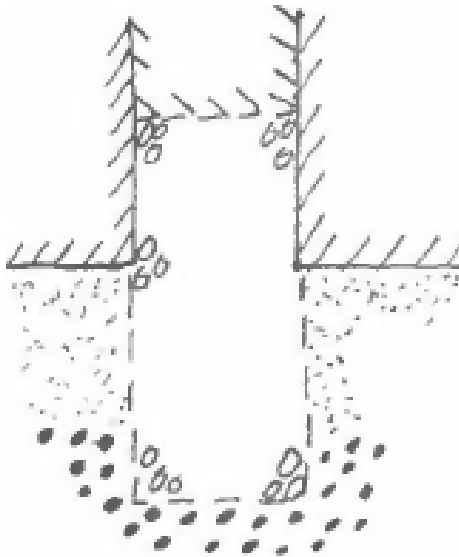
Figuur 85 Verzakking grofzandbarrière bij losgepakt achtergrondzand na leeglopen inkassing.

Deze factor vormt geen reëel risico en kan daarom verder buiten beschouwing worden gelaten.

A.1.9 O9 Sterk doorlatende (grind)laag onderaan barrière

Wanneer er sprake is van een sterk doorlatende (grind)laag die contact kan maken met het onderste gedeelte van de grofzandbarrière, zoals geschetst in Figuur 86, dan zal er extra veel toestroming naar de grofzandbarrière zijn. Bij de interpretatie van het grondonderzoek zal er aandacht aan moeten worden geschonken of er sprake is van een dergelijke laag. Deze ongunstige factor zal dan vervolgens eenvoudigweg in de tweedimensionale grondwaterstromingsberekeningen ten behoeve van het ontwerp worden meegenomen en

leiden tot een hogere berekende gradiënt, die op de in hoofdstuk 2 aangegeven wijze kan worden getoetst aan de toelaatbare gradiënt.

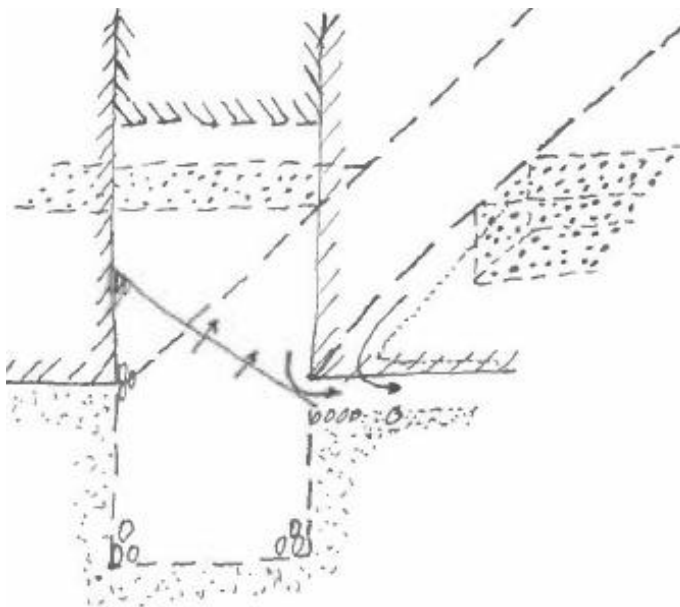


Figuur 86 Sterk doorlatende laag onderaan de barrière.

Dit is potentieel van grote invloed, maar is opgenomen in de werkwijze om tot een goed ontwerp te komen en mag daarmee als afgedekt worden beschouwd.

A.1.10 O10 Grofkorrelige discontinuïteit in ondergrond bij barrière

Anders dan bij O9 gaat het bij de 'grofkorrelige discontinuïteit in de ondergrond bij de barrière' om de aan- of doorsnijding van een (smalle) geul of een antropogeen sterk-doorlatend volume, zie Figuur 87. Hierdoor kan er sprake zijn van extra toestroming én de zijdelingse pipegroei (zie Figuur 16) kan hierop vastlopen, hetgeen van belang is voor de aannames die gedaan worden voor de vaststelling van de 3D-factor (zie §2.2.2.2 en bijlage D).



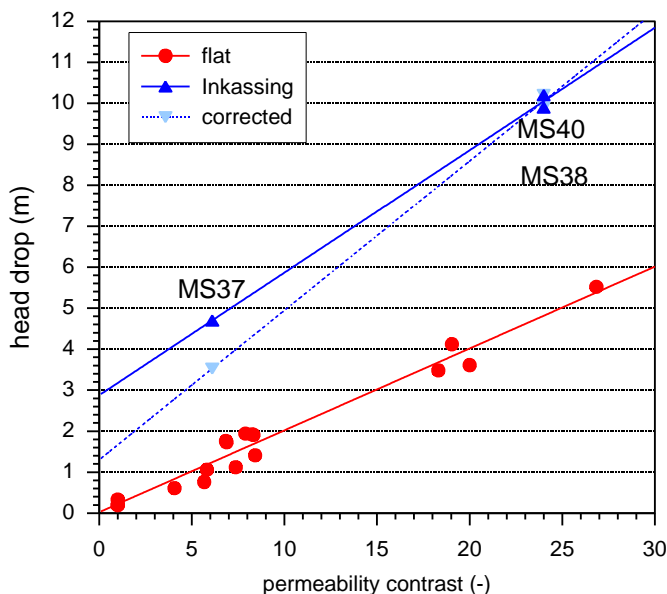
Figuur 87 Grofkorrelige discontinuïteit in de ondergrond haaks op de dijk, doorsneden door de grofzandbarrière.

Een dergelijke situatie zal her en der langs het tracé van een grofzandbarrière kunnen vóórkomen en zal geaccepteerd moeten worden. De ruimtelijke frequentie moet worden meegenomen bij de bepaling van de 3D-factor.

A.1.11

O11 Barrièrezand is te fijn in relatie tot achtergrondzand

De effectiviteit van de grofzandbarrière hangt in belangrijke mate samen met het doorlatendheidscontrast: de verhouding tussen de doorlatendheid van de barrière en de doorlatendheid van het achtergrondzand, zie Figuur 88 voor dit verband bij de laboratoriumproeven op medium-schaal bij Deltares.



Figuur 88 Verband tussen keerbaar verval (verticale as) en doorlatendheidscontrast (horizontale as) voor de medium-schaal opstelling, voor zowel een vlakke grofzandbarrière als een grofzandbarrière met een inkassing (Förster, 2021a).

Hoe groter het doorlatendheidscontrast is, hoe groter naar verhouding de gradiënt bovenstrooms van de grofzandbarrière kan worden – bij eenzelfde toelaatbare gradiënt in de grofzandbarrière kan dan een hoger verval over de dijk worden gekeerd. Maar naarmate het barrièrezand fijner is, neemt het doorlatendheidscontrast af. Hierom is het van belang om bij de selectie van het barrièrezand te zoeken naar een mengsel dat een zo groot mogelijke doorlatendheid heeft, terwijl het ook aan de overige voorwaarden (zie O3 en O4) voldoet.

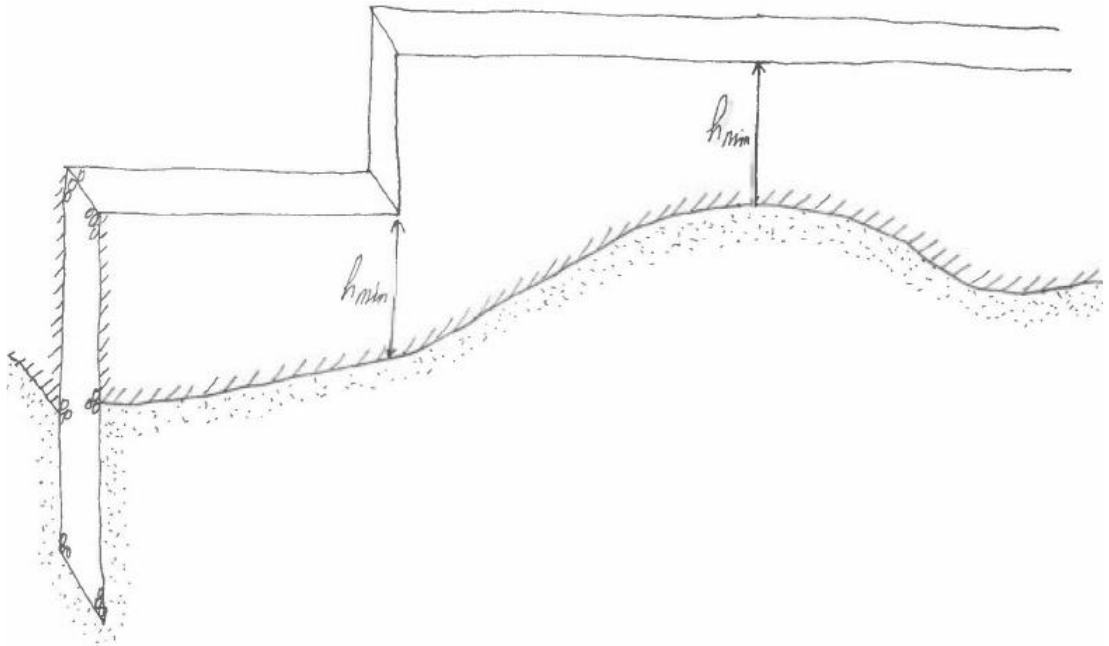
In verband hiermee is het bij een grofzandbarrière ook van groot belang om een realistische waarde vast te stellen voor de doorlatendheid van het achtergrondzand.

Er zal altijd naar gestreefd moeten worden om de grofzandbarrière een relatief grote doorlatendheid te laten bezitten.

A.1.12

O12 In hoogteligging variërende grenslaag tussen de pipinggevoelige zandlaag en de deklaag

De grenslaag tussen de pipinggevoelige zandlaag en de deklaag zal in de praktijk altijd wat in hoogte variëren, zowel in langsricting van de dijk als dwars daarop. Dit is overigens ook de reden dat een 'vlakke' grofzandbarrière (dus zonder inkassing) in de praktijk niet te realiseren is. Deze problematiek is in Figuur 89 geïllustreerd voor een discontinue aanlegmethode waarbij een minimale hoogte van de inkassing is aangehouden. Merk op dat in deze figuur aan de linkerkant ook in dwarsrichting een aanzienlijke sprong in de hoogteligging is aangegeven.



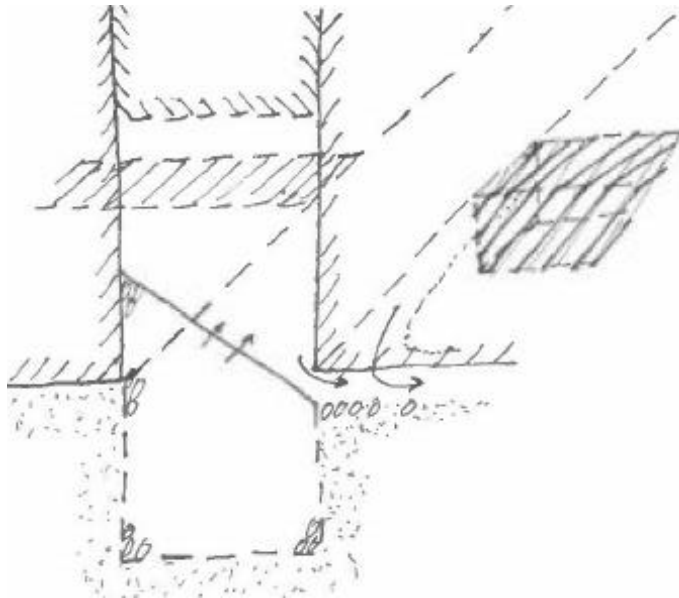
Figuur 89 In hoogteligging variërende grenslaag.

Voor de pilot bij Gameren is de mogelijke variatie beschreven door Hijma (2020). In deze memo zijn ten dele ook algemene uitspraken voor het Nederlandse rivierengebied vermeld. Regionale geologische kennis, gekoppeld aan lokale waarnemingen, zal echter altijd noodzakelijk zijn. In het kort geldt voor Gameren dat er binnen 1 m geleidelijke tot abrupte hoogteverschillen tot 30 cm mogelijk zijn. Daarnaast zal rekening moeten worden gehouden met meet- en interpretatieonnauwkeurigheden in het grondonderzoek en tijdens de uitvoering. Wanneer de uitvoeringsmethode het echter mogelijk maakt om de werkelijke diepteligging tijdens het ontgraven te bepalen, dan vervallen deze onnauwkeurigheden grotendeels en blijft de noodzaak om voorbereid te zijn op de potentieel aanwezige hoogteverschillen over, naast de vereiste heavehoogte. In Gameren volstaat een inkassing van 0,5 m hoogte, met een totale hoogte van 1,5 m voor het grove zand (1 m insteek in het zand).

De mate waarin dit aspect van belang is, zal per locatie verschillen, maar vanwege de potentiële impact zal hier altijd aandacht aan moeten worden geschonken.

A.1.13 O13 Slechtdoorlatende discontinuïteit in ondergrond bij barrière

Wanneer niet een sterk-doorlatend volume wordt doorsneden door de grofzandbarrière, zoals bij O10 (§A.1.10), maar juist een slechtdoorlatend volume zoals een soort grote kleilens of iets dergelijks (zie Figuur 90), dan is er geen sprake van extra toestroming zoals bij O10, maar wel van verhindering van de zijdelingse pipegroei, hetgeen van belang is voor de aannames die gedaan worden voor de vaststelling van de 3D-factor (zie §2.2.2.2 en bijlage D).



Figuur 90 Slechtdoorlatende discontinuïteit in de ondergrond, doorsneden door de grofzandbarrière.

Een dergelijke situatie zal her en der langs het tracé van een grofzandbarrière kunnen voorkomen en zal geaccepteerd moeten worden. De ruimtelijke frequentie moet worden meegenomen bij de bepaling van de 3D-factor.

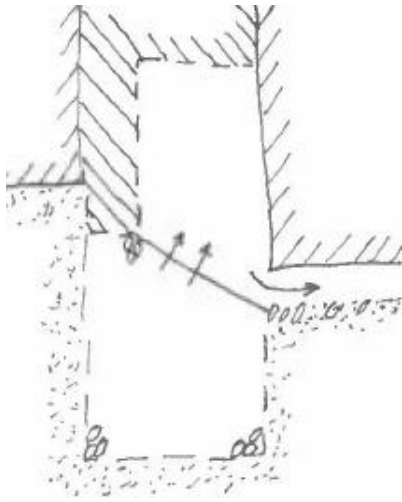
A.1.14 O14 3D-factor is onderschat

Tijdens de ontwerpfase zal met enige regelmaat moeten worden vastgesteld of de vastgestelde 3D-factor nog correct is in het licht van de gemaakte aannamen en nieuw verkregen informatie en inzichten. Deze factor is naar verhouding van (zeer) groot belang, waardoor een onderschatte getalswaarde hiervoor een naar verhouding grote impact kan hebben op het functioneren van de grofzandbarrière (eigenlijk: het eventuele verschil tussen het verwachte functioneren en het daadwerkelijke functioneren). Zie hiervoor ook §2.2.2.2 en bijlage D. Voorkómen moet worden dat deze waarde na het ontwerp naar boven aangepast moet worden.

De 3D-factor is naar verhouding de grootste partiële veiligheidsfactor bij de beoordeling van de veiligheid van de grofzandbarrière; een betrouwbare inschatting van deze factor is daarom van groot belang.

A.1.15 O15 Diepte bovenstroomse afdichting is onvoldoende

Wanneer aan de bovenstroomse kant van de grofzandbarrière een bovenstroomse afdichting wordt gerealiseerd om voldoende heavehoogte te garanderen, ook als de grenslaag bovenstrooms op een hoger niveau ligt (zie ook O2 en Figuur 75 in §A.1.1.2), dan moet die bovenstroomse afdichting wel diep genoeg steken. In Figuur 91 is een situatie geschetst waarbij dat duidelijk niet het geval is (de effectieve heavehoogte is nihil), maar ook een kleiner heavehoogte-tekort is mogelijk.



Figuur 91 Te ondiepe aanleg bovenstroomse afdichting.

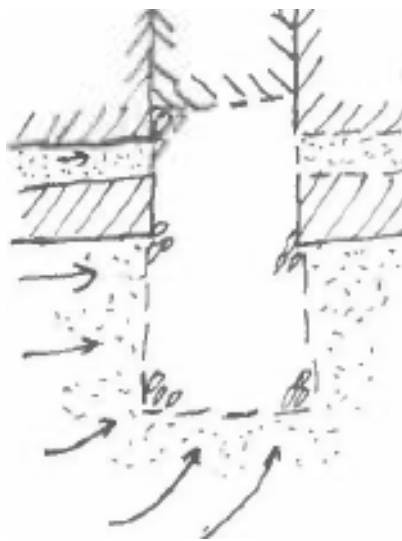
De benodigde heavehoogte volgt uit de grondwaterstromingsberekeningen voor de uiterste situatie waarbij de grofzandbarrière nog juist voldoet, waarbij het oppervlak van de grofzandbarrière onder een flauwe evenwichtshoek komt te liggen onder invloed van de opwaartse stroming. Voor de situatie in Gameren betreft dit een hoek van 10 graden. Hierbij zijn ook de positie van de benedenstroomse grenslaag en de diepte van de benedenstroomse pipe ter plaatse van de aansluiting op de grofzandbarrière van belang.

Als de toepassing van een bovenstroomse afdichting noodzakelijk is vanwege de variatie in de ligging van de grenslaag, dan wordt vanwege de meet- en uitvoeringsonzekerheden dringend geadviseerd de diepteligging wat ruim te nemen (dus niet op de centimeter nauwkeurig te ontwerpen), dit om de vereiste veiligheid te kunnen garanderen.

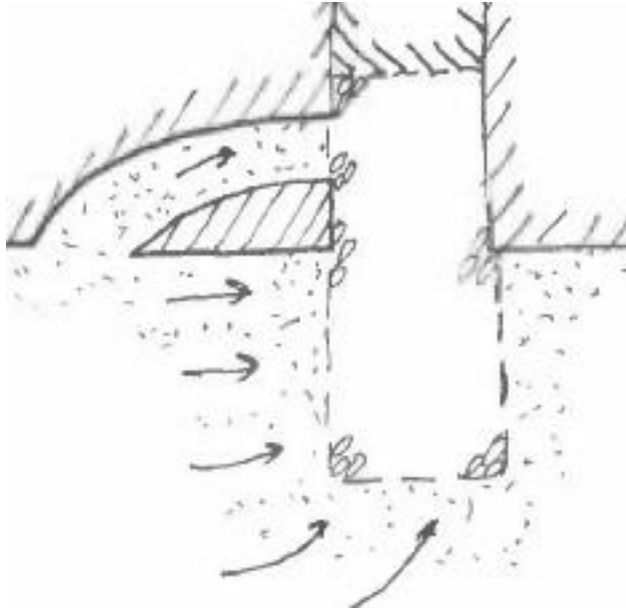
A.1.16

O16 Tussenzandlaag direct bovenstrooms van de barrière

De pipinggevoelige zandlaag hoeft ter plaatse van de grofzandbarrière niet de hoogstliggende zandlaag te zijn. Daarboven kunnen nog andere zandlagen liggen die voor piping niet maatgevend zijn, bijvoorbeeld door de geringe dikte of een lagere doorlatendheid. Een dergelijke tussenzandlaag kan wel zorgen voor een aanvullende hydraulische belasting zorgen, bijvoorbeeld bij de configuratie zoals geschetst in Figuur 92. Dit is nog sterker het geval bij een configuratie die lijkt op de situatie in Figuur 93, omdat er dan sprake kan zijn van een sterkere aanvoer van water naar de grofzandbarrière.



Figuur 92 Aansluiting van een tussenzandlaag op de inkassing van een grofzandbarrière.



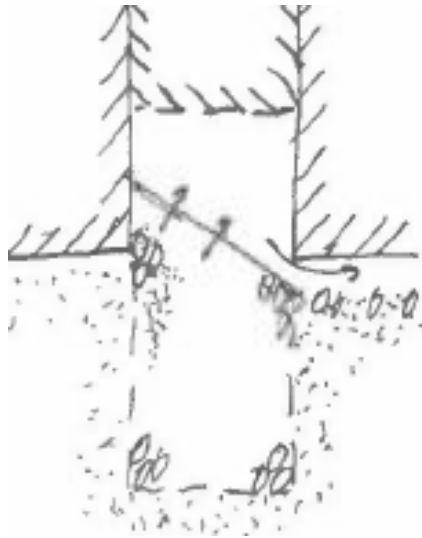
Figuur 93 Tussenzandlaag in contact met de pipinggevoelige zandlaag bovenstrooms van de aansluiting op een grofzandbarrière.

Bij toepassing van een bovenstroomse afdichting zal de aanvoer van water overigens worden afgesloten.

Bij het grondonderzoek moet gekeken worden naar de eventuele aanwezigheid van tussenzandlagen, met name lagen die direct kunnen aansluiten op de inkassing van de grofzandbarrière. Met de aanvullende toestroming moet rekening worden gehouden, tenzij deze door toepassing van een bovenstroomse afdichting wordt uitgesloten.

A.1.17 **O17 Cakevorming door uitspoeling van fijne fractie uit achtergrondzand in bovenstroomse zijde barrière**

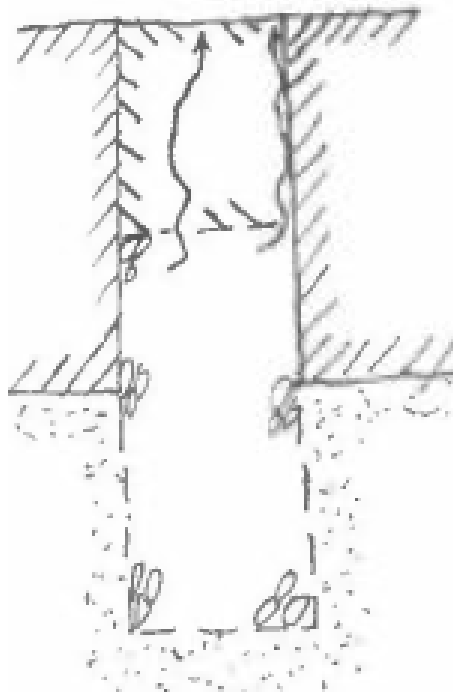
Bij kleinschalige proeven met de grofzandbarrière bleek soms enige inspoeling van de fijne fractie uit het bovenstroomse zand plaats te vinden, ondanks dat aan de eisen aan interne stabiliteit van Kenney & Lau (zie O3, §A.1.3) werd voldaan (maar niet aan één van de beide criteria van Burenkova). Iets verrassend bleef dit materiaal wel steken nabij de bovenstroomse rand van de grofzandbarrière (zie Figuur 94), waardoor er lokaal in beperkte mate een verlaagde doorlatendheid optrad. Hierdoor ontstond er binnen de grofzandbarrière een gunstiger gradiëntverdeling. Dit leidt daardoor tot extra sterkte. Dit is een *positief* effect. Er kan echter niet van worden uitgegaan dat dit zal optreden. Dit verschijnsel kan daarom verder worden genegeerd.



*Figuur 94 Cakevorming in de grofzandbarrière (verstopping met fijn materiaal nabij de bovenstroomse zijde).
Het optreden van deze positieve bijdrage aan de sterkte van de grofzandbarrière is onzeker.
Er kan daarom niet op worden gerekend, zodat dit verder genegeerd kan worden.*

A.1.18 O18 Drainage via aanvulling boven barrière

Wanneer er drainage mogelijk is via de aanvulling boven de barrière, dan kan hierdoor bovenloopsheid ontstaan, zie Figuur 95. Dit leidt tot kwelstroming aan het maaiveld, mits de stijghoogte in de barrière minimaal tot aan het maaiveld reikt. Zodra een benedenstroomse pipe de grofzandbarrière heeft bereikt, zal de stijghoogte over het algemeen aanzienlijk afnemen, hetgeen de eventuele kwel weer zal doen verminderen of stoppen.



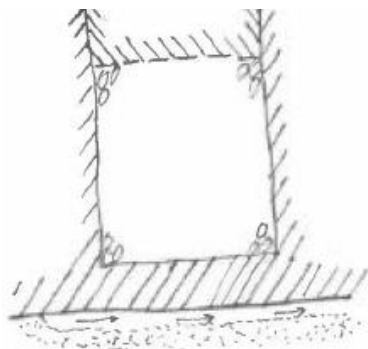
Figuur 95 Drainage door de kleiaanvulling.

Als tegenmaatregel kan de eerste 30 tot 50 cm aanvulling boven de grofzandbarrière uit erosiebestendige klei bestaan die in lagen goed wordt verdicht. Daarboven kan willekeurig aanvulmateriaal worden toegepast, bijvoorbeeld materiaal dat bij de aanleg van de sleuf is vrijgekomen.

Voor de veiligheid zal moeten worden getoetst of er geen kwelstroom bovenlangs kan ontstaan die tot verdere erosie leidt. Zo niet, dan is er sprake van enige wateroverlast indien de stijghoogte in de barrière boven het maaiveld reikt. Ook zorgt dit dan tot een afname van de totale weerstand benedenstrooms van de eigenlijke barrière, hetgeen door herverdeling van de drukken tot een beperkte toename van de gradiënt in de grofzandbarrière zal leiden. Door toepassing van een erosiebestendige kleilaag direct bovenop het barrièrezand is dit in belangrijke mate te voorkomen.

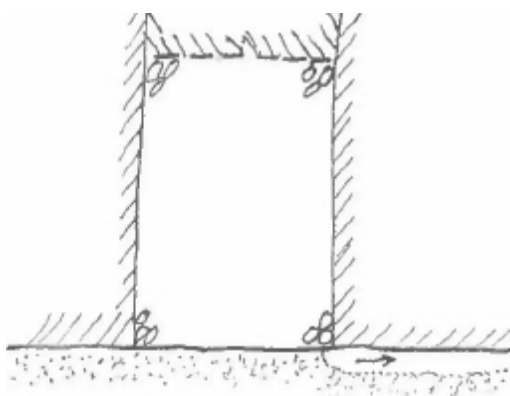
A.1.19 O19 Barrière is te ondiep

De grofzandbarrière kan te ondiep worden ontworpen (of bij de uitvoering kan onvoldoende diep worden gegraven), zodat deze niet tot in de pipinggevoelige zandlaag reikt (zie Figuur 96). Als de kleilaag, hoe dun die eventueel ook is, intact blijft, dan zal een pipe kunnen passeren.

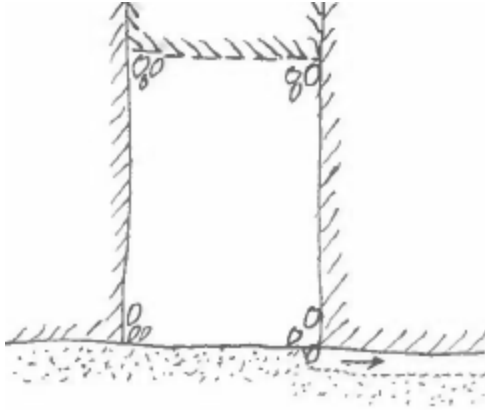


Figuur 96 Barrière is te ondiep en steekt niet tot in de pipinggevoelige zandlaag.

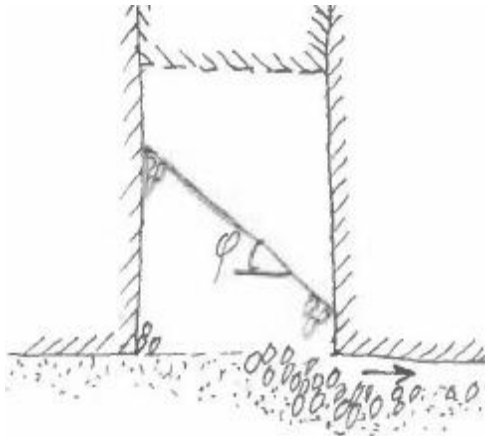
Als de grofzandbarrière juist tot aan de pipinggevoelige zandlaag steekt (zie Figuur 97), dan zal de pipe niet zomaar voorbij de grofzandbarrière kunnen groeien: de korrels van de grofzandbarrière zullen in de pipe vallen (zie Figuur 98). De grove korrels zullen net als anders niet ver weg getransporteerd worden, maar er zal een combinatie ontstaan van een 'plaveisel' in het meest nabije gedeelte van de benedenstroomse pipe (net als anders), en een verzakte grofzandbarrière doordat het fijne zand eronder deels zal eroderen (zie Figuur 99). Uiteindelijk ontstaat er net zo'n uiterste toestand als bij een grofzandbarrière die wél een eindje in de pipinggevoelige zandlaag steekt (zie Figuur 100), al zal het vanwege het deels wegzakken van de barrière in de ondergrond wat rommeliger uitzien en zijn tussenliggende fasen moeilijker te modelleren. De zijdelingse pipeontwikkeling aan de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière zal ook normaal kunnen plaatsvinden.



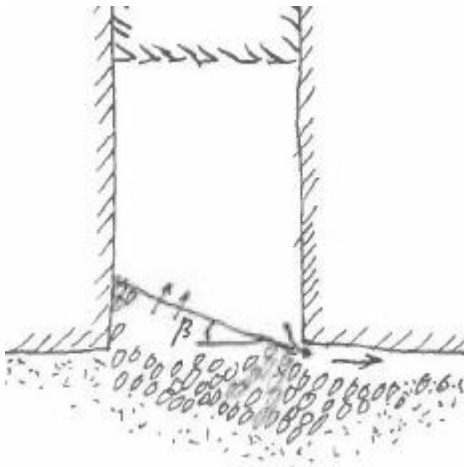
Figuur 97 Pipegroei tot aan een grofzandbarrière die net tot aan de pipinggevoelige zandlaag is aangebracht.



Figuur 98 Vervolg op voorgaande figuur: eerste korrel vanuit de grofzandbarrière in de benedenstroomse pipe.



Figuur 99 Vervolg op voorgaande figuur: deels verzakte grofzandbarrière, deels leeggelopen inkassing en plaveisel met grove korrels in de benedenstroomse pipe.



Figuur 100 Uiterste situatie bij een grofzandbarrière die net tot aan de pipinggevoelige zandlaag is aangebracht.

NB: vanwege de variatie in de ligging van de bovenzijde van de pipinggevoelige zandlaag, meetonnauwkeurigheden bij het grondonderzoek, meetonnauwkeurigheden in de uitvoeringsfase en materieeltoleranties zal er voor het ontwerp nog steeds moeten worden uitgegaan van een grofzandbarrière die enigermate tot in de pipinggevoelige zandlaag steekt. Aangezien een dieper gelegen grofzandbarrière meer water trekt van onderaf, is een zo ondiep mogelijke grofzandbarrière vanuit ontwerpogpunt het meest gunstig. Dit is bovendien

gunstiger voor de uitvoering, zowel qua kosten als voor de te leveren inspanning. De situatie van een (nèt) te ondiep stekende barrière (zoals geschetst in Figuur 96) zal echter beslist vermeden moeten worden.

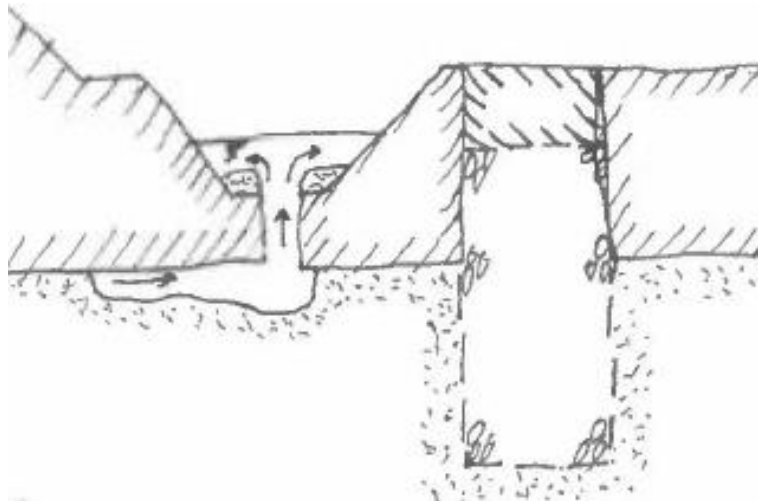
Voor de pilot bij Gameren is geen nadere aandacht besteed aan deze optimalisatiemogelijkheid; dit zou bij een vervolgtoeepassing nader onderzocht kunnen worden.

Gelet op de vereiste aandacht om bij het grondonderzoek de diepteligging én dikte van een onscherpte grenslaag te bepalen (zie O2, §A.1.1.2), zal er voldoende informatie beschikbaar zijn om in de ontwerpfase een te ondiepe ligging van de barrière te vermijden.

Op basis van het vereiste grondonderzoek gericht op de ligging en dikte van de grenslaag zou een te ondiepe ligging van de barrière altijd moeten kunnen worden vermeden.

A.1.20 O20 Barrière is benedenstrooms van uittredepunt

De grofzandbarrière is niet effectief wanneer deze benedenstrooms van het uittredepunt wordt aangelegd, zie Figuur 101. De oplossing is eenvoudig: ervoor zorgen dat de barrière bovenstrooms van het uittredepunt komt te liggen. Dit kan ook worden bereikt door een berm of bermverhoging tussen de binnenteen van de dijk en de grofzandbarrière om zo voldoende veiligheid tegen opbarsten en heave te krijgen. Eventuele doorsnijdingen met extra grof materiaal, zoals beschreven en geschetst in §A.1.10 (beïnvloedende factor O10) dienen hierbij ook in de beschouwing te worden meegenomen.



Figuur 101 Grofzandbarrière benedenstrooms van het uittredepunt.

Van een goed ontwerp mag verwacht worden dat dit wordt ondervangen.

A.2 Uitvoeringsfase

A.2.1 U1 Onvoldoende aansluiting tussen discontinu geproduceerde barrièredelen

Wanneer een grofzandbarrière niet in één continu doorlopend proces wordt gemaakt, dan is het mogelijk dat er onvoldoende aansluiting is tussen twee los van elkaar gemaakte onderdelen, bijvoorbeeld bij stilstand van een kettinggraafmachine (met insluiting van achtergrondzand bij stoppen of herstarten) of bij toepassing van losse zandpalen als grofzandbarrière.

De aansluiting is als onvoldoende te bestempelen wanneer pipegroei mogelijk is voorbij de barrière bij een verval dat volgens de ontwerp-eisen nog gekeerd zou moeten kunnen worden.

Bij een grofzandbarrière zal de grondwaterstroming zich concentreren via het grove zand. Een eventuele insluiting van achtergrondzand en zelfs een doorgaand gedeelte, van benedenstrooms naar bovenstrooms, bestaande uit alleen achtergrondzand, zal daarom in eerste instantie nog geen probleem opleveren. Wanneer de erosie echter een overgang van barrièrezand met achtergrondzand bereikt, dan zal daar eenzelfde vorm van contacterosie kunnen plaatsvinden als bij de benedenstroomse rand van een grofzandbarrière, waar zijdelingse pipegroei optreedt (zie §5.3, met name onderdeel B6, van Figuur 28 tot en met Figuur 30). Als gevolg van deze erosie, nu bij een insluiting van achtergrondzand of zelfs een doorgaand gedeelte met achtergrondzand, zal een pipe tussen de beide barrièredelen door kunnen groeien, met doorloopbaarheid tot gevolg.

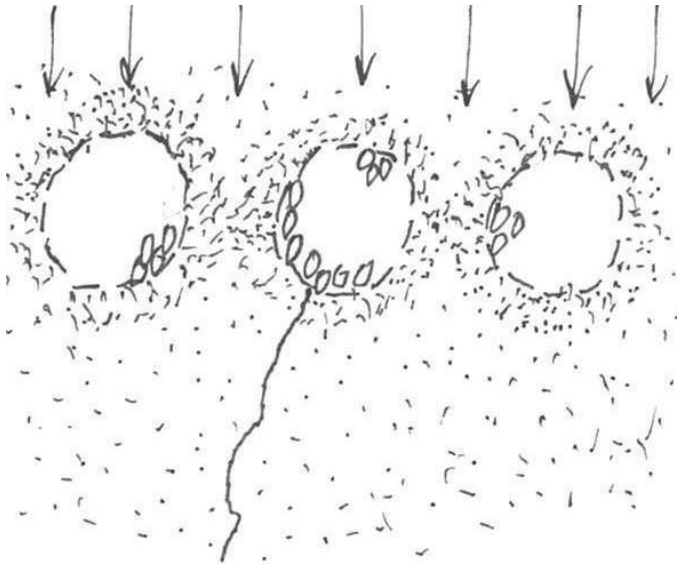
Er zijn op dit moment nog nadere beschouwingen en/of analyses en/of experimenteel onderzoek nodig om te bepalen of hiervoor nog een significante verhoging van het verval over de waterkering vereist is, of dat dit al zal optreden bij het verval waarbij de grofzandbarrière met een betrekkelijk grote insluiting van achtergrondzand of discontinuïteit bereikt wordt. Zonder uitsluitel hierover zullen dergelijke situaties in de uitvoering strikt vermeden moeten worden.

Voor zowel de open-sleufmethode als de kettinggraaftechniek is het goed mogelijk om dit risico op een robuuste wijze uit te sluiten. Bij de open-sleufmethode vergt dit voldoende overlap, hetgeen ook uitvoerbaar is bij scherpe bochten. Bij de kettinggraafmethode kan na een stilstand een gedeelte opnieuw worden gemaakt, zie Figuur 102. De werkrichting is hierbij van rechts naar links, de hoogwaterzijde is aan de bovenkant van deze figuur. Eerst is het gedeelte aangegeven met de doorgetrokken lijn gemaakt, daarna kan aan de bovenstroomse zijde met een nieuw gedeelte worden gestart en via een bocht worden aangesloten op het oorspronkelijke tracé. Daarbij wordt het laatste gedeelte van het eerste deel weggegraven. De aanzet van het nieuwe gedeelte kan overigens beperkt zijn; zodra het graafproces op diepte is, kan al een begin worden gemaakt met het weggraven van het eerste deel.

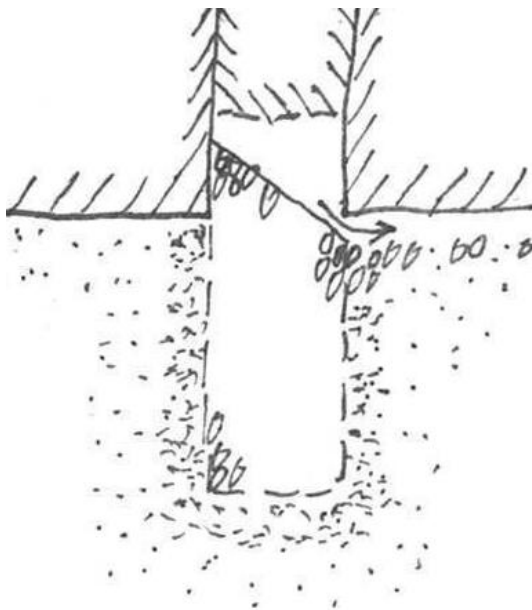


Figuur 102 Schuine insteek en overlap bij herstart met kettinggraafmethode (mogelijke principe-oplossing).

Een andere voorgestelde uitvoeringstechniek betreft het grondverdringend aanbrengen van zandpalen met grof zand. Het idee daarbij is dat deze palen niet overlappend te hoeven geplaatst, omdat het omliggende achtergrondzand, dus ook het achtergrondzand tussen de zandpalen, zodanig verdicht raakt dat de stroming zich via de zandpalen zal concentreren. In Figuur 103 en Figuur 104 zijn principe-schetsen gegeven voor de situatie waarbij een benedenstroomse pipe een zandpaal heeft bereikt.



Figuur 103 Bovenaanzicht grondverdringend aangebrachte zandpalen als grofzandbarrière, met aantakking benedenstroomse pipe op één van de zandpalen.

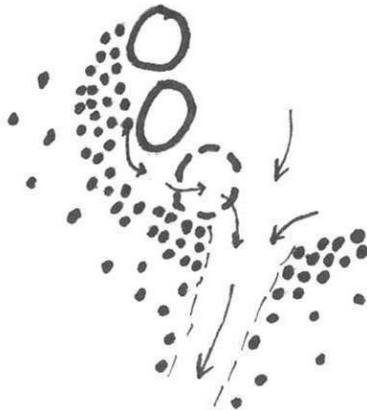


Figuur 104 Dwarsdoorsnede door een grondverdringend aangebrachte zandpaal als grofzandbarrière na 'leeglopen' van de inkassing.

Een punt van zorg is dat bij deze uitvoeringstechniek een pipe langs de zandpaal gevormd kan worden door contacterosie, zie Figuur 105 en Figuur 106. Het proces dat hierbij optreedt is hetzelfde als bij de vorming van een zijdelingse pipe achter een 'gewone' grofzandbarrière met een rechthoekige doorsnede, met als verschillen dat dit proces een vervolg vormt richting falen en dat de hoge dichtheid van het achtergrondzand als gevolg van het aanbrengproces met name aan de rand van de zandpaal leidt tot een hoge weerstand tegen erosie van het fijne zand, in combinatie met een zeer lage doorlatendheid ter plaatse. Hierdoor is het denkbaar dat het proces richting falen pas optreedt bij een verval (ver) boven het maatgevend verval, zodat met deze methode toch voldoende veiligheid tegen piping wordt verkregen. **Experimenteel onderzoek (eventueel slechts van de cruciale deelaspecten die hierbij een rol spelen) met een goede uitkomst wordt noodzakelijk geacht voordat deze uitvoeringstechniek veilig kan worden toegepast.**



Figuur 105 Contacterosie leidend tot pipevorming langs de omtrek van een grondverdringend aangebrachte zandpaal als grofzandbarrière.



Figuur 106 Contacterosie leidend tot pipevorming langs de omtrek van een grondverdringend aangebrachte zandpaal als grofzandbarrière (detail na beperkte langspipe-vorming).

Zie verder §A.2.6 voor de risico's van onder- en voorloopsheid bij deze uitvoeringstechniek als gevolg van de extreme verdichting van het achtergrondzand, waardoor het denkbaar is dat een benedenstroomse pipe de zandpaal niet bereikt.

A.2.2 U2 Aanvulklei wordt te dun aangebracht, bevat holle ruimtes en/of wordt in onvoldoende mate aangevoerd en/of verdicht

Wanneer de klei, die ter aanvulling op het zand van de grofzandbarrière moet worden aangebracht, op enigerlei wijze tekortschiet, dan kan dit bezwijken in de hand werken. Het gaat hierbij om elk van de genoemde mogelijkheden of een combinatie daarvan: te dun aanbrengen, holle ruimtes (bijvoorbeeld in de hoeken), onvoldoende aanvoer (gegeven de voortgangssnelheid – dit is in feite hetzelfde als 'te dun aanbrengen') of onvoldoende verdichting.

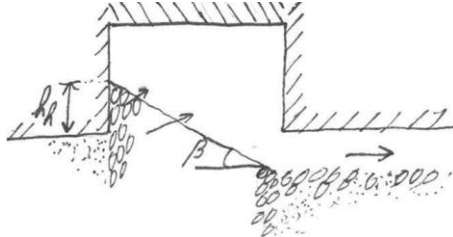
Voor een grofzandbarrière met inkassing geldt dit met name bij de toepassing van een bovenstroomse afdichting ("kleimuurtje"). Wanneer een bovenstroomse afdichting niet nodig is, dan is het voornaamste bezwaar slechts de kwel via de sleuf, hoewel ook dit tot enige verzwakking van de grofzandbarrière als geheel leidt door de resulterende verlaging van de stromingsweerstand benedenstrooms van het grove zand.

A.2.3 U3 Grofzandbarrière is onvoldoende verdicht

Wanneer de grofzandbarrière bij aanleg onvoldoende verdicht is, kan in een latere fase alsnog verdichting optreden. Bij een grofzandbarrière met inkassing leidt dit bij een nog gevulde inkassing slechts tot een beperkte verzakking van de top van de inkassing, hetgeen geen probleem vormt mits de vereiste heavehoogte h_h niet wordt aangetast. Wanneer de vereiste heavehoogte wél wordt aangetast, dan vormt dit wel een probleem. De marges in de

hoogte van de inkassing zullen echter zodanig ruim zijn vanwege de vereiste meet- en maattoleranties bij het grondonderzoek en in de uitvoering, dat de verzakking van deze verdichting wegvalt in de marge en de vereiste heavehoogte in stand blijft.

Een uitzondering hierop vormt de situatie bij een extreem hoogwater waarbij extra verzakking als gevolg van aanvullende verdichting (tot bezwijken leiden). Dit kan bijvoorbeeld gebeuren als een damwand wordt ingetrild bij wijze van noodmaatregel in een aangrenzend gedeelte van dijk.



Figuur 107 Uiterste situatie met minimale heavehoogte en maximaal verflauwde helling, waarin verzakking als gevolg van verdichting niet kan worden opgenomen.

Door tijdens de uitvoering te zorgen voor een goede verdichtingsgraad (bijvoorbeeld minimaal 80% relatieve dichtheid of 95% Proctordichtheid) zal latere verdichting uiterst onwaarschijnlijk worden.

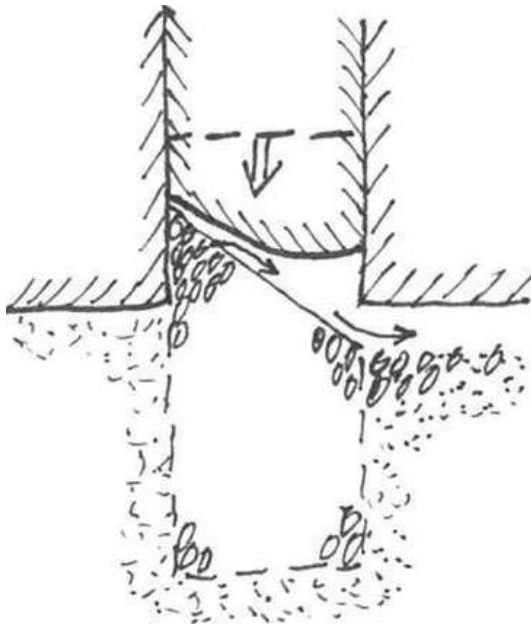
A.2.4 U4 Onvoldoende aanvoer van barrièrezand

Wanneer er onvoldoende barrièrezand wordt aangevoerd gegeven de snelheid waarmee de grofzandbarrière in de ondergrond wordt aangebracht, dan worden de vereiste diepte, hoogte, dikte en/of verdichtingsgraad niet bereikt en is de grofzandbarrière niet sterk genoeg. Dit speelt vooral bij een continue aanbrenghmethode zoals de kettingfrees en dient door monitoring gesignaleerd te kunnen worden. **Indien achteraf niet is vast te stellen dat een aangebrachte sectie voldoet, dan zal dit opnieuw moeten worden aangelegd.**

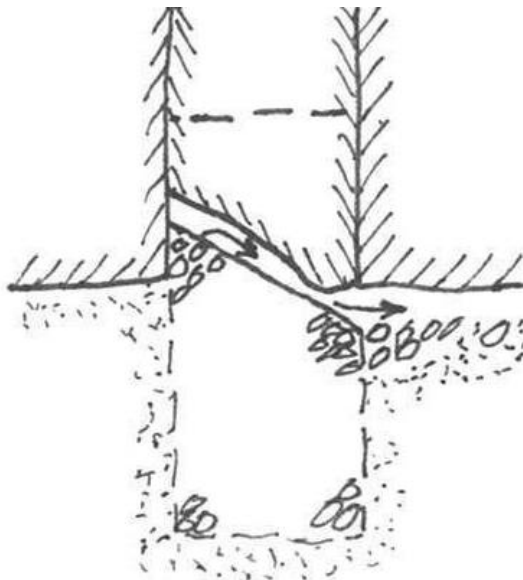
A.2.5 U5 Aanvulklei zwelt te sterk in de holle ruimte die boven het zand ontstaat

Zodra er korrels uit de inkassing wegstromen, ontstaat daar een holle ruimte. Deze ruimte kan worden opgevuld met klei die onderin de sleufaanvulling is gebruikt. Dit kan gebeuren doordat er brokjes klei loslaten of doordat deze klei opzwellt. In het laatste geval kan de mate van opzwellen zo groot zijn, dat dit een belemmering vormt voor de vrije uitstroming van water op de helling die in de grofzandbarrière ontstaat.

Het proces dat dan optreedt is weergegeven in Figuur 108 en Figuur 109: het zwellen van de klei zorgt voor een vernauwing van het vrije uitstroomoppervlak waardoor hier extra erosie ontstaat (dus meer erosie dan zonder deze verzakking van het oppervlak van de onderkant de aanvulklei het geval zou zijn geweest). Hierdoor kan falen eerder worden bereikt.



Figuur 108 Zwell van de kleiaanvulling, leidend tot vernauwing van het vrije uitstroomoppervlak op de helling bovenin het barrièrezand.



Figuur 109 Vervolg op voorgaande figuur: verdere zwellung van de aanvulklei met extra erosie van de grofzandbarrière tot gevolg.

Het is reëel om te verwachten dat een sterk zwellende kleisoort zelf zal eroderen onder invloed van de stroming vanuit grofzandbarrière, of dat de klei in brokken uiteenvalt, eerder dan dat een problematisch grote zwellung optreedt. In §A.2.7 (beïnvloedende factor U7) wordt ingegaan op de mogelijkheid van erosie van de klei zelf, het bijbehorende faalpad 47 is beschreven in §C.2.11.

Een remedie hiertegen is het vermijden van een kleisoort met een groot zwelvermogen als aanvulklei.

Door toepassing van niet sterk-zwellende klei, zal de klei min of meer op zijn plaats blijven of anders in brokken uiteenvallen. De neervallende brokken zullen tijdens het hoogwater door de stroming in delen en deeltjes worden afgevoerd, wat geen invloed zal hebben op de helling in de grofzandbarrière. Na afloop van het hoogwater zal de klei ook nog in de eronder

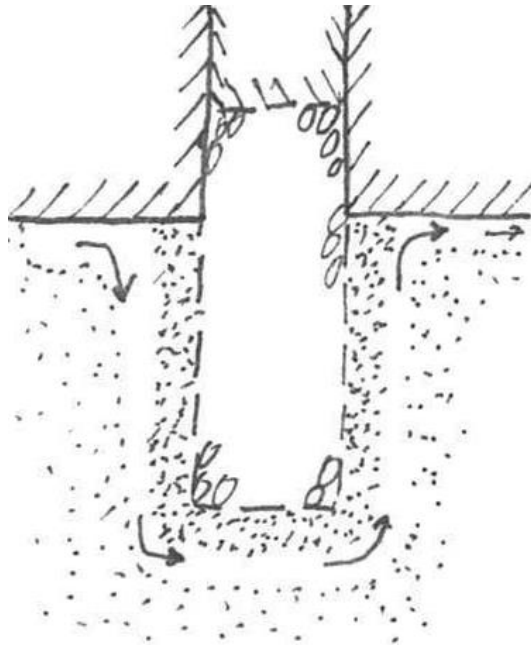
ontstane holle ruimte kunnen vallen; dan wordt de klei niet meer afgevoerd en is er wel sprake van een probleem, waarvoor dan wel de gelegenheid bestaat om dit op te lossen. Deze factor die de veiligheid beïnvloedt is nader beschreven als B4 in §A.3.4.

A.2.6 U6 Extreme verdichting achtergrondzand

Extreme verdichting van het achtergrondzand kan zich voordoen wanneer de grofzandbarrière grondverdringend wordt aangebracht, bijvoorbeeld in de vorm van losse zandpalen zoals reeds genoemd in §A.2.1.

Wanneer een benedenstroomse pipe verbinding maakt met een zandpaal, ondanks de lage doorlatendheid en erosieweerstand van het verdichte achtergrondzand rondom de zandpalen, bestaat het risico op de vorming van een langspipe langs de omtrek van de zandpaal wat kan leiden tot falen bij een verval lager dan het maatgevend verval. Zie §A.2.1, Figuur 103 tot en met Figuur 106 en de daarbij behorende tekst, voor een toelichting hierop.

Een andere mogelijkheid is dat een benedenstroomse pipe niet tot aan de zandpaal kan groeien. In dat geval zijn er twee mogelijkheden: vorming van een pipe onder het geheel van zandpalen en extreem verdicht achtergrondzand door (dat geheel functioneert dan in feite als een heavescherm, zie Figuur 110), of voorloopsheid doordat de waterdruk bovenstrooms van deze maatregel zo hoog oploopt dat dáár opbarsten en heave optreden, waarop echter ontworpen zou moeten worden (zie §A.1.20; maatregelen tegen opbarsten en heave bovenstrooms van de grofzandbarrière).



Figuur 110 Heave achter en piping onder extreem verdicht achtergrondzand rondom een grondverdringend aangebrachte grofzandbarrière door.

Het is goed denkbaar dat falen door deze factor pas optreedt bij een verval dat (ruimschoots) groter dan het maatgevend verval, dan vormt dit geen probleem. Voor de relevante processen van heave onder het geheel door en opbarsten bovenstrooms van de barrière kan met berekeningen worden bepaald of hieraan voldaan wordt.

A.2.7 U7 Aanvulklei is erosiegevoelig

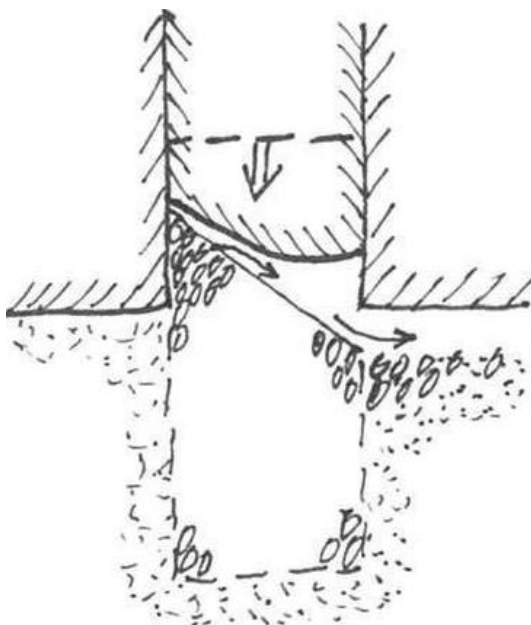
Erosie van de aanvulklei kan op drie manieren optreden:

- Oplossen van klei in water (dispersie).
- Directe stromingserosie.

- Losraken van kleinere brokjes en eventueel wat grotere brokken.

Wanneer de klei gevoelig is voor dispersie, dan kan de kleiaanvulling in de loop van de tijd geleidelijk aan verdwijnen. Klei die hiervoor gevoelig is, kan beter niet worden toegepast.

Bij directe stromingserosie kan gedacht worden aan de situatie als in Figuur 111, ook wanneer de zwel naar verhouding minder extreem is. Deze vorm van erosie kan optreden boven het vrije oppervlak, maar over het algemeen zal dit vrij beperkt zijn omdat de stroming nabij de bovenkant van de ontstane holle ruimte vrij zwak zal blijven.



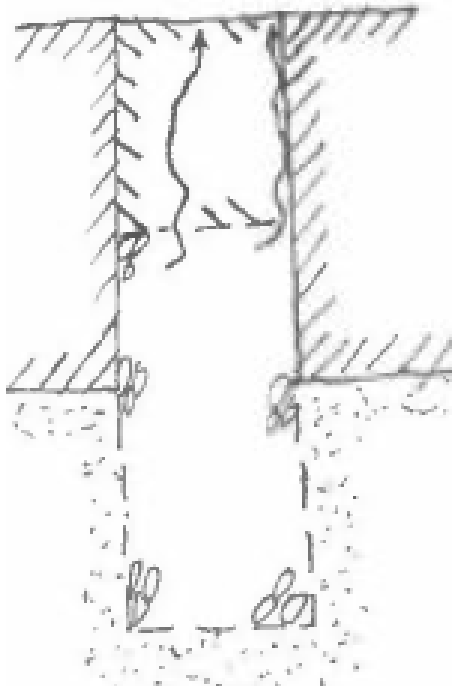
Figuur 111 Situatie waarbij stromingserosie van de kleiaanvulling relatief gemakkelijk zal optreden, met name aan de linkerkant van de grofzandbarrière.

Loslatende brokjes klei zullen betrekkelijk snel worden afgevoerd, zo is de verwachting, mede op basis van waarnemingen bij grootschalige pipingproeven waarbij een deklaag van klei werd gebruikt. Het volledig afgedekt raken van de ontstane helling in het barrièrezand hoeft tijdens een hoogwater niet te worden verwacht (zie hiervoor ook §A.3.4).

De erosie van de aanvulklei kan leiden tot bovenloopsheid, hetgeen niet per se problematisch hoeft te zijn (zie ook §A.1.18). Geadviseerd wordt om een erosiebestendige klei met geen of weinig zwelvermogen toe te passen.

A.2.8 U8 Aanvulklei is bij aanbrengen te nat

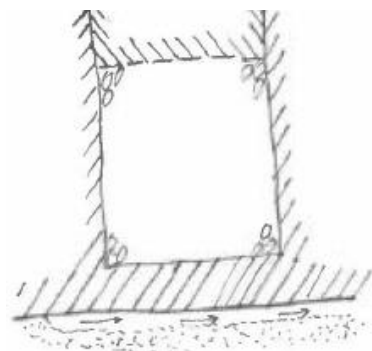
Wanneer de aanvulklei tijdens het aanbrengen te nat is, dan is de vereiste verdichting moeilijker of zelfs niet te realiseren. Ook kan deze klei, als deze droog kan vallen bijvoorbeeld bij lage buitenwaterstanden, naderhand sterker uitdrogen. Dan zullen er krimp-scheuren ontstaan, die niet allemaal weer dicht zullen gaan bij latere vernatting. Door deze scheuren zal drainage via de sleuf kunnen ontstaan, zie Figuur 112.



Figuur 112 Drainage door de kleiaanvulling.

A.2.9 U9 Ontgraving is onvoldoende diep

De grofzandbarrière kan te ondiep worden aangelegd doordat bij de uitvoering onvoldoende diep wordt gegraven, waarbij deze niet tot in de pipinggevoelige zandlaag reikt (zie Figuur 113). Als de kleilaag, hoe dun die eventueel ook is, intact blijft, dan zal een pipe kunnen passeren (zie ook §A.1.19 voor een nadere toelichting).



Figuur 113 Barrière is te ondiep en steekt niet tot in de pipinggevoelige zandlaag.

Om dit probleem te vermijden zal op basis van monitoring tijdens de uitvoering moeten worden aangetoond dat de pipinggevoelige zandlaag is bereikt.

A.2.10 U10 Ontmenging van het barrièrezand

Wanneer tijdens de uitvoering ontmenging optreedt van het barrièrezand, dan zal op de ene plaats te fijn materiaal worden aangebracht en op de andere plaats te grof materiaal, bijvoorbeeld doordat het barrièrezand van te grote hoogte wordt gestort. Dit laatste is vergelijkbaar met het optreden van grindnesten in een diepwand. De grofzandbarrière zal dan niet meer correct functioneren, doordat plaatselijk niet meer aan de filtereisen wordt voldaan.

Aan de variatie in korrelverdeling van het daadwerkelijk aangebrachte barrièrezand zullen eisen moeten worden gesteld, waar dan door zowel aselekt genomen monsters als selectief

genomen monsters (op locaties waar vermoed wordt dat er niet aan de eisen wordt voldaan) zal moeten worden voldaan.

Voor de pilot in Gameren is een bandbreedte van 10% van de korrelverdeling toegestaan.

Vanwege de grote impact op het functioneren van de grofzandbarrière is deze beïnvloedende factor niet uitgewerkt in afzonderlijke faalpaden – dat zou een louter theoretische functie hebben, aangezien dit in de praktijk dient te worden vermeden.

A.2.11 U11 Toepassing van verkeerd materiaal als barrièrezand

Wanneer in plaats van het vereiste barrièrezand, ander zand wordt toegepast, dan zal dat alternatieve zand over het algemeen niet voldoen. Dit moet daarom vermeden worden.

Voor een dijkgedeelte waar overal hetzelfde materiaal wordt gebruikt als barrièrezand zoals in Gameren, is het optreden van deze fout niet erg voor de hand liggend. Alle andere voorkomende zandsoorten wijken namelijk sterk af. Elders is het mogelijk om verschillende barrièrezanden toe te passen op aangrenzende dijkvakken. Dan is verwisseling denkbaar, hetgeen bijvoorbeeld kan worden vermeden door deze barrièrezanden afwijkend te verpakken.

Vanwege de grote impact op het functioneren van de grofzandbarrière is deze beïnvloedende factor niet uitgewerkt in afzonderlijke faalpaden – dat zou een louter theoretische functie hebben, aangezien dit in de praktijk dient te worden vermeden.

A.2.12 U12 Vermenging van barrièrezand met achtergrondzand

Wanneer het barrièrezand vermengd raakt met het achtergrondzand, dan zal het eveneens niet langer aan de uitgangspunten voldoen. Enige vermenging aan de randen, die louter van theoretische betekenis is, kan uiteraard worden geaccepteerd, maar wanneer over meer dan enkele procenten van het dwarsprofiel vermenging optreedt, dan is dat niet acceptabel.

Vanwege de grote impact op het functioneren van de grofzandbarrière is deze beïnvloedende factor niet uitgewerkt in afzonderlijke faalpaden – dat zou een louter theoretische functie hebben, aangezien dit in de praktijk dient te worden vermeden.

A.3 Beheerfase

A.3.1 B1 Toekomstig gebrek aan kennis over de aanwezigheid en werking van de grofzandbarrière

Door haast onvoorstelbare omstandigheden, zoals een (burger)oorlog of een ernstige pandemie, zou de kennis over de aanwezigheid van een grofzandbarrière en de werking ervan verloren kunnen gaan. In een dergelijke situatie, waarin bijvoorbeeld essentiële leggegevens verloren zijn gegaan, dan zou de grofzandbarrière onbedoeld verwijderd kunnen worden of vervangen kunnen worden door een minder effectieve maatregel.

De kans dat dit scenario zich voordoet is niet in te schatten en wordt vooralsnog op nul gesteld. Mocht een dergelijke situatie zich voordoen, dan functioneert het huidige raamwerk van het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium immers ook niet meer.

A.3.2 B2 Doorgraven van de barrière door mens of dier

Wanneer de grofzandbarrière zodanig diep wordt doorgraven dat de benodigde heavehoogte wordt aangetast, dan ontbreekt de benodigde weerstand tegen doorloopsheid en is de veiligheid tegen piping globaal terug op het niveau van voor de aanleg van de grofzandbarrière. Dit moet dus worden voorkomen.

Doorgraven door de mens kan worden tegengegaan door opname in de legger van een verbod op graven tot onder het niveau van de bovenzijde van de inkassing (dit is dus inclusief een veiligheidsmarge) en naleving daarvan. Bij overtreding, in eerste instantie te constateren door regelmatige ('dagelijkse') visuele inspectie van de dijk door de dijkbeheerder, zal herstel van de grofzandbarrière moeten plaatsvinden.

Voor het doorgraven door dieren rijst allereerst de vraag of de locatie van de grofzandbarrière dit waarschijnlijk maakt, of niet. Hierbij spelen parameters als de diepte onder het maaiveld, de diepte ten opzichte van de (variabele!) grondwaterstand, de afstand tot watergangen en de waarschijnlijkheid van de aanwezigheid van gravende dieren (bijvoorbeeld door de ligging ten opzichte van natuurgebieden) een rol. Opgemerkt wordt dat gekeken moet worden naar zowel betrekkelijk droge omstandigheden, waarbij de inkassing eventueel droog komt te staan, als naar (extreme) hoogwatersituaties, waarbij dieren een droog heenkomen kunnen zoeken in en achter de dijk. Voor een verkennende studie naar de invloed van graverijen door dieren op de veiligheid van waterkeringen, ingebed in de hier eveneens gehanteerde faalpadenmethodiek, wordt verwezen naar Koelewijn et al. (2020).

Voor de pilotlocatie bij Gameren geldt dat de bovenzijde van de inkassing van de grofzandbarrière over het algemeen zo'n 3 tot 4 meter beneden maaiveld ligt, met een minimum van 2,5 m en een maximum van ruim 5 m. Alleen bij (nu nog) ongewoon lage grondwaterstanden zal het voor graverijen gevoelige gedeelte over een gedeelte van het tracé droogvallen.

Een diepte van meer dan 2 m sluit ongewenste graverijen door kleinere diersoorten zoals muizen, mollen en ook konijnen al uit. Grotere dieren, zoals vossen, bevers en dassen, kunnen wel meerdere meters diep graven. Voor vossen en dassen geldt dat zij niet onder de grondwaterspiegel graven en dat de ingangen tot hun holen goed zichtbaar zijn, tenzij vegetatie het zicht belemmert. Hierdoor zullen eventuele graafactiviteiten die tot aantasting van de heavehoogte leiden, alleen bij langdurig droge omstandigheden door deze dieren kunnen plaatsvinden. De kans dat dit gebeurt is klein, maar als dit gebeurt, dan is tijdige detectie vrijwel zeker door de goede zichtbaarheid van de ingang(en), eventueel na maaien. Bij bevers ligt dit anders, omdat zij de ingang tot hun burcht onder de waterspiegel plegen te maken. In Gameren geldt echter dat de grofzandbarrière overal tenminste 15 m van een watergang (sloot of kleiput) verwijderd is. Het is zeer onwaarschijnlijk dat de bevergangen op een dergelijke afstand tot de ingang nog tot onder de grondwaterspiegel onder normale en natte omstandigheden zal reiken. Bovendien vormt de dijk een betrekkelijk onaantrekkelijke locatie voor een beverburcht.

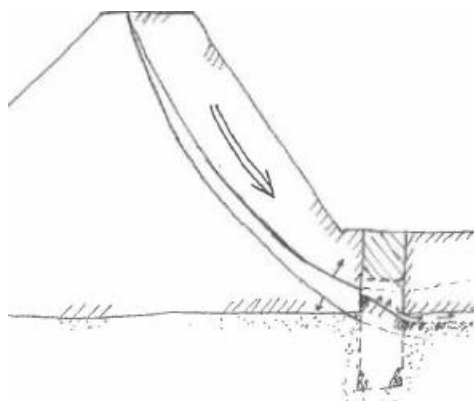
Kortom, de kans op een niet tijdig gedetecteerde doorgraving van de grofzandbarrière die een bedreiging vormt voor de veiligheid tegen piping is uiterst klein. Hierbij wordt onder tijdige detectie verstaan dat er na waarneming nog voldoende tijd zal zijn voor herstel voordat een hoogwater langskomt dat zonder functionerende grofzandbarrière niet gekeerd kan worden.

A.3.3

B3 Macroinstabiliteit leidt tot beschadiging van de barrière

Macroinstabiliteit betreft een ander faalmechanisme dan 'opbarsten, heave en piping' waar de grofzandbarrière een remedie tegen vormt, daarom valt het optreden van macroinstabiliteit volgens de systematiek van het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016a) en het Ontwerpinstrumentarium (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016b) strikt genomen buiten de scope van deze rapportage. Echter, omdat de werking van de grofzandbarrière (nog) niet als algemeen bekend kan worden verondersteld, wordt er hier toch op ingegaan.

Zoals indicatief is aangegeven in Figuur 114, kan een glijvlak onder het essentiële deel van de grofzandbarrière door gaan, er doorheen gaan of dit bovenlangs passeren. Het 'essentiële deel' van de barrière betreft in ieder geval de kritieke helling en de minimale heavehoogte en een beperkte zone daaromheen, alles bij elkaar niet meer dan enkele decimeters hoog.



Figuur 114 Macrostabiliteit met glijvlakken net boven en net onder het essentiële gedeelte van de grofzandbarrière.

Een glijvlak bovenlangs heeft geen wezenlijke invloed: de sleufaanvulling en eventueel zelfs het bovenste gedeelte van de inkassing worden dan opzijgeschoven en vervangen door berm- of dijksmateriaal. De grofzandbarrière zal dan nog steeds zoals bedoeld kunnen functioneren.

Wanneer het glijvlak onderlangs schuift, dan schuift het gehele essentiële deel van de barrière, inclusief de bovenstroomse rand, landinwaarts op. Door de (meestal kleine) hoekverdraaiing wordt de effectieve breedte van de barrière zelfs iets groter, waardoor de barrière in de dwarsdoorsnede nog wat effectiever kan zijn. Als de afschuiving in de lengterichting van de dijk betrekkelijk geleidelijk verloopt (en er dus geen abrupte overgang is tussen het afgeschoven gedeelte en het intacte gedeelte van de dijk¹⁶), dan treden er ook geen problemen op wat betreft de zijdelingse pipegroei.

Wanneer het glijvlak door het gedeelte gaat waar de grofzandbarrière in essentie zijn sterkte aan ontleent, dan is er wel sprake van een probleem, omdat er dan sneller doorloopsheid kan optreden. Dat is overigens ook het geval bij een hoger of lager gelegen primair glijvlak met secundaire vervormingen binnen het essentiële deel.

Het voorgaande is wel onder de aanname dat de afschuiving niet leidt tot verlies van de waterkerende functie, hoewel piping dan geen probleem meer vormt.

Verder kan de aanwezigheid van een grofzandbarrière invloed hebben op de kans van optreden van macrostabiliteit. Dit kan op meerdere manieren. Om te beginnen zal het sterk doorlatende barrièrezand, dat enigszins naar boven toe uitsteekt in de deklaag, een drainerende werking hebben op het dijklichaam en de dijkfundering. Dit betreft een gunstige invloed. Verder zal de sleufaanvulling van invloed zijn. Daar waar klei uit de deklaag vervangen is door klei, is er geen invloed van betekenis. Dit ligt anders wanneer hooggelegen tussenzandlagen worden afgesloten: dan zorgt een volledig uit klei bestaande sleufaanvulling juist tot verstopping, resulterend in verhoging van de freatische lijn nabij en in de berm en het binnentalud van de dijk, hetgeen ongunstig zal zijn. Daarom zal in voorkomende gevallen slechts het onderste gedeelte van de sleufaanvulling (0,3 tot 0,5 m)

¹⁶ Bijvoorbeeld bij de vervormingsproef in Bergambacht in 2001 trad macrostabiliteit met opdrijven op, met een glijvlak van in totaal 110 m lengte, waarbij de maximale vervormingen optraden in de middelste 40 m (Lindenberg et al., 2002).

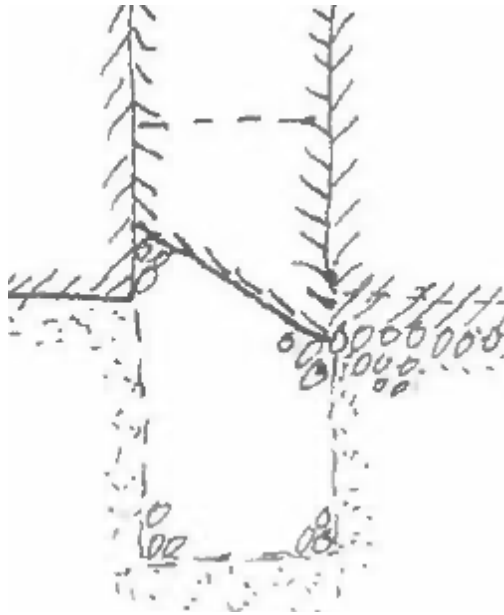
uit goede, erosiebestendige klei moeten bestaan en zal daarboven beter doorlatend materiaal moeten worden toegepast – bijvoorbeeld vrijgekomen materiaal uit de ontgraving.

A.3.4

B4 Na hoogwater nazakken van de deklaag in de pipe in de zandlaag

Na afloop van een hoogwater kan de deklaag nazakken/instorten op de benedenstroomse pipe(s). Daarmee vergelijkbaar is het nazakken van de sleufaanvulling op de grofzandbarrière na gedeeltelijk leeglopen van de inkassing. Dit verschilt in zoverre met het instorten van delen van het bovenliggende kleimateriaal *tijdens* hoogwater dat dit ná hoogwater niet zal worden afgevoerd door de waterstroming in de pipe respectievelijk de inkassing.

Na verloop van tijd (dit kan mogelijk maanden of zelfs jaren duren) kan de ineenstorting min of meer volledig zijn, zoals geschetst in Figuur 115 (zie ook Figuur 109 in §A.2.5).



Figuur 115 Volledig ingestorte holten, enige tijd na afloop van een extreem hoogwater.

Wanneer er dan een nieuw hoogwater optreedt waarbij het verval hoog genoeg is om opnieuw erosie te veroorzaken, dan zal de minimale heavehoogte sneller worden bereikt; de uitgangssituatie is immers ongunstiger dan voorheen, bij een volledig gevulde inkassing. Hierdoor leidt een hoogwatersituatie die niet direct tot falen van de grofzandbarrière leidt, maar wel tot het gedeeltelijk leeglopen van de inkassing, *op termijn* tot een situatie waarbij een minder hoog verval kan worden gekeerd dan voorheen. Er is dan feitelijk een situatie ontstaan die in de richting gaat van een 'vlakke' grofzandbarrière, maar nog wel met een gunstige hellingshoek en enige heavehoogte. De sterkte van een vlakke grofzandbarrière ten opzichte van een grofzandbarrière met inkassing is voor vergelijkbare beproefde situaties weergegeven in Figuur 88 in §A.1.11: de sterkte is duidelijk kleiner, maar niet nihil. Bovendien zijn er nog de genoemde hellingshoek en heavehoogte, die voor wat extra sterkte zullen zorgen.

Toch voldoet de bij een extreem hoogwater ontstane situatie, met gedeeltelijk leeglopen van de inkassing, na afloop van het hoogwater niet meer en zal, voordat zich opnieuw een dergelijk hoogwater voordoet, de inkassing moeten worden hersteld.

Voor de pilotlocatie bij Gameren is nader onderzocht hoe vaak dit verwacht mag worden en hoe dit met monitoring adequaat kan worden gesignaleerd. Hierbij is gebruik gemaakt van de huidige hoogwaterstatistiek bij Gameren en de kritische buitenwaterstand voor piping voor

iedere 100 m langs de huidige primaire kering, dus voor de versterking met de grofzandbarrière.

De huidige hoogwaterstatistiek bij Gameren is bepaald met Hydra-NL (Groeneweg, 2020) en weergegeven in Tabel 7.

Tabel 7 Huidige hoogwaterstatistiek bij Gameren (Waal km 937) uit Hydra-NL (Groeneweg, 2020).

Kans per jaar	Waterpeil bij Gameren (Waal km 937) (m + NAP)
1:10	6.08
1:100	7.33
1:1.000	8.02
1:10.000	8.46
1:100.000	8.89
1:1.000.000	9.39

In Tabel 8 is de kritieke buitenwaterstand volgens het model van Sellmeijer weergegeven voor ieder profiel waarvoor een schematisering is beschreven in Koelewijn et al. (2021). De waarden in deze tabel zijn gebaseerd op tabel 12 in §5.3 van Koelewijn et al. (2021).

Tabel 8 Kritieke buitenwaterstand volgens model van Sellmeijer per profiel.

Profiel RW ...+050	Kritiek peil zonder veiligheidsfactoren ($H_c + PP$) [m + NAP]	Kritiek peil met veiligheidsfactoren ($H_c/(\gamma_b \cdot \gamma_{mp}) + PP$) [m + NAP]
134	6.99	4.73
135	12.12	7.63
136	9.51	6.15
137	6.42	4.41
138	9.01	5.87
139	9.48	6.14
140	7.23	4.87
141	9.78	6.31
142	10.02	6.44
143	9.07	5.91

Gebruikte symbolen: H_c = kritiek verval, PP = polderpeil (NAP + 1.80 m), γ_b = schematiseringsfactor (1.1), γ_{mp} = pipingmodelfactor, voor dit dijktraject 1.61.

Als eerste benadering zou voor de *verwachte* frequentie van het optreden van pipes tot aan de grofzandbarrière kunnen worden uitgegaan van het kritieke peil *zonder* veiligheidsfactoren.¹⁷ Immers, in Gameren ligt het uittredepunt over het algemeen op ruime afstand achter de binnenteen, dus de kritieke pipelengte zal ruwweg rond de locatie van de grofzandbarrière uitkomen (met een ruime marge). De laagste waarde wordt dan gevonden bij profiel RW 137+050 en bedraagt NAP + 6.42 m. De bijbehorende frequentie wordt op basis van Tabel 7 geschat op eens in de circa 20 jaar.

Overigens worden in de huidige praktijk ongeveer eens in de 3 tot 6 jaar op beperkte schaal zandmeevoerende welletjes waargenomen nabij dijkspaal 143, waar een grovere zandbaan in

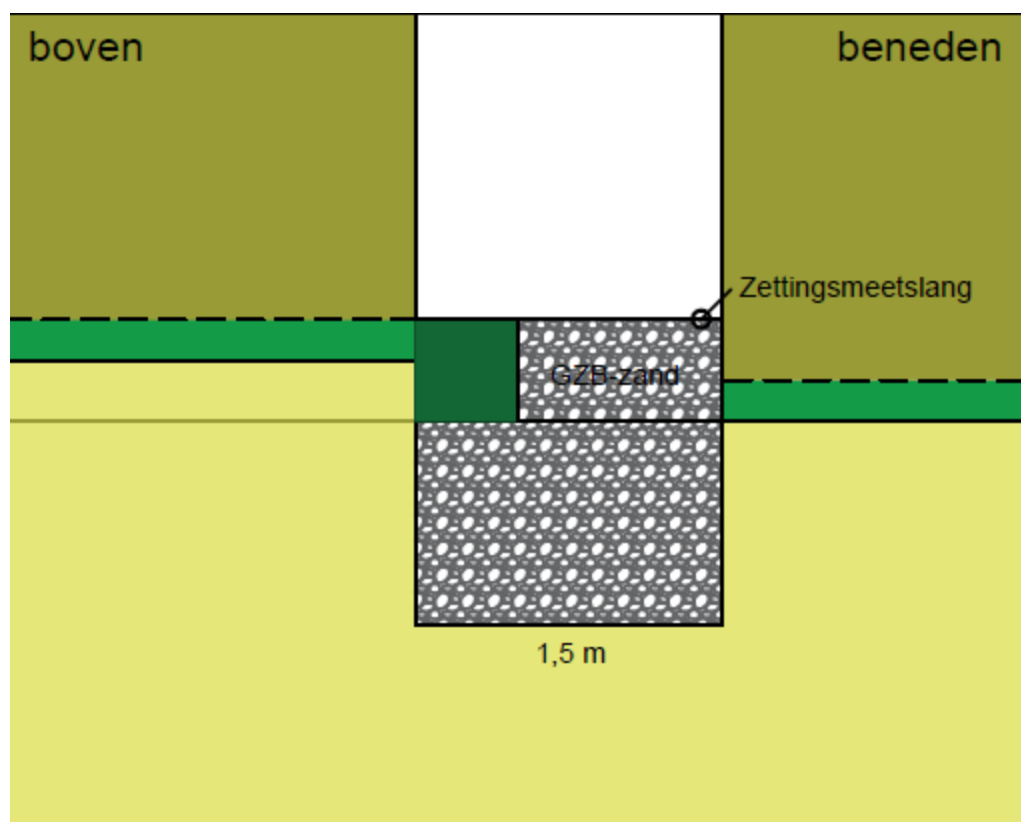
¹⁷ Uit oogpunt van veiligheid wordt met ongunstiger waarden voor het kritieke peil gerekend.

de ondergrond aanwezig is (waar in de berekeningen overigens rekening mee gehouden is). De laatste twee keren zijn beschreven in §4.2 van Koelewijn et al. (2021). Dat deze locatie volgens Tabel 8 een beduidend hoger kritiek peil kent, toont niet eens zozeer de betrekkelijkheid van de berekeningsresultaten, maar vooral het verschil tussen het optreden van de eerste welletjes en de kritieke situatie. Bij deze kleinschalige wel-activiteiten reiken de pipes beslist nog niet tot aan het tracé van de grofzandbarrière.

Er mag voorsnog dus worden uitgegaan van een frequentie van eens in de minimaal 20 jaar waarin de inkassing in belangrijke mate zou kunnen leeglopen. Minimaal, omdat een eerste begin van leeglopen nog niet tot een significante verzakking na afloop van het hoogwater leidt.

Hoewel extreme hoogwaters natuurlijk kort na elkaar zouden kunnen optreden, is de kans hierop gering. Bovendien is de sterkte van de grofzandbarrière niet geheel verdwenen na zelfs het grotendeels leeglopen van de inkassing: een meer frequent voorkomend hoogwater zal nog steeds kunnen worden gekeerd, inclusief een hoogwater waarbij benedenstroomse pipes nog wel de grofzandbarrière bereiken. Zodoende kan er wel oplaagwater worden gewacht voordat actie moet worden ondernomen om de inkassing weer in oorspronkelijke staat te herstellen. Dit betreft dan een gerichte actie die alleen hoeft te worden ondernomen daar waar significante zandmeevoerende wellen in het achterland zijn waargenomen, niet een totale her-aanleg van de grofzandbarrière.

Ter vergroting van het vertrouwen in het functioneren van de grofzandbarrière zal op de pilotlocatie bij Gameren monitoring worden toegepast waarmee de eventuele aantasting van het bovenste deel van de inkassing kan worden gedetecteerd. Hiertoe zal in elk geval een zettingsmeetslang worden geïnstalleerd boven het grove zand, nabij de benedenstroomse rand, zoals indicatief aangegeven in Figuur 116. Over eventuele aanvullende monitoring wordt nog nagedacht binnen de 'Denktank Monitoring Grofzandbarrière Gameren'.

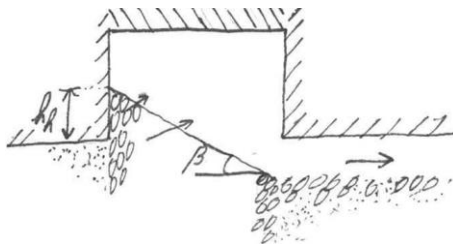


Figuur 116 Principeschets van het Definitief Ontwerp voor de grofzandbarrière bij Gameren, na aanbrengen laatste grove zand (grijs) en zettingsmeetslang, voor aanbrengen sleufaانvulling (zie ook bijlage E; Boone, 2021b).

Er kan dan gericht worden ontgraven ter plaatse van waar de zettingsmeetslang is gezakt, waarbij ook achteraf kan worden gekeken in hoeverre de grofzandbarrière daadwerkelijk is aangetast. Bij het opgraven kan ook worden gecontroleerd in hoeverre er verder zijwaarts ook verzakkingen zijn opgetreden die mogelijk niet met de zettingsmeetslang zijn gedetecteerd. Ook kan worden gekeken in hoeverre er sprake is geweest van zijdelingse pipegroei langs de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière en ook of er sprake is van obstakels die deze zijdelingse pipegroei hebben verhinderd – hetgeen van belang is voor het inzicht in de 3D-factor (zie bijlage D). De ontgraving heeft daarnaast uiteraard ten doel om de inkassing weer te herstellen voor het volgende serieuze hoogwater.

A.3.5 B5 Naverdichten barrière

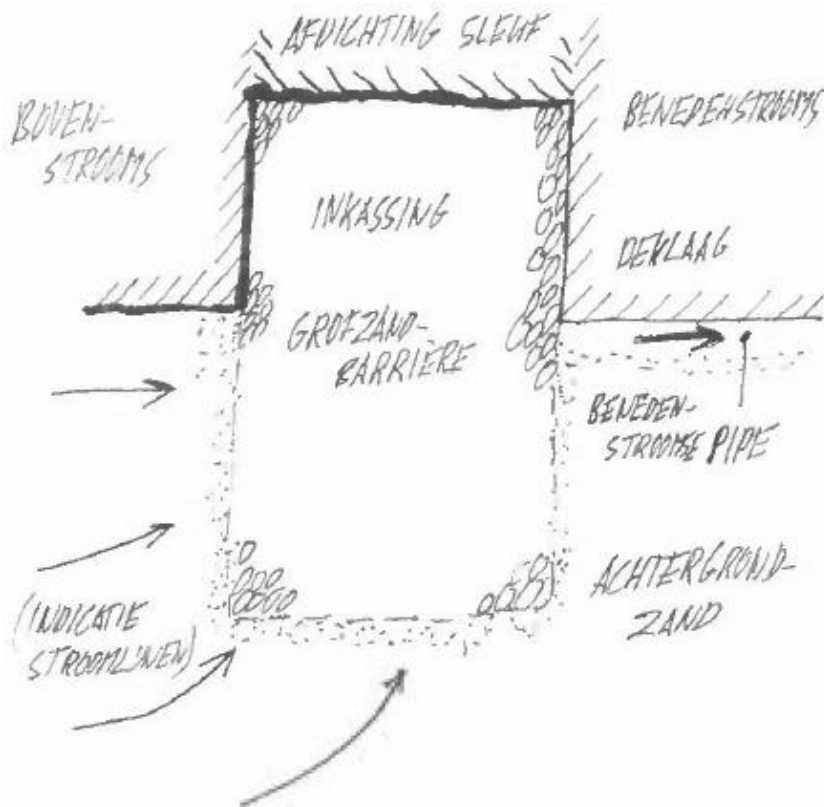
Tijdens de uitvoering zou al afdoende aandacht moeten zijn besteed aan het aanbrengen van het zand van de grofzandbarrière in een vaste pakking, zie hiervoor §A.2.3. De enige situatie die dan nog overblijft die *eventueel* tot problemen kan leiden, is de situatie bij een extreem hoogwater waarbij de uiterste grens qua heavehoogte en/of hellingshoek al dicht is benaderd, zoals geschetst in Figuur 117. In een dergelijke situatie kan verzakking als gevolg van aanvullende verdichting tot bezwijken leiden. Voor de praktijk moet dan worden gedacht aan een extreme hoogwatersituatie, waarbij dan bovendien verdichting wordt gestimuleerd. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren als een damwand wordt ingetrild bij wijze van noodmaatregel in een aangrenzend gedeelte van dijk. Een dergelijke noodmaatregel mag uiterst onwaarschijnlijk worden geacht, mede gelet op het zware materieel dat daarvoor nodig is en waarvan de aanvoer over het algemeen niet op een veilige manier mogelijk is.



Figuur 117 Uiterste situatie met minimale heavehoogte en maximaal verflauwde helling, waarin verzakking als gevolg van verdichting niet kan worden opgenomen.

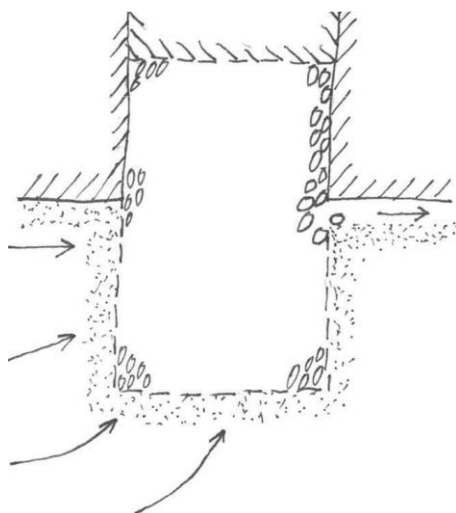
A.3.6 B6 Erosie van de grofzandbarrière zelf bij hoogwater

Een pipe die vanaf de benedenstroomse kant de grofzandbarrière bereikt (zie Figuur 118) maakt het mogelijk dat er korrels vanuit de grofzandbarrière in de aangrenzende pipe rollen.



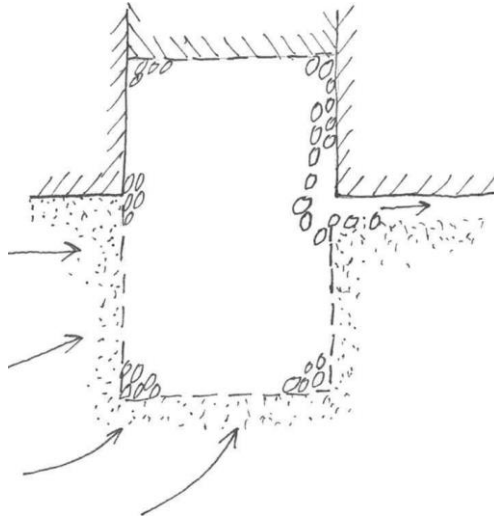
Figuur 118 Zijaanzicht met grofzandbarrière waar een pipe volledig naar toe is gegroeid vanaf het benedenstroomse uittredepunt.

Dit is een kwestie van evenwicht op korrelniveau: wanneer in de situatie van Figuur 118 een korrel uit de grofzandbarrière de zijdelingse steun van het achtergrondzand ontbeert doordat dat zand geërodeerd is, dan zal deze korrel kunnen vallen en mede onder invloed van de stroming zal dit dan ook gebeuren, zie Figuur 119.



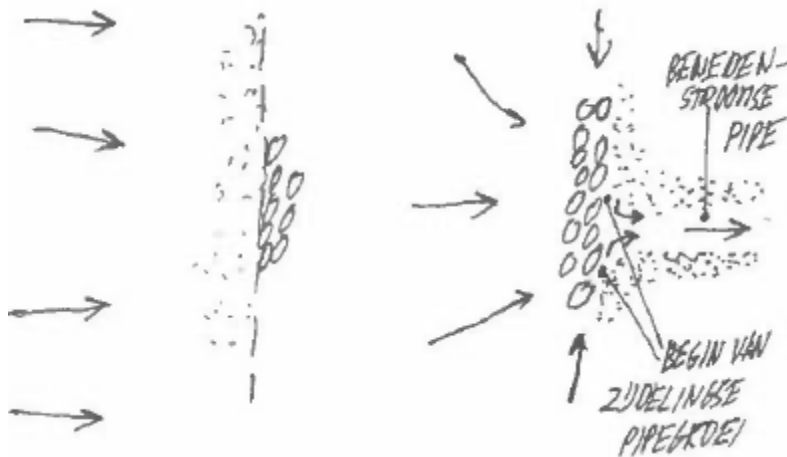
Figuur 119 Zijaanzicht met grofzandbarrière waarvan een eerste korrel is geërodeerd.

Daarna kunnen de volgende korrels volgen, mede geholpen door de zwaartekracht, zie Figuur 120.



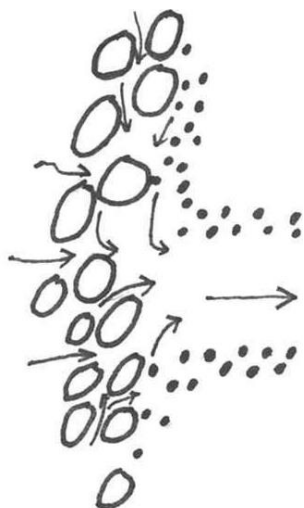
Figuur 120 Zijaanzicht met grofzandbarrière met drie geërodeerde korrels.

Overigens zal er ook erosie optreden in zijwaartse richting, langs de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière. Zie het bovenaanzicht in Figuur 121: het water zal van alle kanten door de barrière naar de pipe toestromen en ook door het achtergrondzand heen gaan.



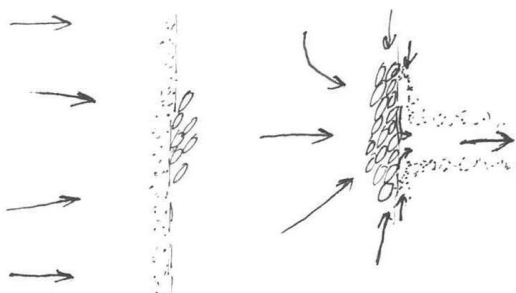
Figuur 121 Bovenaanzicht met allereerste begin van pipegroei in zijwaartse richting.

Hier zal op korrelniveau ook een vorm van contacterosie optreden: korrels behorend bij het achtergrondzand zullen als het ware worden meegezogen door de stroming door het achtergrondzand. Daar passen ze niet door de poriën (er wordt immers voldaan aan de filterregels voor geometrisch dichte filters), maar dit levert wel een zodanige druk op die ene korrel van het achtergrondzand die op de hoek ligt, dat deze als eerste zal eroderen, zie Figuur 122. Daarna zullen de achterliggende korrels van het achtergrondzand stuk voor stuk gemakkelijker getransporteerd kunnen worden dan de grotere korrels van de grofzandbarrière.



Figuur 122 Schematisch detail van de situatie bij het begin van pipegroei in zijwaartse richting (bovenaanzicht).

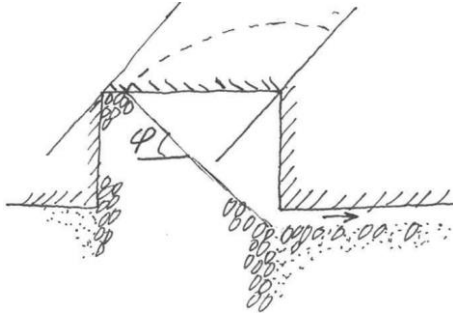
Als er eenmaal enkele korrels van het achtergrondzand aan de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière zijn afgevoerd, zal er een begin van een zogenoemde zijdelingse pipe zijn ontstaan, waardoor over het algemeen de kleine korrels van het achtergrondzand gemakkelijker zullen worden afgevoerd dan de korrels van de barrière. Daardoor zullen twee zijdelingse pipes ontstaan, aan weerszijden van de pipe die aansluit op de pipe richting het uittredepunt (deze laatste wordt ook wel aangeduid als 'de benedenstroomse pipe'), zie Figuur 123.



Figuur 123 Verdere zijdelingse pipegroei in het achtergrondzand direct benedenstrooms van de barrière (bovenaanzicht).

Nadat de eerste korrel in de pipe is gevallen, zullen zoals hiervoor geschetst de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit zandtransport kan zowel korrels uit de grofzandbarrière betreffen als korrels die tot het achtergrondzand behoren. De laatste zijn grotendeels kleiner dan de eerste en zullen daarom gemakkelijker en ook verder getransporteerd worden.

Mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende afvoer van materiaal plaatsvindt, zal dit proces waarbij korrels uit het bovenste deel van de grofzandbarrière verdwijnen doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert (zie voor deze hoek van inwendige wrijving ook het volgende onderdeel, knooppunt 37). Dit levert een soort halfronde mini-amfiteater op ter plaatse van de aansluiting van de pipe (benedenstroomse pipe) op de grofzandbarrière, zie het zijaanzicht met enige 3D-suggestie in Figuur 124.

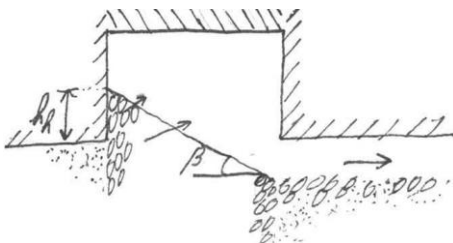


Figuur 124 Uitspoeling van bovendeeel barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen naar verwachting pas in een laat stadium het uittredepunt bereiken. Ondertussen raakt de bodem van de pipe in de nabijheid van de grofzandbarrière meer en meer 'geplaveid' met grovere korrels, hetgeen de stromingsweerstand doet toenemen. Deze hogere weerstand kan er toe leiden dat deze benedenstroomse pipe enigszins zijdelings groeit, met achterlating van een mogelijk grotendeels verstopt gedeelte met meer grof zand, ten gunste van een route waar (vooralsnog) meer achtergrondzand aanwezig is. Hierdoor kan ook het punt waar de benedenstroomse pipe aansluit op de grofzandbarrière in de loop van de tijd variëren, hetgeen er dan ook toe leidt dat de uitspoeling vanuit de grofzandbarrière geometrisch minder fraai gevormd wordt, hetgeen gunstig uitpakt.

Bovendien zullen de korrels uit het bovenste gedeelte van de grofzandbarrière ook op enige afstand van de aansluiting op de benedenstroomse pipe(s) naar beneden rollen in de daar gevormde zijdelingse pipe. Daardoor zal de situatie ondergronds steeds een vorm hebben tussen een halfrond mini-amfitheater en een 2D-doorsnede met één enkele helling in. De omvang van de zijdelingse pipes is enerzijds afhankelijk van de daadwerkelijke afvoer van zand (fijn en grof), hetgeen behalve voldoende verval en daarmee gepaard gaande stroming ook tijd vergt, anderzijds neemt de stroomsnelheid aan de randen af naarmate de pipe groter wordt. Dit kan er toe leiden dat uiteindelijk eerder sprake zal zijn van een enigszins verwijd mini-amfitheater bij de aansluiting op een benedenstroomse pipe. Daarbij is er verder (grotendeels) een zijdelingse pipe met slechts beperkte instorting van de inkassing met daardoor mogelijk een tweede doorgaande holte bovenin. Deze tweede holte bevindt zich dan rechtsboven in de hoek van de inkassing in bijvoorbeeld Figuur 31). Dit zal eerder optreden dan dat er over de hele lengte van de grofzandbarrière sprake zal zijn van een volledig ontwikkelde helling.

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Het gaat hier om een verdere verflauwing van de helling, zoals getoond in Figuur 125.



Figuur 125 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

De verflauwing van de hellingshoek in Figuur 32 leidt ook tot een afname van de zogenoemde “heavehoogte”, de verticale afstand tussen de bovenkant van de resterende grofzandbarrière en de onderkant van de deklaag aan de bovenstroomse zijde van de grofzandbarrière, in de voorgaande figuur aangegeven met h_n .

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. Voor de kritieke uitstroombadient op de helling (i_{crit}) is door Van Rhee & Bezuijen (1992) de volgende vergelijking gegeven:

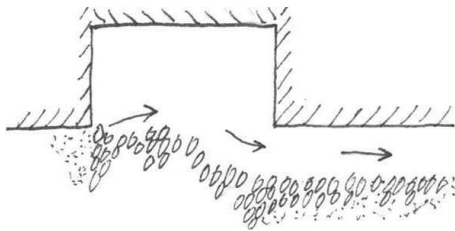
$$i_{crit} = v / k = - (1 - n) \Delta \sin (\phi - \beta) / \sin \phi \quad (A3.6.1)$$

met v = stroomsnelheid van het uittredende kwelwater, k = hydraulische doorlatendheid van de grofzandbarrière, n = porositeit, Δ = relatieve dichtheid van het korrelmateriaal = $(\rho_s - \rho_w) / \rho_w = 1,65$ voor kwartzand in zoet water, ϕ = hoek van interne wrijving van het barrièrezand en β = kritieke hellingshoek (zie Figuur 125).

De toepasselijkheid van deze vergelijking voor de situatie van de grofzandbarrière met inkassing is bevestigd door een tweetal validatie-experimenten op medium schaal (Terwindt et al., 2020) en de analyse daarvan, beschreven in Förster (2021a). Het gaat hierbij om de gradiënt welke optreedt in het midden van de helling. Deze helling verloopt niet recht, doch concaaf, maar voor de analyse kan worden gewerkt met één hellingshoek β .

Voor het in de beschreven proeven gebruikte zand geldt een hoek van inwendige wrijving ϕ van 35 graden en een evenwichtshoek β van 10 graden. Voor andere zanden, geschikt voor een grofzandbarrière, zullen deze waarden over het algemeen niet heel anders zijn.

Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zoals geschetst in Figuur 126. Er ontstaat dan doorlooptheid.



Figuur 126 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

A.3.7 B7 Mechanische, chemische of biologische verstopping

Deze paragraaf vormt in belangrijke mate een vertaling naar de situatie van de grofzandbarrière van hetgeen beschreven is voor het verticaal zanddicht geotextiel door Burger & Waterloo (2020).

Voor verstopping kan een onderscheid worden gemaakt in mechanische, chemische en biologische verstopping.

Voor mechanische verstopping geldt dat de poriën in de grofzandbarrière verstopt kunnen raken doordat grote deeltjes de openingen blokkeren (“blocking”), of door de vorming van een slechtdoorlatende laag op de bovenstroomse rand (“blinding”) of dichtslibben door afzetting en neerslag van fijne deeltjes. Wanneer aan de eisen voor geometrisch dichte filters wordt voldaan (zie §A.1.4), dan kunnen deze verschijnselen geen van alle optreden en is mechanische verstopping dus uitgesloten.

Voor chemische verstopping moeten opgeloste stoffen in het grondwater met de omgeving reageren of een neerslagreactie ontstaan omdat er oververzadiging in de oplossing optreedt – juist ter plaatse van de grofzandbarrière. Het gaat dan met name om de neerslag van kalk (calciet – CaCO_3) en ijzeroxiden (Fe_2O_3).

Oververzadiging ten opzichte van calciet kan optreden bij menging van verschillende typen water, bij verandering van temperatuur of bij een optredende gasdrukverandering, waardoor bijvoorbeeld CO_2 uit het water ontwijkt. In het rivierengebied genomen grondwatermonsters tonen aan dat het water licht onder- of oververzadigd is ten aanzien van calciet. Echter, bij de voorgestelde toepassing van de grofzandbarrière, waarbij de deklaag hersteld wordt, treedt er geen verandering op in CO_2 -spanning in de bodem en zijn er ook geen aanwijzingen dat concentraties van Ca^{2+} of CO_3^{2-} verhoogd worden door toename van verweringsnelheden of verhoogde afbraak van organisch materiaal – het toegepaste grove zand kan weliswaar gebiedsvreemd zijn, maar wijkt op deze punten niet wezenlijk af van het reeds aanwezige zand.

Voor de neerslag van ijzeroxiden spelen ook biologische factoren een rol, zodat er dan sprake is van biogeochemische verstopping. De neerslag van ijzer(hydr)oxiden vereist verhoogde concentraties van opgelost ijzer in het grondwater, aanvoer van nutriënten en eventueel redox overgangen. De belangrijkste aerobe ijzer-bacterie, *Gallionella*, die vrij algemeen voorkomt in de Nederlandse bodem, wordt actief bij ijzerconcentraties in grondwater van boven 5 mg/l. In het algemeen wordt het risico op ijzerneerslag als verwaarloosbaar beschouwd als de ijzerconcentratie in grondwater lager is dan 3 mg/l. In Burger & Waterloo wordt onderzoek aangehaald naar de chemische samenstelling van het grondwater op 11 verschillende locaties in het rivierengebied, waarbij de ijzerconcentratie varieerde van 0 tot maximaal 0,34 mg/l. Elders kan dit uiteraard hoger liggen, maar dan zal de bodem reeds ijzerneerslag vertonen. Deze ijzerneerslag, al dan niet in de vorm van een laag ijzeroer, leidt tot een aanzienlijk verlaagde doorlatendheid. Deze lagere doorlatendheid kan op zichzelf een reden zijn om piping uit te kunnen sluiten. Zo niet, dan geldt nog steeds dat het achtergrondzand hierdoor sterker in doorlatendheid achteruit zal gaan dan het grovere barrièrezand en vormt dit géén belemmering voor een goed functioneren van de grofzandbarrière.

Biologische verstopping kan optreden door de neerslag van biofilms. Bij de toepassing van geotextiel voor de drainage van vuilstorten en in landbouwgronden is dit wel geobserveerd. Dit was echter onder omstandigheden waarbij er een grote hoeveelheid organisch materiaal beschikbaar was dat als voeding diende voor de microbiële populatie. Bij de toepassing van de grofzandbarrière geldt echter hetzelfde als voor de afzetting van ijzerneerslag: het achtergrondzand zal hier in het algemeen gevoeliger voor zijn dan het grovere zand van de barrière.

Als er al lokaal enige vorm van verstopping van de grofzandbarrière zou ontstaan, dan geldt dat het grondwater hier vrij gemakkelijk omheen zal kunnen stromen met amper een verhoging van de stromingsdruk. Wanneer er over een grotere lengte verstopping met bijvoorbeeld ijzeroer ontstaat op het niveau van de bovenzijde van de pipinggevoelige zandlaag, dan betreft dit een naar verhouding vrij dunne laag van minder dan enkele decimeters. De stroming zal dan aan de bovenstroomse zijde iets dieper de grofzandbarrière ingaan, wat alleen maar gunstiger is vanwege de toename van de effectieve heavehoogte.

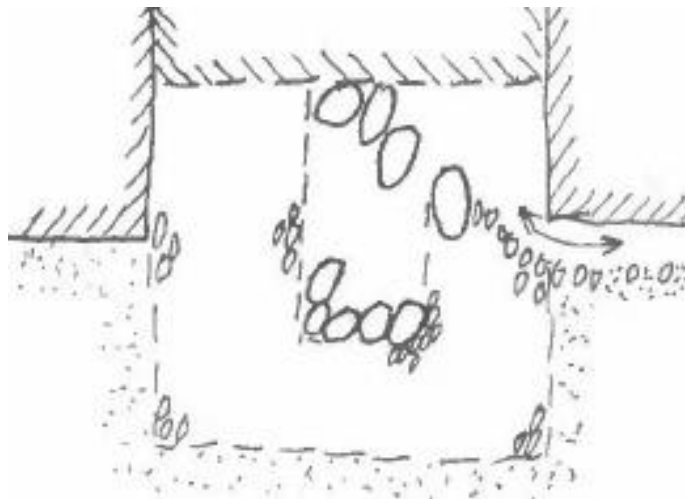
Conclusie: verstopping vormt géén probleem voor het functioneren van een grofzandbarrière als maatregel tegen piping, mits deze aan de eisen voor geometrisch dichte filters voldoet.

Naar aanleiding van enkele uitvoerige discussies komt verstopping in allerlei gedaanten wel voor in de faalboom, bij 8 van de 24 (faal)paden die onder het beheer vallen, zie §C.3, bij de paden 64, 65, 66, 72, 73, 76, 77 en 78.

A.3.8 B8 Bij een eerder hoogwater is de grofzandbarrière door piping bloot komen te liggen

Deze beïnvloedende factor is alleen relevant indien een dubbel filter is toegepast. Bij een normale grofzandbarrière, met een enkelvoudig filter, is dit niet van toepassing.

Bij toepassing van een dubbel filter wordt binnen een 'normale grofzandbarrière' een zone met extra grof materiaal toegepast, dat ook weer aan de filterregels (zie §6.2) moet voldoen. Dit idee is op verschillende plaatsen ontstaan als mogelijkheid om tot een extra sterke grofzandbarrière te komen. Bij een extreem hoogwater waarbij de sterkte nog wel voldoende is, maar de inkassing al gedeeltelijk is leeggestroomd, kan een situatie ontstaan als getoond in Figuur 127: behalve het fijnere filter is ook het grovere filter bloot komen te liggen.



Figuur 127 Als dubbel filter uitgevoerde grofzandbarrière na forse belasting.

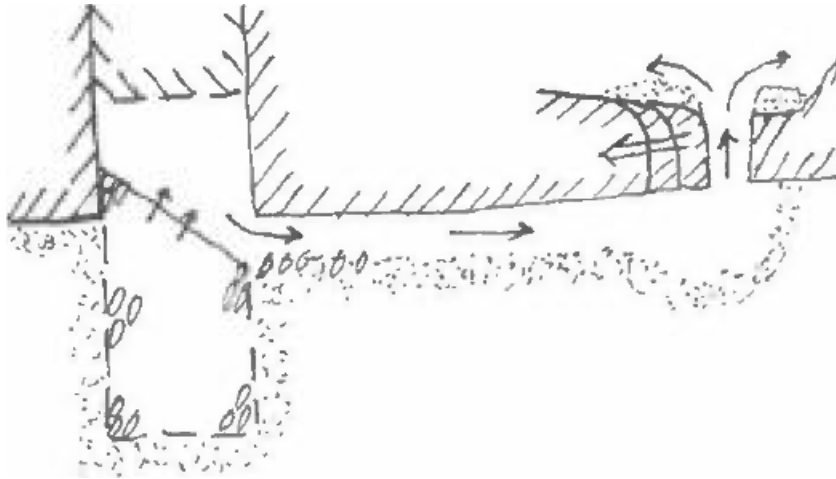
Wanneer vervolgens een stroming ontstaat in omgekeerde richting (dus vanuit het achterland richting het buitenwater), die door uitzonderlijke omstandigheden zó krachtig is dat achtergrondzand wordt meegevoerd, dan kan dit in het grovere filter terecht komen. Wanneer de grofzandbarrière vervolgens voorafgaand aan een volgend extreem hoogwater niet is vernieuwd zoals beschreven in §A.3.4, dan kan het grovere filter hierdoor verstopt blijven indien dit achtergrondzand niet weer polderwaarts kan wegstromen.

Er wordt nadrukkelijk op gewezen dat het dubbele filter als grofzandbarrière een nog onvolledig doordacht concept betreft, waarmee ook nog geen kleinschalige verificatie-experimenten zijn uitgevoerd. Daarnaast zijn er nog meerdere aanvullende stappen nodig voordat er hierdoor falen kan optreden, waaronder twee opeenvolgende extreme hoogwaters met daar tussendoor geen vernieuwing van de inkassing, maar wél een dusdanig sterke stroming vanuit het achterland richting het buitenwater dat hierdoor achtergrondzand wordt meegevoerd dat zich dan in het grovere filter nestelt. Het is daardoor uitermate onwaarschijnlijk dat deze beïnvloedende factor tot falen zal leiden.

A.3.9 B9 Afkalving van de deklaag benedenstrooms van de barrière

Benedenstrooms van de grofzandbarrière kan afkalving van de deklaag ontstaan, hetgeen uiteindelijk kan leiden tot het eroderen van het volledige gebied benedenstrooms van de grofzandbarrière over een zekere breedte aan weerszijden van de benedenstroomse pipe. Dit leidt tot verlies van de benedenstroomse weerstand en daarmee tot een kleine toename van de gradiënt in de grofzandbarrière.

In Figuur 128 is dit geïllustreerd voor de situatie met afkalving van de deklaag bij het uittredepunt. Doorgaans wordt hier in pipinganalyses geen rekening mee gehouden, maar het is bijvoorbeeld waargenomen bij de proefnemingen in de Willemspolder waar het pipingproces bij een zomerkade tot een ongebruikelijk sterke erosie leidde (anders gezegd: het verval lag rond het kritieke verval (zonder veiligheidsfactoren), hetgeen tot een meer extreme situatie leidde dan gangbaar is bij waarnemingen van zandmeevoerende wellen onder hoogwateromstandigheden elders). In een tijdsbestek van meerdere uren verschoof het uittredepunt daarbij ruim een meter rivierwaarts (Koelewijn, 2017).

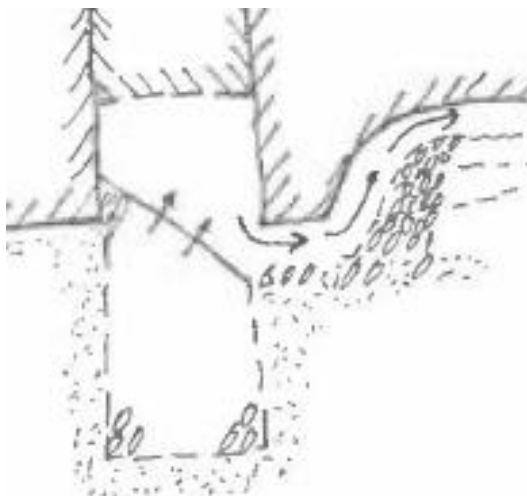


Figuur 128 Afkalving van de deklaag bij het uittredepunt.

Wanneer het uittredepunt in de buurt komt van de grofzandbarrière, kan bovendien interferentie van de onderscheiden erosieprocessen optreden, zoals reeds aangegeven in §A.1.7. Vooralsnog wordt aanbevolen om bij wijze van noodmaatregel grond bij te storten in het erosiegat, uiterlijk wanneer de afstand tot de grofzandbarrière minder dan 5 meter dreigt te worden. Bij die afstand mag dit nog praktisch uitvoerbaar worden geacht.

A.3.10 B10 Pipe slijt de bovenliggende deklaag uit

Wat tot slot nog kan gebeuren, is dat de benedenstroomse pipe de bovenliggende deklaag uitslijt, zie Figuur 129 voor een schetsmatige indicatie. Dit is bijvoorbeeld bij één van de proeven in de Deltagoot geconstateerd. Daarbij was de bodem van de pipe geleidelijk opgehoogd, voornamelijk met grof zand. Uiteindelijk kan dit leiden tot doorsnijding van het maaiveld ergens tussen de grofzandbarrière en het uittredepunt. Of dit uiteindelijk ook gebeurt is mede afhankelijk van de hoogteligging van het maaiveld, de optredende drukken en de erosiegevoeligheid van de deklaag.



Figuur 129 Uitslijting van de bovenliggende deklaag.

Of dit in de praktijk een probleem vormt, zal nog moeten blijken. Voor de veiligheidsbeschouwing heeft dit niet veel invloed, gelet op de stijghoogte die weer gewonnen wordt en de relatief geringe bijdrage van het gedeelte benedenstrooms van de grofzandbarrière in de sterkteberekeningen.

B Foutenboom

B.1 Inleiding

De foutenboom voor de grofzandbarrière is opgesteld volgens hetzelfde stramien als de foutenboom voor het verticaal zanddicht geotextiel (Taal, 2017), met een opdeling naar invloedsfactoren waaraan het beste aandacht kan worden geschonken bij ontwerp, tijdens de uitvoering of gedurende de beheerfase. De foutenboom is aangevuld en aangepast op basis van de input van externe deskundigen, geleverd tijdens en rondom een vijftal bijeenkomsten verspreid over enkele jaren. Voor de volledigheid zijn deze bijeenkomsten en de genodigden per bijeenkomst hierna vermeld.

1^e bijeenkomst, op 25 juni 2018 bij Waterschap Rivierenland in Tiel:

- Henk Weijers (Hoogheemraadschap van Rijnland, voorzitter Projectoverstijgende Verkenning Piping (POV-piping)).
- Bas Berbee (Fugro, lid van de POV-piping).
- Henk Senhorst (Rijkswaterstaat GPO, lid van de POV-piping).
- Jan Jaap Heerema (Rijkswaterstaat WVL, lid van de POV-piping).
- Laura Taal (Waterschap Rivierenland, lid van de POV-piping).
- Hans van der Sande (Waterschap Scheldestromen, lid van de POV-piping).
- Hans Niemeijer (Arcadis, secretaris van de POV-piping).
- Cor Bisschop (Green Rivers).
- Stefan van den Berg (Rijkswaterstaat GPO).
- Hendrik Meuwese (Witteveen+Bos).
- Ruben Jongejan (Jongejan RMC).
- Bastiaan Heutink (Waterschap Rivierenland, projectmanager dijkversterking Gameren).
- Koen van Gerven (Waterschap Rivierenland, technisch manager dijksterking Gameren).
- Ulrich Förster (Deltares).
- André Koelewijn (Deltares).

2^e bijeenkomst, op 4 februari 2019 bij Waterschap Rivierenland in Tiel:

- Henk Weijers (Hoogheemraadschap van Rijnland, voorzitter POV-piping).
- Bas Berbee (Fugro, lid van de POV-piping).
- Henk Senhorst (Rijkswaterstaat GPO, lid van de POV-piping).
- Jan Jaap Heerema (Rijkswaterstaat WVL, lid van de POV-piping).
- Laura Taal (Waterschap Rivierenland, lid van de POV-piping).
- Hans van der Sande (Waterschap Scheldestromen, lid van de POV-piping).
- Hans Niemeijer (Arcadis, secretaris van de POV-piping).
- Cor Bisschop (Green Rivers).
- Stefan van den Berg (Rijkswaterstaat GPO).
- Hendrik Meuwese (Witteveen+Bos).
- Ger-Jan Westerhof (Waterschap Rivierenland).
- Bastiaan Heutink (Waterschap Rivierenland, projectmanager dijkversterking Gameren).
- Koen van Gerven (Waterschap Rivierenland, technisch manager dijksterking Gameren).
- Ulrich Förster (Deltares).
- André Koelewijn (Deltares).

3^e bijeenkomst, op 31 januari 2020 bij Waterschap Rivierenland in Tiel:

- Henk Weijers (Hoogheemraadschap van Rijnland, voorzitter POV-piping).
- Bas Berbee (Fugro, lid van de POV-piping).
- Henk Senhorst (Rijkswaterstaat GPO, lid van de POV-piping).

- Laura Taal (Waterschap Rivierenland, lid van de POV-piping).
- Hans van der Sande (Waterschap Scheldestromen, lid van de POV-piping).
- Harm Rinkel (Rijkswaterstaat WVL).
- Cor Bisschop (Green Rivers).
- Stefan van den Berg (Rijkswaterstaat GPO).
- Hendrik Meuwese (Witteveen+Bos).
- Gerjan Westerhof (Waterschap Rivierenland).
- Andries Nederpel (Waterschap Rivierenland).
- Bastiaan Heutink (Waterschap Rivierenland, projectmanager dijkversterking Gameren).
- Koen van Gerven (Waterschap Rivierenland, technisch manager dijksterking Gameren).
- Ulrich Förster (Deltares).
- Vera van Beek (Deltares).
- Adam Bezuijen (Deltares).
- André Koelewijn (Deltares).

4^e bijeenkomst, op 28 oktober 2020 in een digitale vergadering:

- Henk Weijers (Hoogheemraadschap van Rijnland).
- Bas Berbee (Fugro).
- Henk Senhorst (Rijkswaterstaat GPO).
- Laura Taal (Waterschap Rivierenland).
- Hans van der Sande (Waterschap Scheldestromen).
- Harm Rinkel (Hoogwaterbeschermingsprogramma).
- Cor Bisschop (Green Rivers).
- Stefan van den Berg (Rijkswaterstaat GPO).
- Hendrik Meuwese (Witteveen+Bos).
- Gerjan Westerhof (Waterschap Rivierenland).
- Andries Nederpel (Waterschap Rivierenland).
- Bastiaan Heutink (Waterschap Rivierenland, projectmanager dijkversterking Gameren).
- Koen van Gerven (Waterschap Rivierenland, technisch manager dijksterking Gameren).
- Ulrich Förster (Deltares).
- Vera van Beek (Deltares).
- Adam Bezuijen (Deltares).
- André Koelewijn (Deltares).

5^e bijeenkomst, op 17 december 2020 in een digitale vergadering:

- Henk Weijers (Hoogheemraadschap van Rijnland).
- Bas Berbee (Fugro).
- Henk Senhorst (Rijkswaterstaat GPO).
- Laura Taal (Waterschap Rivierenland).
- Hans van der Sande (Waterschap Scheldestromen).
- Harm Rinkel (Hoogwaterbeschermingsprogramma).
- Cor Bisschop (Green Rivers).
- Stefan van den Berg (Rijkswaterstaat GPO).
- Hendrik Meuwese (Witteveen+Bos).
- Bastiaan Heutink (Waterschap Rivierenland, projectmanager dijkversterking Gameren).
- Koen van Gerven (Waterschap Rivierenland, technisch manager dijksterking Gameren).
- Ulrich Förster (Deltares).
- Vera van Beek (Deltares).
- Adam Bezuijen (Deltares).
- André Koelewijn (Deltares).

De figuur aan het einde van deze bijlage geeft alle gebeurtenissen en beïnvloedende factoren in hun onderlinge verband weer. **Tenzij anders vermeld, gaat het telkens om OF-poorten.** Dat wil zeggen: één onderliggende gebeurtenis is voldoende om de

vervolggebeurtenis te laten plaatsvinden, al zijn de overgangskansen in het algemeen wel kleiner dan 1, behalve in de ene situatie waarin een 'EN'-poort is weergegeven. De nummering is over het algemeen van boven naar beneden en van links naar rechts. Sommige gebeurtenissen en beïnvloedende factoren staan meerdere malen vermeld, om elkaar kruisende pijlen te voorkomen.

Eerst volgt een omschrijving van alle gebeurtenissen (of 'knopen') in de foutenboom, omdat hiervoor in de meeste gevallen onvoldoende ruimte is in de figuur. Daarna staan alle beïnvloedende factoren voluit vermeld. Tot slot is de foutenboom zelf opgenomen.

B.2 Overzicht van gebeurtenissen

B.2.1 Gebeurtenissen richting falen

- 1 Inundatie.
- 2 Bezwijken grofzandbarrière.
- 5 Horizontaal zandtransport tussen grofzandbarrière en buitenwater.
- 6 Doorgaande pipe.
- 7 Ruimen.
- 8 Kruinverlaging.
- 9 Noodmaatregelen ineffectief.
- 10 Bresgroei.
- 11 Pipegroei voorbij uiteinde barrière (in lengterichting van de dijk)..
- 12 Eindafsluiting is te doorlatend.
- 13 Uitspoeling bij aansluiting op hoge grond.
- 14 Overlap met een andere waterdoorlatende pipingmaatregel is te kort.
- 15 Pipe groeit tussen barrièredelen door.
- 16 Pipe passeert (min of meer horizontaal) door (geërodeerde) sleufaanvulling.
- 17 Achtergrondzand is gevoelig voor suffosie (uitspoelen van fijnere deeltjes waarna de grovere korrelmatrix instort).
- 18 Korrelmatrix van barrière stort in na uitspoeling (suffosie).
- 19 Fijne fractie spoelt uit barrièrezand.
- 20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen.
- 21 Doorlaten van praktisch al het achtergrondzand.
- 22 Holle ruimte tussen deklaag/sleufaanvulling en zandlaag/barrière.
- 23* Heavehoogte blijft gelijk of neemt zelfs toe.
- 24* Glijvlak steekt aan de bovenstroomse zijde van de barrière onder het grensvlak.
- 25* Glijvlak loopt aan de bovenstroomse zijde van de barrière boven de inkassing.
- 26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand.
- 27 Doorlaten fijnere fractie achtergrondzand.
- 28 Doorlaten silt of siltfractie aan bovenstroomse zijde.
- 29 Heavehoogte neemt af.
- 30* Glijvlak steekt aan de aan de bovenstroomse zijde van de barrière in de inkassing in.
- 31 Instorten van grof zand in benedenstrooms aangetakte pipe.
- 32 Verlaging bodem door pipe direct benedenstrooms van grofzandbarrière.
- 33 Groei van lens eindigt bij barrière (erosiebestendiger dan achtergrondzand).
- 34 Lensvorming bij uitredpunt.
- 35* Pipe komt bij opeenvolgende hoogwaters steeds dieper in het zand te liggen.
- 36* Nazakken barrière.
- 37 Afname hellingshoek bovenin barrière.
- 38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft.
- 39 Hogere doorlatendheid weegt niet op tegen sterkteverlies.
- 40 Dikte barrière kleiner dan aangenomen in ontwerp.
- 41 Sterkere aanvoer van water naar barrière.

- 42 Doorlatendheidscontrast is te laag.
 - 43* Barrière wordt aan de onderrand slechtdoorlatend.
 - 44 Ongunstiger stromingspatroon ('3D-factor').
 - 45 Dwarsontwikkeling pipes aan achterzijde stopt.
 - 46 Situatie van 'uitstulping': de grofzandbarrière steekt niet naar boven toe uit in de deklaag, maar de kleiaanvulling steekt naar beneden toe uit in de pipinggevoelige zandlaag.
 - 47 Effectieve heave-hoogte is kleiner dan aangenomen in ontwerp.
 - 48 Aanstroming door tussenzandlaag is voldoende voor erosie..
 - 49 Waterstroming gaat via onderzijde/benedenstrooms onderaan alsnog de barrière in.
 - 50* Barrière wordt ook aan de onderrand slechtdoorlatend.
 - 51* Barrière wordt aan de bovenstroomse rand slechtdoorlatend.
 - 52 Fijne materiaal spoelt niet uit, maar veroorzaakt verstopping.
 - 53* Grofzandbarrière raakt verstopt.
 - 54* Bij omgekeerde stroming (stroming van landzijde naar buitenwater) komt fijn materiaal (achtergrondzand) in het grove deel van de als meervoudig filter opgebouwde grofzandbarrière (aan filterregels wordt niet voldaan).
 - 56* Lage doorlatendheid rondom barrière.
 - 57* Verlaagde porositeit rondom barrière.
 - 58* Vermaling van korrels rondom barrière.
 - 59 Pipe ontwikkelt zich door de sleuf naar het maaiveld.
 - 60 Opbarsten en heave van de sleuf.
 - 61 Sleufaanvulling bezwijkt.
 - 62 Erosie van klei uit aanvulling.
 - 63 Erosie deklaag nabij barrière.
 - 64 Erosie van klei uit deklaag tussen barrière en uittredepunt.
 - 65 Kortsluiting door sleufaanvulling.
 - 66* Droogtescheuren.
 - 67* Klei droogt uit.
 - 68 Pipe groeit onder de grofzandbarrière door.
 - 69 Barrière steekt niet diep genoeg; niet tot in de pipinggevoelige zandlaag.
 - 70 Barrière werkt als ondoorlatend scherm.
 - 71* Barrière wordt als geheel slechtdoorlatend.
 - 72* Barrière wordt aan de benedenstroomse rand slechtdoorlatend.
 - 73 Opbarsten en heave bovenstrooms van de barrière.
 - 74 Drukopbouw bovenstrooms van de barrière.
- * gebeurtenis die niet, of niet per se, bij hoogwater optreedt (aangegeven met een okergele achtergrond).

B.2.2 Ongevaarlijke zij- of eindtak

- 55* Bij omgekeerde stroming (stroming van landzijde naar buitenwater) komt fijn materiaal (achtergrondzand) in de grofzandbarrière – aan de filterregels wordt nog wel voldaan, daarom ontstaat er geen verstopping en vormt dit verder geen risico.
 - 88 Geen aanvullend risico.
 - 89 Geen pipingprobleem meer als ook de omgeving verstopt.
- Deze gebeurtenissen zijn aangegeven met een lichtgroene achtergrond.

B.2.3 Gebeurtenissen die een ja/nee-keuze betreffen

- 93 Pipe kan door sleufaanvulling heengroeien.
- 94 Grenslaag is bovenstrooms hoger dan benedenstrooms.
- 95 Alleen barrière verstopt, omgeving niet..
- 96 Stroming wordt (lokaal) onderschat.
- 97 Barrière wordt ook benedenstrooms slechtdoorlatend.
- 98 Slechtdoorlatende deel erodeert of breekt af.

99 Dubbel filter aangebracht én grove deel filter ligt bloot (door pipevorming)
Deze gebeurtenissen zijn afzonderlijk vermeld met de toevoeging 'j' of 'n' en een roze achtergrond.

B.3 Overzicht van beïnvloedende factoren (naast een groot verval over de kering)

B.3.1 Factoren die bij het ontwerp dienen te worden geadresseerd

- O1 Barrière is niet lang genoeg in de lengterichting van de waterkering.
 - O2 Geen scherpe grenslaag tussen de pipinggevoelige zandlaag en de deklaag.
 - O3 Barrièrezand is intern instabiel.
 - O4 Barrièrezand is te grof in relatie tot achtergrondzand.
 - O5 Opdrijven van de deklaag bovenstrooms van de grofzandbarrière.
 - O6 Grenslaag met veel silt.
 - O7 Afstand van barrière tot uittredepunt is klein.
 - O8 Te los gepakt achtergrondzand.
 - O9 Sterk doorlatende (grind)laag onderaan barrière.
 - O10 Grofkorrelige discontinuïteit in ondergrond bij barrière.
 - O11 Barrièrezand is te fijn in relatie tot achtergrondzand.
 - O12 In hoogteligging variërende grenslaag tussen de pipinggevoelige zandlaag en de deklaag.
 - O13 Slechtdoorlatende discontinuïteit in ondergrond bij barrière.
 - O14 3D-factor is onderschat.
 - O15 Diepte bovenstroomse afdichting is onvoldoende.
 - O16 Tussenzandlaag direct bovenstrooms van de barrière.
 - O17 Cakevorming door uitspoeling van fijne fractie uit achtergrondzand in bovenstroomse zijde barrière.
 - O18 Drainage via aanvulling boven barrière.
 - O19 Barrière is te ondiep.
 - O20 Barrière is benedenstrooms van uittredepunt.
- Deze factoren zijn weergegeven met een groene achtergrond en een groene pijl naar de eerstvolgende gebeurtenis(sen).

B.3.2 Factoren die bij de uitvoering dienen te worden geadresseerd

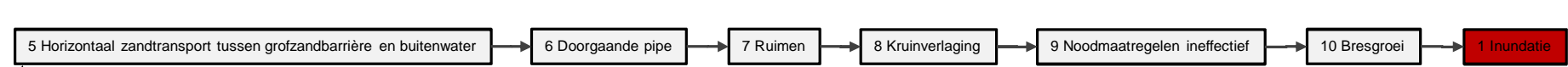
- U1 Onvoldoende aansluiting tussen discontinu geproduceerde barrièredelen.
 - U2 Aanvulklei wordt te dun aangebracht, bevat holle ruimtes en/of wordt in onvoldoende mate aangevoerd en/of verdicht.
 - U3 Grofzandbarrière is onvoldoende verdicht.
 - U4 Onvoldoende aanvoer van barrièrezand.
 - U5 Aanvulklei zwelt te sterk in de holle ruimte die boven het zand ontstaat.
 - U6 Extreme verdichting achtergrondzand.
 - U7 Aanvulklei is erosiegevoelig.
 - U8 Aanvulklei is bij aanbrengen te nat.
 - U9 Ontgraving is onvoldoende diep.
 - U10 Ontmenging van het barrièrezand.
 - U11 Toepassing van verkeerd materiaal als barrièrezand.
 - U12 Vermenging van barrièrezand met achtergrondzand.
- Deze factoren zijn weergegeven met een oranje achtergrond en een oranje pijl naar de eerstvolgende gebeurtenis(sen).

B.3.3 Factoren die bij het beheer dienen te worden geadresseerd

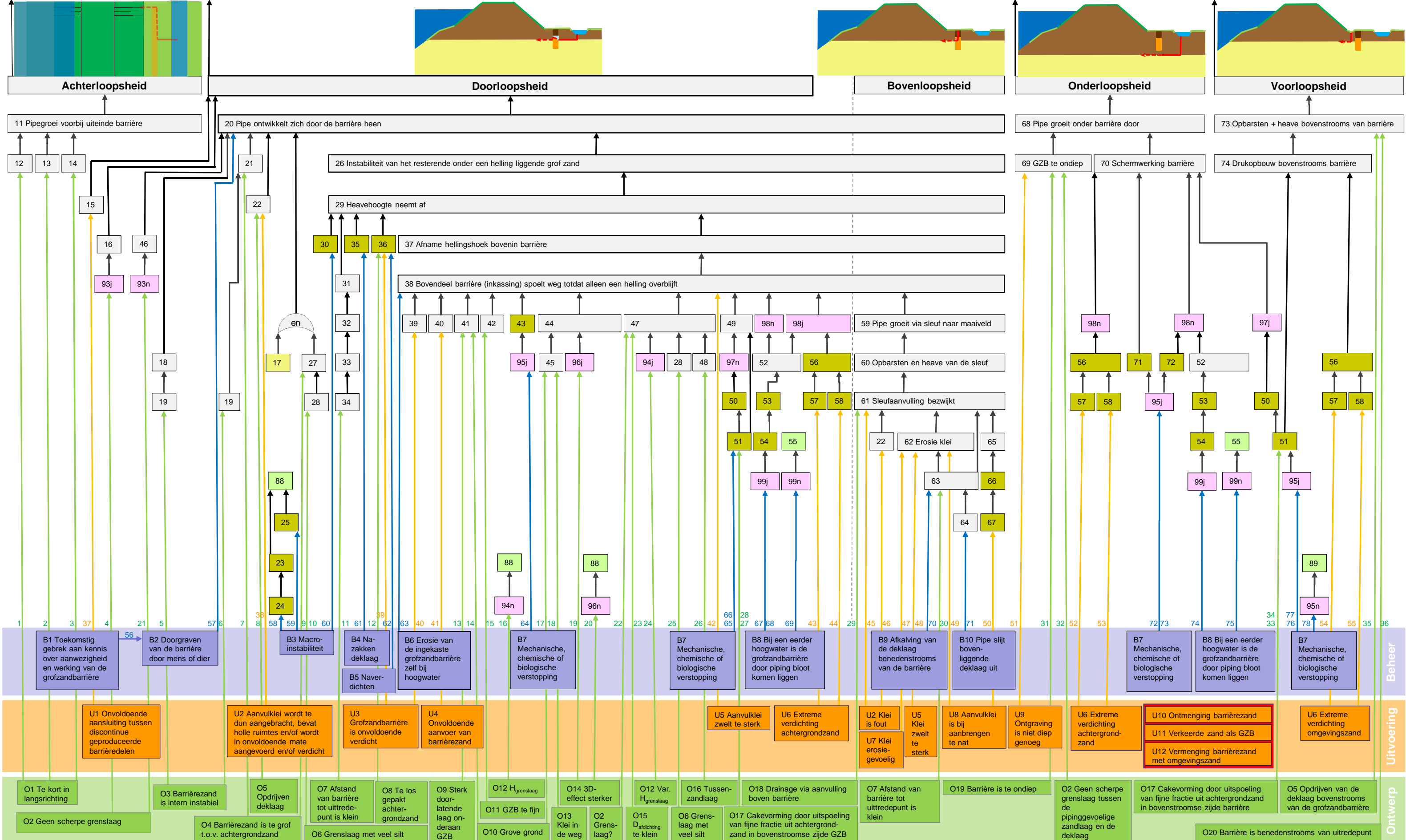
- B1 Toekomstig gebrek aan kennis over de aanwezigheid en werking van de grofzandbarrière.
 - B2 Doorgraven van de barrière door mens of dier.
 - B3 Macroinstabiliteit leidt tot beschadiging van de barrière.
 - B4 Na hoogwater nazakken van de deklaag in de pipe in de zandlaag.
 - B5 Naverdichten barrière.
 - B6 Erosie van de grofzandbarrière zelf bij hoogwater.
 - B7 Mechanische, chemische of biologische verstopping.
 - B8 Bij een eerder hoogwater is de grofzandbarrière door piping bloot komen te liggen.
 - B9 Afkalving van de deklaag benedenstrooms van de barrière.
 - B10 Pipe slijt de bovenliggende deklaag uit.
- Deze factoren zijn weergegeven met een blauwpaarse achtergrond en een donkerblauwe pijl naar de eerstvolgende gebeurtenis(sen).

B.4 Schematisch overzicht

De foutenboom is vervat in het schema op de volgende pagina. Zie eventueel ook het afzonderlijke PowerPoint-bestand.



2 Bezwijken grofzandbarrière



Legenda

- 1 Te vermijden topgebeurtenis
- 2 Te vermijden gebeurtenis
- 11 Tussenschap
- 23 Tussenschap, niet noodzakelijk bij hoogwater
- 93j Keuzemogelijkheid (gesplitst naar j/n)
- 88 Ongevaarlijk eindpunt
- 17 Bijkomende factor
- en EN-poort (overige zijn allemaal OF-poorten!)
- B1 Beïnvloedende factor, te adresseren bij het beheer
- U1 Beïnvloedende factor, te adresseren bij de uitvoering
- O1 Beïnvloedende factor, te adresseren bij het ontwerp
- O1 Uitgesloten factor of gebeurtenis
- Verbinding direct vanuit een beïnvloedende factor vanuit het beheer
- Verbinding direct vanuit een beïnvloedende factor vanuit de uitvoering
- Verbinding direct vanuit een beïnvloedende factor vanuit het ontwerp
- Verbinding vanuit een vervolgebeurtenis
- 56 Pad vanuit beheer
- 37 Pad vanuit uitvoering
- 1 Pad vanuit ontwerp

C Alle 78 afzonderlijke paden uit de foutenboom

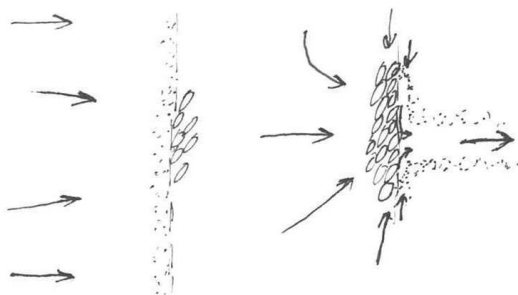
De foutenboom uit bijlage B telt in totaal 78 afzonderlijke paden, waarvan er overigens 6 niet tot falen leiden. Voor de volledigheid zijn deze paden hier allemaal uitgeschreven, waar nodig voorzien van een toelichting. Op het eerste pad na, zijn de paden die tot bezwijken van de grofzandbarrière leiden alleen beschreven tot aan Achterloopsheid, Doorloopsheid, Onderloopsheid en Voorloopsheid, dit om een al te voor de hand liggende herhaling van telkens dezelfde vervolgstappen te vermijden.

De paden zijn gegroepeerd naar de fase waarin deze het beste geadresseerd kunnen worden, dus in de volgorde van de beïnvloedende factoren, van ontwerp (§C.1) via uitvoering (§C.2) naar beheer (§C.3).

C.1 Paden die in het ontwerp geadresseerd kunnen worden

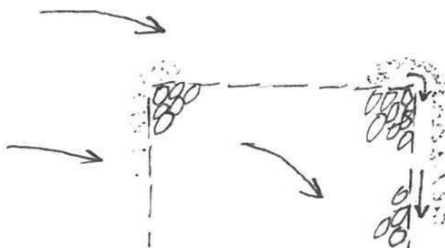
C.1.1 Pad 1 Pipegroei voorbij het uiteinde

O1 Barrière is niet lang genoeg in de lengterichting van de waterkering
De grofzandbarrière biedt aan het uiteinde de mogelijkheid om gepasseerd te worden door pipegroei; een afdoende afsluiting tegen bijvoorbeeld de zijdelingse pipegroei langs de benedenstroomse zijde (zie Figuur 130), die eventueel onbelemmerd zou kunnen doorgroeien tot aan het uiteinde, of aansluiting op andere constructies ontbreekt.

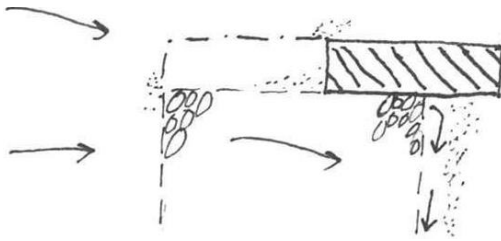


Figuur 130 Bovenaanzicht met beginnende zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière.

12 Eindafsluiting is te doorlatend
Wanneer er geen aanvullende maatregelen getroffen worden aan het uiteinde van de barrière, dan kan de zijdelingse pipegroei doorlopen tot aan het uiteinde en daar de hoek omgaan, zie Figuur 131. Als maatregel hiertegen kan bijvoorbeeld aan het uiteinde een slechtdoorlatende kleiprop worden aangebracht, zoals aangegeven in Figuur 132. Bij deze maatregel is het van belang dat de kleiprop uitsteekt in benedenstroomse richting om zo de kans op passage uit te sluiten.

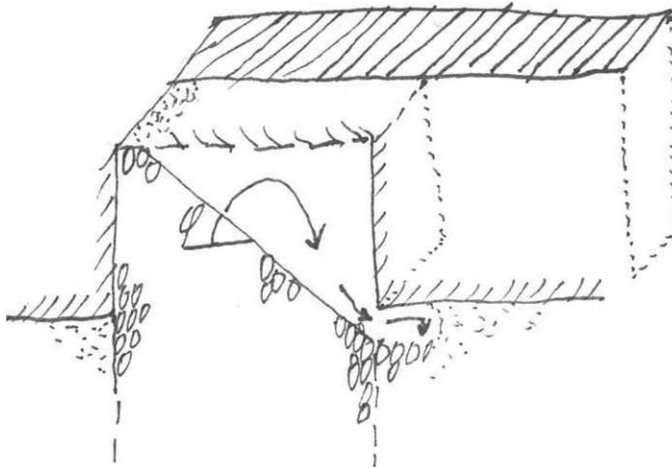


Figuur 131 Zijdelingse pipegroei bij uiteinde grofzandbarrière.



Figuur 132 Kleirop ter afsluiting van uiteinde grofzandbarrière (doorgezet benedenstrooms van barrière)

Omdat korrels vanuit de grofzandbarrière in de zijdelingse pipe zullen rollen, zal uiteindelijk over de gehele lengte van de grofzandbarrière een situatie kunnen ontstaan waarbij er een helling in de grofzandbarrière aanwezig is, tot aan de kleirop aan toe, zoals geschetst in Figuur 133.



Figuur 133 Gedeeltelijk leeggelopen inkassing van de grofzandbarrière tot aan de kleirop op het uiteinde (zijaanzicht met enige 3D-suggestie).

Factoren die dit proces van de vorming van een haast uniforme 2D-doorsnede zullen verhinderen, zijn locatie en aantal van de benedenstroomse pipe(s) richting uitredepunt(en) en beperkingen in de afvoer van de grove korrels, niet alleen bij de uiteinden van de grofzandbarrière, maar ook tussen deze uiteinden en de benedenstroomse pipe(s). Zie voor deze beperkingen §A.1.10 en §A.1.13.

Voor Gameren is voor de afmetingen van de kleirop gesteld dat deze even diep moet steken als de grofzandbarrière, aan de benedenstroomse zijde 1,0 meter moet uitsteken richting achterland en minimaal 0,5 m dik moet zijn. Bovendien moet het achtergrondzand aanwezig blijven in de hoek waar de kleirop en de grofzandbarrière op elkaar aansluiten. De verwachting is dat dit ruimschoots voldoende veiligheidsmarge oplevert, maar hier zijn geen specifieke berekeningen voor gemaakt.

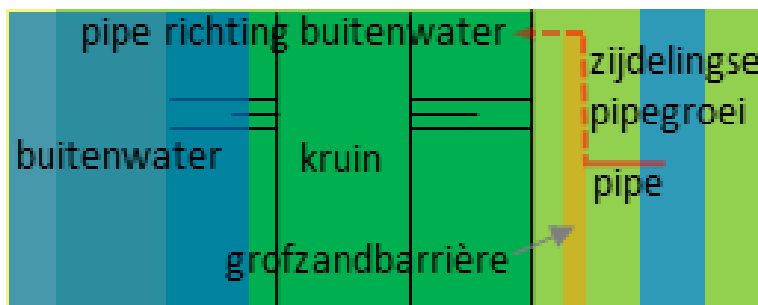
Vanwege de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière is het ver genoeg doorzetten van de grofzandbarrière tot in een aangrenzend gebied waar piping zonder grofzandbarrière was uit te sluiten of waar anderszins aan de eisen ter voorkoming van piping werd voldaan, niet zo eenvoudig als dat op het eerste gezicht mogelijk wel lijkt. De zijdelingse pipegroei wordt primair aangedreven door de hoge doorlatendheid van de grofzandbarrière en zal zich daardoor ook voortzetten tot in het gebied dat aanvankelijk voldeed tegen piping. Hierom is het proces van achterloopsheid bij een grofzandbarrière wezenlijk verschillend van achterloopsheid bij ondoorlatende constructies.

11 Pipegroei voorbij uiteinde barrière (in lengterichting van de dijk)

De volgende stap, waarvan het begin eigenlijk al hiervoor is beschreven en geïllustreerd in Figuur 131, is dat de pipegroei na een haakse bocht de barrière toch weet te passeren, bijvoorbeeld door onvolkomenheden in de kleiprop.

Achterloopsheid

De pipe groeit achter de grofzandbarrière langs en er is sprake van achterloopsheid (zie Figuur 134).



Figuur 134 Achterloopsheid (bovenaanzicht).

2 Bezwijken grofzandbarrière

De grofzandbarrière als waterkerend element is dan bezwiken (al kan de eigenlijke grofzandbarrière op dit moment nog volledig intact zijn)

5 Horizontaal zandtransport tussen grofzandbarrière en buitenwater

Wanneer de hydraulische gradiënt vanuit het buitenwater hoog genoeg is om korrels te eroderen, dan zal de pipe groeien richting het buitenwater. Hierbij kunnen overigens meerdere pipes ontstaan vanaf het punt waar de grofzandbarrière is gepasseerd. Boven de pipe is een doorgaande cohesieve deklaag nodig. Is deze deklaag ten dele onderbroken door granulair materiaal, dan zal de pipe niet horizontaal verder groeien, maar dan zal het bovenliggende materiaal worden afgevoerd (zie Figuur 135), hetgeen mogelijk tot tijdelijke verstopping van de pipe en tot vertraging leidt. Hierbij kan de pipe overigens ook een andere route nemen.



Figuur 135 Onderbroken deklaag – pipe groeit niet verder, maar voert bovenliggend materiaal af.

Is er wel sprake van een doorgaande cohesieve deklaag, dan kan deze zo nu en dan instorten, zeker naarmate de pipe in omvang toeneemt. Dit vertraagt het proces: het ingestorte materiaal moet namelijk telkens worden afgevoerd. Ook hierbij kan de pipe een andere route nemen.

6 Doorgaande pipe

Wanneer de pipe vormt, kan deze bij gelijkblijvend verval een evenwichtssituatie bereiken en dan groeit de pipe alleen verder als het verval toeneemt. Bij overschrijding van een zeker verval, het kritische verval, bereikt de pipe een lengte waarbij deze bij gelijkblijvend verval zal doorgroeien, tenzij bijzondere omstandigheden de pipegroei verstoren, zoals het niet-doorlopen van het pipinggevoelige zandlichaam met een deklaag erboven. De pipe maakt uiteindelijk kortsluiting met het buitenwater bij het intredepunt.

7 Ruimen

Wanneer de pipe, of pipes, kortsluiting maken met het buitenwater neemt de erosiecapaciteit van het water sterk toe en wordt de pipe verbreed en verdiept. Voorwaarde voor dit proces van 'ruimen' is wel dat het verval hoog blijft. De instroom van water erodeert het zand in het bovenstroomse, al vergrote deel van de pipe zodanig dat de pipe benedenstrooms af en toe verstopt raakt, maar dergelijke verstoppingen zijn tijdelijk zolang het verval groot genoeg blijft. De pipe raakt telkens weer open doordat de verstopping wordt afgevoerd, of de pipe kiest een andere weg. Door dit proces wordt de pipe van bovenstrooms naar benedenstrooms steeds omvangrijker. Hierdoor zal de deklaag ook gemakkelijker kunnen instorten, maar ook hiervoor geldt dat dit alleen tot vertraging leidt, maar niet tot het stoppen van het proces – tenzij het verval over de kering voldoende klein wordt doordat de buitenwaterstand voldoende daalt en/of de binnenwaterstand voldoende stijgt. Specifiek voor de situatie bij Gameren geldt dat het peil in het gebied tussen de huidige primaire waterkering en de oude Waalbandijk onder de huidige omstandigheden uiterlijk in deze fase enerzijds niet op het polderpeil gehouden zal kunnen worden, maar anderzijds ook maar in beperkte mate zal stijgen. Voor de onderbouwing hiervan wordt verwezen naar §5.3.

8 Kruinverlaging

De holte onder de dijk leidt tot verzakking van de dijk. Daarmee hoeft het proces van erosie via één of meer pipes niet te stoppen; dat is primair afhankelijk van het verval over de dijk. Dat proces kan doorgaan, met verdere verzakkingen tot gevolg.

9 Noodmaatregelen ineffectief

Wanneer pipingverschijnselen op tijd worden waargenomen en effectieve beheersmaatregelen tijdig ingezet worden, in verschillende van de hiervoor genoemde fasen (ook bij andere faalpaden), dan kan het proces richting falen hiermee worden gestopt. De mogelijkheid tot het nemen van maatregelen wordt mede beïnvloed door factoren als de aanwezigheid van voldoende materiaal, materieel en mensen, en het leggen van de juiste prioriteiten daarbij. In het geval van een extreem hoge waterstand en tot dan toe goede ervaringen met de grofzandbarrière, kan er voor worden gekozen om de beperkte beschikbare middelen elders in te zetten. Dan hoeft er bij de grofzandbarrière weinig te hoeven verwacht van noodmaatregelen en is al dan niet bezwijken in grotere mate afhankelijk van het vooraf goed op orde hebben van de grofzandbarrière, door goed ontwerp, goede uitvoering en goed beheer onder dagelijkse omstandigheden.

10 Bresgroei

Indien de kruinverlaging zodanig is dat er water over de kruin heen stroomt, dan is er sprake van een beginnende bres. Vervolgens zal deze snel of wat langzamer kunnen groeien, afhankelijk van de eigenschappen van de aan de stroming blootgestelde materialen – klei zal minder snel eroderen dan zand. Hierbij moet wel bedacht worden dat een situatie van een gescheurde kleilaag met daaronder een zandkern kan leiden tot uitspoeling van het zand, waarmee er sprake kan zijn van een snelle bresgroei. In de situatie dat er een dunne laag pipinggevoelig zand bovenop een grove laag ligt, is de erosie van alleen de pipinggevoelige zandlaag mogelijk onvoldoende om tot bresvorming te komen.

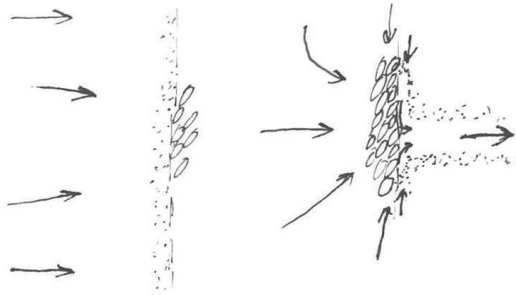
1 Inundatie

Inundatie betreft de te vermijden topgebeurtenis, die na bresgroei zeker zal optreden. Overigens zijn er vanuit het buitenland ook situaties bekend waarbij een cohesief dijklichaam intact bleef ondanks een metersgroot erosiekanaal eronder. In zo'n situatie leidt knooppunt 7 (ruimen) tot knooppunt 1 (inundatie) en worden de knopen 8, 9 en 10 omzeild. In alle gevallen geldt dat het passeren van de verschillende knooppunten doorgaans enige tijd vergt. Het is bij veel knopen echter nog niet goed mogelijk om een goede schatting te maken van de tijdscomponent.

C.1.2 Pad 2 Barrière sluit niet goed aan op hoge grond

O1 Barrière is niet lang genoeg in de lengterichting van de waterkering

De grofzandbarrière biedt aan het uiteinde de mogelijkheid om gepasseerd te worden door pipegroei; een afdoende afsluiting tegen bijvoorbeeld de zijdelingse pipegroei langs de benedenstroomse zijde (zie Figuur 136), die eventueel onbelemmerd zou kunnen doorgroeien tot aan het uiteinde, of aansluiting op andere constructies ontbreekt.

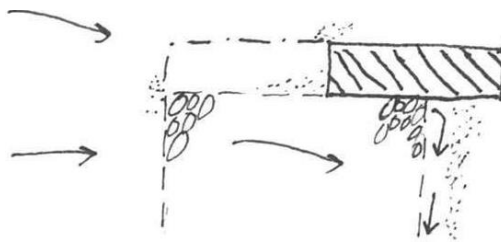


Figuur 136 Bovenaanzicht met beginnende zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière.

13 Uitspoeling bij aansluiting op hoge grond

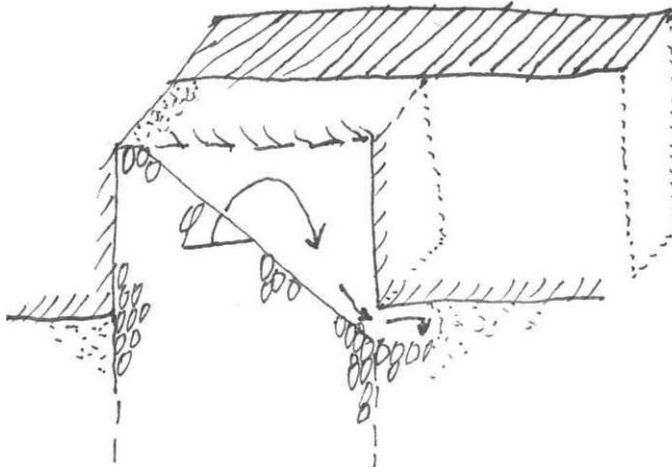
Doorgaans is er sprake van aansluiting met slechtdoorlatende elementen, zoals klei, staal of beton, wanneer een waterkering aansluit op hoge grond. Bij de grofzandbarrière is er sprake van aansluiting met een sterk waterdoorlatend element.

Vanwege de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière is het ver genoeg doorzetten van de grofzandbarrière tot in een aangrenzend gebied waar piping zonder grofzandbarrière was uit te sluiten of waar anderszins aan de eisen ter voorkoming van piping werd voldaan, niet zo eenvoudig als dat op het eerste gezicht mogelijk wel lijkt. De zijdelingse pipegroei wordt primair aangedreven door de hoge doorlatendheid van de grofzandbarrière en zal zich daardoor ook voortzetten tot in het gebied dat aanvankelijk voldeed tegen piping. Hierom is het proces van achterloopsheid bij een grofzandbarrière wezenlijk verschillend van achterloopsheid bij ondoorlatende constructies. Voor de aansluiting op hoge gronden of op een 'klassieke' pipingberm kan een kleiprop worden toegepast, zoals aangegeven in Figuur 137. Bij deze maatregel is het van belang dat de kleiprop uitsteekt in benedenstroomse richting om zo de kans op passage uit te sluiten.



Figuur 137 Kleiprop ter afsluiting van uiteinde grofzandbarrière (doorgezet benedenstrooms van barrière)

Omdat korrels vanuit de grofzandbarrière in de zijdelingse pipe zullen rollen, zal uiteindelijk over de gehele lengte van de grofzandbarrière een situatie kunnen ontstaan waarbij er een helling in de grofzandbarrière aanwezig is, tot aan de kleiprop aan toe, zoals geschetst in Figuur 138.



Figuur 138 Gedeeltelijk leeggelopen inkassing van de grofzandbarrière tot aan de kleiprop op het uiteinde (zijaanzicht met enige 3D-suggestie).

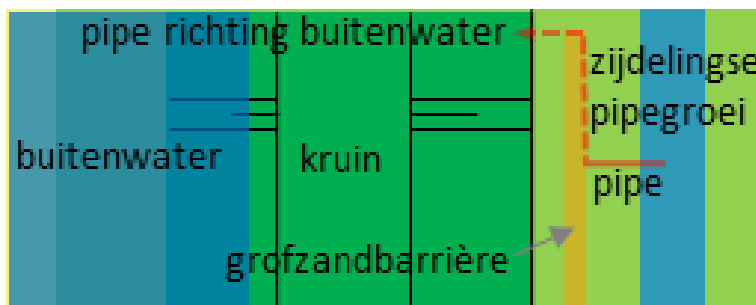
Factoren die dit proces van de vorming van een haast uniforme 2D-doorsnede zullen verhinderen, zijn locatie en aantal van de benedenstroomse pipe(s) richting uitredepunt(en) en beperkingen in de afvoer van de grove korrels, niet alleen bij de uiteinden van de grofzandbarrière, maar ook tussen deze uiteinden en de benedenstroomse pipe(s). Zie voor deze beperkingen §A.1.10 en §A.1.13.

11 Pipegroei voorbij uiteinde barrière (in lengterichting van de dijk)

De volgende stap is dat de pipegroei na een haakse bocht de barrière toch weet te passeren, bijvoorbeeld door onvolkomenheden in de kleiprop.

Achterloopsheid

De pipe groeit achter de grofzandbarrière langs en er is sprake van achterloopsheid (zie Figuur 139).



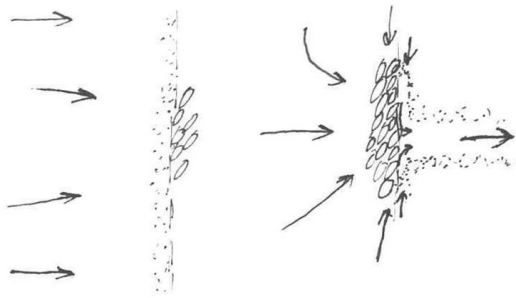
Figuur 139 Achterloopsheid (bovenaanzicht).

C.1.3

Pad 3 Barrière sluit niet goed aan op een andere waterdoorlatende pipingmaatregel

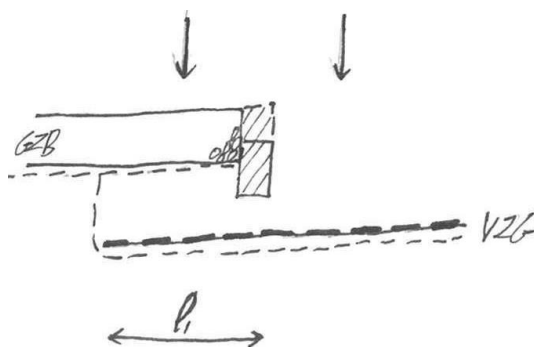
O1 Barrière is niet lang genoeg in de lengterichting van de waterkering

De grofzandbarrière biedt aan het uiteinde de mogelijkheid om gepasseerd te worden door pipegroei; een afdoende afsluiting tegen bijvoorbeeld de zijdelingse pipegroei langs de benedenstroomse zijde (zie Figuur 140), die eventueel onbelemmerd zou kunnen doorgroeien tot aan het uiteinde, of aansluiting op andere constructies ontbreekt.



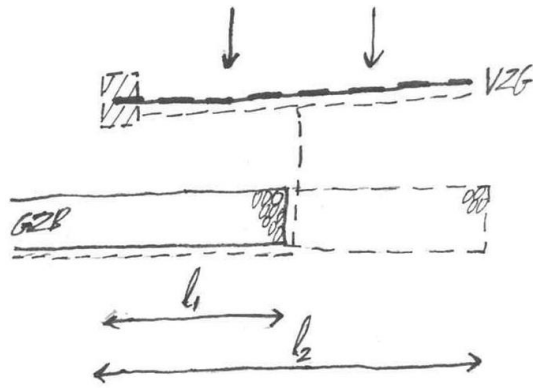
Figuur 140 Bovenaanzicht met beginnende zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière.

14 Overlap met een andere waterdoorlatende pipingmaatregel is te kort
 Bij een aansluiting op een andere doorlatende pipingmaatregel, zoals een eerder aangelegde grofzandbarrière of een verticaal zanddicht geotextiel (VZG), zijn er meerdere mogelijkheden. Bij een aansluiting op een andere grofzandbarrière kan de nieuwe barrière in en door de bestaande barrière worden aangelegd, zodat één doorgaande grofzandbarrière ontstaat. Bij een VZG is een directe aansluiting in principe ook denkbaar, maar dit moet dan wel zó worden uitgevoerd dat het geotextiel niet beschadigd raakt. Een alternatieve aansluitmogelijkheid is dan een korte overlap waarbij de grofzandbarrière net bovenstrooms van het VZG wordt aangebracht, zie Figuur 141, met een kleiprop aan het uiteinde van de grofzandbarrière. De overlaplengte l_1 kan beperkt zijn, circa 1 meter mag naar verwachting voorsnog als ruim voldoende worden verondersteld. Deze overlaplengte is vooral nodig om uit te sluiten dat een pipe vanaf het uiteinde van het VZG schuin voorbij de kleiprop kan groeien, al dan niet langs ongelukkigerwijs bij de aanleg achtergebleven kleibrokken tussen barrière en geotextiel.



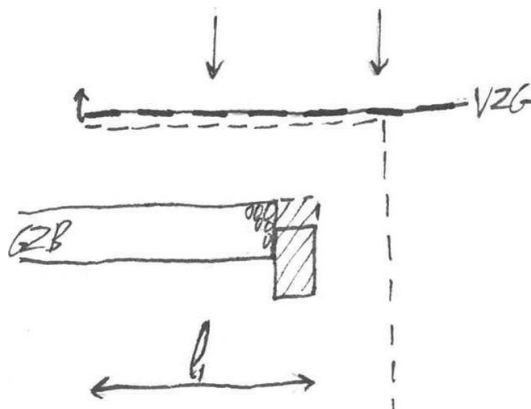
Figuur 141 Aansluiting van een grofzandbarrière bovenstrooms van een verticaal zanddicht geotextiel (bovenaanzicht).

Wanneer de grofzandbarrière net benedenstrooms van het VZG wordt aangebracht, zoals geschetst in Figuur 142, dan kan een korte overlaplengte l_1 onvoldoende zijn wanneer het VZG zonder een eindafsluiting is aangebracht. In zo'n situatie zou een grotere overlaplengte l_2 moeten worden toegepast. Een betrouwbare methode voor het bepalen van l_2 is momenteel echter niet beschikbaar.



Figuur 142 Aansluiting van een grofzandbarrière benedenstrooms van een verticaal zanddicht geotextiel (bovenaanzicht).

Een denkbare variant op de hiervoor genoemde situatie is geschetst in Figuur 143, met een kleiprop bij een korte overlappende l_1 . Hierbij is het echter denkbaar dat een benedenstroomse pipe de barrière (in de tekening) rechts passeert en om het geotextiel heengroeit.



Figuur 143 Benedenstroomse aansluiting van een grofzandbarrière met kleiprop op een verticaal zanddicht geotextiel, met de mogelijkheid van passage door een pipe vanaf benedenstrooms (bovenaanzicht).

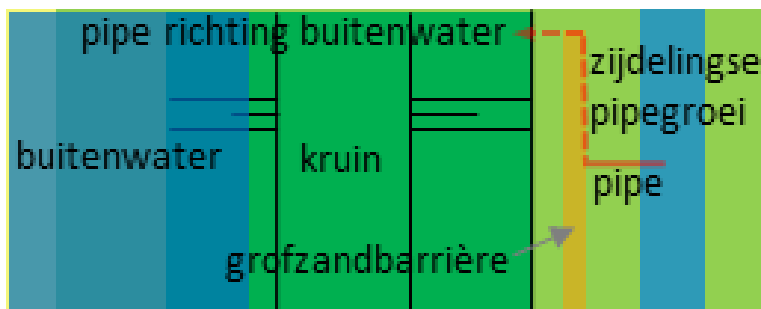
Het rekenen aan dergelijke drie-dimensionale stromingssituaties met zijdelingse pipegroei waarin erosie een dominante rol speelt, vormt ook voor specialisten nog een uitdaging (zie ter illustratie bijvoorbeeld de 3D-analyse van de grofzandbarrière (Rosenbrand et al., 2021)). Het bepalen van een 'veilige lengte' waarover een grofzandbarrière zonder eindafsluiting kan worden aangelegd, is daardoor nog niet goed mogelijk. Een eenvoudiger oplossing is te vinden in het constructief uitsluiten van deze mogelijke faaloorzaak, zoals hiervoor is geschetst. Hiervoor zal steeds naar de plaatselijke situatie moeten worden gekeken hoe dit het beste kan worden vormgeven.

11 Pipegroei voorbij uiteinde barrière (in lengterichting van de dijk)

De volgende stap is dat de pipegroei na een haakse bocht de barrière toch weet te passeren, bijvoorbeeld door onvolkomenheden in de genomen maatregelen daartegen.

Achterloopsheid

De pipe groeit achter de grofzandbarrière langs en er is sprake van achterloopsheid (zie Figuur 144).

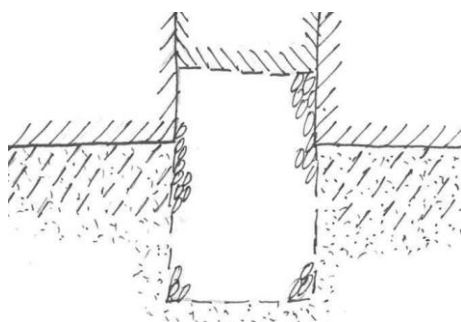


Figuur 144 Achterloopsheid (bovenaanzicht).

C.1.4

Pad 4 Geen scherpe grenslaag en pipe kan bovenlangs door sleufaanvulling heengroeien

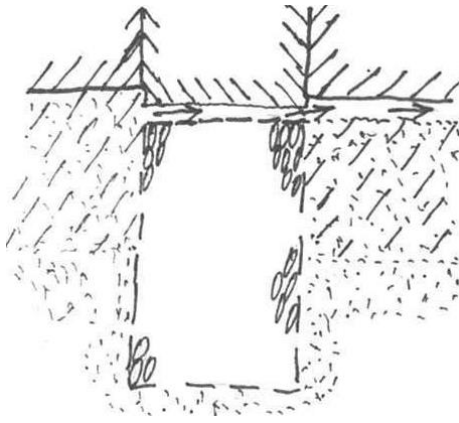
O2 Geen scherpe grenslaag tussen de pipinggevoelige zandlaag en de deklaag
In de principe-schetsen over de werking van de grofzandbarrière wordt altijd uitgegaan van een scherpe overgang tussen een deklaag van klei met daaronder een pipinggevoelige zandlaag. Dit komt in de praktijk vaak voor, maar evengoed zijn er situaties waarbij er sprake is van een meer diffuse overgang tussen de slechtdoorlatende deklaag en de pipinggevoelige zandlaag van soms wel meerdere meters hoog. Voor het ontwerp van een grofzandbarrière kan dan een onjuist niveau worden ingeschat op basis van boorbeschrijvingen en sondeerresultaten. Een dergelijke situatie is geschetst in Figuur 145, waar ten behoeve van deze uitleg een drielaagsysteem is geschetst. De middelste laag kan bijvoorbeeld omschreven zijn als 'klei, sterk zandig' en een lage conusweerstand vertonen, terwijl de onderste laag een veel hogere conusweerstand laat zien. Voor het ontwerp kan dan de onderste 'laagovergang' als veilige grenslaag worden gehanteerd ter bepaling van de benodigde diepte van de barrière, terwijl de pipegroei in werkelijkheid mogelijk plaatsvindt op het niveau van de bovenste 'laagovergang'. Dit is van invloed op de keuze van de hoogte van de inkassing (zoals verder de vereiste heavehoogte, de meeton nauwkeurigheden bij het grondonderzoek en bij de uitvoering en de maaton nauwkeurigheden bij de uitvoering hiervoor bepalend zijn).



Figuur 145 Drielaagsysteem ter illustratie van 'geen scherpe grenslaag'.

Het is ook denkbaar dat bij een diffuse overgang een pipe bovenstrooms op een hoger niveau verdergaat dan het niveau waarop een pipe vanaf het uittredepunt bij de barrière aankomt. Het stromingspatroon in de barrière zelf bevordert overigens een dergelijk vervolg op een hoger niveau (eventueel met een schuin naar beneden verlopende pipe), wat bij scherpe klei-zand overgang nooit zou plaatsvinden. De effectieve heave-hoogte wordt dan kleiner en falen treedt sneller op. Dit is nader uitgewerkt bij het bijbehorende faalpad in §C.1.22.

Eén van de drie meer extreme varianten waar deze situatie toe kan leiden, is dat de pipe (min of meer) over de eigenlijke grofzandbarrière heen groeit, door de onderkant van de sleufaanvulling, zie Figuur 146 (de beide andere meer extreme varianten zijn uitgewerkt in §C.1.21 en §C.1.32).



Figuur 146 Onscherpe grenslaag waarbij de pipe vanaf benedenstrooms veel hoger aankomt én de sleufaanvulling erodeert.

93j Pipe kan WEL door sleufaanvulling heengroeien

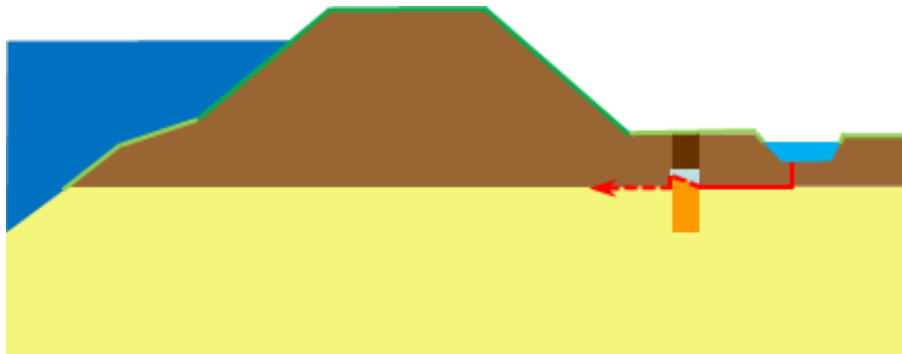
Dit is een cruciaal punt bij dit faalpad. De sleufaanvulling dient onderin van niet te natte, goed verdichte, erosiebestendige klei te worden gemaakt, mede om dit faalpad op dit punt een lage, liefst verwaarloosbare overgangskans te geven.

16 Pipe passeert (min of meer horizontaal) door (geërodeerde) sleufaanvulling

Zie Figuur 146, dit vergt erosie van de sleufaanvulling of anders eventueel falen van de grofzandbarrière aan de bovenzijde, als 'vlakke grofzandbarrière' (zie Rosenbrand & Van Beek (2020)).

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 147).



Figuur 147 Doorlooptheid.

C.1.5 Pad 5 Barrièrezand is intern instabiel, fijne fractie spoelt uit en korrelmatrix stort in

O3 Barrièrezand is intern instabiel

Interne instabiliteit wil zeggen dat de fijnste fractie van een zandmengsel kan uitspoelen door de poriën, waardoor in vervolg daarop ook een minder fijne fractie kan uitspoelen. In natuurlijke zanden zoals die in Nederland buiten Limburg worden aangetroffen vormt dit geen probleem, maar bij een kunstmatig samengesteld materiaal vormt dit wel een risico. Criteria hiervoor zijn aangegeven in §A.1.3.

19 Fijne fractie spoelt uit barrièrezand

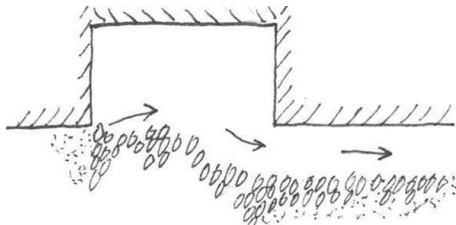
Eerst spoelt de fijne fractie uit, tussen de grovere korrels door. Meestal wordt de korrelverdeling van een zandmengsel dat hiervoor gevoelig is, gekenmerkt door meerdere toppen.

18 Korrelmatrix van barrière stort in na uitspoeling (suffosie)

Als gevolg van de uitspoeling van de fijne fractie neemt het porievolume flink toe. Daardoor kan lokaal de korrelmatrix instorten, hetgeen zich progressief kan voortplanten of zich geleidelijk aan op meer plaatsen en in steeds grotere delen kan voordoen.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

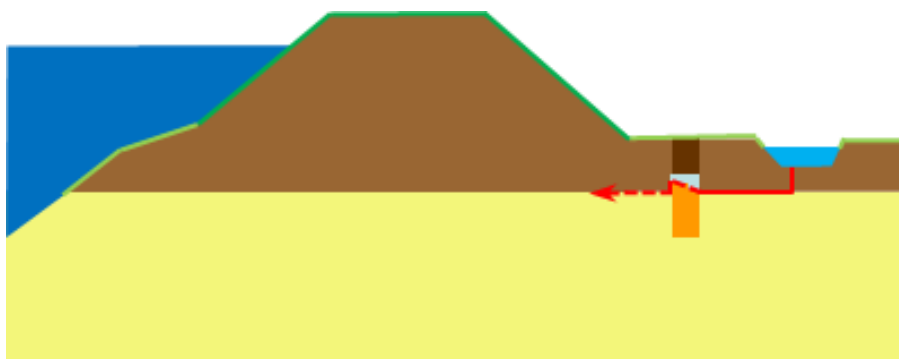
Door de in de vorige stap ontstane verzakkingen kan de pipe door de barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstreams van de barrière, zoals geschetst in Figuur 148.



Figuur 148 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorloopsheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorloopsheid (zie Figuur 149).



Figuur 149 Doorloopsheid.

C.1.6 Pad 6 Barrièrezand is intern instabiel, fijne fractie spoelt uit en achtergrondzand wordt doorgelaten

O3 Barrièrezand is intern instabiel

Interne instabiliteit wil zeggen dat de fijnste fractie van een zandmengsel kan uitspoelen door de poriën, waardoor in vervolg daarop ook een minder fijne fractie kan uitspoelen. In natuurlijke zanden zoals die in Nederland buiten Limburg worden aangetroffen vormt dit geen probleem, maar bij een kunstmatig samengesteld materiaal vormt dit wel een risico. Criteria hiervoor zijn aangegeven in §A.1.3.

19 Fijne fractie spoelt uit barrièrezand

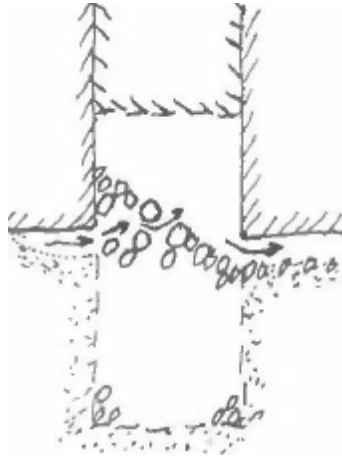
Eerst spoelt de fijne fractie uit, tussen de grovere korrels door. Meestal wordt de korrelverdeling van een zandmengsel dat hiervoor gevoelig is, gekenmerkt door meerdere toppen.

21 Doorlaten van praktisch al het achtergrondzand

Dit is, na stap 19, een onwaarschijnlijke stap zonder dat de korrelmatrix van de barrière instort (zie faalpad 5, §C.1.5). Geheel onmogelijk is dit echter niet als het achtergrondzand over het algemeen even fijn of fijner is als de uitgespoelde fijne fractie. Dit vereist wel een doorgaand erosiepad, hetgeen bij uitspoeling van de fijne fractie niet snel optreedt zonder dat er lokaal instorten plaatsvindt.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

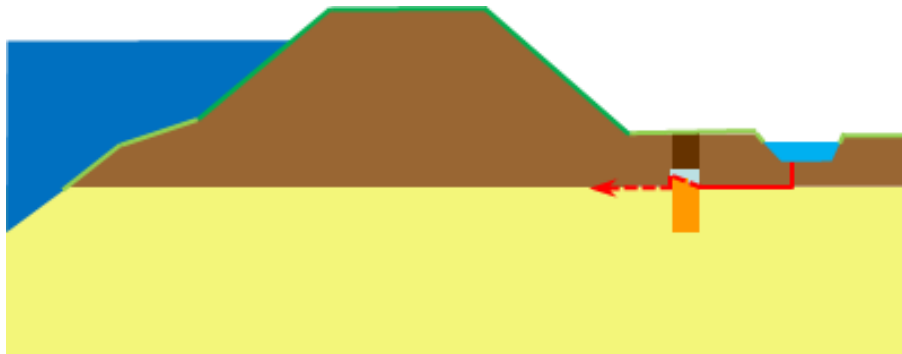
De vorige stap impliceert eigenlijk al doorgroei van de pipe voorbij de barrière. De ontstane situatie is geschetst in Figuur 148. (NB: Het leeglopen van een deel van de inkassing hangt primair samen met de benedenstroomse pipe en zal dus altijd al optreden, hoewel dit niet in dezelfde dwarsdoorsnede hoeft te gebeuren als deze doorontwikkeling van de pipe door de barrière heen.)



Figuur 150 Doorgroeien van de pipe door de barrière na uitspoeling van de fijnere fractie uit de barrière, zonder ineensinken van de korrelmatrix.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 151).



Figuur 151 Doorlooptheid.

C.1.7 Pad 7 Barrièrezand is te grof: barrière laat achtergrondzand door

O4 Barrièrezand is te grof in relatie tot achtergrondzand

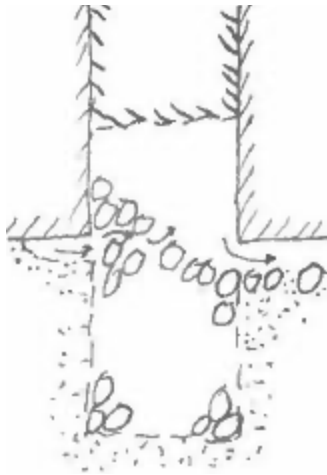
Het barrièrezand moet worden afgestemd op het achtergrondzand. Hiervoor zijn in §A.1.4 eisen aangegeven, gebaseerd op de geometrisch dichte filtercriteria van Terzaghi. Eén van de mogelijkheden om hier niet aan te voldoen, is om een (veel) te grof barrièrezand toe te passen waar het achtergrondzand (grotendeels) doorheen kan spoelen.

21 Doorlaten van praktisch al het achtergrondzand

Het achtergrondzand zal in deze situatie door de barrière heen kunnen spoelen, op de (aller)grootste fractie na. Eenvoudig gesteld: "keien houden geen zand tegen."

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

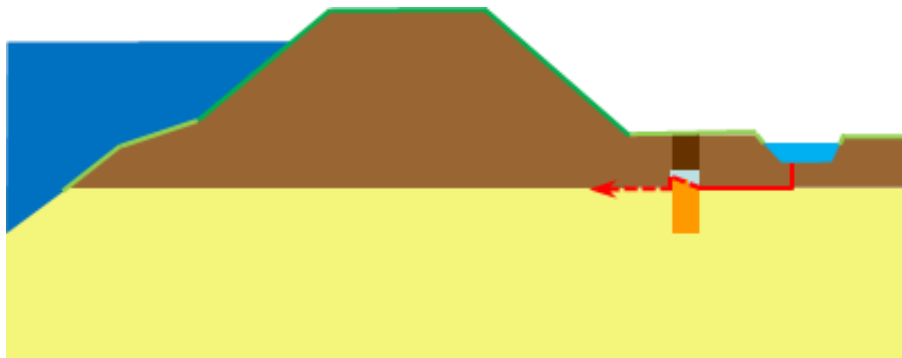
Onder deze omstandigheden kan de pipe zonder veel hinder door de barrière heen groeien, zoals geschetst in Figuur 152.



Figuur 152 Doorgroeien van de pipe door de barrière in het geval van te grof barrièremateriaal.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 153).



Figuur 153 Doorlooptheid.

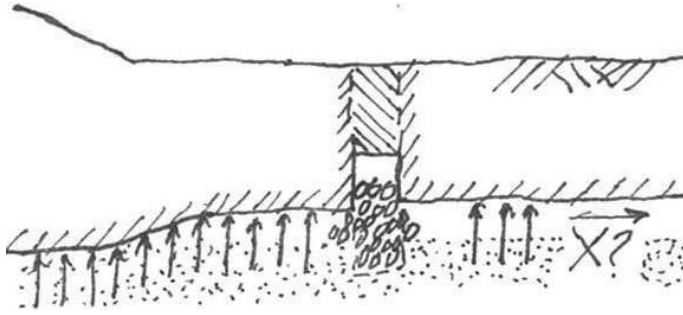
C.1.8 Pad 8 Deklaag bovenstrooms van barrière drijft op, waarna holle ruimte leidt tot pipeontwikkeling

O5 Opdrijven van de deklaag bovenstrooms van de grofzandbarrière

Bij een voldoende hoge waterdruk in de pipinggevoelige zandlaag, in combinatie met een voldoende dikke deklaag waarbij onvoldoende drukverlies richting het achterland optreedt, kan de deklaag bovenstrooms van de grofzandbarrière gaan opdrijven.

22 Holle ruimte tussen deklaag/sleufaanvulling en zandlaag/barrière

Als de deklaag gaat opdrijven ontstaat er een waterlens tussen de bovenkant van het zandpakket en de onderkant van het slappe-lagenpakket. Dit is bijvoorbeeld geconstateerd bij de macrostabiliteitsproef met opdrijven bij Bergambacht (Lindenberg et al., 2002). De gedachte, of vrees, hierbij is dat er dan ongehinderd erosie kan optreden richting het achterland en daarmee falen van de grofzandbarrière, zie Figuur 154.



Figuur 154 Opdrrijven van een deklaag met een grofzandbarrière.

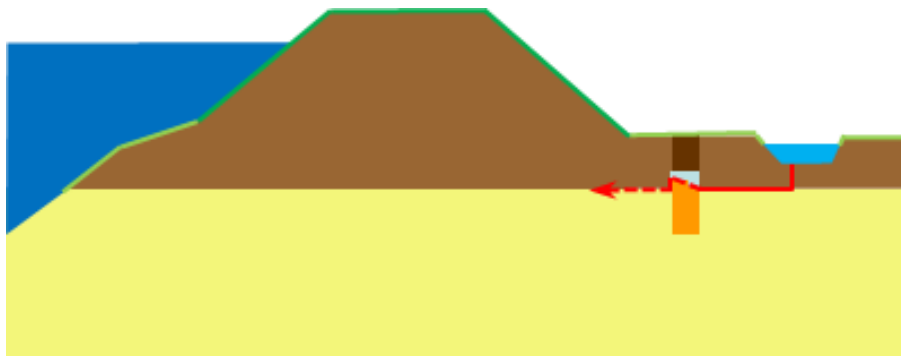
Met de verandering van een vlakke grofzandbarrière (bovenzijde gelijk aan niveau grenslaag) naar een grofzandbarrière met een inkassing lijkt dit scenario als oorzaak van falen nog onwaarschijnlijker te zijn geworden, maar de kans van optreden mocht toch al nihil worden geacht. Opdrrijven vergt immers een aanzienlijke opwaartse waterdruk, zeker indien de grofzandbarrière betrekkelijk dicht bij een dijk ligt, wat in het algemeen toch het geval zal zijn. Gesteld dat de sleufaanvulling deze opwaartse waterdruk zal weerstaan (zie anders de knoop 'opbarsten en heave van de sleuf', met onder andere O18, 'drainage via aanvulling boven barrière' als beïnvloedende factor, zie §A1.18), dan mag er ook geen opbarsten van de deklaag of uitstroming bij een uittredepunt optreden, want dan is de voor opdrrijven vereiste druk weg. In situaties waarin een pipingwerende maatregel zoals de grofzandbarrière wordt toegepast, ligt het voor de hand te veronderstellen dat er sprake is van een uittredepunt op een zodanige afstand dat opdrrijven niet kan optreden. Maar gesteld dat dit niet het geval is en de drukopbouw kan plaatsvinden: dan zal de grondwaterstroming in de ontstane waterlens onvoldoende zijn om tot erosie van zelfs maar het fijne zand te leiden, laat staan erosie van de grofzandbarrière, al zal er wel enig verlies van korrels naar weerszijden kunnen optreden zoals geschetst in Figuur 154. Zodra er wél een uittredepunt ontstaat, dan zal de druk zeer snel afnemen en er hooguit een begin van erosie ontstaan, het meeste nabij het uittredepunt en amper of niet bij de barrière. Van opdrrijven is dan immers al vrijwel direct geen sprake meer en de reële bedreigingen voor het functioneren van de grofzandbarrière daarbij zijn al afgedekt door de andere beïnvloedende factoren.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

Als de deklaag in opgedreven toestand zou blijven in combinatie met afvoer van water (en zand) richting een benedenstrooms uittredepunt, dán zou de pipe zich door de barrière heen kunnen ontwikkelen. Dit is fysiek echter niet mogelijk, zoals hiervoor al betoogd is. Deze factor vormt géén reëel risico en kan daarom verder buiten beschouwing worden gelaten.

Doorlooptheid

De pipe zou hierna door de grofzandbarrière heen groeien en er zou sprake zijn van doorlooptheid (zie Figuur 155).



Figuur 155 Doorlooptheid.

C.1.9 Pad 9 Barrièrezand is te grof en achtergrondzand is gevoelig voor suffosie

O4 Barrièrezand is te grof in relatie tot achtergrondzand

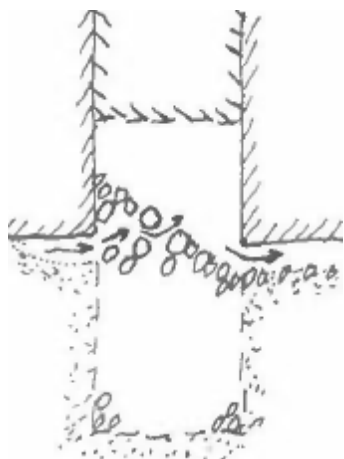
Het barrièrezand moet worden afgestemd op het achtergrondzand. Hiervoor zijn in §A.1.4 eisen aangegeven, gebaseerd op de geometrisch dichte filtercriteria van Terzaghi. Eén van de mogelijkheden om hier niet aan te voldoen, is om een te grof barrièrezand toe te passen waar het achtergrondzand deels doorheen kan spoelen. NB: In dit geval kan het barrièrezand minder grof zijn dan bij faalpad 7 (zie §C.1.7), omdat het verdere deel van dit faalpad aanvullende eisen bevat.

27 Doorlaten fijnere fractie achtergrondzand **EN 17** Achtergrondzand is gevoelig voor suffosie (uitspoelen van fijnere deeltjes waarna de grovere korrelmatrix instort)

Wanneer de fijnere fractie van het achtergrondzand door de barrière heen kan stromen doordat het barrièrezand te grof is én het achtergrondzand bovendien gevoelig is voor suffosie (hetgeen in Nederland buiten Limburg van nature niet het geval is, en ook in Limburg geen algemeen voorkomend verschijnsel is), dán kan er voldoende materiaal door de barrière heen stromen zodat er bovenstrooms van de barrière een pipe kan ontstaan en doorgroeien.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

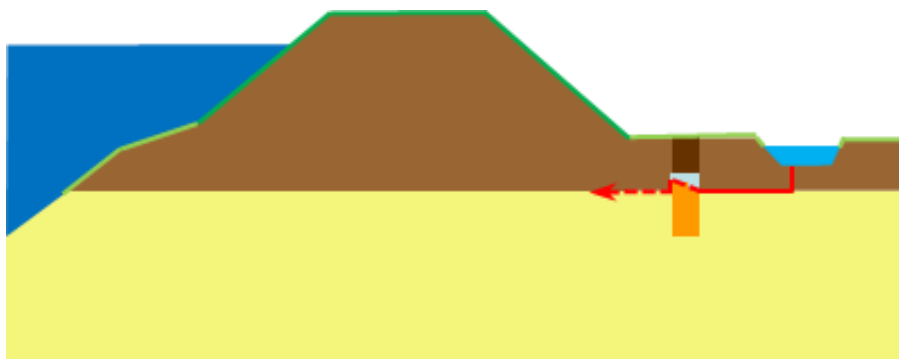
Onder deze omstandigheden zal de pipe door de barrière heen kunnen groeien, zoals geschetst in Figuur 156.



Figuur 156 Doorgroeien van de pipe door de barrière in het geval van te grof barrière materiaal en gevoeligheid voor suffosie van het achtergrondzand.

Doorlooptheid

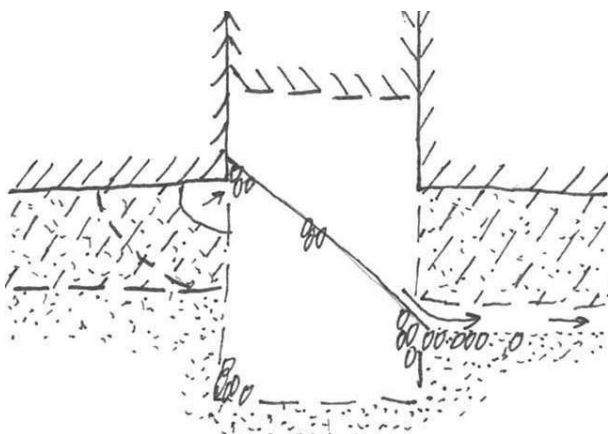
De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 157).



C.1.10 Pad 10 Silt uit grenslaag spoelt uit en maakt barrière instabiel

O6 Grenslaag met veel silt

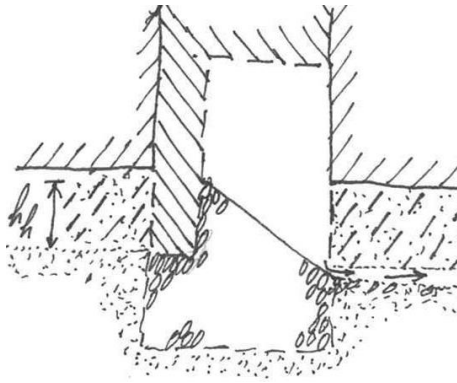
Een grenslaag met veel silt, bijvoorbeeld zoals geïllustreerd in Figuur 158, kan worden gezien als een variant op de situatie zonder scherpe grenslaag (zie §§A.1.2, C.1.4, C.1.21, C.1.22 en C.1.32), hoewel dit ook een gevolg kan zijn van een onjuiste classificatie van de silthoudende laag direct boven de pipinggevoelige zandlaag. In Figuur 158 is aangenomen dat de siltlaag aan de benedenstroomse zijde niet erodeert, maar aan de bovenstroomse zijde zou dan toch een probleem kunnen ontstaan wanneer de samenstelling van de grofzandbarrière niet is afgestemd op de siltlaag: het silt zal door het grove zand heen uitspoelen en de kans bestaat dat er onvoldoende heavehoogte overblijft.



Figuur 158 Mogelijke situatie bij een grenslaag met veel silt, zonder daarop afgestemde grofzandbarrière bij een verval waarbij de inkassing zal leeglopen – ware het niet dat de benedenstroomse pipe niet kan ontstaan.

Wanneer de samenstelling van de grofzandbarrière mede zou moeten worden afgestemd op de siltlagen, dan leidt dit al snel tot een relatief fijne samenstelling van het zand van de grofzandbarrière: uit de eis voor een geometrisch dicht filter (vergelijking (6.2) in §6.2) volgt een lage maximale waarde voor de d_{15} van de grofzandbarrière, namelijk maximaal 5 maal de d_{85} van het achtergrondmateriaal. Daarentegen moet de grofzandbarrière om effectief te zijn over een relatief grote doorlatendheid beschikken, niet alleen ten opzichte van deze siltlagen, maar (vooral) ook ten opzichte van de doorsneden zandlagen, zowel in hetzelfde profiel als in aangrenzende profielen. Dit is tot uitdrukking gebracht in vergelijking (6.4) in §6.2: de d_{15} van de grofzandbarrière moet minimaal 4 maal groter zijn dan de d_{15} van het achtergrondmateriaal. Dit leidt al snel tot onderling onverenigbare eisen.

Wanneer de grofzandbarrière voldoende breed is en de siltlaag voldoende dun, dan is er uiteindelijk geen probleem, zelfs als de siltlaag volledig uitspoelt. Maar bij een dikkere siltlaag en een relatief smalle grofzandbarrière waarbij geen bovenstroomse afdichting is toegepast (zie Figuur 159), dan zou de sterkte van de grofzandbarrière onvoldoende zijn.



Figuur 159 Toepassing van een bovenstroomse afdichting om te kleine heavehoogte bij een onscherpe grenslaag, of bij een siltlaag, uit te sluiten.

Bovenstaande benadering zoomt echter te snel in op de situatie in de dwarsdoorsnede met de grofzandbarrière en de onmiddellijke omgeving daarvan. Belangrijker is daarom de constatering dat de aanwezigheid van een siltlaag niet tot onoverkomelijke problemen leidt, zelfs als de samenstelling van het barrièrezand hier niet op afgestemd wordt, vanwege de effecten die op wat grotere schaal plaatsvinden.

Ten eerste zal in het gedeelte waar de grofzandbarrière een siltlaag passeert, er geen pipegroei plaatsvinden vanuit het achterland tot aan de grofzandbarrière. Een eventuele beginnende pipe zal immers weinig aanvoer van water krijgen vanuit de siltlaag, vanwege de lage doorlatendheid daarvan. Pipegroei onder de siltlaag door, in de zandlaag, is niet mogelijk doordat het niet-cohesieve silt geen stabiel plafond zal vormen boven de pipe, maar in de pipe zal vallen. Doorgroei van de pipe vereist derhalve dat de hele siltlaag boven de pipe, met aan weerszijden een helling onder de hoek van inwendige wrijving ϕ van het silt, zal moeten worden afgevoerd – en gelet op de omvang van de holte die daarmee ontstaat, mogelijk ook de deklaag daarboven. Voordat dit al gebeurt is ontstaan en groei van een pipe in aangrenzende gedeeltes zonder siltlaag veel waarschijnlijker.

Ten tweede vormt de siltlaag geen beletsel voor het functioneren van de grofzandbarrière voor wat betreft de zijdelingse pipegroei in lengterichting van de dijk. Deze zijdelingse pipegroei maakt het mogelijk dat niet alleen op de plaats waar de benedenstroomse pipe bij de grofzandbarrière aankomt, maar ook verderop losse korrels uit de grofzandbarrière in de ontstane holle ruimte direct benedenstrooms van de barrière zullen vallen. Die ruimte wordt daardoor tijdelijk gedeeltelijk opgevuld, maar de vernauwing in combinatie met de blijvende stroming van water door de pipes zal leiden tot voortgaande erosie. Hierbij zullen de grotere korrels minder ver komen dan de kleinere korrels en treedt ook een soort ingraving van de grotere korrels op: kleinere korrels, al dan niet uit het achtergrondzand, naast en ook onder de grotere korrels eroderen en de moeilijker transporteerbare grotere korrels komen dieper te liggen en vormen zo geleidelijk aan een 'grof plaveisel' aan de onderzijde van de pipes, zoals toegelicht in §5.3.

De korrels die de grofzandbarrière verlaten, leiden in eerste instantie tot een holle ruimte bovenin de inkassing, aan de benedenstroomse zijde van de barrière. Immers, de ruimte die een korrel innam zal worden opgevuld door de korrel(s) erboven. Naarmate er meer zand uit de barrière wordt afgevoerd zal er een helling ontstaan in de grofzandbarrière onder een helling gelijk aan de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand. Onder invloed van de grondwaterstroming door de barrière heen zal deze helling nog wat verder verflauwen. Door de hiervoor beschreven processen groeien er aan weerszijden van de aansluiting van iedere benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière twee holle ruimtes vrijwel recht boven elkaar (de zijdelingse pipe en de holte bovenin aan de benedenstroomse zijde), die naarmate het proces verder vordert één geheel vormen. Hierdoor wordt de stromingsweerstand in de langsrichting van de barrière, die bij een volledig intacte barrière natuurlijk al laag is, nog veel lager, waardoor de stijghoogte in de barrière in het gedeelte waar de inkassing gedeeltelijk is leeggelopen overal praktisch gelijk wordt.

Wanneer een zijdelingse pipe bij een siltlaag aankomt, dan zal het silt dat direct aan de barrière grenst relatief gemakkelijk eroderen: de niet-cohesieve siltdeeltjes worden immers gemakkelijk meegevoerd. De hiervoor beschreven processen treden dus ongehinderd ook op in en rond een deel van de grofzandbarrière dat in een siltlaag ligt. Wel zal de aanvoer van water van bovenstrooms hier kleiner zijn: de siltlaag is immers relatief slecht doorlatend. Hierdoor zal de hellingshoek in de barrière hier niet veel flauwer worden dan de hoek van inwendige wrijving van het materiaal.

Een ander verschil betreft het gedrag bij dunne obstakels aan de benedenstroomse zijde, zoals een plank of een stuk plastic loodrecht op de grofzandbarrière. Elders zal dit de doorgroei van de zijdelingse pipe doen stoppen, maar bij een siltlaag kan de groei doorgaan, juist doordat de siltdeeltjes door de feitelijk te grof ontworpen grofzandbarrière heen kunnen en er zo als het ware een by-pass kan ontstaan.

In Gameren is in meerdere boringen in het tracé van de grofzandbarrière voor het Definitief Ontwerp een hoog gehalte aan silt aangetroffen (meer dan 15%), direct boven de voor piping maatgevend beschouwde zandlaag. Dit is het geval bij RW 134+040, RW 138+011 en RW 138+066, zie ook bijlage E van deze rapportage en Koelewijn (2021). Dat gevoegd bij de extra grote afstand tussen de holle ruimte in de gedeeltelijk leeggelopen inkassing en de bovenstroomse siltlaag, mede door de aanwezigheid van de bovenstroomse kleirop in het Definitief Ontwerp, zal ertoe leiden dat er geen erosie van de siltlaag bovenstrooms van de barrière plaats zal vinden. NB: zelfs wanneer dit wel zou plaatsvinden, dan zou er uiteindelijk geen piping optreden nadat de siltlaag is geërodeerd, omdat het bovenstroomse zand niet door de grofzandbarrière heen kan, omdat daarvoor weer wél aan de filtereisen wordt voldaan.

De aanwezigheid van een siltige grenslaag vormt uiteindelijk geen probleem, zoals voor de pilottoepassing bij Gameren nader is onderzocht.

28 Doorlaten silt of siltfractie aan bovenstroomse zijde

Wanneer de grofzandbarrière niet is afgestemd op de aanwezigheid van silt, dan zal dit bij voldoende stroming door de siltlaag heen leiden tot het doorlaten van het silt, de siltfractie of een deel van de siltfractie.

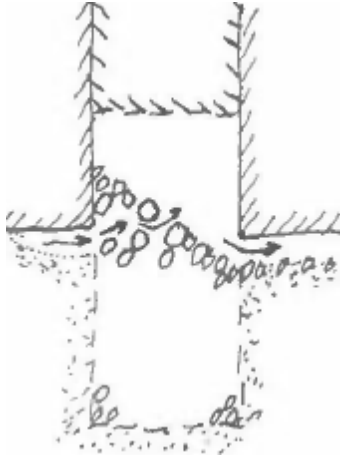
27 Doorlaten fijnere fractie achtergrondzand **EN 17** Achtergrondzand is gevoelig voor suffosie (uitspoelen van fijnere deeltjes waarna de grovere korrelmatrix instort)

Wanneer de fijnere fractie van het achtergrondzand, in dit faalpad betreft dit dus het silt, door de barrière heen kan stromen doordat het barrièrezand te grof is én het achtergrondzand bovendien gevoelig is voor suffosie (hetgeen in Nederland buiten Limburg van nature niet het geval is, en ook in Limburg geen algemeen voorkomend verschijnsel is), dán kan er voldoende materiaal door de barrière heen stromen zodat er bovenstrooms van de barrière een pipe kan ontstaan en doorgroeien.

Zie ook faalpad 25 (§C.1.25), waar na knoop 28 een ander vervolg is geschetst.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

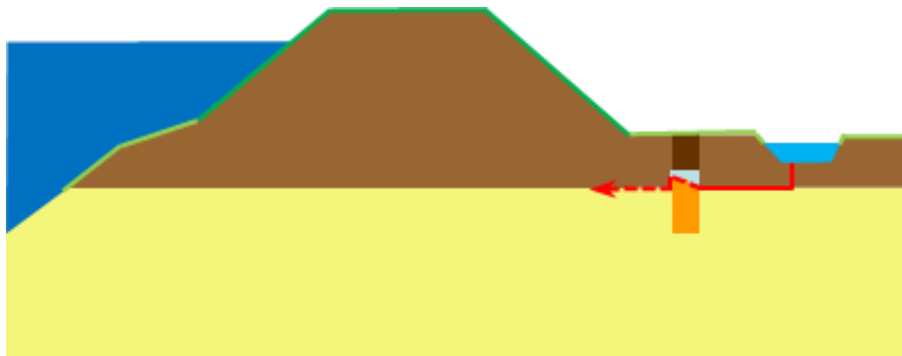
Met de voorgaande stap zal de pipe door de barrière heen kunnen groeien, zoals geschetst in Figuur 160. Hier geldt echter wel de kanttekening die hiervoor al is gemaakt, dat er voldoende stroming op moet kunnen treden en het bovenstroomse zand, na het silt, nog steeds niet door de barrière kan passeren.



Figuur 160 Doorgroeien van de pipe door de barrière in het geval van te grof barrièremateriaal en gevoeligheid voor suffosie van het achtergrondzand.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 161).



Figuur 161 Doorlooptheid.

C.1.11 Pad 11 Uittredepunt ligt dicht bij barrière, processen bij uittredepunt ondermijnen barrière

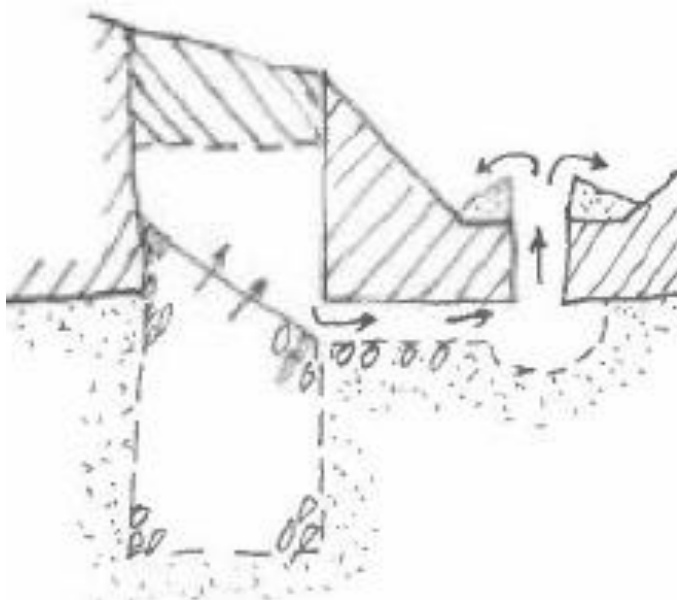
O7 Afstand van barrière tot uittredepunt is klein

Als de afstand tussen de barrière en het uittredepunt klein is, dan kunnen erosieverschijnselen bij het uittredepunt van invloed worden op het functioneren van de grofzandbarrière.

Dit faalpad zou met name worden verergerd indien ook het uittredepunt bovenstrooms verschuift. Dit laatste is uitgewerkt onder de beheerfase, in §A.3.9 (beïnvloedende factor B9) en §C.3.15 (faalpad 70). De combinatie is hier niet nader uitgewerkt.

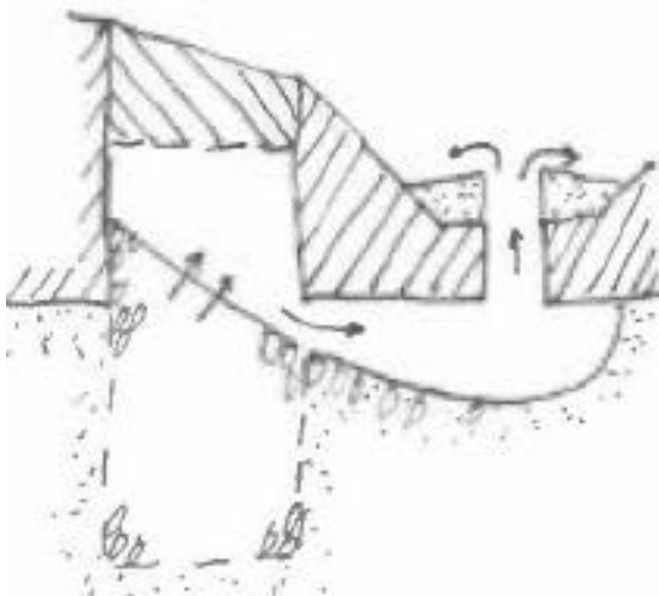
34 Lensvorming bij uittredepunt

Bij het uittredepunt wordt in de zandlaag vaak een lensvormige erosiekuil gevonden, zoals geïllustreerd is in Figuur 162.



Figuur 162 Uittredepunt nabij de grofzandbarrière: beginnende erosielens onder uittredepunt.

33 Groei van lens eindigt bij barrière (erosiebestendiger dan achtergrondzand)
 Wanneer de erosielens groeit en de afstand tot de grofzandbarrière klein is, dan ontstaat de situatie van Figuur 163. De erosielens is daarbij gegroeid tot aan de benedenstroomse rand van de grofzandbarrière. Overigens treedt dit alleen op daar waar er daadwerkelijk een zandmeevoerende wel aanwezig is, hetgeen in de lengterichting van de dijk (loodrecht op het vlak van de figuur) vrijwel nooit continu het geval is.



Figuur 163 Uittredepunt nabij de grofzandbarrière: erosielens gegroeid tot aan benedenstroomse rand van grofzandbarrière.

32 Verlaging bodem door pipe direct benedenstrooms van grofzandbarrière
 Bij verdere groei ontstaat daarna verdieping van de pipe aan de benedenstroomse rand van de grofzandbarrière.

31 Instorten van grof zand in benedenstrooms aangetakte pipe

De voorgaande stap leidt tot het instorten van grof zand in de benedenstroomse pipe, ofwel de erosielens. Dit leidt vervolgens tot een algehele verlaging van de helling (bij gelijkblijvende hellingshoek).

29 Heavehoogte neemt af

De algemene verlaging van de helling heeft als verdere gevolg is dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

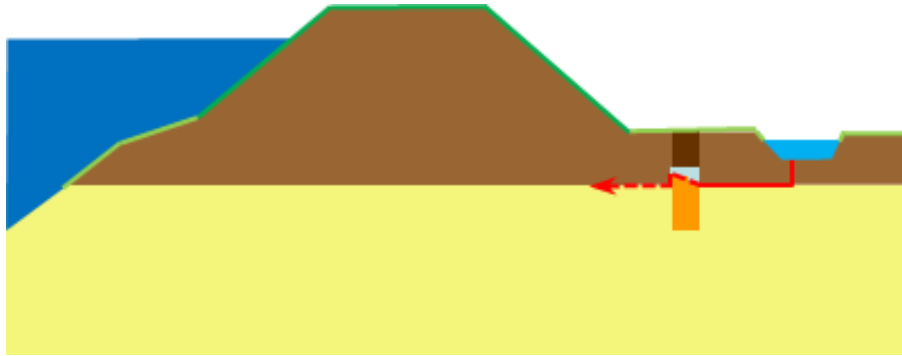
Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier korthedshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière.

Doorloopsheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorloopsheid (zie Figuur 164).



Figuur 164 Doorloopsheid.

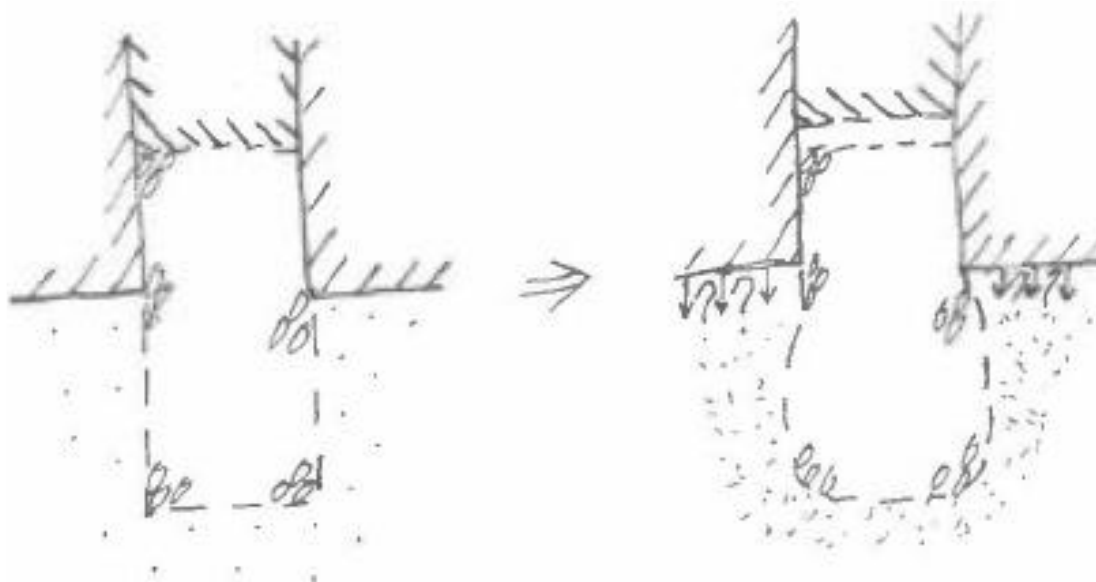
C.1.12 Pad 12 Losse pakking achtergrondzand leidt tot nazakken barrière en daardoor gebrek aan voldoende hoogte barrière

O8 Te los gepakt achtergrondzand

Wanneer het achtergrondzand (zeer) losgepakt is, dan is het denkbaar dat er ná aanbrengen van de grofzandbarrière verdichting optreedt.

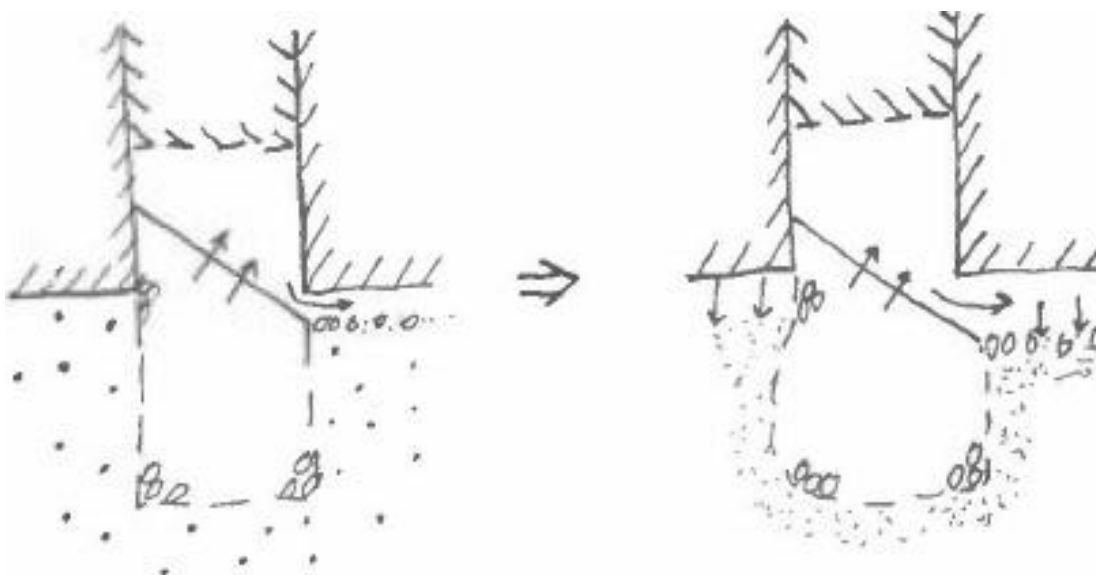
36* Nazakken barrière

Verdichting van het omliggende achtergrondzand kan leiden tot nazakken van de grofzandbarrière. Dit kan bijvoorbeeld de combinatie zijn van opzij uitzakken en naar beneden zakken die geschetst is in Figuur 165. Een praktische vraag die dit oproept is waarom dit dan niet al voor of desnoods tijdens de aanleg van de dijk of de grofzandbarrière zou zijn opgetreden? Bij een grofzandbarrière met een inkassing vormt dit echter geen enkel probleem, zoals in de figuur te zien is.

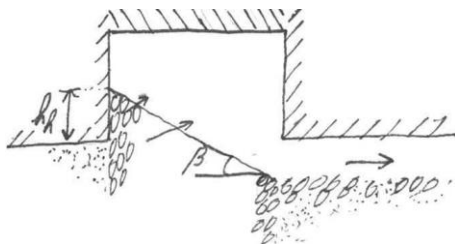


Figuur 165 Verzakking grofzandbarrière bij losgepakt achtergrondzand.

Een uitzondering hierop is de situatie waarbij er al een helling is ontstaan in de grofzandbarrière, zie Figuur 166. Dan vormt een kleine aanvullende verzakking mogelijk wél een probleem doordat de heavehoogte dan te veel afneemt, zoals wanneer de uiterste nog stabiele situatie, zoals geschetst in Figuur 167, al is opgetreden. Dit scenario is echter uiterst onwaarschijnlijk, al kan gedacht worden aan het vlakbij intrillen van een stalen damwand als noodmaatregel tijdens een hoogwater.



Figuur 166 Verzakking grofzandbarrière bij losgepakt achtergrondzand na leeglopen inkassing.



Figuur 167 Uiterste situatie met minimale heavehoogte en maximaal verflauwde helling, waarin verzakking als gevolg van verdichting niet kan worden opgenomen.

29 Heavehoogte neemt af

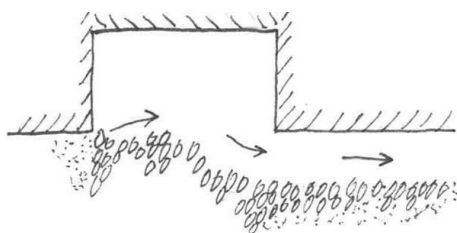
Het inzakken van de grofzandbarrière heeft ook als gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier kortheidshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

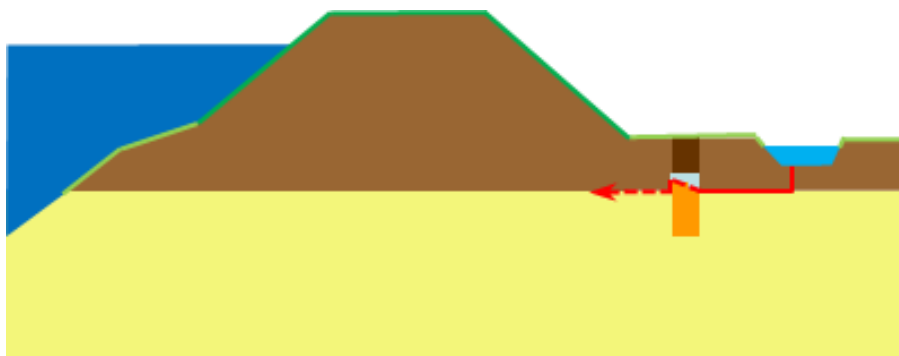
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 168.



Figuur 168 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 169).



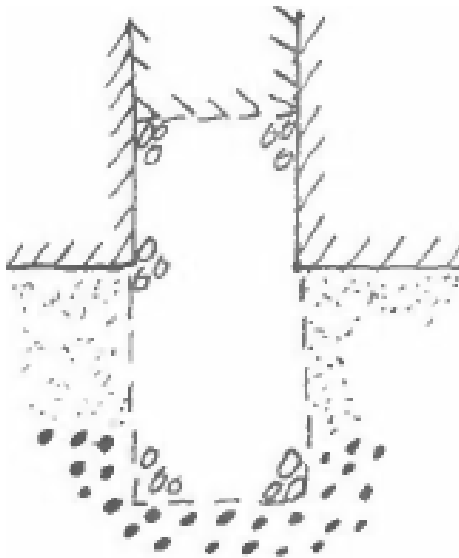
Figuur 169 Doorlooptheid.

C.1.13

Pad 13 Sterke aanvoer van water via grindlaag onderaan barrière

O9 Sterk doorlatende (grind)laag onderaan barrière

Wanneer er sprake is van een sterk doorlatende (grind)laag die contact kan maken met het onderste gedeelte van de grofzandbarrière, zoals geschetst in Figuur 170, dan zal er extra veel toestroming naar de grofzandbarrière zijn, hetgeen bij het 'gewone' faalpad zoals geschetst in §5.3 tot een toename van de belasting leidt en daardoor eerder tot falen. Bij de interpretatie van het grondonderzoek zal er aandacht aan moeten worden geschonken of er sprake is van een dergelijke laag. Deze ongunstige factor zal dan vervolgens eenvoudigweg in de tweedimensionale grondwaterstromingsberekeningen ten behoeve van het ontwerp worden meegenomen en leiden tot een hogere berekende gradiënt, die op de in hoofdstuk 2 aangegeven wijze kan worden getoetst aan de toelaatbare gradiënt.



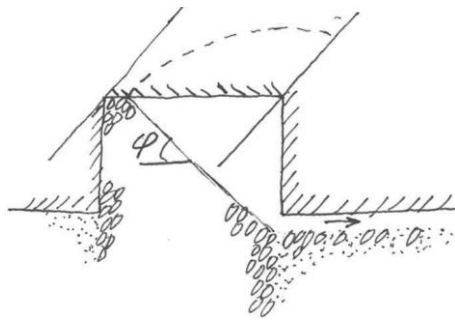
Figuur 170 Sterk doorlatende laag onderaan de barrière.

41 Sterkere aanvoer van water naar barrière

Wanneer de doorlatendheden van de lagen in de ondergrond groter zijn dan aangenomen in de berekeningen, leidt dit tot een sterkere aanvoer van water naar de barrière. Dit effect treedt het sterkst op als een meer doorlatende laag direct contact maakt met de grofzandbarrière.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft

Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfrond mini-amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 171.



Figuur 171 Uitspoeling van bovendeele barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

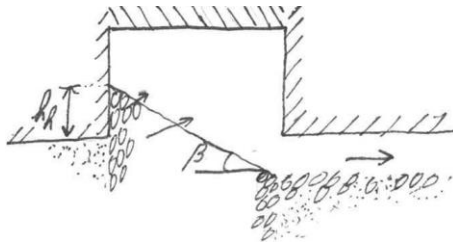
De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfitheater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor. De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van

gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

Uiteindelijk kan er wel over de hele lengte van de grofzandbarrière sprake zijn van een volledig ontwikkelde helling, maar het is waarschijnlijker dat de zijdelingse pipegroei ergens geblokkeerd raakt.

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 172.



Figuur 172 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

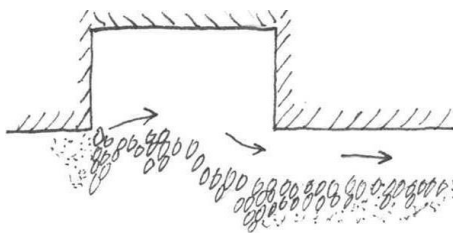
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier korthedshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

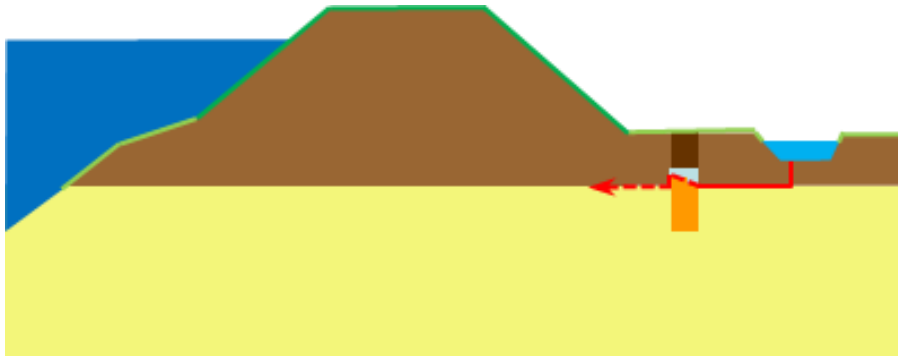
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 173.



Figuur 173 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorloopbaarheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorloopbaarheid (zie Figuur 174).



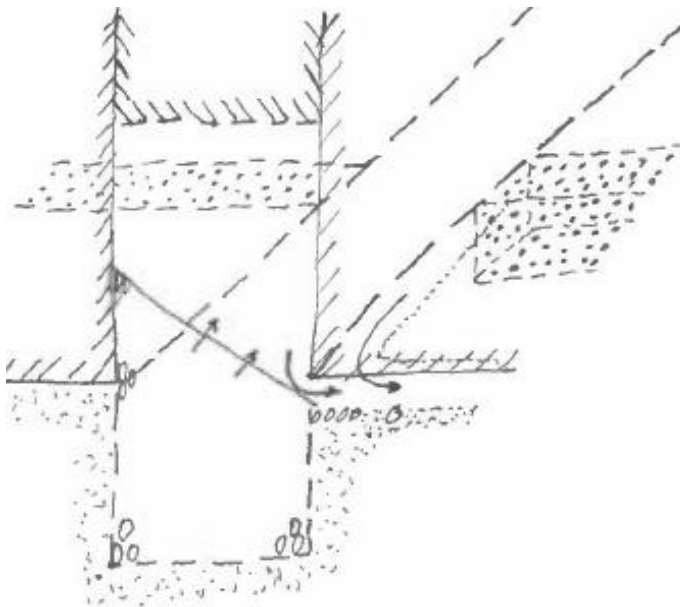
Figuur 174 Doorloopsheid.

C.1.14

Pad 14 Grove discontinuïteit (geul) voert extra veel water aan

O10 Grofkorrelige discontinuïteit in ondergrond bij barrière

Anders dan bij O9 gaat het bij de 'grofkorrelige discontinuïteit in de ondergrond bij de barrière' om de aan- of doorsnijding van een (smalle) geul of een antropogeen sterk-doorlatend volume, zie Figuur 175. Hierdoor kan er sprake zijn van extra toestroming én de zijdelingse pipegroei kan hierop vastlopen, hetgeen van belang is voor de aannames die gedaan worden voor de vaststelling van de 3D-factor (zie §2.2.2.2 en bijlage D).

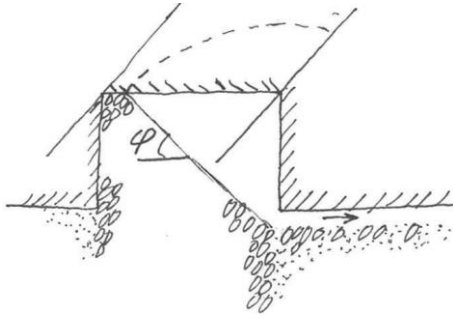


Figuur 175 Grofkorrelige discontinuïteit in de ondergrond, doorsneden door de grofzandbarrière.

41 Sterkere aanvoer van water naar barrière

Wanneer de doorlatendheden van de lagen in de ondergrond groter zijn dan aangenomen in de berekeningen, leidt dit tot een sterkere aanvoer van water naar de barrière. Dit effect treedt het sterkst op als een meer doorlatende laag direct contact maakt met de grofzandbarrière, zoals hier lokaal duidelijk het geval is.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfrond mini-amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 176.



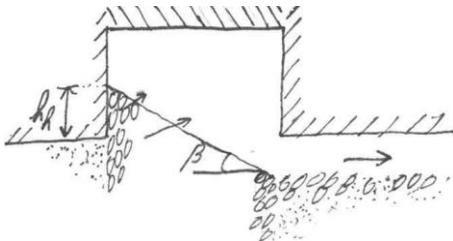
Figuur 176 Uitspoeling van bovendeel barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het ‘amfitheater’ een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor.

De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage). Bij de grove discontinuïteit kan het proces van zijdelingse pipegroei vastlopen (zie §C.1.17), met uiteindelijk slechts een helling in zijdelingse richting zoals beschreven in bijlage D (Figuur 447).

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 177.



Figuur 177 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

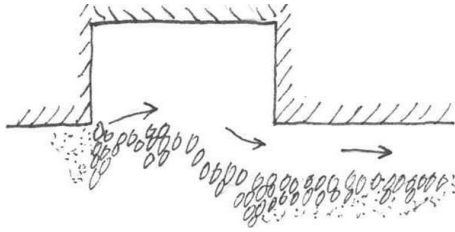
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formules hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier korthedshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

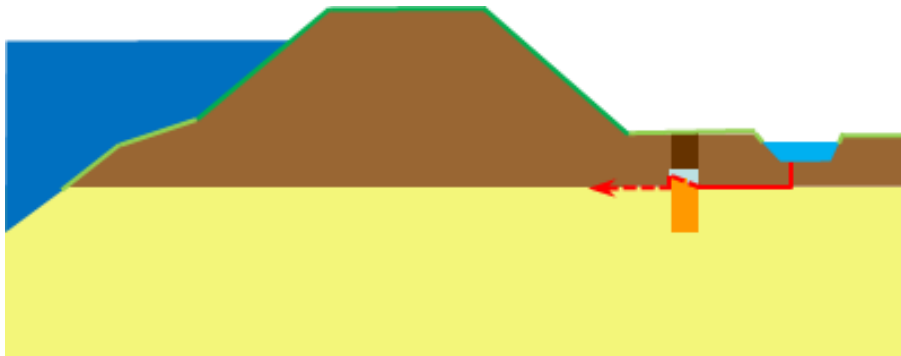
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 178.



Figuur 178 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 179).

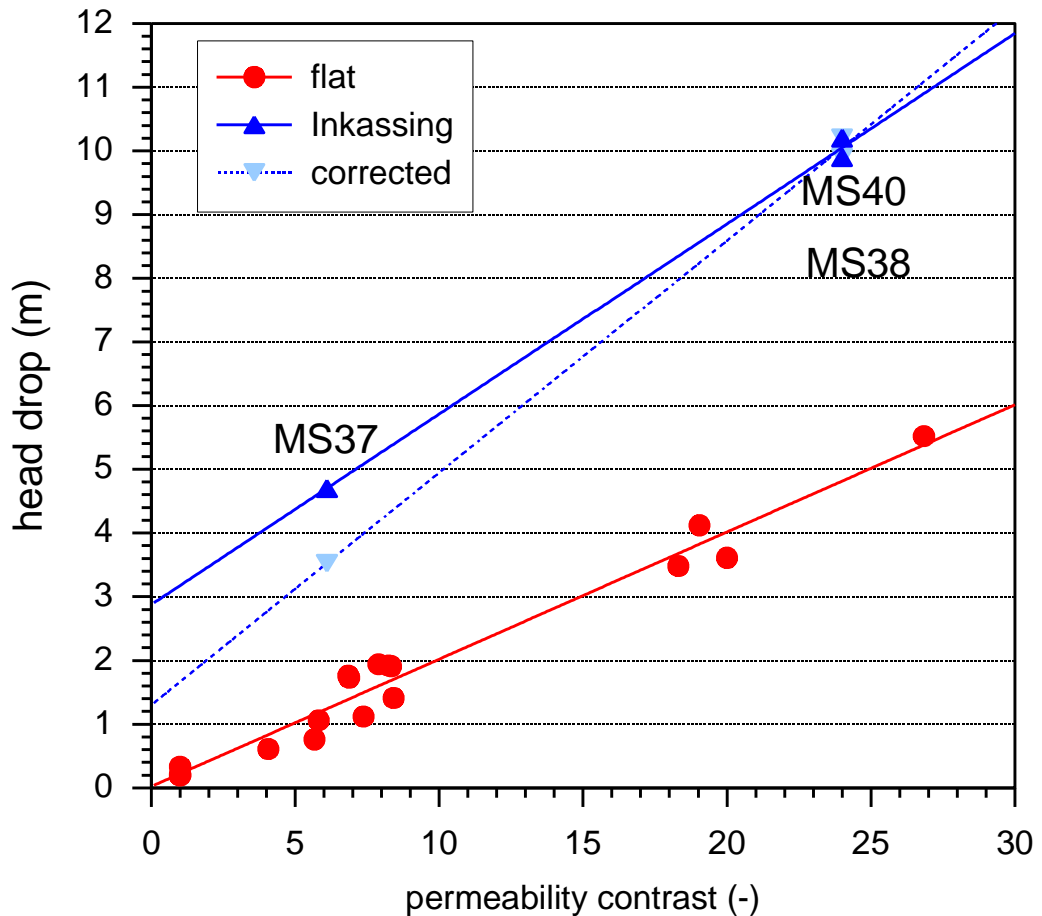


Figuur 179 Doorlooptheid.

C.1.15 Pad 15 Barrièrezand heeft te lage doorlatendheid; barrière raakt relatief zwaar belast

O11 Barrièrezand is te fijn in relatie tot achtergrondzand

De effectiviteit van de grofzandbarrière hangt in belangrijke mate samen met het doorlatendheidscontrast: de verhouding tussen de doorlatendheid van de barrière en de doorlatendheid van het achtergrondzand, zie Figuur 180 voor dit verband bij de laboratoriumproeven op medium-schaal bij Deltares.



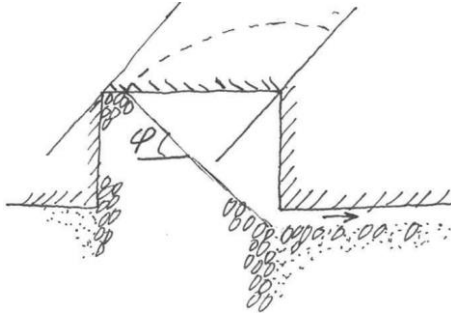
Figuur 180 Verband tussen keerbaar verval en doorlatendheidscontrast voor de medium-schaal opstelling, voor zowel een vlakke grofzandbarrière als een grofzandbarrière met een inkassing (Förster, 2021a).

Hoe groter het doorlatendheidscontrast is, hoe groter naar verhouding de gradiënt bovenstrooms van de grofzandbarrière kan worden – bij eenzelfde toelaatbare gradiënt in de grofzandbarrière kan dan een hoger verval over de dijk worden gekeerd. Maar naarmate het barrièrezand fijner is, neemt het doorlatendheidscontrast af. Hierom is het van belang om bij de selectie van het barrièrezand te zoeken naar een mengsel dat een zo groot mogelijke doorlatendheid heeft, terwijl het ook aan de overige voorwaarden (zie O3 en O4) voldoet.

42 Doorlatendheidscontrast is te laag

Als het doorlatendheidscontrast lager is dan aangenomen in de berekeningen, dan zal de grofzandbarrière een kleinere sterkte hebben. Hierbij wordt opgemerkt dat het doorlatendheidscontrast zowel afhankelijk is van de doorlatendheid van de grofzandbarrière als de doorlatendheid van het achtergrondzand. Het vaststellen van een betrouwbaar waarde hiervoor kan in de praktijk lastig zijn.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfrond mini-amfiteater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 181.



Figuur 181 Uitspoeling van bovendeele barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

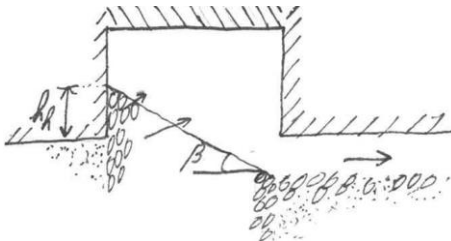
De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uitredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfitheater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor.

De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

Uiteindelijk kan er wel over de hele lengte van de grofzandbarrière sprake zijn van een volledig ontwikkelde helling, maar het is waarschijnlijker dat de zijdelingse pipegroei ergens geblokkeerd raakt.

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 182.



Figuur 182 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

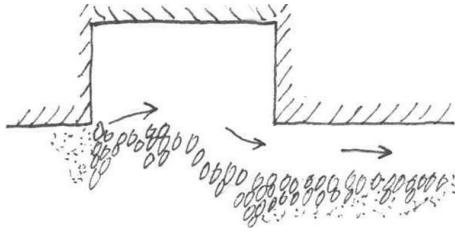
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formules hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier korthedshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

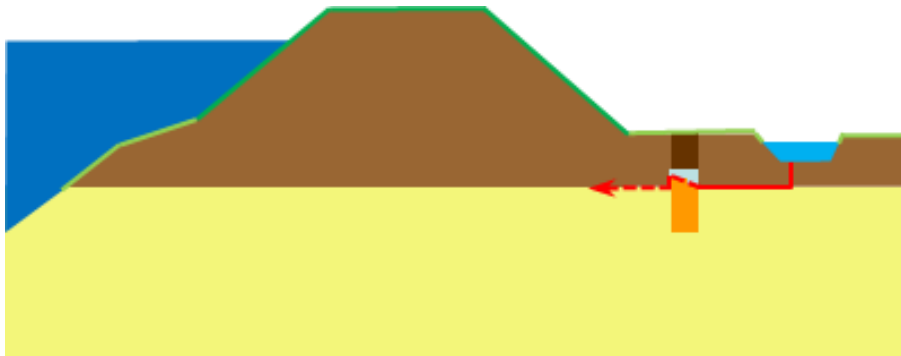
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 183.



Figuur 183 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 184).

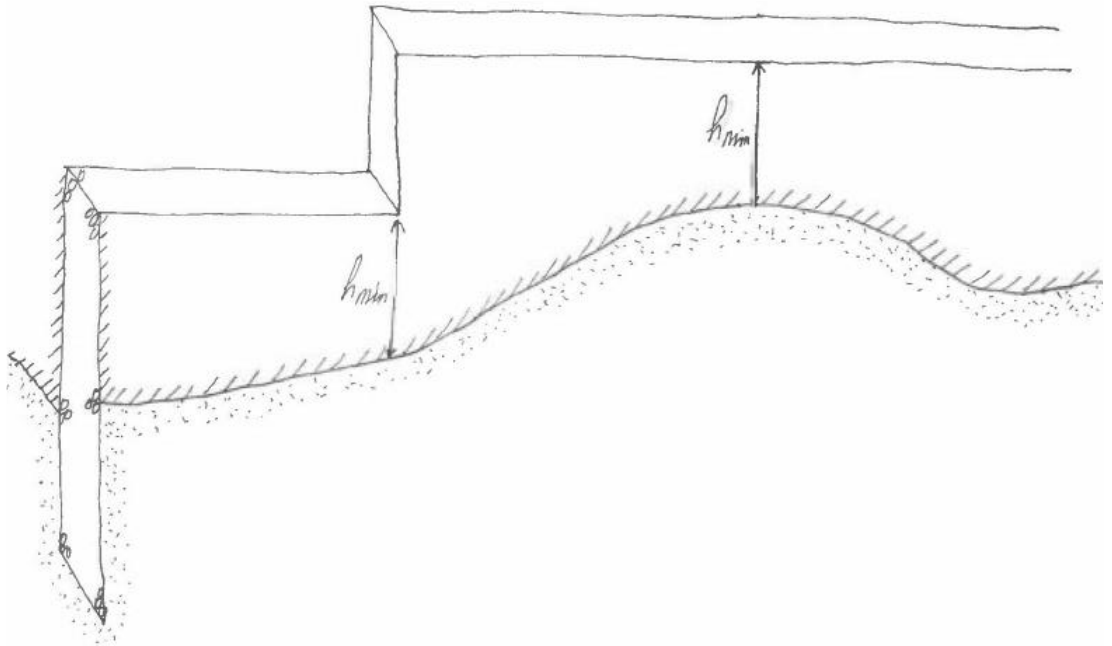


Figuur 184 Doorlooptheid.

C.1.16 Pad 16 Hoogte grenslaag varieert, maar is bovenstrooms niet hoger: eventueel gunstiger

O12 In hoogteligging variërende grenslaag tussen de pipinggevoelige zandlaag en de deklaag

De grenslaag tussen de pipinggevoelige zandlaag en de deklaag zal in de praktijk altijd wat in hoogte variëren, zowel in langsrichting van de dijk als dwars daarop. Dit is overigens ook de reden dat een 'vlakke' grofzandbarrière (dus zonder inkassing) in de praktijk niet te realiseren is. Deze problematiek is in Figuur 185 geïllustreerd voor een discontinue aanlegmethode waarbij een minimale hoogte van de inkassing is aangehouden. Merk op dat in deze figuur aan de linkerkant ook in dwarsrichting een aanzienlijke sprong in de hoogteligging is aangegeven.



Figuur 185 In hoogteligging variërende grenslaag.

94n Grenslaag is bovenstrooms NIET hoger dan benedenstrooms
 Wanneer de grenslaag bovenstrooms *lág*er ligt dan benedenstrooms, dan pakt dit zelfs gunstiger uit.

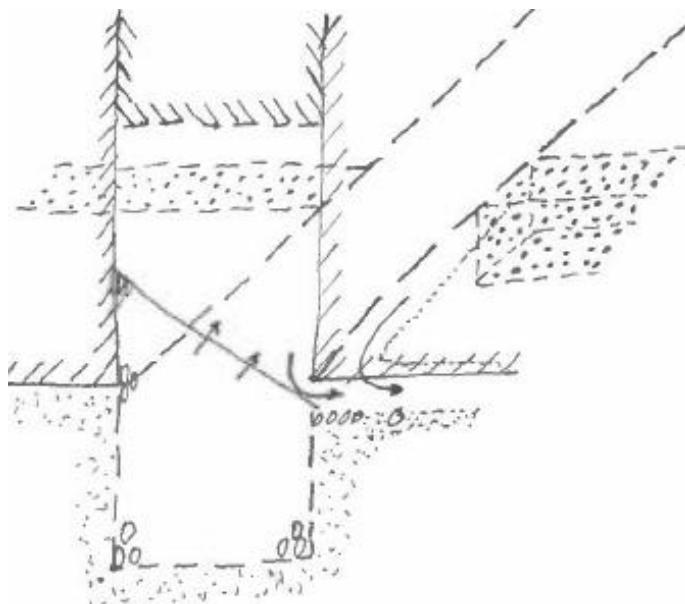
88 Geen aanvullend risico

Dit pad levert geen aanvullend risico op. De 'tegenhanger' van dit pad is faalpad 24, beschreven in §C.1.24.

C.1.17 Pad 17 Grove discontinuïteit (geul) onderbreekt dwarsontwikkeling pipes aan benedenstroomse zijde

O10 Grofkorrelige discontinuïteit in ondergrond bij barrière

Het gaat hier om de aan- of doorsnijding van een (smalle) geul of een antropogeen sterk-doorlatend volume, zie Figuur 186. Hierdoor kan er sprake zijn van extra toestroming én de zijdelingse pipegroei kan hierop vastlopen, hetgeen van belang is voor de aannames die gedaan worden voor de vaststelling van de 3D-factor (zie §2.2.2.2 en bijlage D).



Figuur 186 Grofkorrelige discontinuïteit in de ondergrond, doorsneden door de grofzandbarrière.

45 Dwarsontwikkeling pipes aan achterzijde stokt

De zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de grofzandbarrière kan vastlopen op een dergelijke grofkorrelige discontinuïteit, omdat de groei van de zijdelingse pipes mede afhankelijk is van het feit dat het fijnkorrelige achtergrondzand gemakkelijker erodeert dan het materiaal uit de grofzandbarrière.

Voor Gameren is met de verwachting van de lengte van de zijdelingse pipes overigens rekening gehouden met het vóórkomen van dergelijke hindernissen bij de opstelling van de hiervoor bepalende Tabel 12 in §D.3.

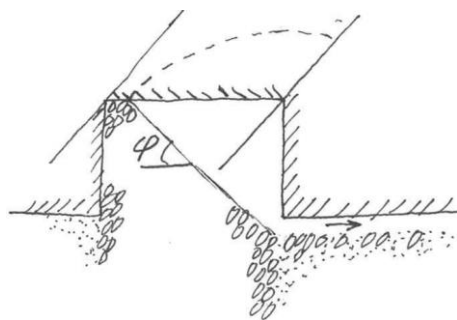
44 Ongunstiger stromingspatroon ('3D-factor')

Een begrenzing van de afstand waarover de zijdelingse pipeontwikkeling kan plaatsvinden, leidt tot een stromingsconcentratie bij het uiteinde van de zijdelingse pipe, hier dus bij de locatie van de discontinuïteit. Dit dient te worden meegenomen bij de bepaling van de 3D-factor γ_{3D} .

Voor Gameren is hier rekening mee gehouden.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft

Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfronde mini-amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 187.



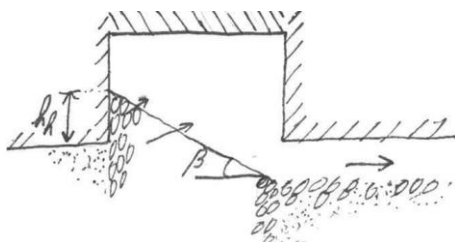
Figuur 187 Uitspoeling van bovendeele barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfitheater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor.

De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage). Bij de discontinuïteit loopt het proces van zijdelingse pipegroei vast, zoals hiervoor omschreven, met uiteindelijk slechts een helling in zijdelingse richting zoals beschreven in bijlage D (Figuur 447).

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 177.



Figuur 188 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

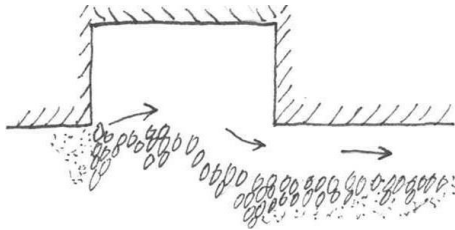
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier korthedshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

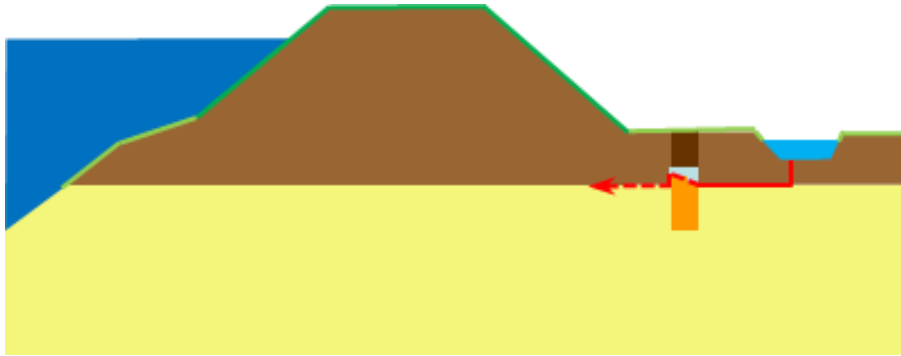
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 178.



Figuur 189 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorloopsheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorloopsheid (zie Figuur 190).

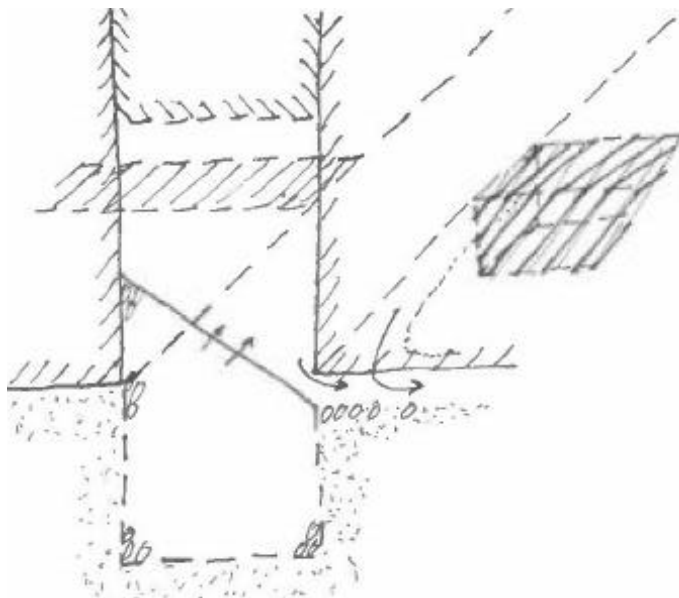


Figuur 190 Doorloopsheid.

C.1.18 Pad 18 Slechtdoorlatende discontinuïteit onderbreekt dwarsontwikkeling pipes aan benedenstroomse zijde

O13 Slechtdoorlatende discontinuïteit in ondergrond bij barrière

Wanneer niet een sterk-doorlatend volume wordt doorsneden door de grofzandbarrière, zoals bij O10 (§A.1.10 en faalpaden 14 en 17, in respectievelijk §C.1.14 en §C.1.17), maar juist een slechtdoorlatend volume zoals een kleilens of een voormalige sloot die (deels) met klei of slib is opgevuld (zie Figuur 191), dan is er geen sprake van extra toestroming, maar wel van verhindering van de zijdelingse pipegroei, hetgeen van belang is voor de aannames die gedaan worden voor de vaststelling van de 3D-factor (zie §2.2.2.2 en bijlage D).



Figuur 191 Slechtdoorlatende discontinuïteit in de ondergrond, doorsneden door de grofzandbarrière.

45 Dwarsontwikkeling pipes aan achterzijde stokt

De zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de grofzandbarrière kan vastlopen op een dergelijke slechtdoorlatende discontinuïteit, omdat de groei van de zijdelingse pipes mede afhankelijk is van het feit dat het fijnkorrelige achtergrondzand gemakkelijker erodeert dan het materiaal uit de grofzandbarrière – bij een slechtdoorlatende discontinuïteit werkt de (nog) lagere doorlatendheid ongunstig, evenals eventuele cohesie, zoals bij klei.

Voor Gameren is met de verwachting van de lengte van de zijdelingse pipes overigens rekening gehouden met het vóórkomen van dergelijke hindernissen bij de opstelling van de hiervoor bepalende Tabel 12 in §D.3.

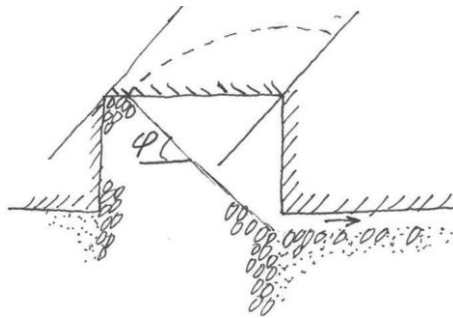
44 Ongunstiger stromingspatroon ('3D-factor')

Een begrenzing van de afstand waarover de zijdelingse pipeontwikkeling kan plaatsvinden, leidt tot een stromingsconcentratie bij het uiteinde van de zijdelingse pipe, hier dus bij de locatie van de discontinuïteit. Dit dient te worden meegenomen bij de bepaling van de 3D-factor γ_{3D} .

Voor Gameren is hier rekening mee gehouden.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft

Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfronde mini-amfiteater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 192.



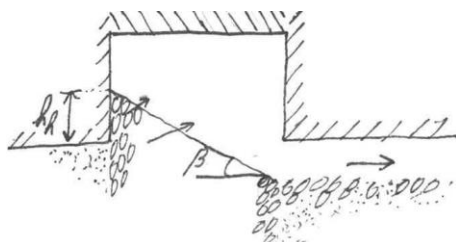
Figuur 192 Uitspoeling van bovendeele barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfiteater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor.

De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage). Bij de discontinuïteit loopt het proces van zijdelingse pipegroei vast, zoals hiervoor omschreven, met uiteindelijk slechts een helling in zijdelingse richting zoals beschreven in bijlage D (Figuur 447).

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 193.



Figuur 193 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

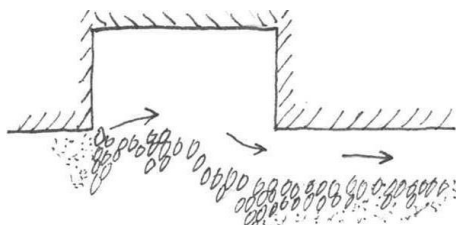
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier kortheidshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

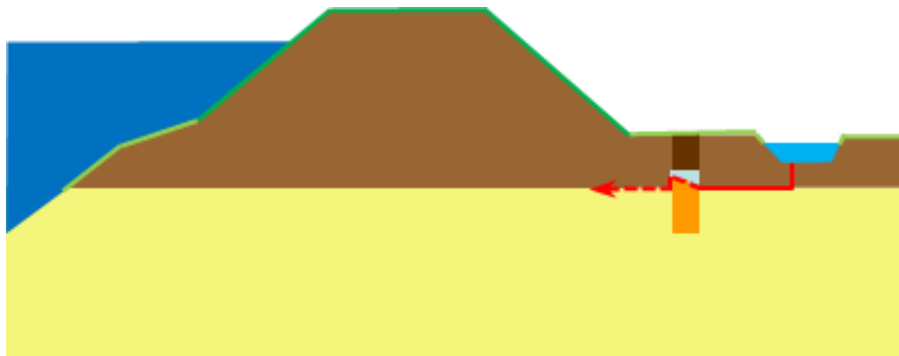
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 194.



Figuur 194 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 195).



Figuur 195 Doorlooptheid.

C.1.19 Pad 19 Complexe geohydrologische situatie leidt tot onderschatting stroming

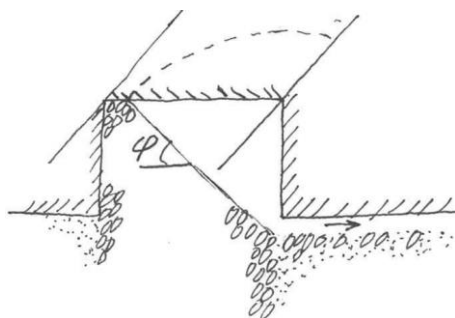
O14 3D-factor is onderschat

Tijdens de ontwerpfase zal met enige regelmaat moeten worden vastgesteld of de vastgestelde 3D-factor nog correct is in het licht van de gemaakte aannamen en nieuw verkregen informatie en inzichten. Deze factor is naar verhouding van (zeer) groot belang, waardoor een onderschatte getalswaarde hiervoor een naar verhouding grote impact kan hebben op het functioneren van de grofzandbarrière (eigenlijk: het eventuele verschil tussen het verwachte functioneren en het daadwerkelijke functioneren). Zie hiervoor ook §2.2.2.2 en bijlage D. Voorkómen moet worden dat deze waarde na het ontwerp naar boven aangepast moet worden.

96j Stroming wordt (lokaal) WEL onderschat
In dit faalpad is de stroming toch onderschat.

44 Ongunstiger stromingspatroon ('3D-factor')
De onderschatting, om wat reden dan ook, van de stroming leidt tot een hogere 3D-factor γ_{3D} .

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft
Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfrond mini-amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 196.



Figuur 196 Uitspoeling van bovendeele barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsricting).

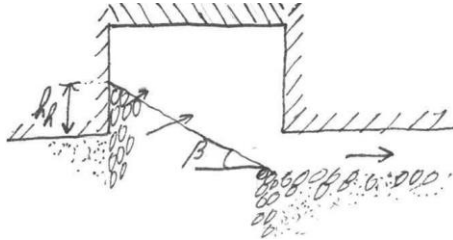
De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uitredpunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfitheater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor.

De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

Bij verandering van inzicht in deze processen zou ook de 3D-factor aangepast kunnen moeten worden.

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 197.



Figuur 197 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

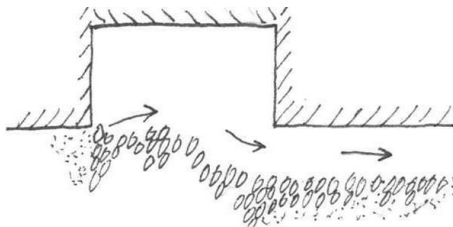
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier kortheidshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

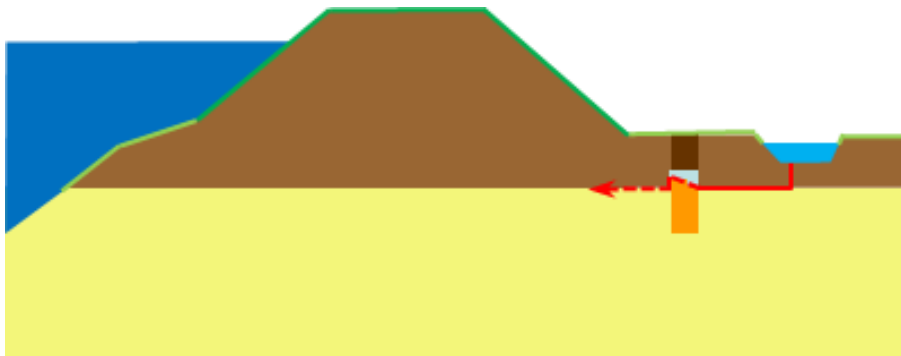
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 198.



Figuur 198 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 199).



Figuur 199 Doorlooptheid.

C.1.20 Pad 20 Complexe geohydrologische situatie leidt tot overschatting stroming

O14 3D-factor is onderschat

Tijdens de ontwerpfase zal met enige regelmaat moeten worden vastgesteld of de vastgestelde 3D-factor nog correct is in het licht van de gemaakte aannamen en nieuw verkregen informatie en inzichten. Deze factor is naar verhouding van (zeer) groot belang, waardoor een onderschatte getalswaarde hiervoor een naar verhouding grote impact kan hebben op het functioneren van de grofzandbarrière (eigenlijk: het eventuele verschil tussen het verwachte functioneren en het daadwerkelijke functioneren). Zie hiervoor ook §2.2.2.2 en bijlage D. Voorkómen moet worden dat deze waarde na het ontwerp naar boven aangepast moet worden.

96n Stroming wordt (lokaal) NIET onderschat

De mogelijkheid bestaat ook dat de 3D-factor niet onderschat is, maar bijvoorbeeld juist overschat. Dit pakt dan juist gunstig uit.

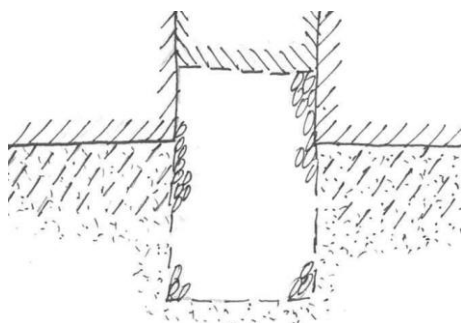
88 Geen aanvullend risico

Dit pad levert geen aanvullend risico op. De 'tegenhanger' van dit pad is faalpad 19, hiervoor beschreven in §C.1.19.

C.1.21 Pad 21 Geen scherpe grenslaag en kleiaanvulling steekt effectief naar beneden, daardoor ongunstiger stroming en sneller falen

O2 Geen scherpe grenslaag tussen de pipinggevoelige zandlaag en de deklaag

In de principe-schetsen over de werking van de grofzandbarrière wordt altijd uitgegaan van een scherpe overgang tussen een deklaag van klei met daaronder een pipinggevoelige zandlaag. Dit komt in de praktijk vaak voor, maar evengoed zijn er situaties waarbij er sprake is van een meer diffuse overgang tussen de slechtdoorlatende deklaag en de pipinggevoelige zandlaag van soms wel meerdere meters hoog. Voor het ontwerp van een grofzandbarrière kan dan een onjuist niveau worden ingeschat op basis van boorbeschrijvingen en sondeerresultaten. Een dergelijke situatie is geschetst in Figuur 200, waar ten behoeve van deze uitleg een drielaagensysteem is geschetst. De middelste laag kan bijvoorbeeld omschreven zijn als 'klei, sterk zandig' en een lage conusweerstand vertonen, terwijl de onderste laag een veel hogere conusweerstand laat zien. Voor het ontwerp kan dan de onderste 'laagovergang' als veilige grenslaag worden gehanteerd ter bepaling van de benodigde diepte van de barrière, terwijl de pipegroei in werkelijkheid mogelijk plaatsvindt op het niveau van de bovenste 'laagovergang'. Dit is van invloed op de keuze van de hoogte van de inkassing (zoals verder de vereiste heavehoogte, de meeton nauwkeurigheden bij het grondonderzoek en bij de uitvoering en de maaton nauwkeurigheden bij de uitvoering hiervoor bepalend zijn).

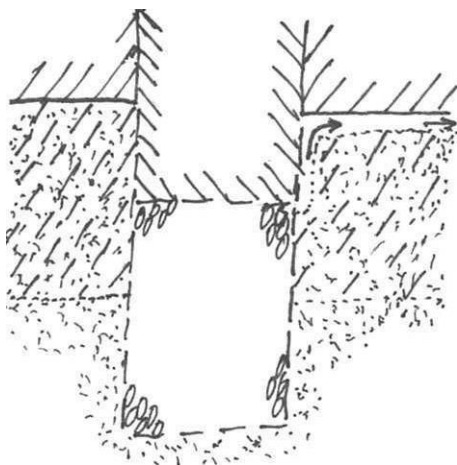


Figuur 200 Drielagensysteem ter illustratie van 'geen scherpe grenslaag'.

Het is ook denkbaar dat bij een diffuse overgang een pipe bovenstrooms op een hoger niveau verdergaat dan het niveau waarop een pipe vanaf het uittredepunt bij de barrière aankomt. Het stromingspatroon in de barrière zelf bevordert overigens een dergelijk vervolg op een hoger niveau (eventueel met een schuin naar beneden verlopende pipe), wat bij

scherpe klei-zand overgang nooit zou plaatsvinden. De effectieve heave-hoogte wordt dan kleiner en falen treedt sneller op. Dit is nader uitgewerkt bij het bijbehorende faalpad in §C.1.22.

Eén van de drie meer extreme varianten waar deze situatie toe kan leiden, is dat de kleiaanvulling effectief nog onder het niveau waarop piping plaatsvindt steekt. Deze situatie is ook wel aangeduid als 'uitstulping', zie Figuur 201 (de beide andere meer extreme varianten zijn uitgewerkt in §C.1.4 en §C.1.32).



Figuur 201 Onscherpe grenslaag met pipe langs bovenkant en uitstulping van kleiaanvulling onder niveau van de benedenstroomse pipe.

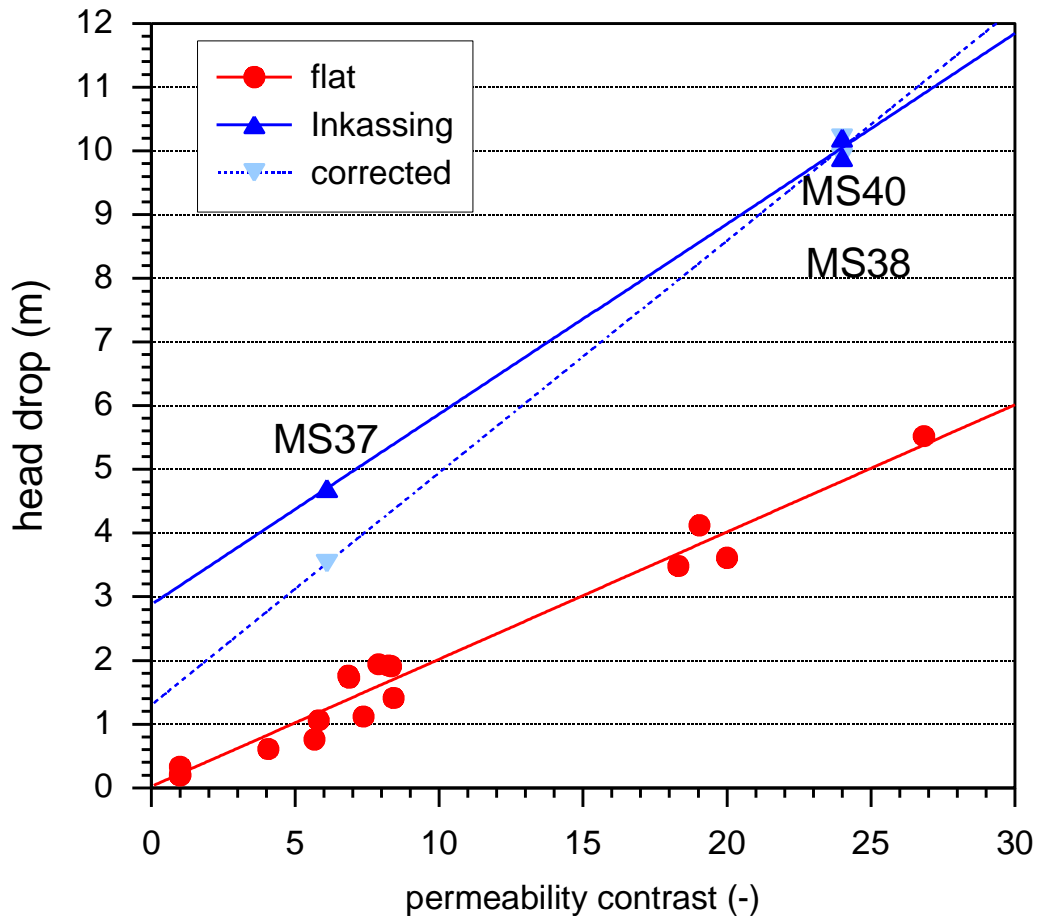
93n Pipe kan NIET door sleufaanvulling heengroeien

Als de pipe niet door de sleufaanvulling heen kan groeien, dan kan de pipe er alleen onderdoor.

46 Situatie van 'uitstulping': de grofzandbarrière steekt niet naar boven toe uit in de deklaag, maar de kleiaanvulling steekt naar beneden toe uit in de pipinggevoelige zandlaag. De pipe zal dan eerst verticaal naar beneden moeten groeien. Dat is op zich gunstig voor het keerbare verval, maar daar staat tegenover dat in deze situatie géén zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de grofzandbarrière zal optreden, waardoor er sprake is van een maximaal ongunstig 3D-grondwaterstromingspatroon en een hoge 3D-factor (γ_{3D}).

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

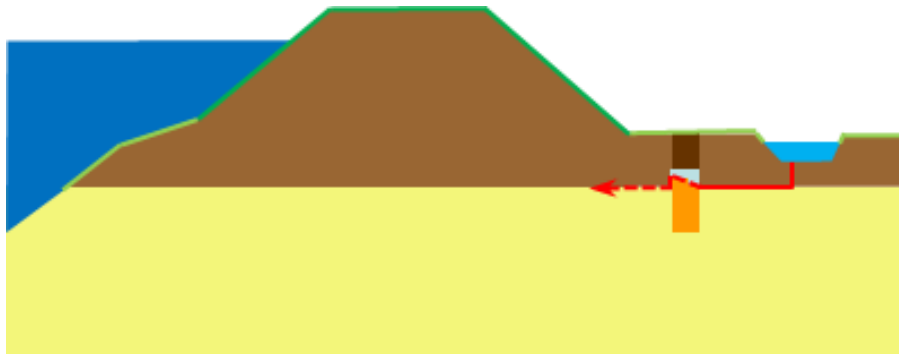
Eenmaal op het niveau van de bovenzijde van de grofzandbarrière aangekomen, zal de pipe nog door de grofzandbarrière heen moeten groeien. Dit betreft dan een situatie die veel weg heeft van de 'vlakke grofzandbarrière', zoals beschreven door Rosenbrand & Van Beek (2020). Een indicatie van de relatieve sterkte (ten opzichte van een grofzandbarrière met inkassing) is te ontleen aan Figuur 202, die is afgeleid voor de medium-schaal laboratoriumproeven met een grofzandbarrière.



Figuur 202 Verband tussen keerbaar verval en doorlatendheidscontrast voor de medium-schaal opstelling, voor zowel een vlakke grofzandbarrière als een grofzandbarrière met een inkassing (Förster, 2021a).

Doorloopseid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorloopseid (zie Figuur 203).

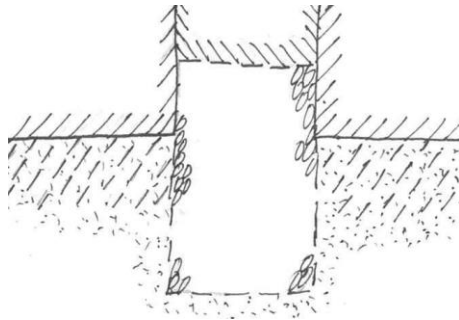


Figuur 203 Doorloopseid.

C.1.22 Pad 22 Geen scherpe grenslaag waardoor hoogte inkassing kleiner is, daardoor sneller falen

O2 Geen scherpe grenslaag tussen de pipinggevoelige zandlaag en de deklaag
In de principe-schetsen over de werking van de grofzandbarrière wordt altijd uitgegaan van een scherpe overgang tussen een deklaag van klei met daaronder een pipinggevoelige zandlaag. Dit komt in de praktijk vaak voor, maar evengoed zijn er situaties waarbij er sprake is van een meer diffuse overgang tussen de slechtdoorlatende deklaag en de pipinggevoelige zandlaag van soms wel meerdere meters hoog. Voor het ontwerp van een grofzandbarrière

kan dan een onjuist niveau worden ingeschat op basis van boorbeschrijvingen en sondeerresultaten. Een dergelijke situatie is geschetst in Figuur 200, waar ten behoeve van deze uitleg een drielagensysteem is geschetst. De middelste laag kan bijvoorbeeld omschreven zijn als 'klei, sterk zandig' en een lage conusweerstand vertonen, terwijl de onderste laag een veel hogere conusweerstand laat zien. Voor het ontwerp kan dan de onderste 'laagovergang' als veilige grenslaag worden gehanteerd ter bepaling van de benodigde diepte van de barrière, terwijl de pipegroei in werkelijkheid mogelijk plaatsvindt op het niveau van de bovenste 'laagovergang'. Dit is van invloed op de keuze van de hoogte van de inkassing (zoals verder de vereiste heavehoogte, de meeton nauwkeurigheden bij het grondonderzoek en bij de uitvoering en de maaton nauwkeurigheden bij de uitvoering hiervoor bepalend zijn).



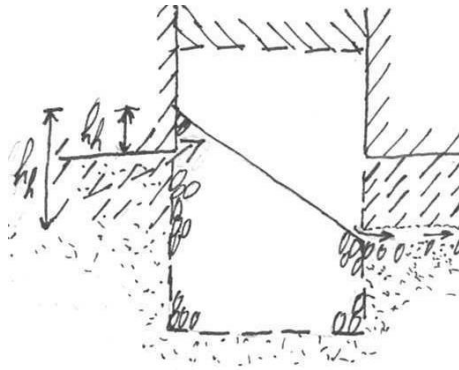
Figuur 204 Drielagensysteem ter illustratie van 'geen scherpe grenslaag'.

Het is ook denkbaar dat bij een diffuse overgang een pipe bovenstrooms op een hoger niveau verdergaat dan het niveau waarop een pipe vanaf het uittredepunt bij de barrière aankomt. Het stromingspatroon in de barrière zelf bevordert overigens een dergelijk vervolg op een hoger niveau (eventueel met een schuin naar beneden verlopende pipe), wat bij scherpe klei-zand overgang nooit zou plaatsvinden.

Er zijn drie meer extreme varianten waar deze situatie toe kan leiden. Deze zijn uitgewerkt in §C.1.4, §C.1.21 en §C.1.32. **De vereiste aandacht ter voorkoming van de hier nader uitgewerkte mogelijkheid zal deze drie meer extreme varianten in de praktijk kunnen uitsluiten.** Het vóórkomen van deze mogelijkheid vereist ten eerste een grondopbouw waarin dergelijke onscherpe overgangen daadwerkelijk voorkómen (op basis van geologische gebiedskennis is dit te detecteren) en ten tweede voorkómen dat hier bij het ontwerp onvoldoende aandacht voor is. Wanneer vanuit de geologie de kans bestaat dat dit voorkomt, zal hier bij ontwerp extra aandacht aan moeten worden besteed, hetgeen ook tot aanvullend grondonderzoek aanleiding kan zijn.

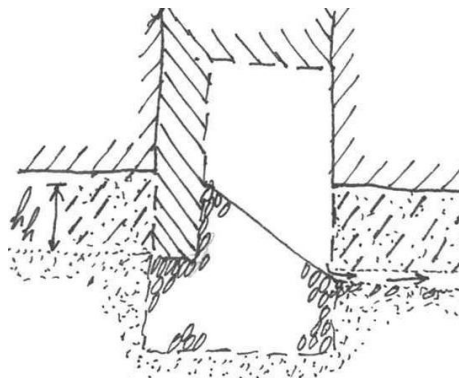
47 Effectieve heavehoogte is kleiner dan aangenomen in ontwerp

Wanneer het pipingproces rond de grenslaag anders verloopt dan aangenomen, dan kan bijvoorbeeld de situatie zoals getoond in Figuur 205 optreden: de benedenstroomse pipe komt op het lage niveau aan, maar de doorlatendheid van de laag daarboven is tóch voldoende om de heavehoogte in werkelijkheid aanmerkelijk kleiner te laten zijn, omdat er voldoende wateraanvoer vanaf het hogere niveau is.



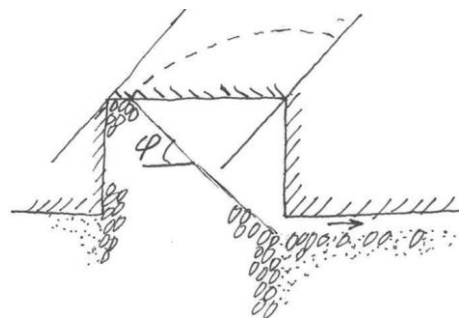
Figuur 205 Verskil in heavehoogte bij verschillend pipe-niveau rond grenslaag.

Een oplossing kan zijn om een bovenstroomse afdichting toe te passen, soms ook wel aangeduid als een 'kleimuurkje': een kleilaag aan de bovenstroomse kant van de grofzandbarrière waarmee de vereiste heavehoogte geforceerd aanwezig zal zijn. Dit is aangegeven in Figuur 206. De functionele eis aan de bovenstroomse afdichting luidt dat zich hierdoorheen geen pipe kan vormen. Een verticaal aaneengesloten kolom van goed verdichte klei van slechts enkele centimeters dikte, zonder doorgaande scheuren, volstaat hiervoor. Zie §E.3.2 voor hoe dit in Gameren praktisch is uitgewerkt, met een afdichting van een halve meter dikte.



Figuur 206 Toepassing van een bovenstroomse afdichting om te kleine heavehoogte bij een onscherpe grenslaag uit te sluiten.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft
 Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfrond mini-amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 207.



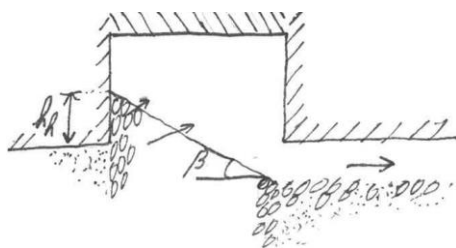
Figuur 207 Uitspoeling van bovendeele barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfitheater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor.

De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 208.



Figuur 208 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

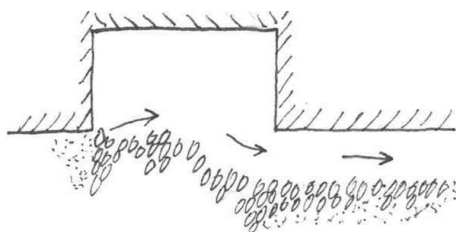
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier korthedshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

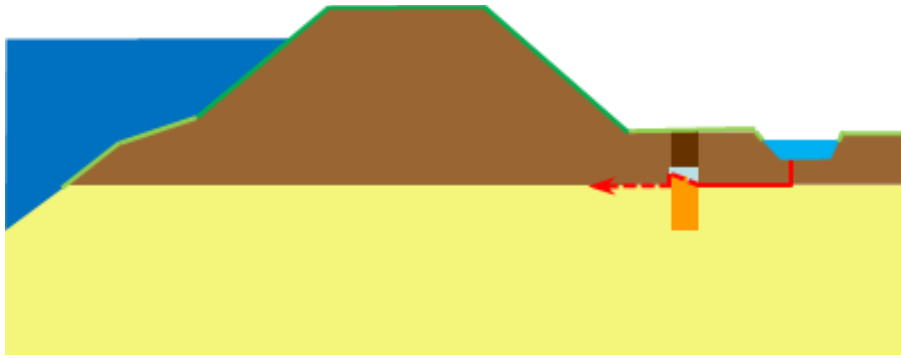
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 209.



Figuur 209 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 210).

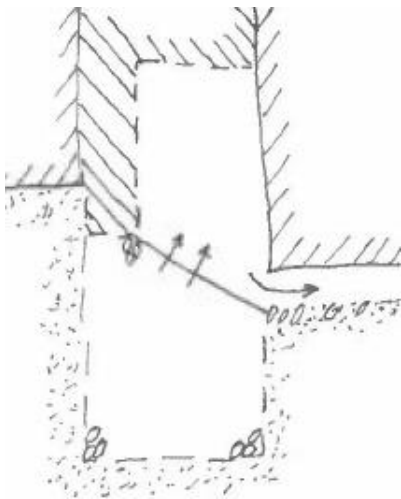


Figuur 210 Doorlooptheid.

C.1.23 Pad 23 Afdichting als aanvullende maatregel bij een dunne barrière is onvoldoende hoog, daardoor sneller falen

O15 Diepte bovenstroomse afdichting is onvoldoende

Wanneer aan de bovenstroomse kant van de grofzandbarrière een bovenstroomse afdichting wordt gerealiseerd om voldoende heavehoogte te garanderen, ook als de grenslaag bovenstrooms op een hoger niveau ligt (zie ook O2 en Figuur 75 in §A.1.1.2), dan moet die bovenstroomse afdichting wel diep genoeg steken. In Figuur 211 is een situatie geschetst waarbij dat duidelijk niet het geval is (de effectieve heavehoogte is nihil), maar ook een kleiner heavehoogte-tekort is mogelijk.



Figuur 211 Te ondiepe aanleg bovenstroomse afdichting.

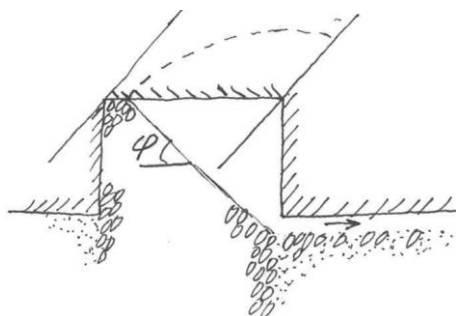
47 Effectieve heavehoogte is kleiner dan aangenomen in ontwerp

Wanneer de heavehoogte kleiner is dan aangenomen in het ontwerp, en vooral wanneer de effectieve heavehoogte kleiner is dan noodzakelijk, dan zal al bij een te laag verval knooppunt 26 (verderop) worden gepasseerd. De voornaamste tegenmaatregel in de ontwerpfase is het alsnog dieper maken van de bovenstroomse afdichting.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft

Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom

een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort half rond mini-amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 212.



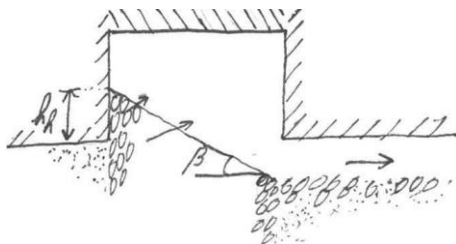
Figuur 212 Uitspoeling van bovendeeel barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrchting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfitheater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor.

De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 213.



Figuur 213 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

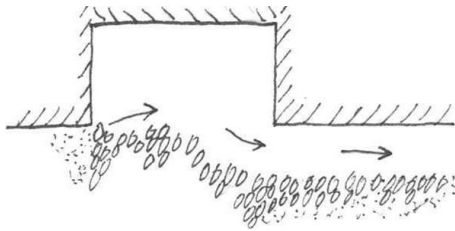
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formules hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier korthedshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

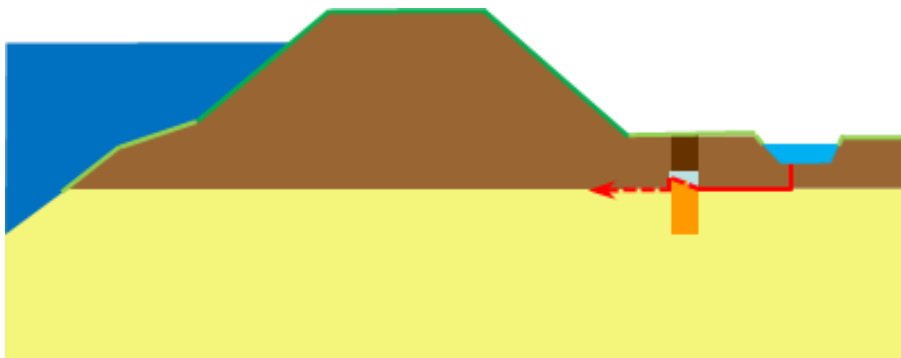
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 214.



Figuur 214 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

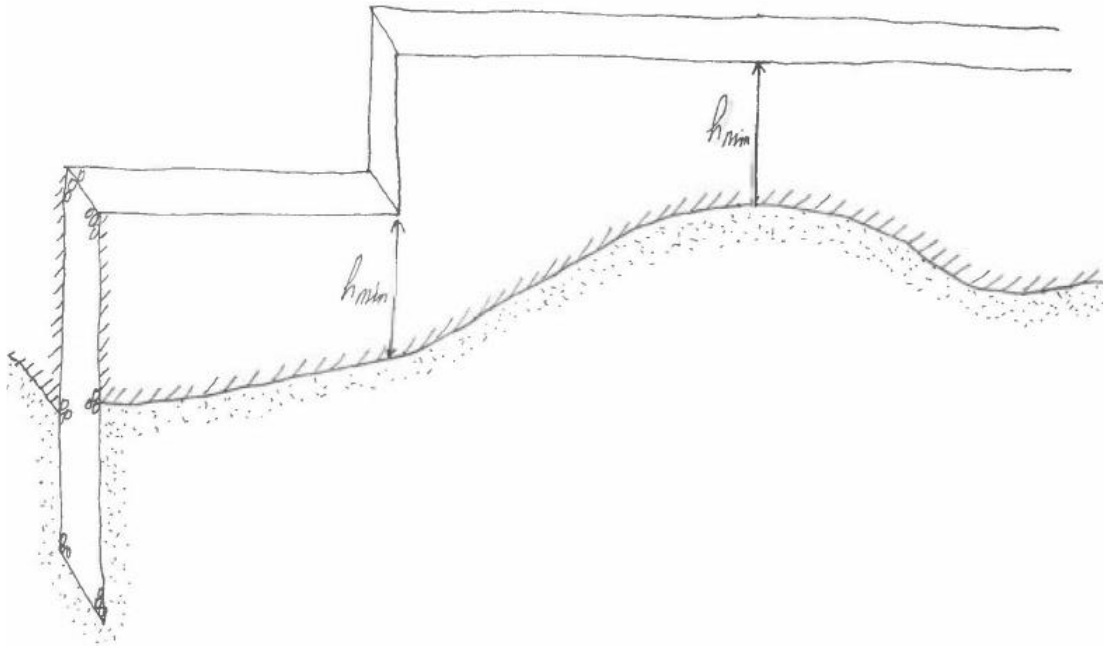
Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 215).



Figuur 215 Doorlooptheid.

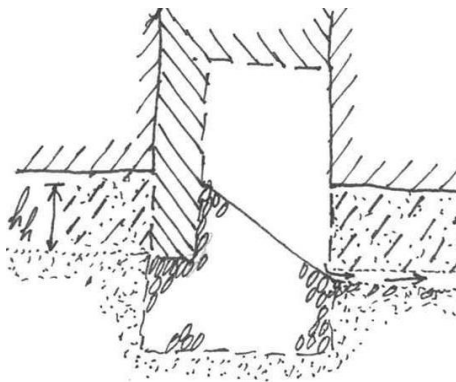
- C.1.24 Pad 24 Grenslaag ligt bovenstrooms hoger, daardoor minder heave-hoogte en sneller falen O12** In hoogteligging variërende grenslaag tussen de pipinggevoelige zandlaag en de deklaag
- De grenslaag tussen de pipinggevoelige zandlaag en de deklaag zal in de praktijk altijd wat in hoogte variëren, zowel in langsrichting van de dijk als dwars daarop. Dit is overigens ook de reden dat een 'vlakke' grofzandbarrière (dus zonder inkassing) in de praktijk niet te realiseren is. Deze problematiek is in Figuur 216 geïllustreerd voor een discontinue aanlegmethode waarbij een minimale hoogte van de inkassing is aangehouden. Merk op dat in deze figuur aan de linkerkant ook in dwarsrichting een aanzienlijke sprong in de hoogteligging is aangegeven.



Figuur 216 In hoogteligging variërende grenslaag.

94j Grenslaag is bovenstrooms WEL hoger dan benedenstrooms
In dit faalpad ligt de grenslaag boven hoger dan benedenstrooms, wat ongunstig is.

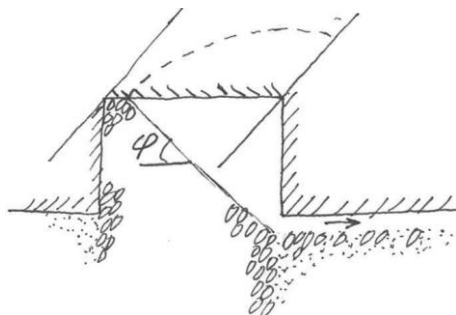
47 Effectieve heavehoogte is kleiner dan aangenomen in ontwerp
Wanneer de grenslaag bovenstrooms hoger ligt dan waar in het ontwerp rekening mee is gehouden, dan kan te snel falen optreden. Een oplossing kan dan zijn om een (diepere) bovenstroomse afdichting toe te passen: een kleilaag aan de bovenstroomse kant van de grofzandbarrière waarmee de vereiste heavehoogte geforceerd aanwezig zal zijn. Dit is aangegeven in Figuur 217. De functionele eis aan de bovenstroomse afdichting luidt dat zich hierdoorheen geen pipe kan vormen. Een verticaal aaneengesloten kolom van goed verdichte klei van slechts enkele centimeters dikte, zonder doorgaande scheuren, volstaat hiervoor. Zie §E.3.2 voor hoe dit in Gameren praktisch is uitgewerkt, met een afdichting van een halve meter dikte.



Figuur 217 Toepassing van een bovenstroomse afdichting om te kleine heavehoogte uit te sluiten.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft
Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het

barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfmond mini-amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 218.



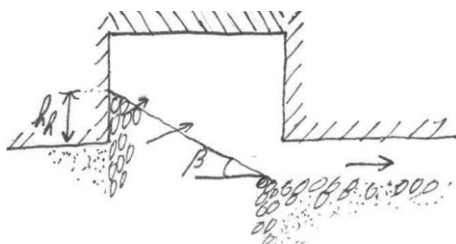
Figuur 218 Uitspoeling van bovendeeel barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfitheater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor.

De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 219.



Figuur 219 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

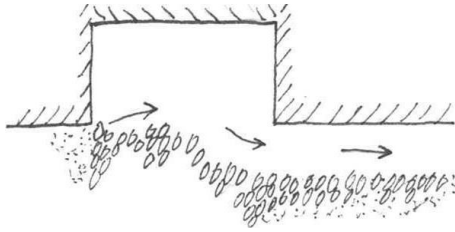
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formules hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier korthedshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

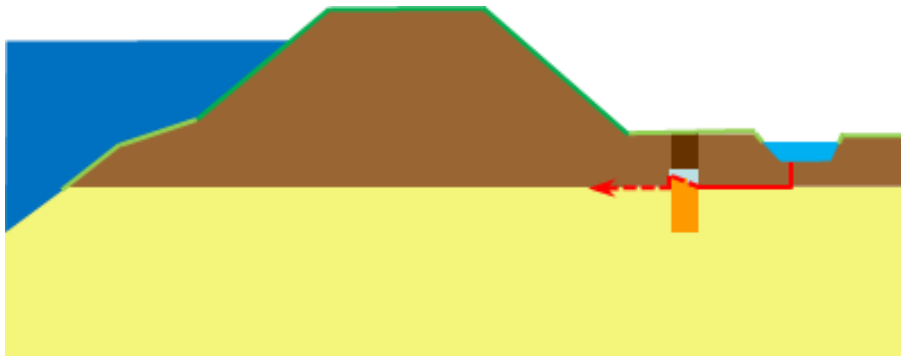
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 220.



Figuur 220 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 221).

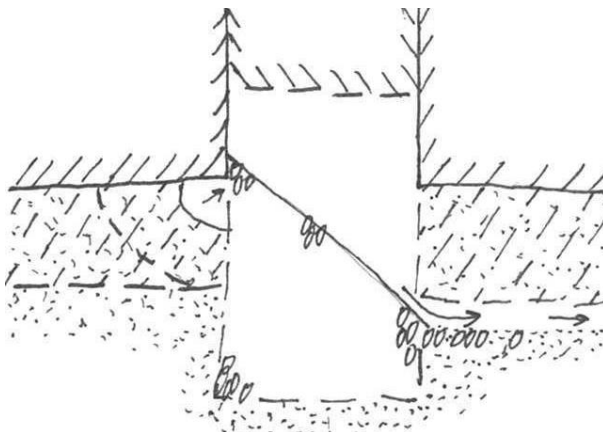


Figuur 221 Doorlooptheid.

C.1.25 Pad 25 Grenslaag bevat veel silt dat doorspoelt en waardoor pipe bovenstrooms hoger verdergaat: daardoor minder heave-hoogte en sneller falen

O6 Grenslaag met veel silt

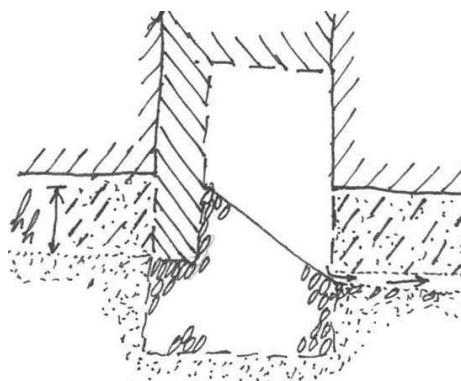
Een grenslaag met veel silt, bijvoorbeeld zoals geïllustreerd in Figuur 158, kan worden gezien als een variant op de situatie zonder scherpe grenslaag (zie §§A.1.2, C.1.4, C.1.21, C.1.22 en C.1.32), hoewel dit ook een gevolg kan zijn van een onjuiste classificatie van de silthoudende laag direct boven de pipinggevoelige zandlaag. In Figuur 222 is aangenomen dat de siltlaag aan de benedenstroomse zijde niet erodeert, maar aan de bovenstroomse zijde zou dan toch een probleem kunnen ontstaan wanneer de samenstelling van de grofzandbarrière niet is afgestemd op de siltlaag: het silt zal door het grove zand heen uitspoelen en de kans bestaat dat er onvoldoende heavehoogte overblijft.



Figuur 222 Mogelijke situatie bij een grenslaag met veel silt, zonder daarop afgestemde grofzandbarrière bij een verval waarbij de inkassing zal leeglopen – ware het niet dat de benedenstroomse pipe niet kan ontstaan.

Wanneer de samenstelling van de grofzandbarrière mede zou moeten worden afgestemd op de siltlagen, dan leidt dit al snel tot een relatief fijne samenstelling van het zand van de grofzandbarrière: uit de eis voor een geometrisch dicht filter (vergelijking (6.2) in §6.2) volgt een lage maximale waarde voor de d_{15} van de grofzandbarrière, namelijk maximaal 5 maal de d_{85} van het achtergrondmateriaal. Daarentegen moet de grofzandbarrière om effectief te zijn over een relatief grote doorlatendheid beschikken, niet alleen ten opzichte van deze siltlagen, maar (vooral) ook ten opzichte van de doorsneden zandlagen, zowel in hetzelfde profiel als in aangrenzende profielen. Dit is tot uitdrukking gebracht in vergelijking (6.4) in §6.2: de d_{15} van de grofzandbarrière moet minimaal 4 maal groter zijn dan de d_{15} van het achtergrondmateriaal. Dit leidt al snel tot onderling onverenigbare eisen.

Wanneer de grofzandbarrière voldoende breed is en de siltlaag voldoende dun, dan is er uiteindelijk geen probleem, zelfs als de siltlaag volledig uitspoelt. Maar bij een dikkere siltlaag en een relatief smalle grofzandbarrière waarbij geen bovenstroomse afdichting is toegepast (zie Figuur 223), dan zou de sterkte van de grofzandbarrière onvoldoende zijn.



Figuur 223 Toepassing van een bovenstroomse afdichting om te kleine heavehoogte bij een onscherpe grenslaag, of bij een siltlaag, uit te sluiten.

Bovenstaande benadering zoomt echter te snel in op de situatie in de dwarsdoorsnede met de grofzandbarrière en de onmiddellijke omgeving daarvan. Belangrijker is daarom de constatering dat de aanwezigheid van een siltlaag niet tot onoverkomelijke problemen leidt, zelfs als de samenstelling van het barrièrezand hier niet op afgestemd wordt, vanwege de effecten die op wat grotere schaal plaatsvinden.

Ten eerste zal in het gedeelte waar de grofzandbarrière een siltlaag passeert, er geen pipegroei plaatsvinden vanuit het achterland tot aan de grofzandbarrière. Een eventuele beginnende pipe zal immers weinig aanvoer van water krijgen vanuit de siltlaag, vanwege de lage doorlatendheid daarvan. Pipegroei onder de siltlaag door, in de zandlaag, is niet mogelijk doordat het niet-cohesieve silt geen stabiel plafond zal vormen boven de pipe, maar in de pipe zal vallen. Doorgroei van de pipe vereist derhalve dat de hele siltlaag boven de pipe, met aan weerszijden een helling onder de hoek van inwendige wrijving ϕ van het silt, zal moeten worden afgevoerd – en gelet op de omvang van de holte die daarmee ontstaat, mogelijk ook de deklaag daarboven. Voordat dit al gebeurt is ontstaan en groei van een pipe in aangrenzende gedeeltes zonder siltlaag veel waarschijnlijker.

Ten tweede vormt de siltlaag geen beletsel voor het functioneren van de grofzandbarrière voor wat betreft de zijdelingse pipegroei in lengterichting van de dijk. Deze zijdelingse pipegroei maakt het mogelijk dat niet alleen op de plaats waar de benedenstroomse pipe bij de grofzandbarrière aankomt, maar ook verderop losse korrels uit de grofzandbarrière in de ontstane holle ruimte direct benedenstrooms van de barrière zullen vallen. Die ruimte wordt daardoor tijdelijk gedeeltelijk opgevuld, maar de vernauwing in combinatie met de blijvende stroming van water door de pipes zal leiden tot voortgaande erosie. Hierbij zullen de grotere

korrels minder ver komen dan de kleinere korrels en treedt ook een soort ingraving van de grotere korrels op: kleinere korrels, al dan niet uit het achtergrondzand, naast en ook onder de grotere korrels eroderen en de moeilijker transporteerbare grotere korrels komen dieper te liggen en vormen zo geleidelijk aan een 'grof plaveisel' aan de onderzijde van de pipes, zoals toegelicht in §5.3.

De korrels die de grofzandbarrière verlaten, leiden in eerste instantie tot een holle ruimte bovenin de inkassing, aan de benedenstroomse zijde van de barrière. Immers, de ruimte die een korrel innam zal worden opgevuld door de korrel(s) erboven. Naarmate er meer zand uit de barrière wordt afgevoerd zal er een helling ontstaan in de grofzandbarrière onder een helling gelijk aan de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand. Onder invloed van de grondwaterstroming door de barrière heen zal deze helling nog wat verder verflauwen.

Door de hiervoor beschreven processen groeien er aan weerszijden van de aansluiting van iedere benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière twee holle ruimtes vrijwel recht boven elkaar (de zijdelingse pipe en de holte bovenin aan de benedenstroomse zijde), die naarmate het proces verder vordert één geheel vormen. Hierdoor wordt de stromingsweerstand in de langsrichting van de barrière, die bij een volledig intacte barrière natuurlijk al laag is, nog veel lager, waardoor de stijghoogte in de barrière in het gedeelte waar de inkassing gedeeltelijk is leeggelopen overal praktisch gelijk wordt.

Wanneer een zijdelingse pipe bij een siltlaag aankomt, dan zal het silt dat direct aan de barrière grenst relatief gemakkelijk eroderen: de niet-cohesieve siltdeeltjes worden immers gemakkelijk meegevoerd. De hiervoor beschreven processen treden dus ongehinderd ook op in en rond een deel van de grofzandbarrière dat in een siltlaag ligt. Wel zal de aanvoer van water van bovenstrooms hier kleiner zijn: de siltlaag is immers relatief slecht doorlatend. Hierdoor zal de hellingshoek in de barrière hier niet veel flauwer worden dan de hoek van inwendige wrijving van het materiaal.

Een ander verschil betreft het gedrag bij dunne obstakels aan de benedenstroomse zijde, zoals een plank of een stuk plastic loodrecht op de grofzandbarrière. Elders zal dit de doorgroei van de zijdelingse pipe doen stoppen, maar bij een siltlaag kan de groei doorgaan, juist doordat de siltdeeltjes door de feitelijk te grof ontworpen grofzandbarrière heen kunnen en er zo als het ware een by-pass kan ontstaan.

In Gameren is in meerdere boringen in het tracé van de grofzandbarrière voor het Definitief Ontwerp een hoog gehalte aan silt aangetroffen (meer dan 15%), direct boven de voor piping maatgevend beschouwde zandlaag. Dit is het geval bij RW 134+040, RW 138+011 en RW 138+066, zie ook bijlage E van deze rapportage en Koelewijn (2021). Dat gevoegd bij de extra grote afstand tussen de holle ruimte in de gedeeltelijk leeggelopen inkassing en de bovenstroomse siltlaag, mede door de aanwezigheid van de bovenstroomse kleirop in het Definitief Ontwerp, zal ertoe leiden dat er geen erosie van de siltlaag bovenstrooms van de barrière plaats zal vinden. NB: zelfs wanneer dit wel zou plaatsvinden, dan zou er uiteindelijk geen piping optreden nadat de siltlaag is geërodeerd, omdat het bovenstroomse zand niet door de grofzandbarrière heen kan, omdat daarvoor weer wél aan de filtereisen wordt voldaan.

De aanwezigheid van een siltige grenslaag vormt uiteindelijk geen probleem, zoals voor de pilottoepassing bij Gameren nader is onderzocht.

28 Doorlaten silt of siltfractie aan bovenstroomse zijde

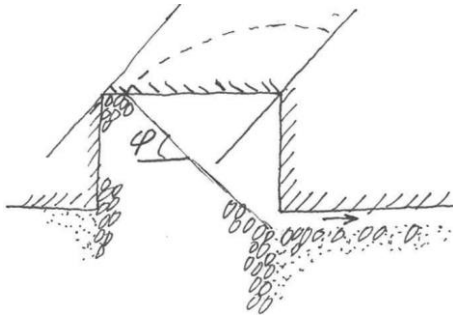
Wanneer de grofzandbarrière niet is afgestemd op de aanwezigheid van silt, dan zal dit bij voldoende stroming door de siltlaag heen leiden tot het doorlaten van het silt, de siltfractie of een deel van de siltfractie.

47 Effectieve heavehoogte is kleiner dan aangenomen in ontwerp

Wanneer de grenslaag bovenstrooms hoger ligt dan waar in het ontwerp rekening mee is gehouden, dan kan te snel falen optreden. Een oplossing kan dan zijn om een (diepere) bovenstroomse afdichting toe te passen: een kleilaag aan de bovenstroomse kant van de grofzandbarrière waarmee de vereiste heavehoogte geforceerd aanwezig zal zijn. Dit is aan

het begin van deze paragraaf al geïllustreerd met Figuur 223. De functionele eis aan de bovenstroomse afdichting luidt dat zich hierdoorheen geen pipe kan vormen. Een verticaal aaneengesloten kolom van goed verdichte klei van slechts enkele centimeters dikte, zonder doorgaande scheuren, volstaat hiervoor. Zie §E.3.2 voor hoe dit in Gameren praktisch is uitgewerkt, met een afdichting van een halve meter dikte.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft. Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfrond mini-amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 224.

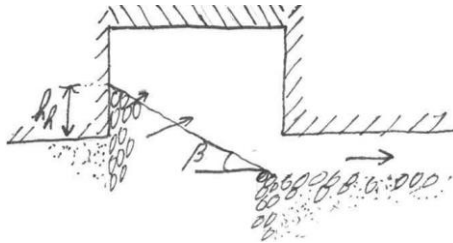


Figuur 224 Uitspoeling van bovendeele barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfitheater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor. De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 225.



Figuur 225 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

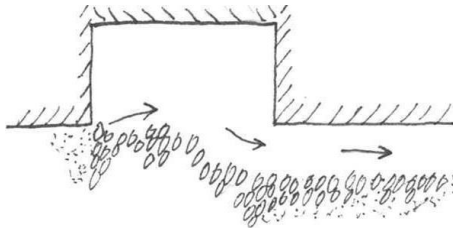
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier kortheidshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

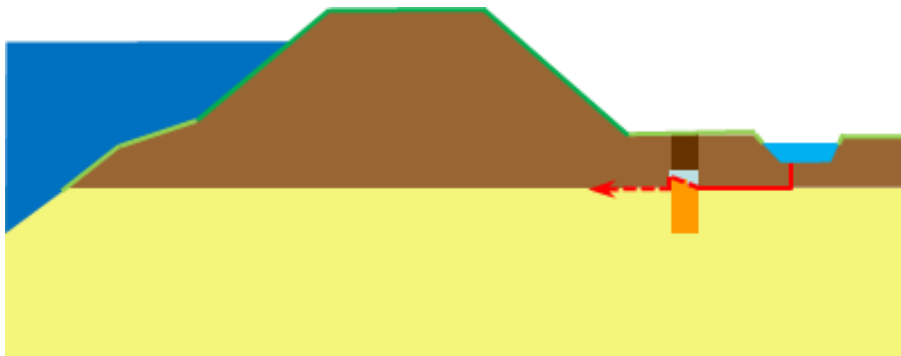
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 226.



Figuur 226 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 227).



Figuur 227 Doorlooptheid.

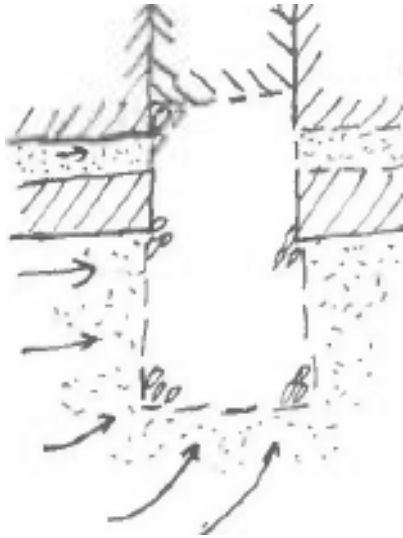
C.1.26

Pad 26 Tussenzandlaag bovenstrooms van barrière leidt tot extra erosie bij doorlooptheid

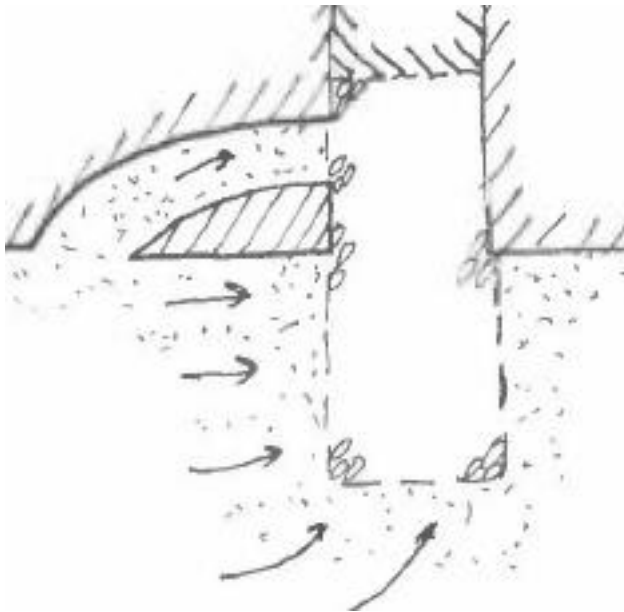
O16 Tussenzandlaag direct bovenstrooms van de barrière

De pipinggevoelige zandlaag hoeft ter plaatse van de grofzandbarrière niet de hoogstliggende zandlaag te zijn. Daarboven kunnen nog andere zandlagen liggen die voor piping niet maatgevend zijn, bijvoorbeeld door de geringe dikte of een lagere doorlatendheid. Een dergelijke tussenzandlaag kan wel zorgen voor een aanvullende hydraulische belasting zorgen, bijvoorbeeld bij de configuratie zoals geschetst in Figuur 228. Dit is nog sterker het

geval bij een configuratie die lijkt op de situatie in Figuur 229, omdat er dan sprake kan zijn van een sterkere aanvoer van water naar de grofzandbarrière.



Figuur 228 Aansluiting van een tussenzandlaag op de inkassing van een grofzandbarrière.



Figuur 229 Tussenzandlaag in contact met de pipinggevoelige zandlaag bovenstrooms van de aansluiting op een grofzandbarrière.

Bij het grondonderzoek moet gekeken worden naar de eventuele aanwezigheid van tussenzandlagen, met name lagen die direct kunnen aansluiten op de inkassing van de grofzandbarrière. Met de aanvullende toestroming moet rekening worden gehouden, tenzij deze door toepassing van een bovenstroomse afdichting kan worden uitgesloten.

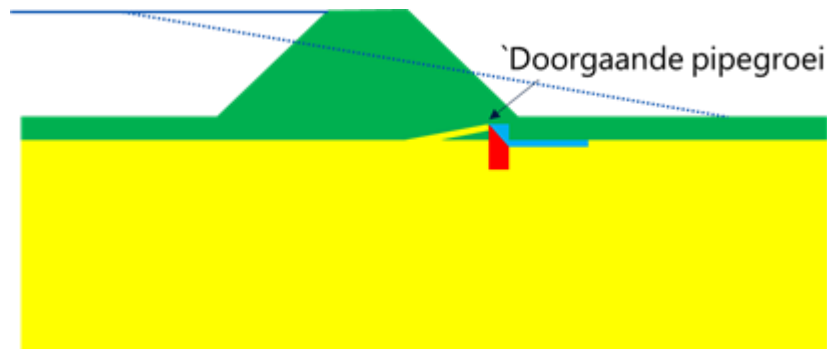
48 Aanstroming door tussenzandlaag is voldoende voor erosie

NB: deze knoop staat te vroeg – een betere positie zou zijn ná het ontstaan van de helling (knoop 38), of na afname van de hellingshoek (knoop 37), of als directe bijdrage aan de instabiliteit van de kritieke helling (knoop 26). Dit zou de overzichtelijkheid van de figuur met de foutenboom (§B.4) echter danig hebben verstoord, daarom is hier niet voor gekozen.

Wanneer de aanstroming door de tussenzandlaag voldoende is om tot erosie te leiden, hetzij in de inkassing van de grofzandbarrière onder het niveau van de helling, hetzij in de

tussenzandlaag zelf, met name wanneer deze boven de helling uitsteekt, dan kunnen problemen ontstaan. Echter, als de tussenzandlaag wordt afgesloten door een bovenstroomse afdichting, dan wordt dit faalpad effectief uitgesloten.

Voor Gameren is er gerekend met een tussenzandlaag die aansluit aan de bovenkant van de helling, zie Figuur 230. Dit is dus de meest ongunstige configuratie, in werkelijkheid is het onzeker of de tussenzandlaag wel ergens contact maakt met de zandlaag daaronder.



Figuur 230 Schematisering van een tussenzandlaag voor de situatie in Gameren (Förster, 2021c).

Voor de tussenzandlaag zijn twee berekeningen uitgevoerd: eerst met een tien maal lagere doorlatendheid dan voor de pipinggevoelige zandlaag, conform Koelewijn et al. (2021). Dit vanwege de fijnere samenstelling van deze tussenzandlaag. Daarna is een berekening gemaakt met dezelfde doorlatendheid als voor de pipinggevoelige zandlaag.

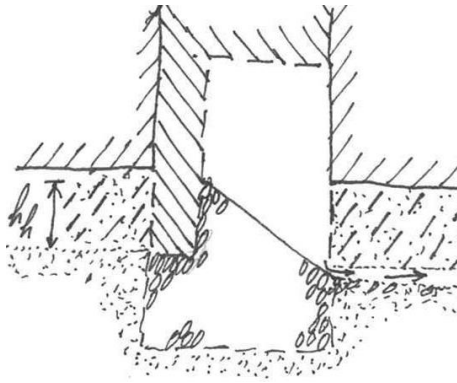
Uit de eerste, meest realistische berekening, uitgaande van verbondenheid van beide zandlagen op een ongelukkige locatie, volgt dat het debiet slechts verwaarloosbaar toeneemt (maximaal in de orde van een tiende procent), terwijl de uittredesnelheid niet meer is dan 5×10^{-4} m/s, te laag om tot erosie te leiden. Uit de tweede som volgt een ruim 20 maal groter debiet, hetgeen nog steeds niet meer dan ongeveer een procent van het totale debiet bedraagt. De maximale stroomsnelheid neemt toe tot 0,012 m/s (Förster, 2021b). Bij deze omstandigheden, die minder realistisch lijken, is wel enige erosie mogelijk van fijn zand uit de tussenzandlaag, mits die boven het grove zand uitkomt.

Al met al mag voor deze pilotlocatie de kans vrij klein worden geacht dat dit invloed heeft, als er géén bovenstroomse afdichting zou worden toegepast. Mét bovenstroomse afdichting wordt deze lekweg effectief afgesloten.

47 Effectieve heavehoogte is kleiner dan aangenomen in ontwerp

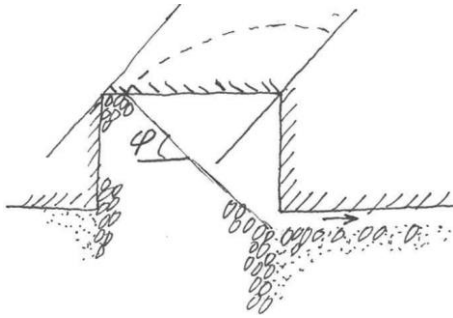
Door een tussenzandlaag kan de effectieve heavehoogte kleiner uitpakken: water kan dan immers op een hoger niveau binnenkomen.

Een oplossing kan dan zijn om een (diepere) bovenstroomse afdichting toe te passen: een kleilaag aan de bovenstroomse kant van de grofzandbarrière waarmee de vereiste heavehoogte geforceerd aanwezig zal zijn. Dit is geïllustreerd in Figuur 231. De functionele eis aan de bovenstroomse afdichting luidt dat zich hierdoorheen geen pipe kan vormen. Een verticaal aaneengesloten kolom van goed verdichte klei van slechts enkele centimeters dikte, zonder doorgaande scheuren, volstaat hiervoor. Zie §E.3.2 voor hoe dit in Gameren praktisch is uitgewerkt, met een afdichting van een halve meter dikte.



Figuur 231 Toepassing van een bovenstroomse afdichting om te kleine heavehoogte uit te sluiten.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft. Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfrond mini-amfiteater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 232.

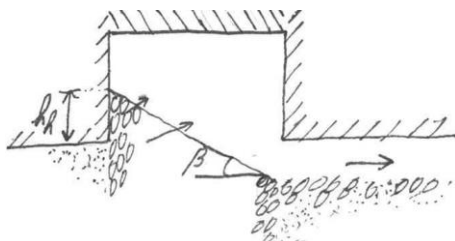


Figuur 232 Uitspoeling van bovendeel barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfiteater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor. De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 233.



Figuur 233 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

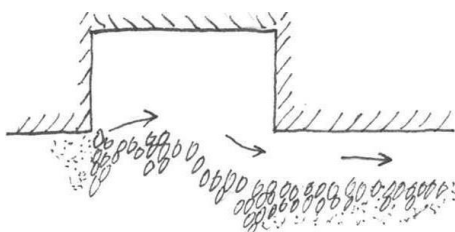
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier kortheidshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

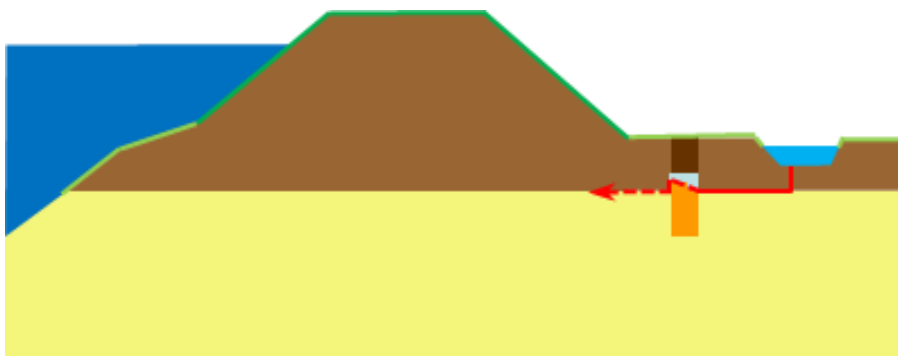
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 234.



Figuur 234 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 235).



Figuur 235 Doorlooptheid.

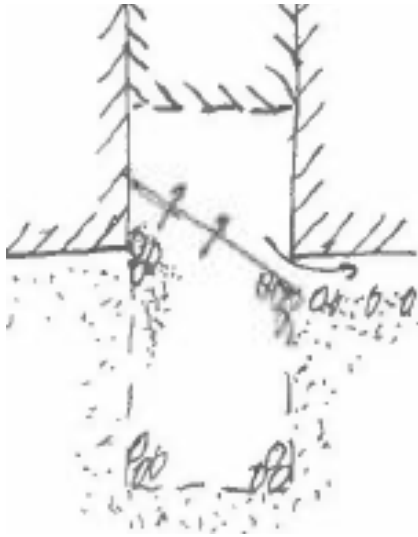
C.1.27

Pad 27 Barrière raakt door cakevorming aan bovenstroomse rand en onderrand verstopt

O17 Cakevorming door uitspoeling van fijne fractie uit achtergrondzand in bovenstroomse zijde barrière

Bij kleinschalige proeven met de grofzandbarrière bleek soms enige inspoeling van de fijne fractie uit het bovenstroomse zand plaats te vinden, ondanks dat aan de eisen aan interne stabiliteit van Kenney & Lau (zie O3, §A.1.1.3) werd voldaan (maar niet aan één van de beide

criteria van Burenkova). Ietwat verrassend bleef dit materiaal wel steken nabij de bovenstroomse rand van de grofzandbarrière (zie Figuur 236), waardoor er lokaal in beperkte mate een verlaagde doorlatendheid optrad. Hierdoor ontstond er binnen de grofzandbarrière een gunstiger gradiëntverdeling. Dit leidde daardoor tot extra sterkte. Dit is een positief effect, waar echter in het algemeen niet van kan worden uitgegaan dat het zal optreden.



Figuur 236 Cakevorming in de grofzandbarrière

Het is theoretisch denkbaar dat deze cakevorming verder doorzet, wat echter zeer onwaarschijnlijk mag worden geacht – het verschijnsel is in feite immers gelijk aan mechanische verstopping, dat in het veld niet op voldoende grote schaal kan optreden – ook in lengterichting van de dijk – om daadwerkelijk invloed te hebben – zie hiervoor §A.3.7 over verstopping in het algemeen.

Hier wordt voor de volledigheid het faalpad verder afgelopen, maar de kans van optreden mag dus verwaarloosbaar worden geacht.

51* Barrière wordt aan de bovenstroomse rand slechtdoorlatend

Door de cakevorming wordt de barrière aan de bovenstroomse rand, binnen het grove zand, slechtdoorlatend.

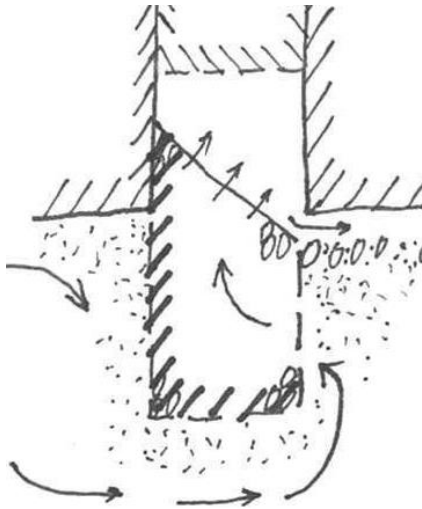
50* Barrière wordt ook aan de onderrand slechtdoorlatend

Het proces van cakevorming zet zich ook voort totdat de onderrand slechtdoorlatend is geworden. Zie faalpad 28 in §C.1.28 voor wanneer dit niet gebeurt.

97n Barrière wordt NIET ook benedenstrooms slechtdoorlatend

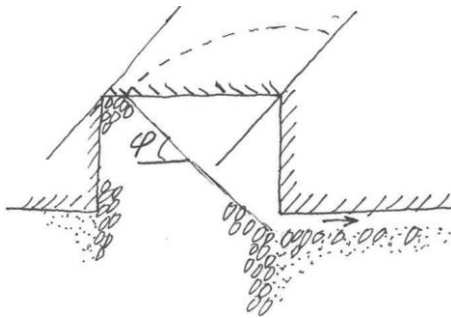
De barrière wordt niet ook nog aan de benedenstroomse rand slechtdoorlatend. Zie faalpad 33 in §C.1.33 voor als dit wel gebeurt.

49 Waterstroming gaat via onderzijde/benedenstrooms onderaan alsnog de barrière in
Zoals geschetst in Figuur 237 zal de stroming nabij de onderzijde, aan de benedenstroomse kant vervolgens alsnog de barrière in stromen, waarna grotendeels de bekende processen zich zullen afspelen.



Figuur 237 Stromingspatroon bij grofzandbarrière na verstopping aan bovenstroomse zijde en onderzijde, na gedeeltelijk leegstromen van de inkassing.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft. Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfronde mini-amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 238.



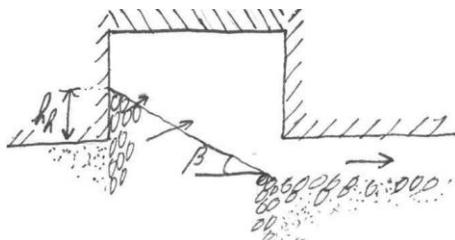
Figuur 238 Uitspoeling van bovendeele barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfitheater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor.

De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 239.



Figuur 239 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

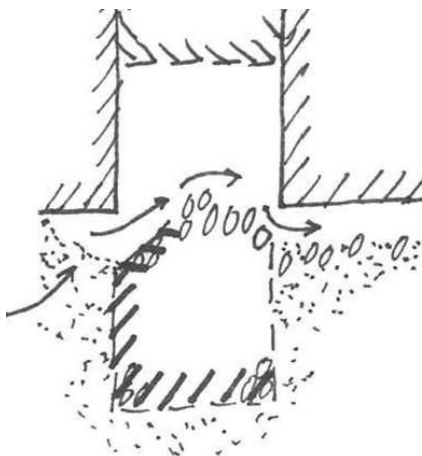
26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier kortheidshalve niet herhaald.

Het feit dat er bij dit faalpad geen of amper water kan instromen via de bovenstroomse rand en de onderrand van de grofzandbarrière leidt er wel toe dat de kritieke gradiënt pas bij een hoger verval over de waterkering zal optreden. De gedeeltelijke verstopping heeft daardoor een positief effect.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

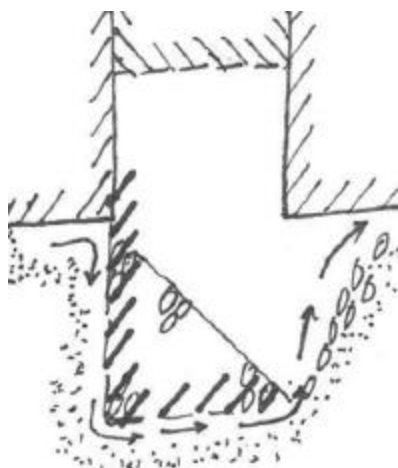
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, waarbij in dit geval uiteindelijk een breuk zal optreden in de verstopte bovenstroomse rand, zie Figuur 240.



Figuur 240 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld bij een situatie met extreme cakevorming of andersoortige verstopping.

NB: wanneer de verstopte bovenstroomse rand uiteindelijk niet zou breken, dan zou er een vorm van onderloopsheid ontstaan zoals geschetst in Figuur 241, of waarschijnlijker nog:

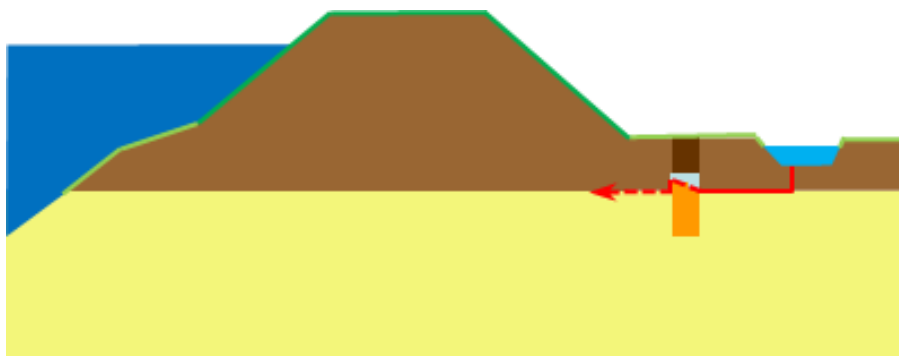
verticale heave direct achter de verstopte rand, met aan weerszijden van het heavekanaal nog korrels. Dit wordt onwaarschijnlijk geacht. Eveneens onwaarschijnlijk, maar hier wel nader uitgewerkt, zijn een andere variant waarbij onderloopsheid ontstaat (zie faalpad 33 in §C.1.33) en een variant met voorloopsheid (zie faalpad 34 in §C.1.34).



Figuur 241 Onderloopsheid na verstopping van de bovenstroomse rand en de onderrand van de grofzandbarrière.

Doorloopsheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorloopsheid (zie Figuur 242).

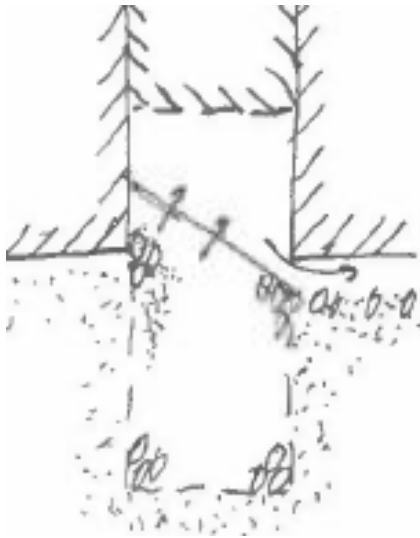


Figuur 242 Doorloopsheid.

C.1.28 Pad 28 Barrière raakt door cakevorming aan alleen de bovenstroomse rand verstopt

O17 Cakevorming door uitspoeling van fijne fractie uit achtergrondzand in bovenstroomse zijde barrière

Bij kleinschalige proeven met de grofzandbarrière bleek soms enige inspoeling van de fijne fractie uit het bovenstroomse zand plaats te vinden, ondanks dat aan de eisen aan interne stabiliteit van Kenney & Lau (zie O3, §A.1.1.3) werd voldaan (maar niet aan één van de beide criteria van Burenkova). Ietwat verrassend bleef dit materiaal wel steken nabij de bovenstroomse rand van de grofzandbarrière (zie Figuur 243), waardoor er lokaal in beperkte mate een verlaagde doorlatendheid optrad. Hierdoor ontstond er binnen de grofzandbarrière een gunstiger gradiëntverdeling. Dit leidde daardoor tot extra sterkte. Dit is een positief effect, waar echter in het algemeen niet van kan worden uitgegaan dat het zal optreden.



Figuur 243 Cakevorming in de grofzandbarrière

Het is theoretisch denkbaar dat deze cakevorming verder doorzet, wat echter zeer onwaarschijnlijk mag worden geacht – het verschijnsel is in feite immers gelijk aan mechanische verstopping, dat in het veld niet op voldoende grote schaal kan optreden – ook in lengterichting van de dijk – om daadwerkelijk invloed te hebben – zie hiervoor §A.3.7 over verstopping in het algemeen.

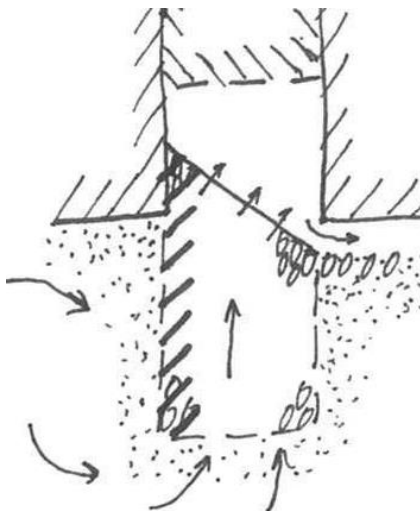
Hier wordt voor de volledigheid het faalpad verder afgelopen, maar de kans van optreden mag dus verwaarloosbaar worden geacht.

51* Barrière wordt aan de bovenstroomse rand slechtdoorlatend

Door de cakevorming wordt de barrière aan de bovenstroomse rand, binnen het grove zand, slechtdoorlatend.

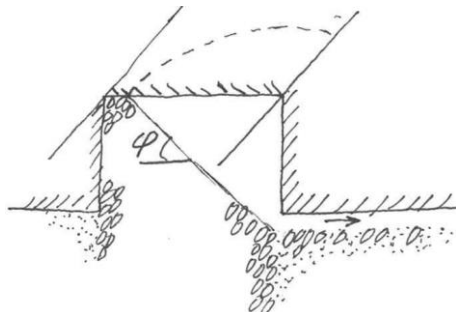
Echter, niet ook nog aan de onderrand (zie faalpad 27 in §C.1.27) en aan de benedenstroomse rand (zie faalpad 33 in §C.1.33). Zie faalpad 34 in §C.1.34 voor de situatie waarbij dit leidt tot opbarsten en heave bovenstrooms (voorloopsheid).

49 Waterstroming gaat via onderzijde/benedenstrooms onderaan alsnog de barrière in. Zoals geschetst in Figuur 244 zal de stroming aan de onderzijde vervolgens alsnog de barrière in stromen, waarna grotendeels de bekende processen zich zullen afspelen.



Figuur 244 Stromingspatroon bij grofzandbarrière na verstopping aan bovenstroomse zijde, na gedeeltelijk leegstromen van de inkassing.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft
 Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfrond mini-amfiteater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 245.

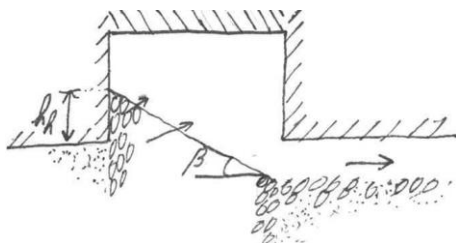


Figuur 245 Uitspoeling van bovendeel barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrchting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uitredpunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfiteater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor. De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 246.



Figuur 246 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

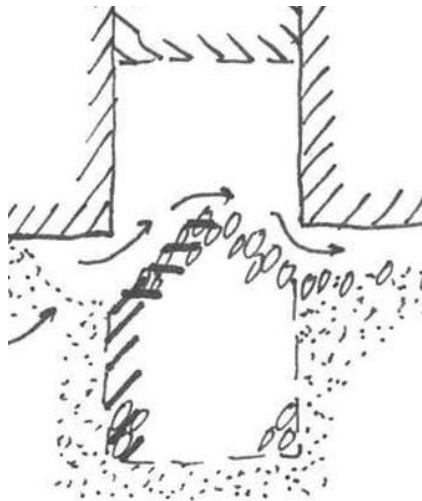
26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier kortheidshalve niet herhaald.

Het feit dat er bij dit faalpad geen of amper water kan instromen via de bovenstroomse rand van de grofzandbarrière leidt er wel toe dat de kritieke gradiënt pas bij een hoger verval over de waterkering zal optreden. De gedeeltelijke verstopping heeft daardoor een positief effect.

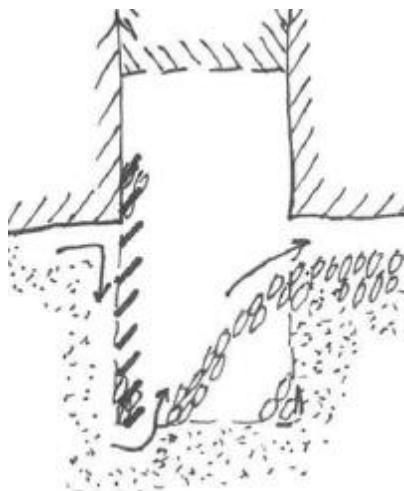
20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, waarbij in dit geval uiteindelijk een breuk zal optreden in de verstopte bovenstroomse rand, zie Figuur 247.



Figuur 247 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld bij een situatie met extreme cakevorming of andersoortige verstopping.

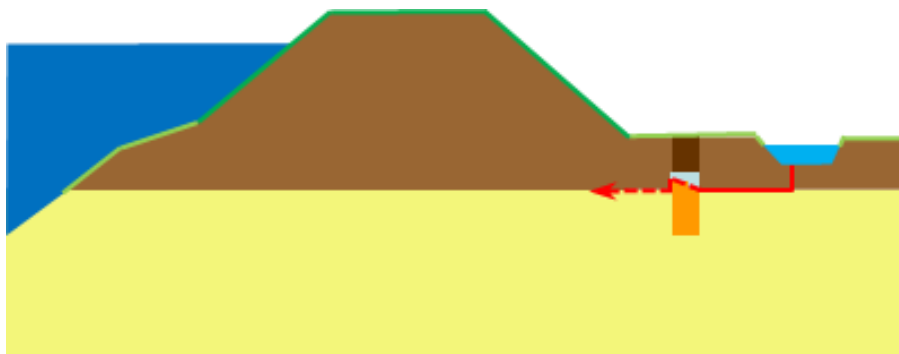
NB: wanneer de verstopte bovenstroomse rand uiteindelijk niet zou breken, dan zou er een vorm van onderloopsheid ontstaan zoals geschetst in Figuur 248, of waarschijnlijker nog: verticale heave direct achter de verstopte rand. Dit wordt onwaarschijnlijk geacht. Eveneens onwaarschijnlijk, maar hier wel nader uitgewerkt, zijn een andere variant waarbij onderloopsheid ontstaat (zie faalpad 33 in §C.1.33) en een variant met voorloopsheid (zie faalpad 34 in §C.1.34).



Figuur 248 Onderloopsheid na verstopping van de bovenstroomse rand van de grofzandbarrière.

Doorloopsheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorloopsheid (zie Figuur 249).

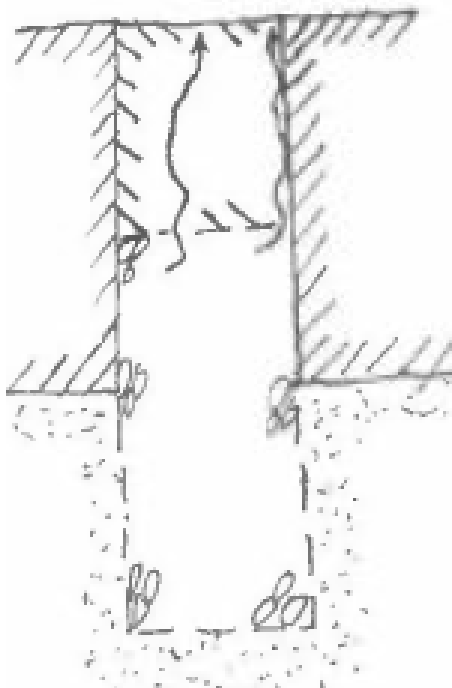


Figuur 249 Doorloopsheid.

C.1.29 Pad 29 Kleiaanvulling in sleuf leidt tot drainage, erosie tot bezwijken sleufaanvulling

O18 Drainage via aanvulling boven barrière

Wanneer er drainage mogelijk is via de aanvulling boven de barrière, dan kan hierdoor bovenloopsheid ontstaan, zie Figuur 250. Dit leidt tot kwelstroming aan het maaiveld, mits de stijghoogte in de barrière minimaal tot aan het maaiveld reikt. Zodra een benedenstroomse pipe de grofzandbarrière heeft bereikt, zal de stijghoogte over het algemeen aanzienlijk afnemen, hetgeen de eventuele kwel weer zal doen verminderen of stoppen.



Figuur 250 Drainage door de kleiaanvulling.

Als tegenmaatregel kan de eerste 30 tot 50 cm aanvulling boven de grofzandbarrière uit erosiebestendige klei bestaan die in lagen goed wordt verdicht. Daarboven kan willekeurig aanvulmateriaal worden toegepast, bijvoorbeeld materiaal dat bij de aanleg van de sleuf is vrijgekomen.

61 Sleufaanvulling bezwijkt

De volgende stap is dat de sleufaanvulling bezwijkt, dat wil zeggen: geen volledige afsluiting meer vormt tussen barrièrezand en maaiveld. Dit kan gebeuren als de sleufaanvulling van onderaf erodeert. Voor de veiligheid zal moeten worden getoetst of er geen kwelstroom bovenlangs kan ontstaan die tot verdere erosie leidt. Als er geen erosie optreedt, dan is er hooguit sprake van enige wateroverlast indien de stijghoogte in de barrière boven het maaiveld reikt. Door toepassing van een erosiebestendige kleilaag direct bovenop het barrièrezand is dit in belangrijke mate te voorkomen.

60 Opbarsten en heave van de sleuf

De vorige stap leidt, bij voldoende stromingsdruk, vervolgens tot heave van de sleuf, na eventueel opbarsten.

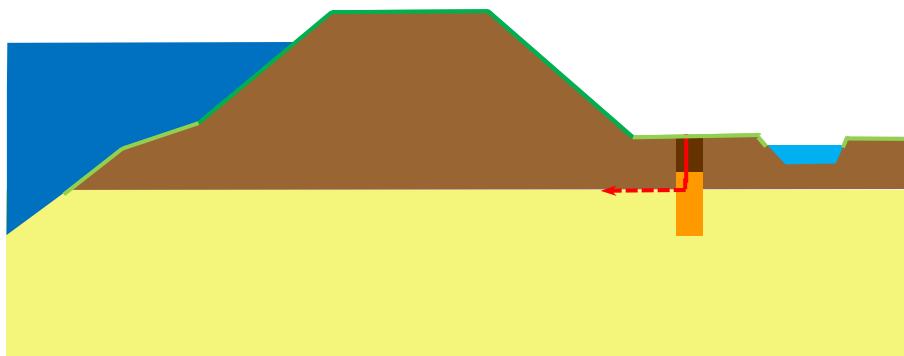
59 Pipe ontwikkelt zich door de sleuf naar het maaiveld

Hierna ontwikkelt de pipe zich via de sleuf naar het maaiveld.

Bij deze oorzaak en het hiervoor beschreven faalpad zal op dit punt in één of meer doorsneden overigens een geheel open verbinding zijn ontstaan tussen het oorspronkelijke uittredepunt en de sleuf.

Bovenloopsheid

*Er ontstaat kortsluiting naar het maaiveld via de afdichting boven de grofzandbarrière (zie Figuur 251). Er is dan sprake van een kwelstroom via de sleuf. Dit leidt echter niet direct tot falen: de barrière biedt nog steeds weerstand. **Bovenloopsheid impliceert dus nog géén falen.** Wel zal de totale weerstand benedenstrooms (als in: stroomafwaarts) van de eigenlijke grofzandbarrière verkleind zijn (tenzij de bovenkant van de sleuf zo hoog ligt dat er uiteindelijk geen kwelstroming optreedt, doordat de stijghoogte ter plaatse lager is dan het maaiveld).*



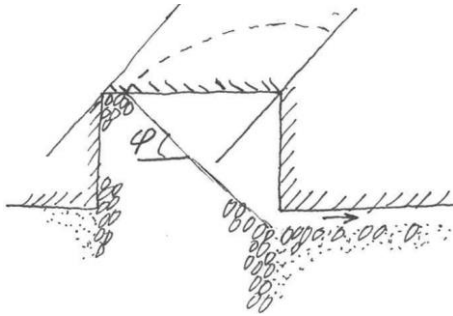
Figuur 251 Bovenloopsheid.

Er treedt dan een herverdeling op van de waterdrukken, waarbij het gedeelte benedenstrooms van de eigenlijke grofzandbarrière (dus: de benedenstroomse pipe(s) en de sleuf samen) een kleiner deel van het verval keren, wat dan gecompenseerd zal moeten worden door het verval over de eigenlijke grofzandbarrière en het achtergrondzand bovenstrooms van de grofzandbarrière samen. De toename van het verval over de eigenlijke grofzandbarrière zelf zal relatief gering zijn: het grootste deel van het verval zal nog steeds worden opgenomen door het gedeelte bovenstrooms van de grofzandbarrière. Om tot falen van de waterkering te komen is nog steeds een reeks van stappen nodig die via doorloopsheid uiteindelijk leidt tot inundatie; hierna zijn de stappen tot aan doorloopsheid beschreven.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft

Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende

zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfronde mini-amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 252.



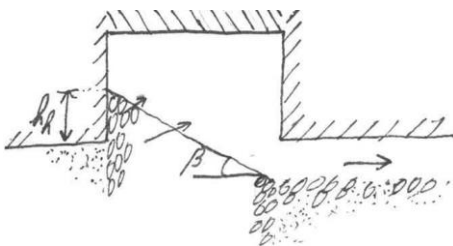
Figuur 252 Uitspoeling van bovendeel barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfitheater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor.

De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 253.



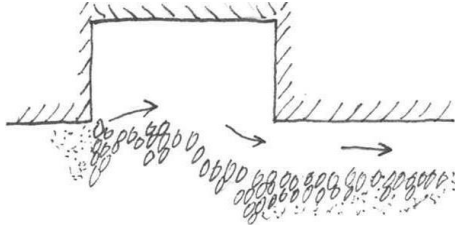
Figuur 253 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand
Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier kortheidshalve niet herhaald.

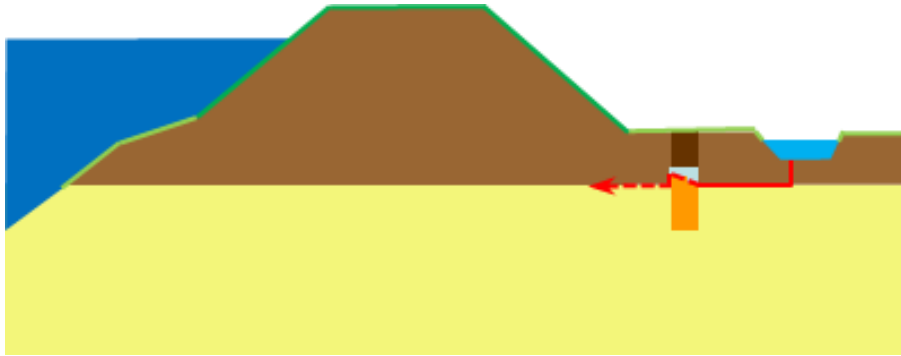
20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 254.



Figuur 254 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 255).



Figuur 255 Doorlooptheid.

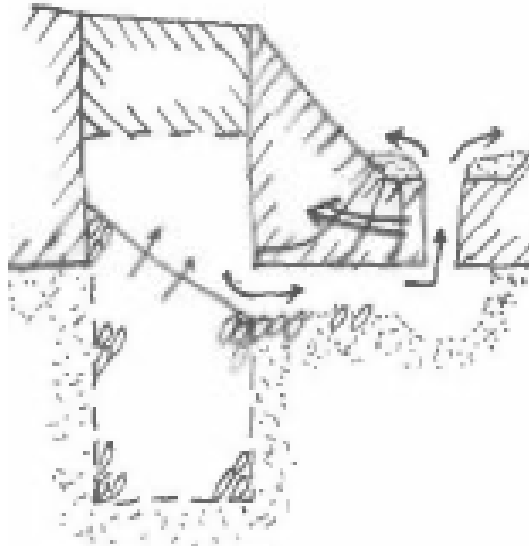
C.1.30 Pad 30 Nabijheid van uittredepunt leidt tot aanvullende problemen

O7 Afstand van barrière tot uittredepunt is klein

De nabijheid van het uittredepunt kan leiden tot aanvullende problemen, doordat verschillende erosieprocessen met elkaar gaan interfereren.

63 Erosie deklaag nabij barrière

De deklaag erodeert, bijvoorbeeld in de volgorde zoals aangeven in Figuur 256: eerst bij het uittredepunt (dat hierdoor in bovenstroomse richting opschuift), daarna ook langs de onderkant van de deklaag. Vanwege de korte afstand tot de barrière betreft dit allebei 'erosie nabij barrière'.



Figuur 256 Erosie deklaag bij een uittredepunt nabij de grofzandbarrière.

62 Erosie van klei uit aanvulling

Hierna kan de klei uit de sleufaanvulling eroderen (bij andere oorzaken kan dat overigens ook zonder dat de deklaag benedenstrooms verdwenen is).

61 Sleufaanvulling bezwijkt

De volgende stap is dat de sleufaanvulling bezwijkt, dat wil zeggen: geen volledige afsluiting meer vormt tussen barrièrezand en maaiveld. Dit kan gebeuren als de sleufaanvulling van onderaf verder erodeert. Voor de veiligheid zal moeten worden getoetst of er geen kwelstroom bovenlangs kan ontstaan die tot verdere erosie leidt. Als er geen erosie optreedt, dan is er hooguit sprake van enige wateroverlast indien de stijghoogte in de barrière boven het maaiveld reikt. Door toepassing van een erosiebestendige kleilaag direct bovenop het barrièrezand is dit in belangrijke mate te voorkomen.

Het bezwijken van de sleufaanvulling kan zich ook voordoen in de vorm van opbarsten, waarbij de waterdruk van onderaf de sleufaanvulling doet bezwijken. Dit kan optreden ondanks dat de sleufaanvulling op opbarsten ontworpen is, als gevolg van de erosie van onderaf. Dan valt dit feitelijk onder het volgende punt.

60 Opbarsten en heave van de sleuf

De vorige stap leidt, bij voldoende stromingsdruk, vervolgens tot heave van de sleuf, na eventueel opbarsten.

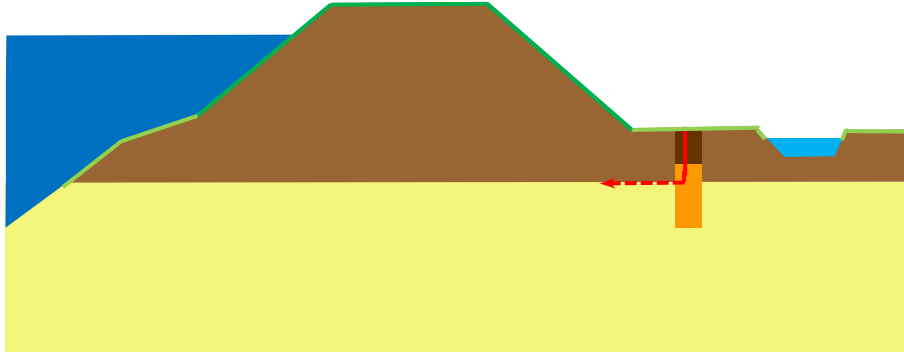
59 Pipe ontwikkelt zich door de sleuf naar het maaiveld

Hierna ontwikkelt de pipe zich via de sleuf naar het maaiveld.

Bij deze oorzaak en het hiervoor beschreven faalpad zal op dit punt in één of meer doorsneden overigens een geheel open verbinding zijn ontstaan tussen het oorspronkelijke uittredepunt en de sleuf.

Bovenloopsheid

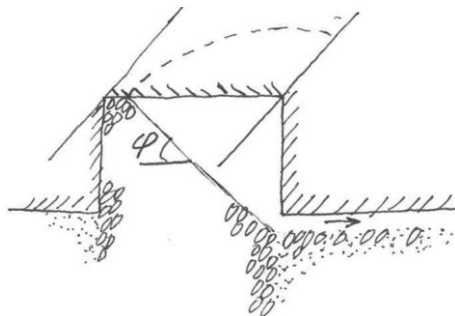
*Er ontstaat kortsluiting naar het maaiveld via de afdichting boven de grofzandbarrière (zie Figuur 257). Er is dan sprake van een kwelstroom via de sleuf. Dit leidt echter niet direct tot falen: de barrière biedt nog steeds weerstand. **Bovenloopsheid impliceert dus nog géén falen.** Wel zal de totale weerstand benedenstrooms (als in: stroomafwaarts) van de eigenlijke grofzandbarrière verkleind zijn (tenzij de bovenkant van de sleuf zo hoog ligt dat er uiteindelijk geen kwelstroming optreedt, doordat de stijghoogte ter plaatse lager is dan het maaiveld).*



Figuur 257 Bovenloopsheid.

Er treedt dan een herverdeling op van de waterdrukken, waarbij het gedeelte benedenstrooms van de eigenlijke grofzandbarrière (dus: de benedenstroomse pipe(s) en de sleuf samen) een kleiner deel van het verval keren, wat dan gecompenseerd zal moeten worden door het verval over de eigenlijke grofzandbarrière en het achtergrondzand bovenstrooms van de grofzandbarrière samen. De toename van het verval over de eigenlijke grofzandbarrière zelf zal relatief gering zijn: het grootste deel van het verval zal nog steeds worden opgenomen door het gedeelte bovenstrooms van de grofzandbarrière. Om tot falen van de waterkering te komen is nog steeds een reeks van stappen nodig die via doorloopsheid uiteindelijk leidt tot inundatie; hierna zijn de stappen tot aan doorloopsheid beschreven.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfronde mini-amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 258.



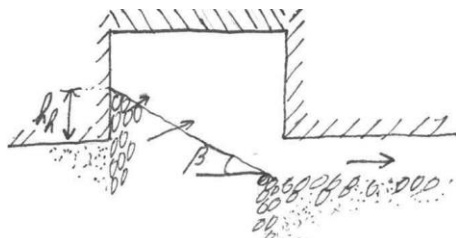
Figuur 258 Uitspoeling van bovendeele barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfitheater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor. De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan,

bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 259.



Figuur 259 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

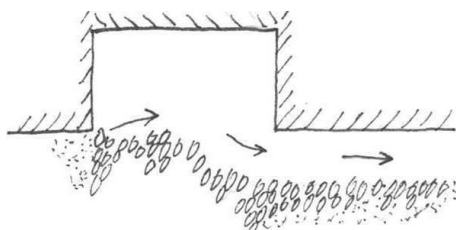
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier kortheidshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

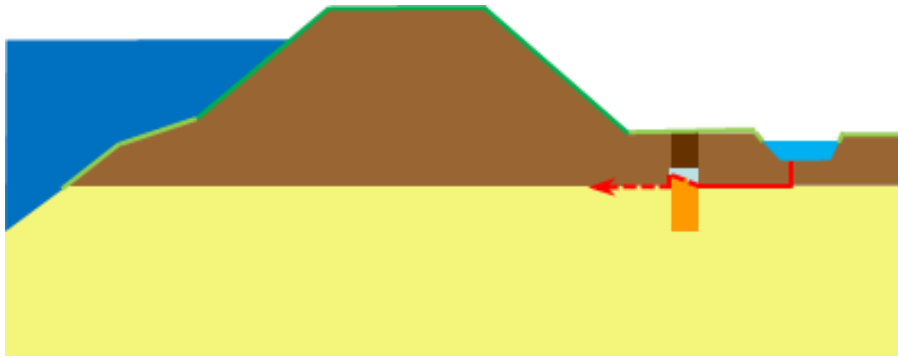
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 260.



Figuur 260 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 261).

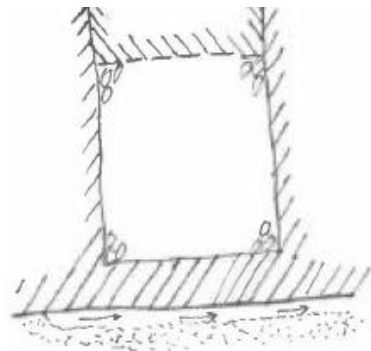


Figuur 261 Doorlooptheid.

C.1.31 Pad 31 Barrière is te ondiep waardoor piping onder de barrière door kan optreden

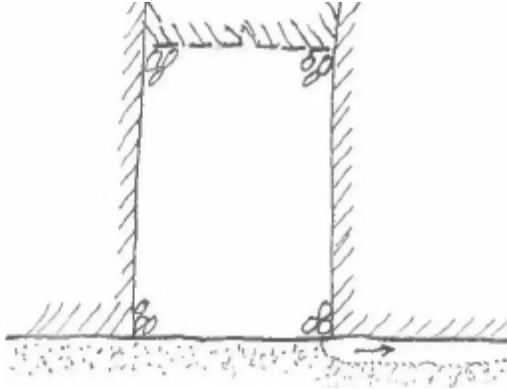
O19 Barrière is te ondiep

De grofzandbarrière kan te ondiep worden ontworpen (of bij de uitvoering kan onvoldoende diep worden gegraven), zodat deze niet tot in de pipinggevoelige zandlaag reikt (zie Figuur 262). Als de kleilaag, hoe dun die eventueel ook is, intact blijft, dan zal een pipe kunnen passeren.

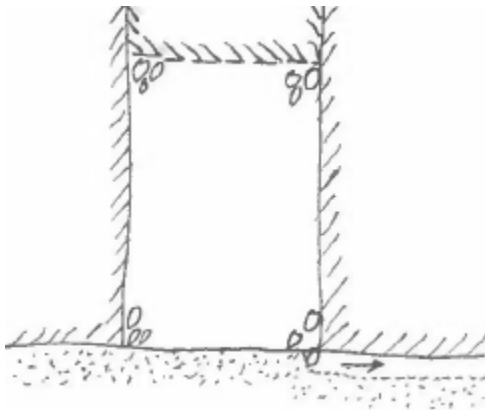


Figuur 262 Barrière is te ondiep en steekt niet tot in de pipinggevoelige zandlaag.

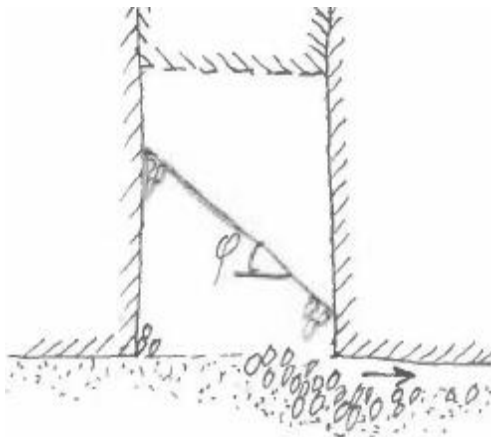
Als de grofzandbarrière juist tot aan de pipinggevoelige zandlaag steekt (zie Figuur 263), dan zal de pipe niet zomaar voorbij de grofzandbarrière kunnen groeien: de korrels van de grofzandbarrière zullen in de pipe vallen (zie Figuur 264). De grove korrels zullen net als anders niet ver weg getransporteerd worden, maar er zal een combinatie ontstaan van een 'plaveisel' in het meest nabije gedeelte van de benedenstroomse pipe (net als anders), en een verzakte grofzandbarrière doordat het fijne zand eronder deels zal eroderen (zie Figuur 265). Uiteindelijk ontstaat er net zo'n uiterste toestand als bij een grofzandbarrière die wél een eindje in de pipinggevoelige zandlaag steekt (zie Figuur 266), al zal het vanwege het deels wegzakken van de barrière in de ondergrond wat rommeliger uitzien en zijn tussenliggende fasen moeilijker te modelleren. De zijdelingse pipeontwikkeling aan de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière zal ook normaal kunnen plaatsvinden.



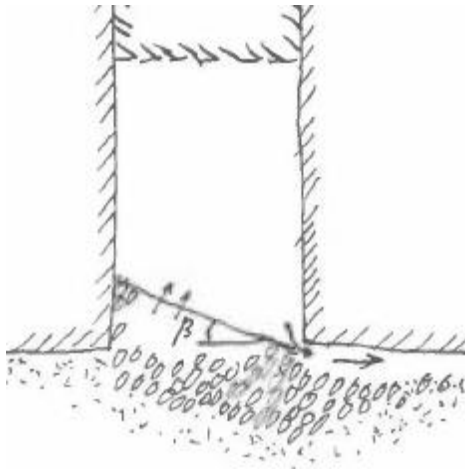
Figuur 263 Pipegroei tot aan een grofzandbarrière die net tot aan de pipinggevoelige zandlaag is aangebracht.



Figuur 264 Vervolg op voorgaande figuur: eerste korrel vanuit de grofzandbarrière in de benedenstroomse pipe.



Figuur 265 Vervolg op voorgaande figuur: deels verzakte grofzandbarrière, deels leeggelopen inkassing en plaveisel met grove korrels in de benedenstroomse pipe.



Figuur 266 Uiterste situatie bij een grofzandbarrière die net tot aan de pipinggevoelige zandlaag is aangebracht.

NB: vanwege de variatie in de ligging van de bovenzijde van de pipinggevoelige zandlaag, meetonnauwkeurigheden bij het grondonderzoek, meetonnauwkeurigheden in de uitvoeringsfase en materieeltoleranties zal er voor het ontwerp nog steeds moeten worden uitgegaan van een grofzandbarrière die enigermate tot in de pipinggevoelige zandlaag steekt. Aangezien een dieper gelegen grofzandbarrière meer water trekt van onderaf, is een zo ondiep mogelijke grofzandbarrière vanuit ontwerp oogpunt het meest gunstig. Dit is bovendien gunstiger voor de uitvoering, zowel qua kosten als voor de te leveren inspanning. De situatie van een (nèt) te ondiep stekende barrière (zoals geschetst in Figuur 262) zal echter beslist vermeden moeten worden.

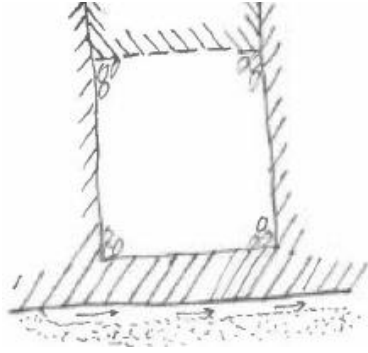
Voor de pilot bij Gameren is geen nadere aandacht besteed aan deze optimalisatiemogelijkheid; dit zou bij een vervolgtoeepassing nader onderzocht kunnen worden.

Gelet op de vereiste aandacht om bij het grondonderzoek de diepteligging én dikte van een onscherpte grenslaag te bepalen (zie beïnvloedende oorzaak O2 in §A.1.1.2 of ook §C.1.32 hierna), zou er voldoende informatie beschikbaar moeten zijn om in de ontwerpfase een te ondiepe ligging van de barrière te vermijden.

Op basis van het vereiste grondonderzoek gericht op de ligging en dikte van de grenslaag zou een te ondiepe ligging van de barrière altijd moeten kunnen worden vermeden.

69 Barrière steekt niet diep genoeg; niet tot in de pipinggevoelige zandlaag
Zoals bij de beschrijving van de beïnvloedende factor hiervoor is toegelicht, is er alleen een probleem als de grofzandbarrière niet tot in de pipinggevoelige zandlaag reikt.

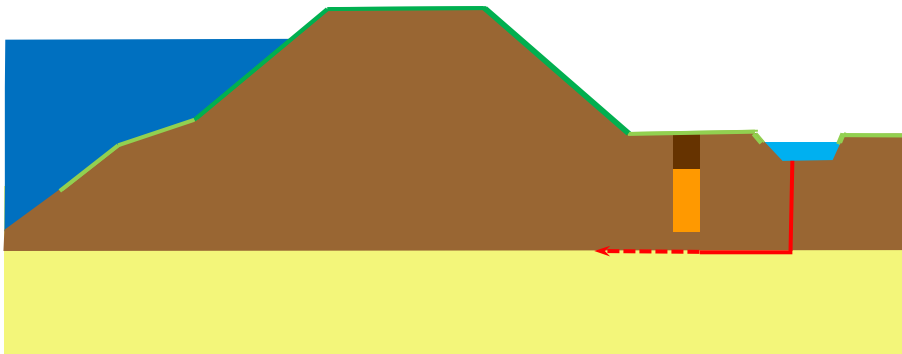
68 Pipe groeit onder de grofzandbarrière door
Als de grofzandbarrière niet diep genoeg steekt, zodat deze niet tot in de pipinggevoelige zandlaag reikt, dan zal een pipe onder de grofzandbarrière door kunnen passeren (zie Figuur 267).



Figuur 267 Barrière is te ondiep en steekt niet tot in de pipinggevoelige zandlaag.

Onderloopsheid

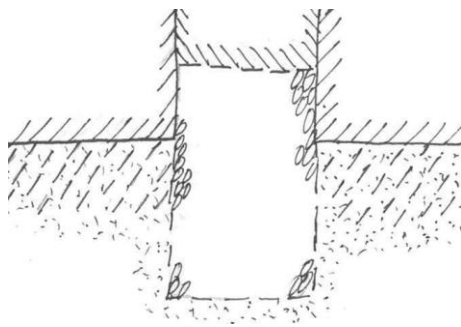
De pipe ontwikkelt zich onder de barrière door, zodat er sprake is van onderloopsheid (zie Figuur 268).



Figuur 268 Onderloopsheid.

C.1.32 Pad 32 Onduidelijke grenslaag, waarbij de barrière te ondiep blijkt en piping onder de barrière door kan optreden

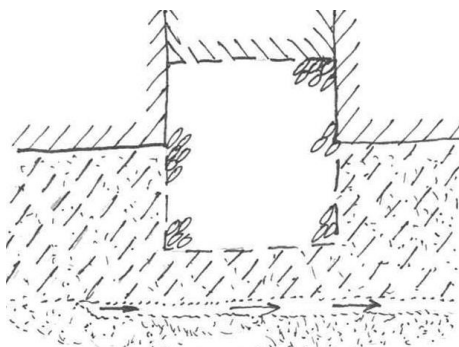
O2 Geen scherpe grenslaag tussen de pipinggevoelige zandlaag en de deklaag
In de principe-schetsen over de werking van de grofzandbarrière wordt altijd uitgegaan van een scherpe overgang tussen een deklaag van klei met daaronder een pipinggevoelige zandlaag. Dit komt in de praktijk vaak voor, maar evengoed zijn er situaties waarbij er sprake is van een meer diffuse overgang tussen de slechtdoorlatende deklaag en de pipinggevoelige zandlaag van soms wel meerdere meters hoog. Voor het ontwerp van een grofzandbarrière kan dan een onjuist niveau worden ingeschat op basis van boorbeschrijvingen en sondeerresultaten. Een dergelijke situatie is geschetst in Figuur 269, waar ten behoeve van deze uitleg een drielaagsysteem is geschetst. De middelste laag kan bijvoorbeeld omschreven zijn als 'klei, sterk zandig' en een lage conusweerstand vertonen, terwijl de onderste laag een veel hogere conusweerstand laat zien. Voor het ontwerp kan dan de onderste 'laagovergang' als veilige grenslaag worden gehanteerd ter bepaling van de benodigde diepte van de barrière, terwijl de pipegroei in werkelijkheid mogelijk plaatsvindt op het niveau van de bovenste 'laagovergang'. Dit is van invloed op de keuze van de hoogte van de inkassing (zoals verder de vereiste heavehoogte, de meeton nauwkeurigheden bij het grondonderzoek en bij de uitvoering en de maaton nauwkeurigheden bij de uitvoering hiervoor bepalend zijn).



Figuur 269 Drielaagensysteem ter illustratie van 'geen scherpe grenslaag'.

Het is ook denkbaar dat bij een diffuse overgang een pipe bovenstrooms op een hoger niveau verdergaat dan het niveau waarop een pipe vanaf het uittredepunt bij de barrière aankomt. Het stromingspatroon in de barrière zelf bevordert overigens een dergelijk vervolg op een hoger niveau (eventueel met een schuin naar beneden verlopende pipe), wat bij scherpe klei-zand overgang nooit zou plaatsvinden. De effectieve heave-hoogte wordt dan kleiner en falen treedt sneller op. Dit is nader uitgewerkt bij het bijbehorende faalpad in §C.1.22.

Eén van de drie meer extreme varianten waar deze situatie toe kan leiden, is dat de onderkant van de grofzandbarrière niet diep genoeg steekt en nog boven het niveau ligt waarop piping ontstaat, zie Figuur 270 (de beide andere meer extreme varianten zijn uitgewerkt in §C.1.4 en §C.1.21).



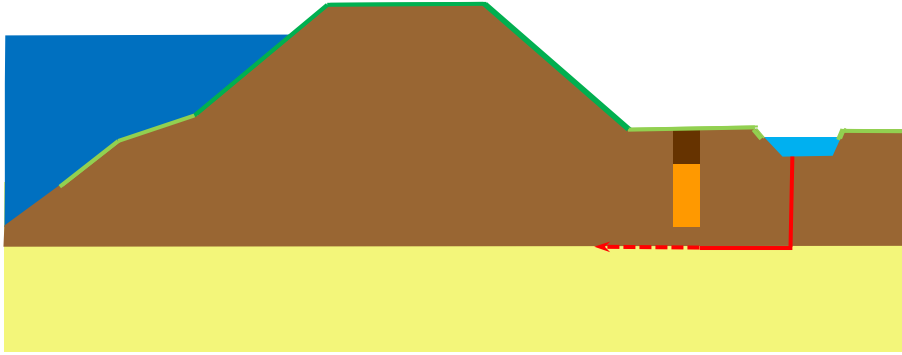
Figuur 270 Grenslaag die voor wat betreft piping een cohesieve laag blijkt te zijn, zodat de pipe eronderdoor groeit.

69 Barrière steekt niet diep genoeg; niet tot in de pipinggevoelige zandlaag
Zoals bij de beschrijving van de beïnvloedende factor hiervoor is toegelicht, is er een probleem als de grofzandbarrière niet tot in de pipinggevoelige zandlaag reikt. Wanneer de grofzandbarrière nét wel tot in deze zandlaag reikt, dan zal deze maatregel tegen piping functioneren zoals beoogd, zoals toegelicht is bij beïnvloedende factor O19 (zie §A.1.19 of het eerste gedeelte van §C.1.31 kort hiervoor).

68 Pipe groeit onder de grofzandbarrière door
Als de grofzandbarrière niet diep genoeg steekt, zodat deze niet tot in de pipinggevoelige zandlaag reikt, dan zal een pipe onder de grofzandbarrière door kunnen passeren (zie Figuur 270).

Onderloopsheid

De pipe ontwikkelt zich onder de barrière door, zodat er sprake is van onderloopsheid (zie Figuur 271).

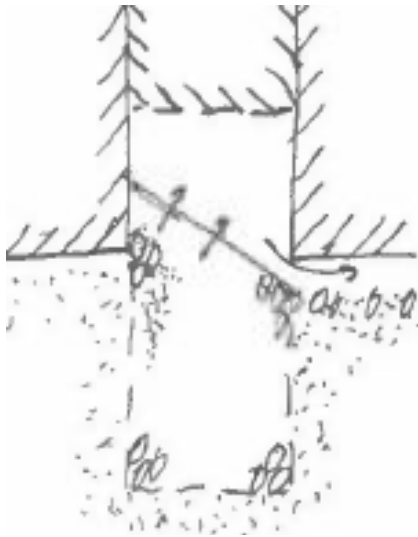


Figuur 271 Onderloopsheid.

C.1.33 Pad 33 Barrière raakt door cakevorming aan alle kanten verstopt, werkt daardoor als kwelscherm

O17 Cakevorming door uitspoeling van fijne fractie uit achtergrondzand in bovenstroomse zijde barrière

Bij kleinschalige proeven met de grofzandbarrière bleek soms enige inspoeling van de fijne fractie uit het bovenstroomse zand plaats te vinden, ondanks dat aan de eisen aan interne stabiliteit van Kenney & Lau (zie O3, §A.1.1.3) werd voldaan (maar niet aan één van de beide criteria van Burenkova). Ietwat verrassend bleef dit materiaal wel steken nabij de bovenstroomse rand van de grofzandbarrière (zie Figuur 272), waardoor er lokaal in beperkte mate een verlaagde doorlatendheid optrad. Hierdoor ontstond er binnen de grofzandbarrière een gunstiger gradiëntverdeling. Dit leidde daardoor tot extra sterkte. Dit is een positief effect, waar echter in het algemeen niet van kan worden uitgegaan dat het zal optreden.



Figuur 272 Cakevorming in de grofzandbarrière

Het is theoretisch denkbaar dat deze cakevorming verder doorzet, wat echter zeer onwaarschijnlijk mag worden geacht – het verschijnsel is in feite immers gelijk aan mechanische verstopping, dat in het veld niet op voldoende grote schaal kan optreden – ook in lengterichting van de dijk – om daadwerkelijk invloed te hebben – zie hiervoor §A.3.7 over verstopping in het algemeen.

Hier wordt voor de volledigheid het faalpad verder afgelopen, maar de kans van optreden mag dus verwaarloosbaar worden geacht.

51* Barrière wordt aan de bovenstroomse rand slechtdoorlatend

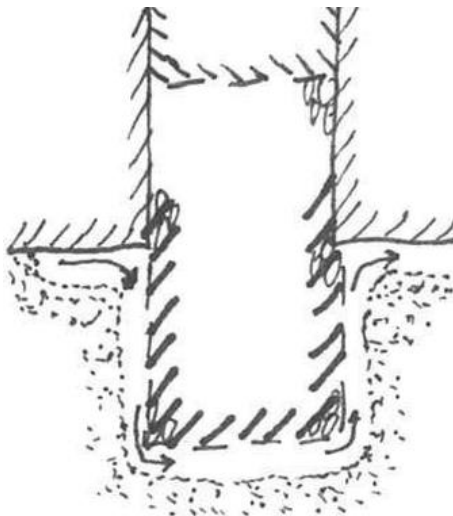
Door de cakevorming wordt de barrière aan de bovenstroomse rand, binnen het grove zand, slechtdoorlatend.

50* Barrière wordt ook aan de onderrand slechtdoorlatend
Het proces van cakevorming zet zich ook voort totdat de onderrand slechtdoorlatend is geworden. Zie faalpad 28 in §C.1.28 voor wanneer dit niet gebeurt.

97j Barrière wordt WEL ook benedenstrooms slechtdoorlatend
De barrière wordt ook nog aan de benedenstroomse rand slechtdoorlatend. Zie faalpad 27 in §C.1.27 voor als dit niet gebeurt.

70 Barrière werkt als ondoorlatend scherm
De barrière functioneert hierdoor effectief als een (dik) ondoorlatend scherm, niet als een grofzandbarrière met filterwerking.

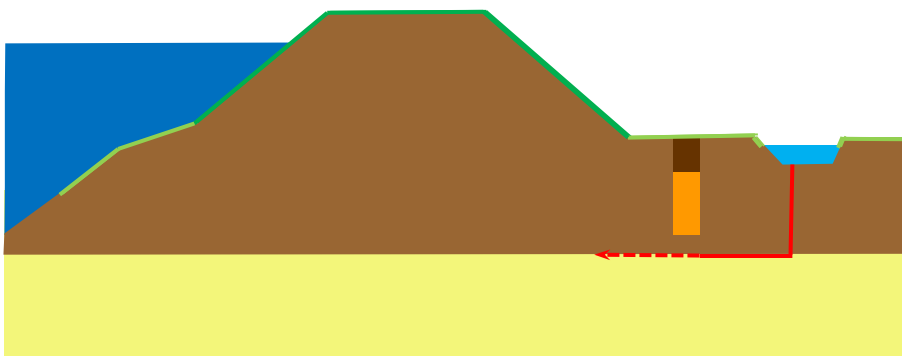
68 Pipe groeit onder de grofzandbarrière door
De pipe zal onder de grofzandbarrière doorgroeien, waarmee die niet meer is dan een kort en dik heavescherm (zie Figuur 273).



Figuur 273 Onderloopsheid bij verstopping aan alle randen van de barrière.

Onderloopsheid

De pipe ontwikkelt zich onder de barrière door, zodat er sprake is van onderloopsheid (zie Figuur 274).

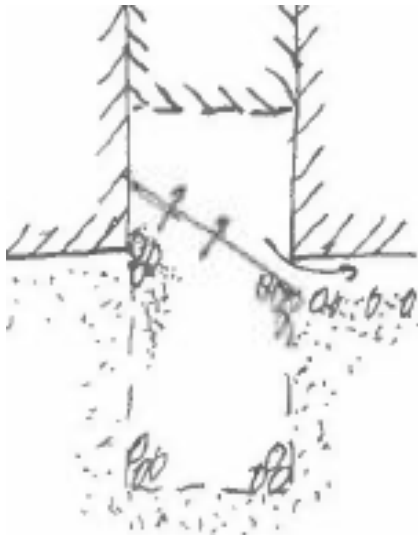


Figuur 274 Onderloopsheid.

De kans van optreden van dit scenario mag nihil worden geacht.

Pad 34 Barrière raakt door cakevorming aan bovenstroomse rand verstopt, waardoor bovenstroomse drukopbouw te groot wordt en bovenstrooms opbarsten en heave optreden
 O17 Cakevorming door uitspoeling van fijne fractie uit achtergrondzand in bovenstroomse zijde barrière

Bij kleinschalige proeven met de grofzandbarrière bleek soms enige inspoeling van de fijne fractie uit het bovenstroomse zand plaats te vinden, ondanks dat aan de eisen aan interne stabiliteit van Kenney & Lau (zie O3, §A.1.1.3) werd voldaan (maar niet aan één van de beide criteria van Burenkova). Iets verrassend bleef dit materiaal wel steken nabij de bovenstroomse rand van de grofzandbarrière (zie Figuur 275), waardoor er lokaal in beperkte mate een verlaagde doorlatendheid optrad. Hierdoor ontstond er binnen de grofzandbarrière een gunstiger gradiëntverdeling. Dit leidde daardoor tot extra sterkte. Dit is een positief effect, waar echter in het algemeen niet van kan worden uitgegaan dat het zal optreden.



Figuur 275 Cakevorming in de grofzandbarrière

Het is theoretisch denkbaar dat deze cakevorming verder doorzet, wat echter zeer onwaarschijnlijk mag worden geacht – het verschijnsel is in feite immers gelijk aan mechanische verstopping, dat in het veld niet op voldoende grote schaal kan optreden – ook in lengterichting van de dijk – om daadwerkelijk invloed te hebben – zie hiervoor §A.3.7 over verstopping in het algemeen.

Hier wordt voor de volledigheid het faalpad verder afgelopen, maar de kans van optreden mag dus verwaarloosbaar worden geacht.

51* Barrière wordt aan de bovenstroomse rand slechtdoorlatend

Door de cakevorming wordt de barrière aan de bovenstroomse rand, binnen het grove zand, slechtdoorlatend.

Eventueel worden óók de onderrand en de benedenstroomse rand hierna slechtdoorlatend, maar dat maakt voor dit faalpad verder amper uit.

74 Drukopbouw bovenstrooms van de barrière

Doordat de grofzandbarrière in deze situatie als een hydraulische barrière optreedt, zal er drukopbouw plaatsvinden direct bovenstrooms van de barrière, hetgeen sterk in contrast staat tot de bedoelde wijze van functioneren.

73 Opbarsten en heave bovenstrooms van de barrière

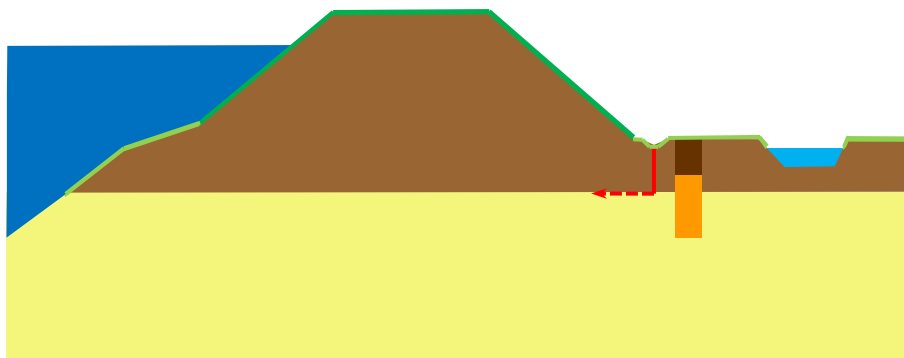
Voor zover nodig treden eerst opbarsten en eventueel heave op, bovenstrooms van de barrière.

Om te voorkomen dat dit kan gebeuren, zal het gebied tussen de dijk en de grofzandbarrière gecontroleerd moeten worden op eventuele uittredepunten en de veiligheid tegen opbarsten en heave. Zo nodig moet een ophoging of grondverbetering worden toegepast. Mits inpasbaar, kan de grofzandbarrière het beste zo dicht mogelijk bij de dijk worden aangelegd als voor de uitvoering nog werkbaar is.

Voor de concrete situatie in Gameren wordt hier verwezen naar de tekst hierover in §5.7.

Voorloopsheid

Het faalmechanisme piping treedt op bovenstrooms van de grofzandbarrière, zodat deze ineffectief is (zie Figuur 276).



Figuur 276 Voorloopsheid.

C.1.35 Pad 35 Deklaag bovenstrooms van de barrière drijft op, waarna bovenstrooms ook opbarsten en heave optreden

O5 Opdrijven van de deklaag bovenstrooms van de grofzandbarrière

Bij een voldoende hoge waterdruk in de pipinggevoelige zandlaag, in combinatie met een voldoende dikke deklaag waarbij onvoldoende drukverlies richting het achterland optreedt, kan de deklaag bovenstrooms van de grofzandbarrière gaan opdrijven.

73 Opbarsten en heave bovenstrooms van de barrière

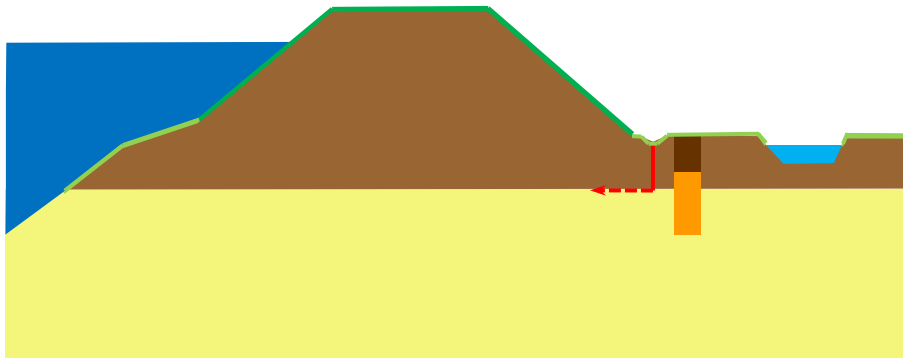
Voor zover nodig treden eerst opbarsten en eventueel heave op, bovenstrooms van de barrière.

Om te voorkomen dat dit kan gebeuren, zal het gebied tussen de dijk en de grofzandbarrière gecontroleerd moeten worden op eventuele uittredepunten en de veiligheid tegen opbarsten en heave. Zo nodig moet een ophoging of grondverbetering worden toegepast. Mits inpasbaar, kan de grofzandbarrière het beste zo dicht mogelijk bij de dijk worden aangelegd als voor de uitvoering nog werkbaar is.

Voor de concrete situatie in Gameren wordt hier verwezen naar de tekst hierover in §5.7.

Voorloopsheid

Het faalmechanisme piping treedt op bovenstrooms van de grofzandbarrière, zodat deze ineffectief is (zie Figuur 277).



Figuur 277 Voorloopsheid.

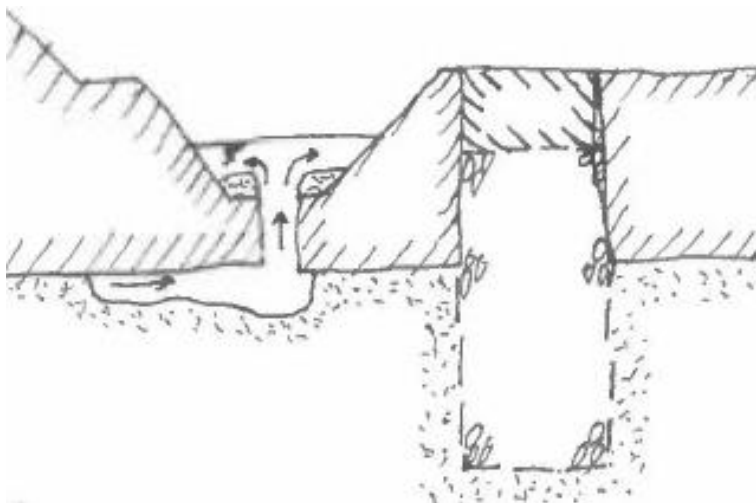
C.1.36

Pad 36 Grofzandbarrière ligt te ver achter de waterkering en is daardoor niet functioneel

O20 Barrière is benedenstrooms van uittredepunt

De grofzandbarrière is niet effectief wanneer deze benedenstrooms van het uittredepunt wordt aangelegd, zie Figuur 278. Van een goed ontwerp mag worden verwacht dat dit wordt ondervangen.

De oplossing is op zich eenvoudig: ervoor zorgen dat de barrière bovenstrooms van het uittredepunt komt te liggen. Dit kan ook worden bereikt door een berm of bermverhoging tussen de binnenteen van de dijk en de grofzandbarrière om zo voldoende veiligheid tegen opbarsten en heave te krijgen. Eventuele doorsnijdingen met extra grof materiaal, zoals beschreven en geschetst in §A.1.10 (beïnvloedende factor O10) dienen hierbij ook in de beschouwing te worden meegenomen.



Figuur 278 Voorloopsheid door grofzandbarrière benedenstrooms van het uittredepunt.

73 Opbarsten en heave bovenstrooms van de barrière

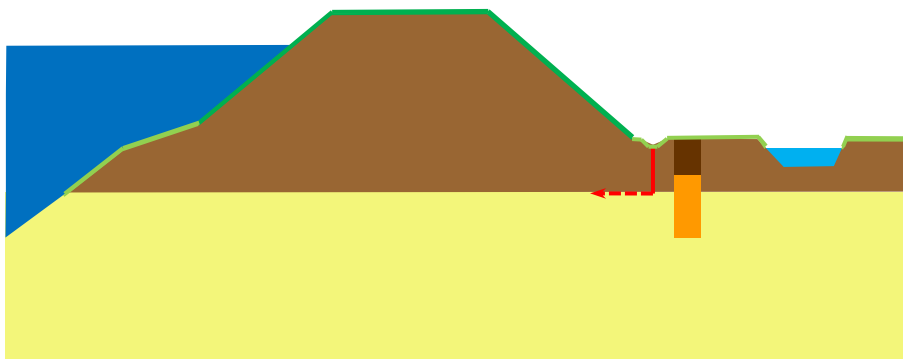
Voor zover nodig treden eerst opbarsten en eventueel heave op, bovenstrooms van de barrière.

Om te voorkomen dat dit kan gebeuren, zal het gebied tussen de dijk en de grofzandbarrière gecontroleerd moeten worden op eventuele uittredepunten en de veiligheid tegen opbarsten en heave. Zo nodig moet een ophoging of grondverbetering worden toegepast. Mits inpasbaar, kan de grofzandbarrière het beste zo dicht mogelijk bij de dijk worden aangelegd als voor de uitvoering nog werkbaar is.

Voor de concrete situatie in Gameren wordt hier verwezen naar de tekst hierover in §5.7.

Voorloopsheid

Het faalmechanisme piping, of anders wel heave, treedt op bovenstrooms van de grofzandbarrière, zodat deze ineffectief is. Daarmee treedt voorloopsheid op (zie Figuur 279).



Figuur 279 Voorloopsheid.

C.2 Paden die in de uitvoering geadresseerd kunnen worden

C.2.1 Pad 37 Niet in één gang geproduceerde barrièredelen sluiten niet goed op elkaar aan, zodat pipe ertussendoor kan groeien

U1 Onvoldoende aansluiting tussen discontinu geproduceerde barrièredelen
Wanneer een grofzandbarrière niet in één continu doorlopend proces wordt gemaakt, dan is het mogelijk dat er onvoldoende aansluiting is tussen twee los van elkaar gemaakte onderdelen, bijvoorbeeld bij twee delen van de met een open sleuf gemaakte grofzandbarrière, bij stilstand van een kettinggraafmachine (met insluiting van achtergrondzand bij stoppen of herstarten) of bij toepassing van losse zandpalen als grofzandbarrière.

De aansluiting is als onvoldoende te bestempelen wanneer pipegroei mogelijk is voorbij de barrière bij een verval dat volgens de ontwerpvoorschriften nog gekeerd zou moeten kunnen worden.

Bij een grofzandbarrière zal de grondwaterstroming zich concentreren via het grove zand. Een eventuele insluiting van achtergrondzand en zelfs een doorgaand gedeelte, van benedenstrooms naar bovenstrooms, bestaande uit alleen achtergrondzand, zal daarom in eerste instantie nog geen probleem opleveren. Wanneer de erosie echter een overgang van barrièrezand met achtergrondzand bereikt, dan zal daar eenzelfde vorm van contacterosie kunnen plaatsvinden als bij de benedenstroomse rand van een grofzandbarrière, waar zijdelingse pipegroei optreedt (zie §5.3, met name onderdeel B6, van Figuur 28 tot en met Figuur 30). Als gevolg van deze erosie, nu bij een insluiting van achtergrondzand of zelfs een doorgaand gedeelte met achtergrondzand, zal een pipe tussen de beide barrièredelen door kunnen groeien, met doorloopsheid tot gevolg.

Er zijn op dit moment nog nadere beschouwingen en/of analyses en/of experimenteel onderzoek nodig om te bepalen of hiervoor nog een significante verhoging van het verval over de waterkering vereist is, of dat dit al zal optreden bij het verval waarbij de grofzandbarrière met een betrekkelijk grote insluiting van achtergrondzand of discontinuïteit bereikt wordt. Zonder uitsluitel hierover zullen dergelijke situaties in de uitvoering strikt vermeden moeten worden.

Voor zowel de open-sleufmethode als de kettinggraaftechniek is het goed mogelijk om dit risico op een robuuste wijze uit te sluiten. Bij de open-sleufmethode vergt dit voldoende overlap, hetgeen ook uitvoerbaar is bij scherpe bochten.

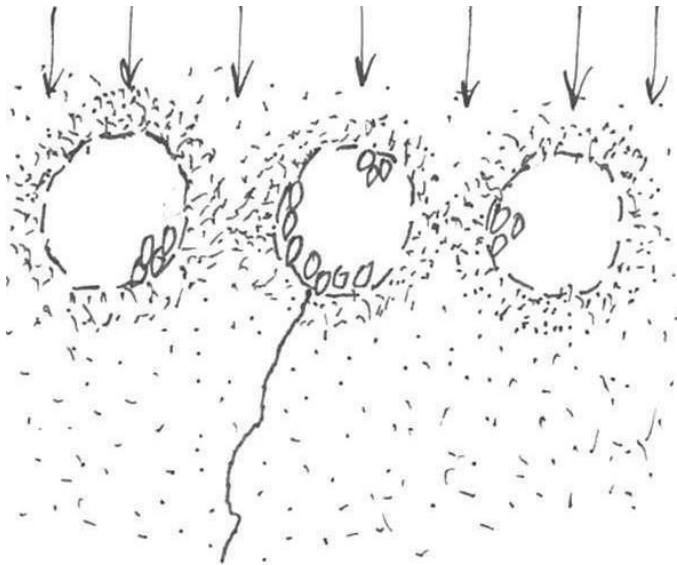
Bij de kettinggraafmethode kan na een stilstand een gedeelte opnieuw worden gemaakt, zie Figuur 280. De werkrichting is hierbij van rechts naar links, de hoogwaterzijde is aan de bovenkant van deze figuur. Eerst is het gedeelte aangegeven met de doorgetrokken lijn

gemaakt, daarna kan aan de bovenstroomse zijde met een nieuw gedeelte worden gestart en via een bocht worden aangesloten op het oorspronkelijke tracé. Daarbij wordt het laatste gedeelte van het eerste deel weggegraven. De aanzet van het nieuwe gedeelte kan overigens beperkt zijn; zodra het graafproces op diepte is, kan al een begin worden gemaakt met het weggraven van het eerste deel.

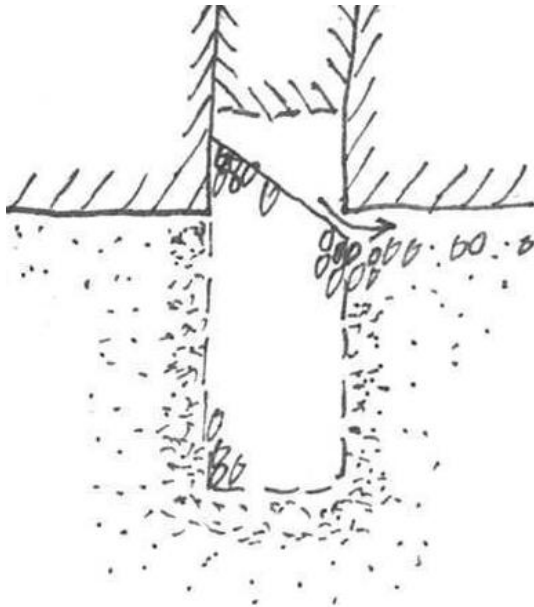


Figuur 280 Schuine insteek en overlap bij herstart met kettinggraafmethode (mogelijke principe-oplossing).

Een andere voorgestelde uitvoeringstechniek betreft het grondverdringend aanbrengen van zandpalen met grof zand. Het idee daarbij is dat deze palen niet overlappend te hoeven geplaatst, omdat het omliggende achtergrondzand, dus ook het achtergrondzand tússten de zandpalen, zodanig verdicht raakt dat de stroming zich via de zandpalen zal concentreren. In Figuur 281 en Figuur 282 zijn principe-schetsen gegeven voor de situatie waarbij een benedenstroomse pipe een zandpaal heeft bereikt.



Figuur 281 Bovenaanzicht grondverdringend aangebrachte zandpalen als grofzandbarrière, met aantakking benedenstroomse pipe op één van de zandpalen.

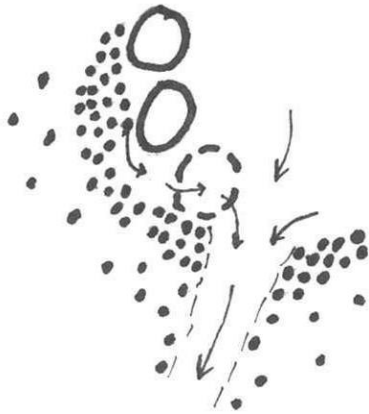


Figuur 282 Dwarsdoorsnede door een grondverdringend aangebrachte zandpaal als grofzandbarrière na 'leeglopen' van de inkassing.

Een punt van zorg is dat bij deze uitvoeringstechniek een pipe langs de zandpaal gevormd kan worden door contacterosie, zie Figuur 283 en Figuur 284. Het proces dat hierbij optreedt is hetzelfde als bij de vorming van een zijdelingse pipe achter een 'gewone' grofzandbarrière met een rechthoekige doorsnede, met als verschillen dat dit proces een vervolg vormt richting falen en dat de hoge dichtheid van het achtergrondzand als gevolg van het aanbrengeproces met name aan de rand van de zandpaal leidt tot een hoge weerstand tegen erosie van het fijne zand, in combinatie met een zeer lage doorlatendheid ter plaatse. Hierdoor is het denkbaar dat het proces richting falen pas optreedt bij een verval (ver) boven het maatgevend verval, zodat met deze methode toch voldoende veiligheid tegen piping wordt verkregen. **Experimenteel onderzoek (eventueel slechts van de cruciale deelaspecten die hierbij een rol spelen) met een goede uitkomst wordt noodzakelijk geacht voordat deze uitvoeringstechniek veilig kan worden toegepast.**



Figuur 283 Contacterosie leidend tot pipevorming langs de omtrek van een grondverdringend aangebrachte zandpaal als grofzandbarrière.



Figuur 284 Contacterosie leidend tot pipevorming langs de omtrek van een grondverdringend aangebrachte zandpaal als grofzandbarrière (detail na beperkte langspipe-vorming).

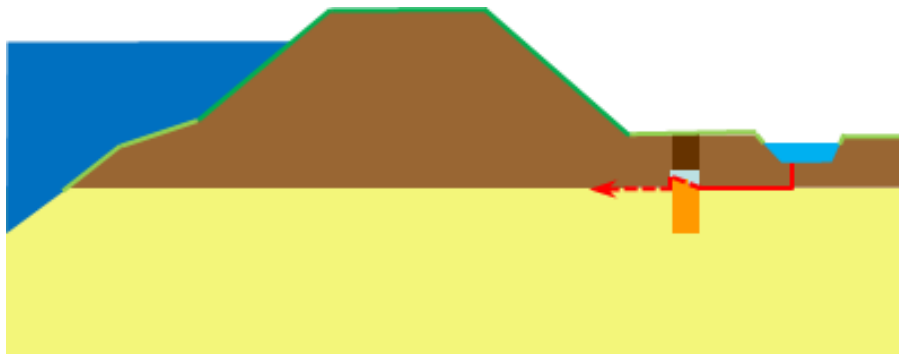
Zie verder §A.2.6 voor de risico's van onder- en voorloopsheid bij deze uitvoeringstechniek als gevolg van de extreme verdichting van het achtergrondzand, waardoor het denkbaar is dat een benedenstroomse pipe de zandpaal niet bereikt.

15 Pipe groeit tussen barrièredelen door

Wanneer pipegroei mogelijk is tussen barrièredelen door, bij een verval dat volgens de ontwerpeisen nog gekeerd zou moeten kunnen worden, dan is de aansluiting onvoldoende en kan er falen optreden.

Doorloopsheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorloopsheid (zie Figuur 285).



Figuur 285 Doorloopsheid.

C.2.2

Pad 38 Aanvulklei is niet goed, daardoor holle ruimte direct boven barrièrezand

U2 Aanvulklei wordt te dun aangebracht, bevat holle ruimtes en/of wordt in onvoldoende mate aangevoerd en/of verdicht

Wanneer de klei, die ter aanvulling op het zand van de grofzandbarrière moet worden aangebracht, op enigerlei wijze tekortschiet, dan kan dit bezwijken in de hand werken. Het gaat hierbij om elk van de genoemde mogelijkheden of een combinatie daarvan: te dun aanbrengen, holle ruimtes (bijvoorbeeld in de hoeken), onvoldoende aanvoer (gegeven de voortgangssnelheid – dit is in feite hetzelfde als 'te dun aanbrengen') of onvoldoende verdichting.

22 Holle ruimte tussen deklaag/sleufaanvulling en zandlaag/barrière

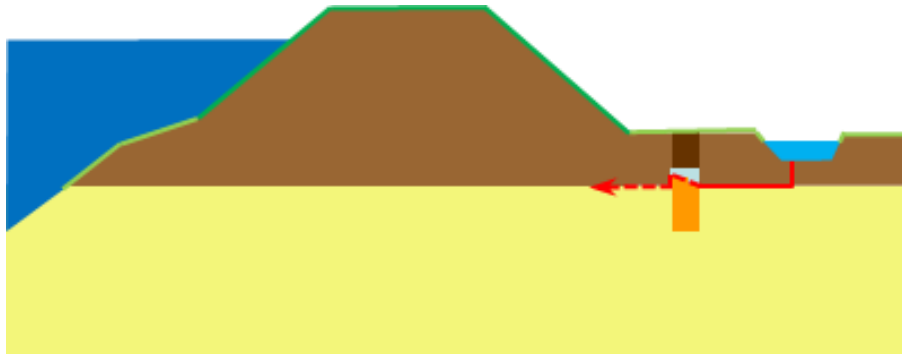
Als er een holle ruimte is tussen deklaag en sleufaanvulling en pipinggevoelige zandlaag/grofzandbarrière anderszijds, dan kan zich hierlangs een pipe vormen.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

De pipe ontwikkelt zich dan tot aan de bovenstroomse rand, langs de bovenkant van de grofzandbarrière. Hoewel dit op basis van de oorzaak beter geschaard zou kunnen worden onder bovenloopsheid, wordt hier vooral gekeken naar de gevolgen, die overeenkomen met doorloopsheid – vandaar de op het oog wat afwijkende indeling.

Doorloopsheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorloopsheid (zie Figuur 286).



Figuur 286 Doorloopsheid.

C.2.3 Pad 39 Barrière is onvoldoende verdicht, door nazakken neemt heave-hoogte af

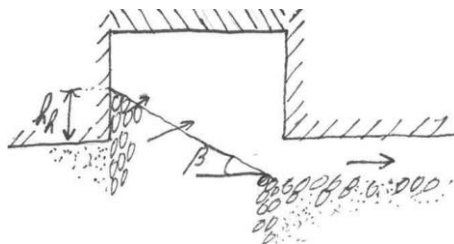
U3 Grofzandbarrière is onvoldoende verdicht

Wanneer de grofzandbarrière bij aanleg onvoldoende verdicht is, kan in een latere fase alsnog verdichting optreden.

36* Nazakken barrière

Bij een grofzandbarrière met inkassing leidt dit bij een nog gevulde inkassing slechts tot een beperkte verzakking van de top van de inkassing, hetgeen geen probleem vormt mits de vereiste heavehoogte h_n niet wordt aangetast. Wanneer de vereiste heavehoogte wél wordt aangetast, dan vormt dit wel een probleem. De marges in de hoogte van de inkassing zullen echter zodanig ruim zijn vanwege de vereiste meet- en maattoleranties bij het grondonderzoek en in de uitvoering, dat deze verdichting wegvalt in de marge en de vereiste heavehoogte in stand blijft.

Een uitzondering hierop vormt de situatie bij een extreem hoogwater waarbij de uiterste grens qua heavehoogte en/of hellingshoek al dicht is benaderd, zoals geschetst in Figuur 287. In een dergelijke situatie kan verzakking als gevolg van aanvullende verdichting tot bezwijken leiden. Voor de praktijk moet dan worden gedacht aan een extreme hoogwatersituatie, waarbij dan bovendien verdichting wordt gestimuleerd. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren als een damwand wordt ingetrild bij wijze van noodmaatregel in een aangrenzend gedeelte van dijk.



Figuur 287 Uiterste situatie met minimale heavehoogte en maximaal verflauwde helling, waarin verzakking als gevolg van verdichting niet kan worden opgenomen.

29 Heavehoogte neemt af

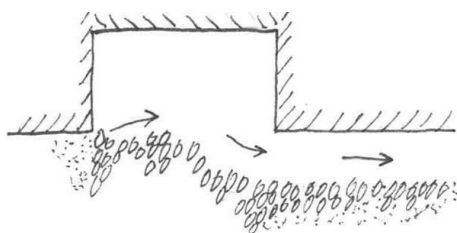
Het inzakken van de grofzandbarrière heeft ook als gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier kortheidshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

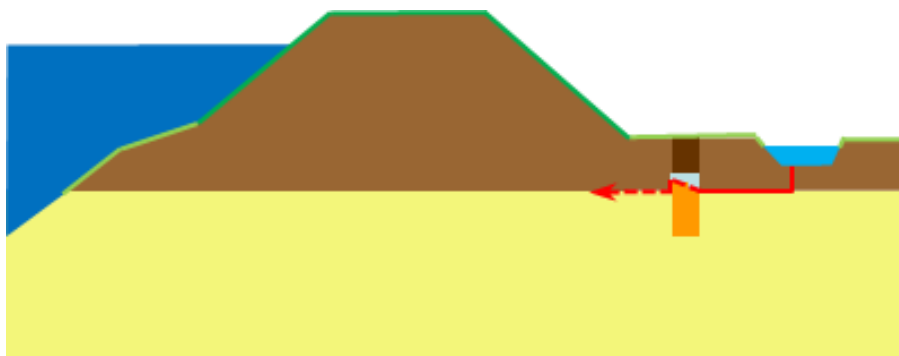
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 288.



Figuur 288 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 289).



Figuur 289 Doorlooptheid.

C.2.4 Pad 40 Barrière is onvoldoende verdicht en daardoor zwakker

U3 Grofzandbarrière is onvoldoende verdicht

Dit faalpad focust specifiek op de invloed van de mate van verdichting van de grofzandbarrière op de doorlatendheid ervan en staat los van de vervormingseffecten (zie daarvoor faalpad 39 in §C.2.3).

39 Hogere doorlatendheid weegt niet op tegen sterkteverlies

Bij een lagere verdichtingsgraad zullen de porositeit en de doorlatendheid groter zijn. De grotere doorlatendheid werkt gunstig, omdat de gradiënt in de barrière hierdoor minder groot wordt. Een grotere porositeit leidt echter ook tot een lagere waarde voor de kritieke gradiënt i_{crit} , zoals te zien is aan de daarvoor gebruikte formule uit het model van Van Rhee & Bezuijen (1992):

$$i_{crit} = v / k = - (1 - n) \Delta \sin (\phi - \beta) / \sin \phi \quad (C.2.4.1)$$

met v = stroomsnelheid van het uittredende kwelwater, k = hydraulische doorlatendheid van de grofzandbarrière, n = porositeit, Δ = relatieve dichtheid van het korrelmateriaal = $(\rho_s - \rho_w) / \rho_w = 1,65$ voor kwartzand in zoet water, ϕ = hoek van interne wrijving van het barrièrezand en β = kritieke hellingshoek.

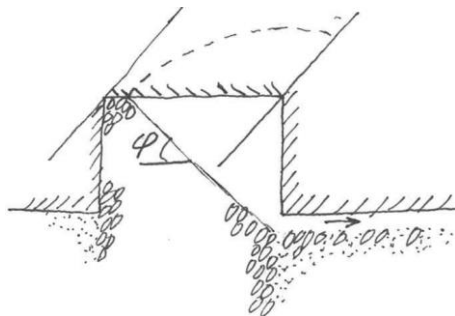
Of de lagere dichtheid daadwerkelijk leidt tot een sterkteverlies dat niet opweegt tegen de hogere doorlatendheidswaarde, zal per zand kunnen verschillen. Voor een mengsel als GZB3 gelden de in Tabel 9 vermelde waarden voor relatieve dichtheid, porositeit en doorlatendheid.

Tabel 9 Doorlatendheden GZB3 bij verschillende waarden voor de porositeit.

Relatieve Dichtheid RD (%)	Porositeit n (-)	(1-n) * Δ (-)	Doorlatendheid bij 10 graden Celsius (m/dag)
0	0.448 (maximum)	0.911	niet bepaald
70	0.389	1.008	368
80	0.380	1.023	335
85	0.376	1.030	319
90	0.372	1.037	304
95	0.367	1.044	291
100	0.363 (minimum)	1.051	277

Het verband tussen de doorlatendheid van de grofzandbarrière en het keerbare verval is bij benadering lineair (Koelewijn et al., 2021). Voor GZB3 is daarmee te zien dat bij een lagere dichtheid de toename in de doorlatendheid juist wél opweegt tegen het sterkteverlies volgens vergelijking (C.2.4.1). Desalniettemin geldt vanwege de mogelijk naderhand optredende vervormingen (zie §A.2.3 en §C.2.3 nog steeds dat een verdichtingsgraad behorende bij een vaste pakking dient te worden nagestreefd.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfronde mini-amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 290.



Figuur 290 Uitspoeling van bovendeeel barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrchting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten

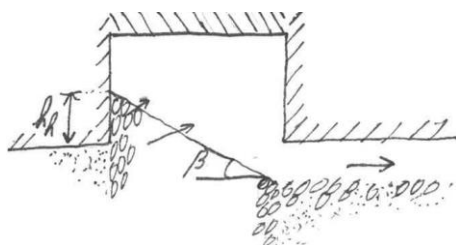
toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfitheater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor.

De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

Uiteindelijk kan er wel over de hele lengte van de grofzandbarrière sprake zijn van een volledig ontwikkelde helling, maar het is waarschijnlijker dat de zijdelingse pipegroei ergens geblokkeerd raakt.

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 291.



Figuur 291 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

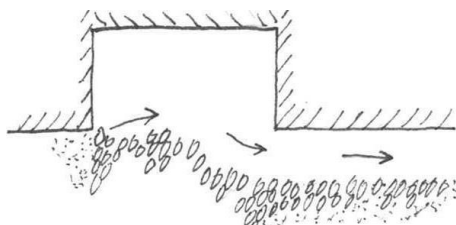
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven eerder in deze paragraaf, bij knooppunt 39 (vergelijking C.2.4.1), en eerder al in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier kortheidshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

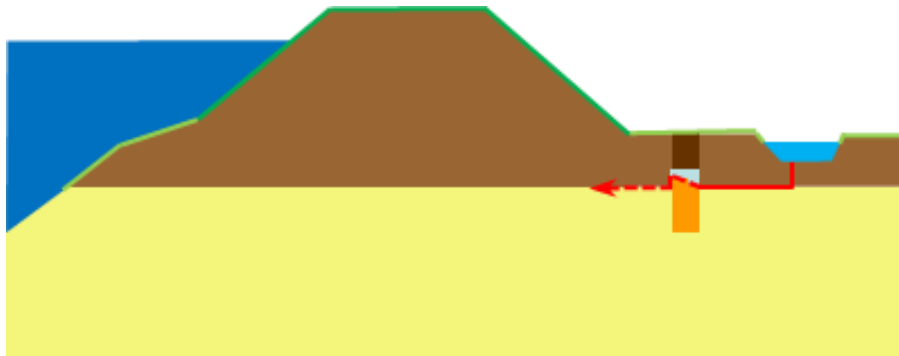
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 292.



Figuur 292 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 293).



Figuur 293 Doorlooptheid.

C.2.5

Pad 41 Aanvoer van barrièrezand is onvoldoende in verhouding tot de voortgangssnelheid

U4 Onvoldoende aanvoer van barrièrezand

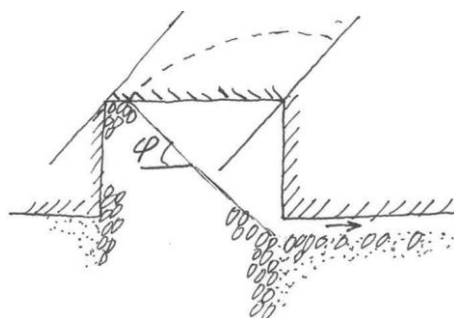
Wanneer er onvoldoende barrièrezand wordt aangevoerd gegeven de snelheid waarmee de grofzandbarrière in de ondergrond wordt aangebracht, dan worden de vereiste diepte, hoogte, dikte en/of verdichtingsgraad niet bereikt en is de grofzandbarrière niet sterk genoeg. Dit speelt vooral bij een continue aanbrenghmethode zoals de kettingfrees en dient door monitoring gesignaleerd te kunnen worden. Indien achteraf niet is vast te stellen dat een aangebrachte sectie voldoet, dan zal dit opnieuw moeten worden aangelegd.

40 Dikte barrière kleiner dan aangenomen in ontwerp

Voor de titel van dit knooppunt is de nadruk gelegd op de dikte, maar zoals hiervoor aangegeven zijn naast dikte ook diepte, hoogte en verdichtingsgraad van belang.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft

Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfrond mini-amfiteater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 294.



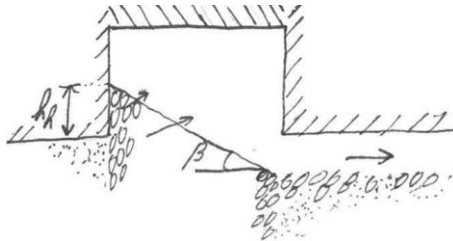
Figuur 294 Uitspoeling van bovendeeel barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsricting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen

variëren, waardoor het ‘amfitheater’ een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor. De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage). Uiteindelijk kan er wel over de hele lengte van de grofzandbarrière sprake zijn van een volledig ontwikkelde helling, maar het is waarschijnlijker dat de zijdelingse pipegroei ergens geblokkeerd raakt.

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 295.



Figuur 295 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

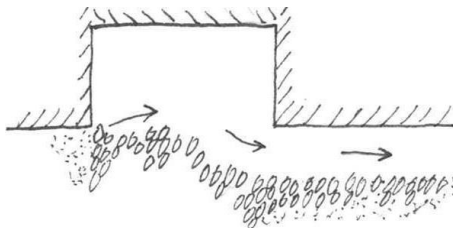
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier korthedshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

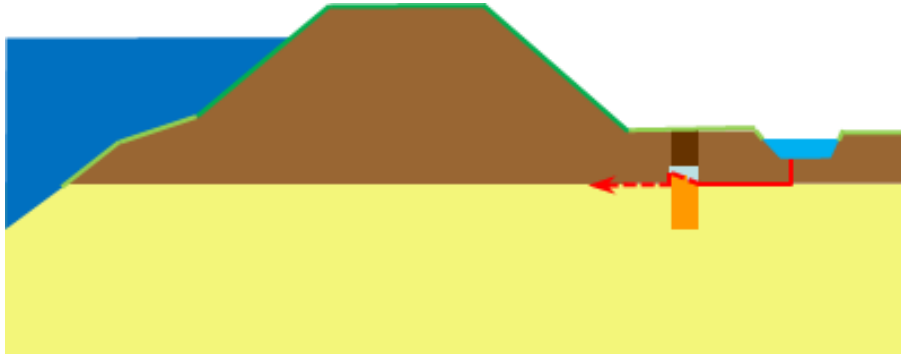
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 296.



Figuur 296 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 297).

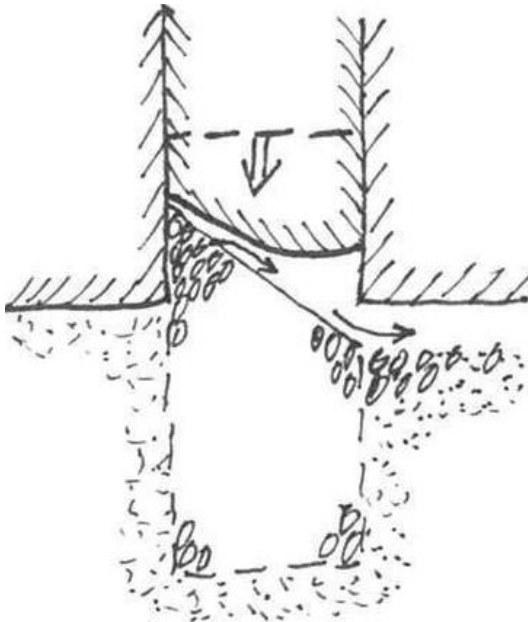


Figuur 297 Doorloopsheld.

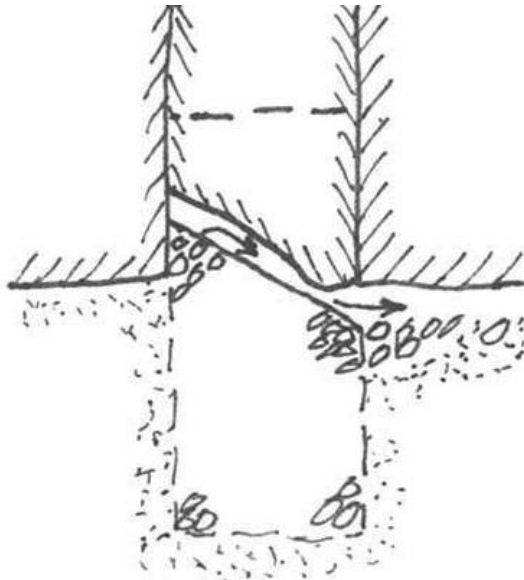
C.2.6 Pad 42 Aanvulklei zwelt te sterk en belemmert ontwikkeling vrije helling aan bovenzijde barrière

U5 Aanvulklei zwelt te sterk in de holle ruimte die boven het zand ontstaat. Zodra er korrels uit de inkassing wegstromen, ontstaat daar een holle ruimte. Deze ruimte kan worden opgevuld met klei die onderin de sleufaanvulling is gebruikt. Dit kan gebeuren doordat er brokjes klei loslaten of doordat deze klei opzwellt. In het laatste geval kan de mate van opzwellen zo groot zijn, dat dit een belemmering vormt voor de vrije uitstroming van water op de helling die in de grofzandbarrière ontstaat.

Het proces dat dan optreedt is weergegeven in Figuur 298 en Figuur 299: het zwellen van de klei zorgt voor een vernauwing van het vrije uitstroomoppervlak waardoor hier extra erosie ontstaat (dus meer erosie van het zand dan zonder deze verzakking van het oppervlak van de onderkant de aanvulklei het geval zou zijn geweest). Hierdoor kan falen eerder worden bereikt.



Figuur 298 Zwel van de kleiaanvulling, leidend tot vernauwing van het vrije uitstroomoppervlak op de helling bovenin het barrièrezand.

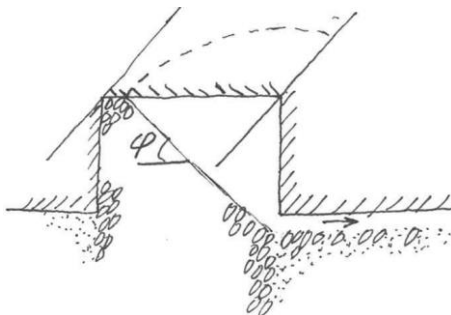


Figuur 299 Vervolg op voorgaande figuur: verdere zwelling van de aanvulklei met extra erosie van de grofzandbarrière tot gevolg.

Het is reëel om te verwachten dat een sterk zwellende kleisoort zelf zal eroderen onder invloed van de stroming vanuit grofzandbarrière, of dat de klei in brokken uiteenvalt, eerder dan dat een problematisch grote zwelling optreedt. In §A.2.7 (beïnvloedende factor U7) wordt ingegaan op de mogelijkheid van erosie van de klei zelf, het bijbehorende faalpad 47 is hierna beschreven in §C.2.11.

Door toepassing van niet sterk-zwellende klei, zal de klei min of meer op zijn plaats blijven of anders in brokken uiteenvallen. De neervallende brokken zullen tijdens het hoogwater door de stroming in delen en deeltjes worden afgevoerd, wat geen invloed zal hebben op de helling in de grofzandbarrière. Na afloop van het hoogwater zal de klei ook nog in de eronder ontstane holle ruimte kunnen vallen; dan wordt de klei niet meer afgevoerd en is er wel sprake van een probleem, waarvoor dan wel de gelegenheid bestaat om dit op te lossen. Deze factor die de veiligheid beïnvloedt is nader beschreven als B4 in §A.3.4.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfrond mini-amfiteater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 300.



Figuur 300 Uitspoeling van bovendeele barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

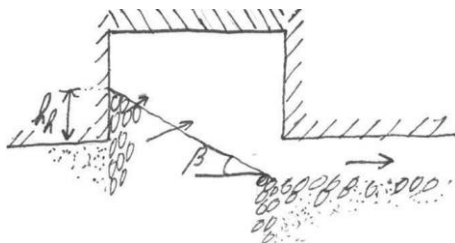
De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfitheater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor.

De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

Uiteindelijk kan er wel over de hele lengte van de grofzandbarrière sprake zijn van een volledig ontwikkelde helling, maar het is waarschijnlijker dat de zijdelingse pipegroei ergens geblokkeerd raakt.

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 301. Eventueel op de helling vallende kleibrokken uit de sleufaanvulling zullen worden afgevoerd, waarbij alleen lokaal en tijdelijk enige verhoging van de uitstroming vanuit het zand optreedt.



Figuur 301 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

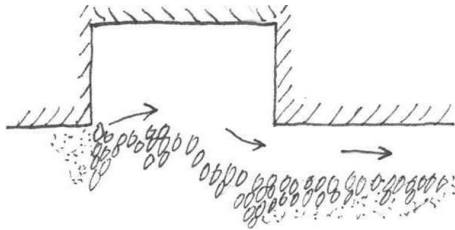
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formules hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier korthedshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

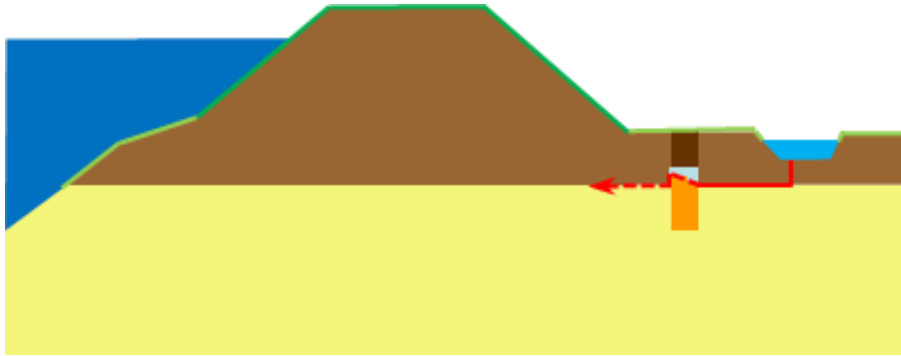
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 302.



Figuur 302 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorloopsheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorloopsheid (zie Figuur 303).



Figuur 303 Doorloopsheid.

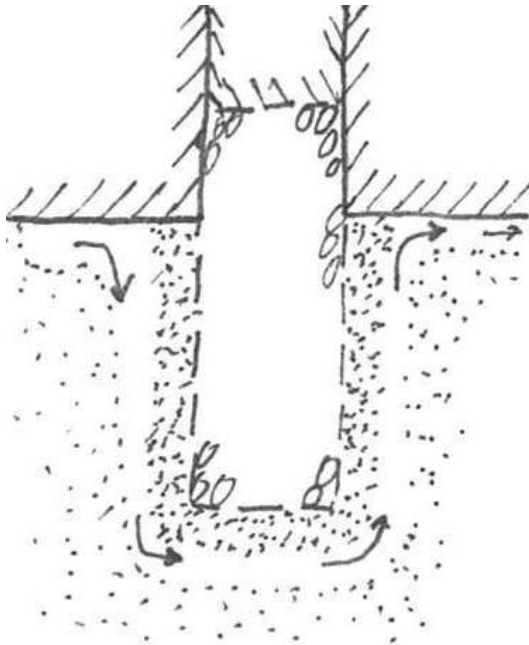
C.2.7 Pad 43 Achtergrondzand raakt in extreme mate verdicht: deel met lage porositeit erodeert wel: doorloopsheid

U6 Extreme verdichting achtergrondzand

Extreme verdichting van het achtergrondzand kan zich voordoen wanneer de grofzandbarrière grondverdringend wordt aangebracht, bijvoorbeeld in de vorm van losse zandpalen.

Wanneer een benedenstroomse pipe verbinding maakt met een zandpaal, ondanks de lage doorlatendheid en erosieweerstand van het verdichte achtergrondzand rondom de zandpalen, bestaat het risico op de vorming van een langspipe langs de omtrek van de zandpaal wat kan leiden tot falen bij een verval lager dan het maatgevend verval. Zie §A.2.1, Figuur 103 tot en met Figuur 106 en de daarbij behorende tekst, voor een toelichting hierop.

Een andere mogelijkheid is dat een benedenstroomse pipe niet tot aan de zandpaal kan groeien. In dat geval zijn er twee mogelijkheden: vorming van een pipe onder het geheel van zandpalen en extreem verdicht achtergrondzand door (dat geheel functioneert dan in feite als een heavescherm, zie Figuur 304), of voorloopsheid doordat de waterdruk bovenstrooms van deze maatregel zo hoog oploopt dat dáár opbarsten en heave optreden, waarop echter ontworpen zou moeten worden (zie §A.1.20; maatregelen tegen opbarsten en heave bovenstrooms van de grofzandbarrière en de faalpaden 54 en 55 in §C.2.18-19).



Figuur 304 Heave achter en piping onder extreem verdicht achtergrondzand rondom een grondverdringend aangebrachte grofzandbarrière door.

Het is goed denkbaar dat falen door deze factor pas optreedt bij een verval dat (ruimschoots) groter dan het maatgevend verval, dan vormt dit geen probleem. Voor de relevante processen van heave onder het geheel door en opbarsten bovenstrooms van de barrière kan met berekeningen worden bepaald of hieraan voldaan wordt.

57* Verlaagde porositeit rondom barrière

Door het grondverdringende aanbrengproces worden de korrels in een zone rondom de zandpaal samengedrukt waardoor de porositeit verlaagd wordt.

56* Lage doorlatendheid rondom barrière

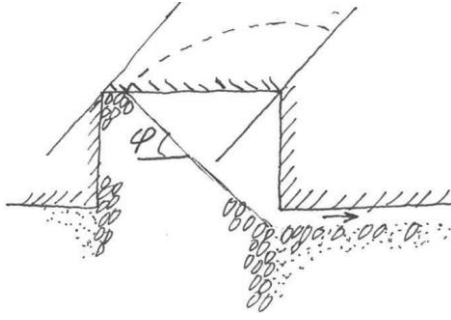
Door de lagere porositeit is er ook sprake van een lagere doorlatendheid rondom de barrière, in de zone die beïnvloed is door het aanbrengproces.

98j Slechtdoorlatende deel erodeert WEL of breekt WEL af

Wanneer het pipingproces en (een deel van) het heaveproces optreden zoals aangegeven in Figuur 304, dan kan het slechtdoorlatende deel alsnog wél eroderen of afbreken, allereerst aan de benedenstroomse kant. In dat geval kan de barrière alsnog zoals bedoeld worden aangesproken op de sterkte. Wanneer dit niet erodeert of afbreekt, dan ontstaat de situatie met onderloopsheid zoals beschreven in §C.2.16 (faalpad 52).

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft

Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfrond mini-amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 305.

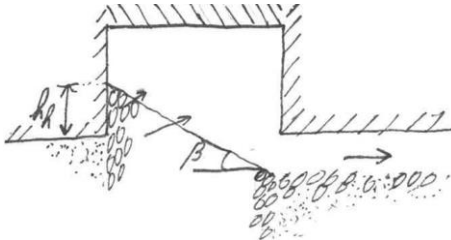


Figuur 305 Uitspoeling van bovendeel barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren. Bij de (losse) zandpalen zal de variatie kleiner zijn dan bij een continue grofzandbarrière, tenzij de benedenstroomse pipe 'overspringt' op een andere zandpaal. Er is hierbij ook geen sprake van een vergelijkbare zijdelingse pipegroei, waardoor bij deze methode waarschijnlijk met een ongunstige 3D-factor zal moeten worden gerekend. Dit is echter slechts een voorlopige inschatting, nadere beschouwingen en onderzoek zijn hiervoor nog vereist.

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 306.



Figuur 306 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

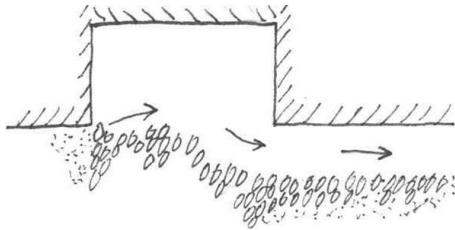
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier korthedshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

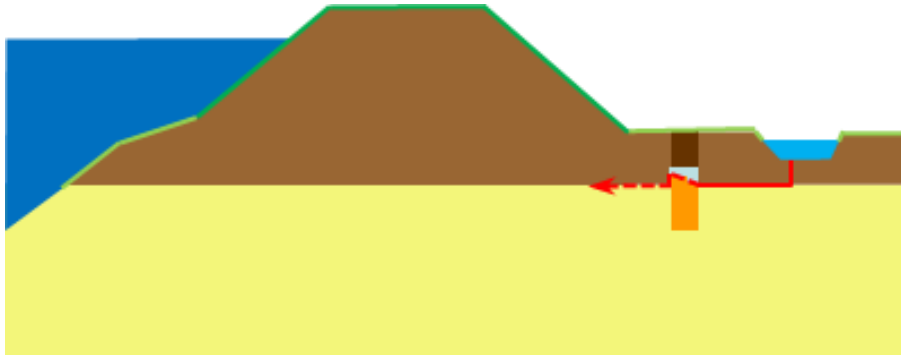
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 307.



Figuur 307 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 308).



Figuur 308 Doorlooptheid.

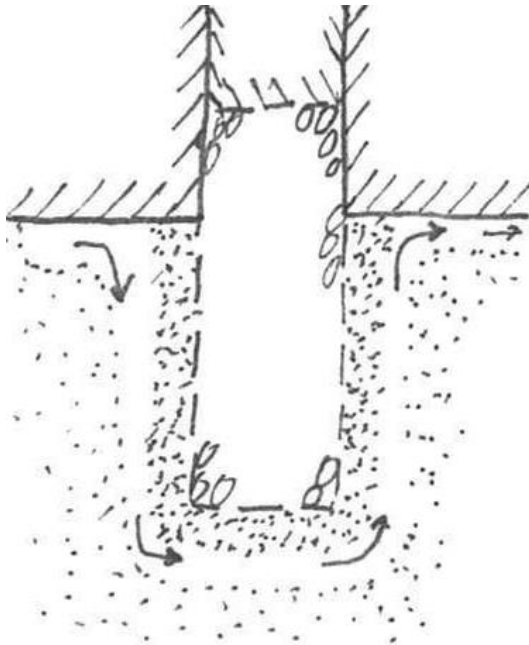
C.2.8 Pad 44 Achtergrondzand raakt in extreme mate verdicht: deel met vermalen korrels erodeert wel: doorlooptheid

U6 Extreme verdichting achtergrondzand

Extreme verdichting van het achtergrondzand kan zich voordoen wanneer de grofzandbarrière grondverdringend wordt aangebracht, bijvoorbeeld in de vorm van losse zandpalen.

Wanneer een benedenstroomse pipe verbinding maakt met een zandpaal, ondanks de lage doorlatendheid en erosieweerstand van het verdichte achtergrondzand rondom de zandpalen, bestaat het risico op de vorming van een langspipe langs de omtrek van de zandpaal wat kan leiden tot falen bij een verval lager dan het maatgevend verval. Zie §A.2.1, Figuur 103 tot en met Figuur 106 en de daarbij behorende tekst, voor een toelichting hierop.

Een andere mogelijkheid is dat een benedenstroomse pipe niet tot aan de zandpaal kan groeien. In dat geval zijn er twee mogelijkheden: vorming van een pipe onder het geheel van zandpalen en extreem verdicht achtergrondzand door (dat geheel functioneert dan in feite als een heavescherm, zie Figuur 309), of voorlooptheid doordat de waterdruk bovenstrooms van deze maatregel zo hoog oploopt dat dáár opbarsten en heave optreden, waarop echter ontworpen zou moeten worden (zie §A.1.20; maatregelen tegen opbarsten en heave bovenstrooms van de grofzandbarrière en de faalpaden 54 en 55 in §C.2.18-19).



Figuur 309 Heave achter en piping onder extreem verdicht achtergrondzand rondom een grondverdringend aangebrachte grofzandbarrière door.

Het is goed denkbaar dat falen door deze factor pas optreedt bij een verval dat (ruimschoots) groter dan het maatgevend verval, dan vormt dit geen probleem. Voor de relevante processen van heave onder het geheel door en opbarsten bovenstrooms van de barrière kan met berekeningen worden bepaald of hieraan voldaan wordt.

58* Vermaling van korrels rondom barrière

Door het grondverdringende aanbrengproces worden de korrels in een zone rondom de zandpaal vermalen waardoor de porositeit verlaagd wordt.

56* Lage doorlatendheid rondom barrière

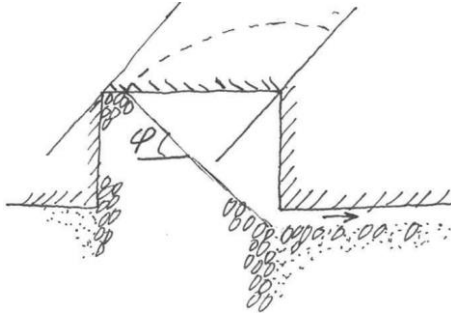
Door de lagere porositeit is er ook sprake van een lagere doorlatendheid rondom de barrière, in de zone die beïnvloed is door het aanbrengproces.

98j Slechtdoorlatende deel erodeert WEL of breekt WEL af

Wanneer het pipingproces en (een deel van) het heaveproces optreden zoals aangegeven in Figuur 309, dan kan het slechtdoorlatende deel alsnog wél eroderen of afbreken, allereerst aan de benedenstroomse kant. In dat geval kan de barrière alsnog zoals bedoeld worden aangesproken op de sterkte. Wanneer dit niet erodeert of afbreekt, dan ontstaat de situatie met onderloopsheid zoals beschreven in §C.2.17.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft

Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfrond mini-amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 310.

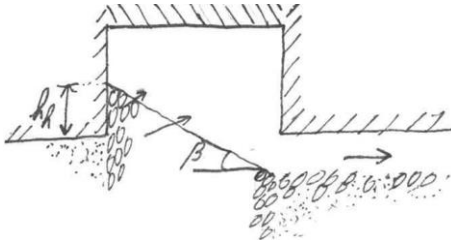


Figuur 310 Uitspoeling van bovendeel barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren. Bij de (losse) zandpalen zal de variatie kleiner zijn dan bij een continue grofzandbarrière, tenzij de benedenstroomse pipe 'overspringt' op een andere zandpaal. Er is hierbij ook geen sprake van een vergelijkbare zijdelingse pipegroei, waardoor bij deze methode waarschijnlijk met een ongunstige 3D-factor zal moeten worden gerekend. Dit is echter slechts een voorlopige inschatting, nadere beschouwingen en onderzoek zijn hiervoor nog vereist.

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 311.



Figuur 311 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

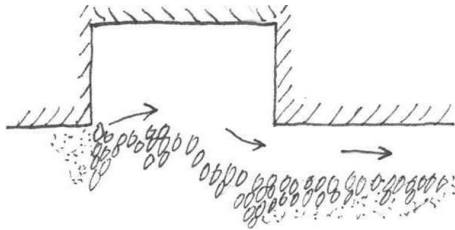
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier korthedshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

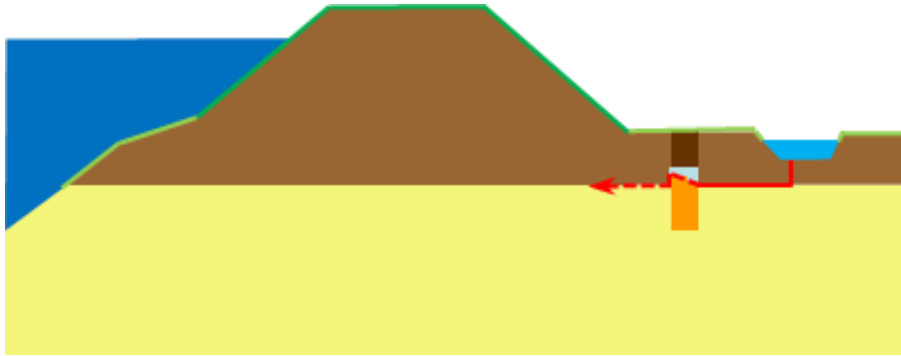
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 312.



Figuur 312 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 313).



Figuur 313 Doorlooptheid.

C.2.9 Pad 45 Aanvulklei is niet goed waardoor sleufaanvulling bezwijkt

U2 Aanvulklei wordt te dun aangebracht, bevat holle ruimtes en/of wordt in onvoldoende mate aangevoerd en/of verdicht

Wanneer de klei, die ter aanvulling op het zand van de grofzandbarrière moet worden aangebracht, op enigerlei wijze tekortschiet, dan kan dit bezwijken in de hand werken. Het gaat hierbij om elk van de genoemde mogelijkheden of een combinatie daarvan: te dun aanbrengen, holle ruimtes (bijvoorbeeld in de hoeken), onvoldoende aanvoer (gegeven de voortgangssnelheid – dit is in feite hetzelfde als ‘te dun aanbrengen’) of onvoldoende verdichting.

Voor een grofzandbarrière met inkassing geldt dit met name bij de toepassing van een bovenstroomse afdichting (“kleimuurtje”). Wanneer een bovenstroomse afdichting niet nodig is, dan is het voornaamste bezwaar slechts de kwel via de sleuf, hoewel ook dit tot enige verzwakking van de grofzandbarrière als geheel leidt door de resulterende verlaging van de stromingsweerstand benedenstrooms van het grove zand.

61 Sleufaanvulling bezwijkt

De volgende stap is dat de sleufaanvulling bezwijkt, dat wil zeggen: geen volledige afsluiting meer vormt tussen barrièrezand en maaiveld. Dit kan gebeuren als de sleufaanvulling van onderaf erodeert. Voor de veiligheid zal moeten worden getoetst of er geen kwelstroom bovenlangs kan ontstaan die tot verdere erosie leidt. Als er geen erosie optreedt, dan is er hooguit sprake van enige wateroverlast indien de stijghoogte in de barrière boven het maaiveld reikt. Door toepassing van een erosiebestendige kleilaag direct bovenop het barrièrezand is dit in belangrijke mate te voorkomen.

60 Opbarsten en heave van de sleuf

De vorige stap leidt, bij voldoende stromingsdruk, vervolgens tot heave van de sleuf, na eventueel opbarsten.

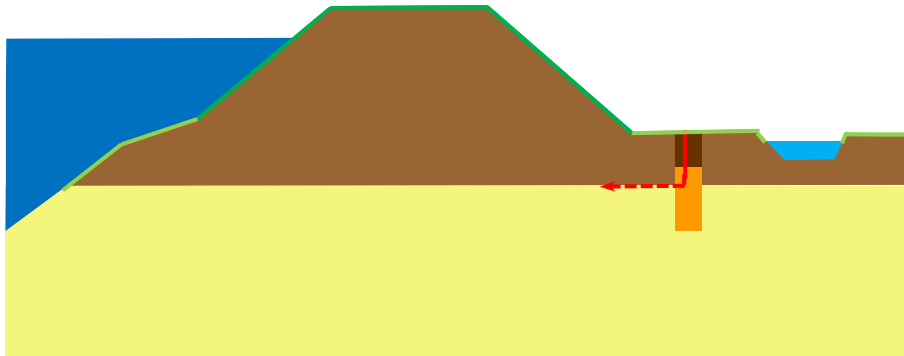
59 Pipe ontwikkelt zich door de sleuf naar het maaiveld

Hierna ontwikkelt de pipe zich via de sleuf naar het maaiveld.

Bij deze oorzaak en het hiervoor beschreven faalpad zal op dit punt in één of meer doorsneden overigens een geheel open verbinding zijn ontstaan tussen het oorspronkelijke uittredepunt en de sleuf.

Bovenloopsheid

*Er ontstaat kortsluiting naar het maaiveld via de afdichting boven de grofzandbarrière (zie Figuur 314). Er is dan sprake van een kwelstroom via de sleuf. Dit leidt echter niet direct tot falen: de barrière biedt nog steeds weerstand. **Bovenloopsheid impliceert dus nog géén falen.** Wel zal de totale weerstand benedenstrooms (als in: stroomafwaarts) van de eigenlijke grofzandbarrière verkleind zijn (tenzij de bovenkant van de sleuf zo hoog ligt dat er uiteindelijk geen kwelstroming optreedt, doordat de stijghoogte ter plaatse lager is dan het maaiveld).*



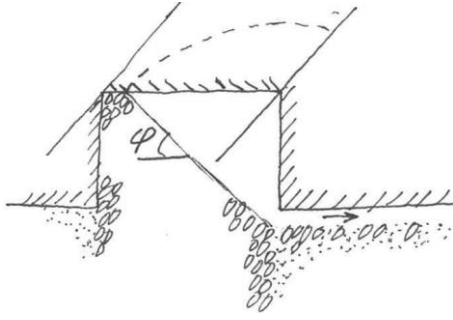
Figuur 314 Bovenloopsheid.

Er treedt dan een herverdeling op van de waterdrukken, waarbij het gedeelte benedenstrooms van de eigenlijke grofzandbarrière (dus: de benedenstroomse pipe(s) en de sleuf samen) een kleiner deel van het verval keren, wat dan gecompenseerd zal moeten worden door het verval over de eigenlijke grofzandbarrière en het achtergrondzand bovenstrooms van de grofzandbarrière samen. De toename van het verval over de eigenlijke grofzandbarrière zelf zal relatief gering zijn: het grootste deel van het verval zal nog steeds worden opgenomen door het gedeelte bovenstrooms van de grofzandbarrière.

Om tot falen van de waterkering te komen is nog steeds een reeks van stappen nodig die via doorloopsheid uiteindelijk leidt tot inundatie; hierna zijn de stappen tot aan doorloopsheid beschreven.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft

Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfrond mini-amfiteater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 315.



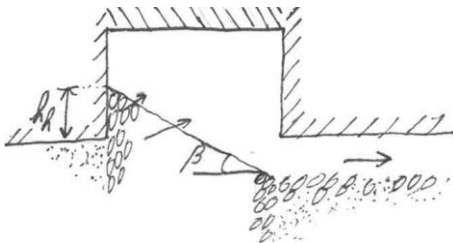
Figuur 315 Uitspoeling van bovendeel barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfitheater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor.

De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 316.



Figuur 316 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

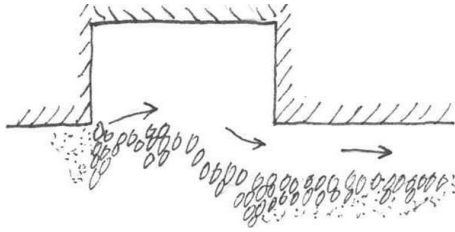
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier kortheidshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

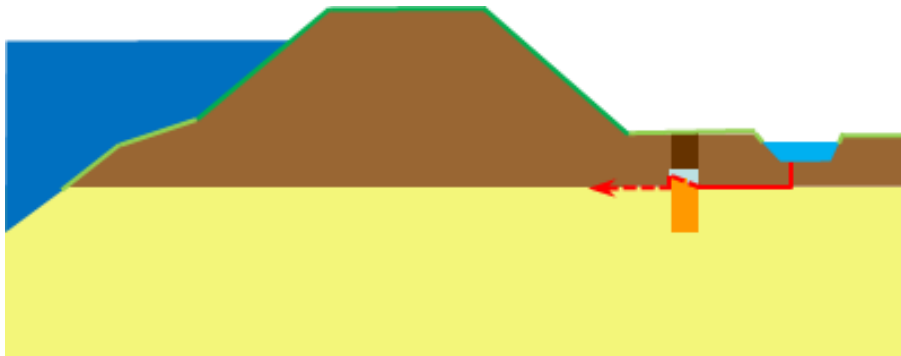
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 317.



Figuur 317 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeiën van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 318).



Figuur 318 Doorlooptheid.

C.2.10 Pad 46 Aanvulklei is niet goed waardoor er een holle ruimte is boven het barrièrezand en de sleufaanvulling bezwijkt

U2 Aanvulklei wordt te dun aangebracht, bevat holle ruimtes en/of wordt in onvoldoende mate aangevoerd en/of verdicht

Wanneer de klei, die ter aanvulling op het zand van de grofzandbarrière moet worden aangebracht, op enigerlei wijze tekortschiet, dan kan dit bezwijken in de hand werken. Het gaat hierbij om elk van de genoemde mogelijkheden of een combinatie daarvan: te dun aanbrengen, holle ruimtes (bijvoorbeeld in de hoeken), onvoldoende aanvoer (gegeven de voortgangssnelheid – dit is in feite hetzelfde als 'te dun aanbrengen') of onvoldoende verdichting.

Voor een grofzandbarrière met inkassing geldt dit met name bij de toepassing van een bovenstroomse afdichting ("kleimuurtje"). Wanneer een bovenstroomse afdichting niet nodig is, dan is het voornaamste bezwaar slechts de kwel via de sleuf, hoewel ook dit tot enige verzwakking van de grofzandbarrière als geheel leidt door de resulterende verlaging van de stromingsweerstand benedenstrooms van het grove zand.

22 Holle ruimte tussen deklaag/sleufaanvulling en zandlaag/barrière

Als er een holle ruimte is tussen deklaag en sleufaanvulling en pipinggevoelige zandlaag/grofzandbarrière anderzijds, dan vormt dit een zone waar gemakkelijker erosie kan optreden omdat het materiaal dan ook kan worden afgevoerd (anders dan wanneer er slechts sprake is van poriën)

61 Sleufaanvulling bezwijkt

De volgende stap is dat de sleufaanvulling bezwijkt, dat wil zeggen: geen volledige afsluiting meer vormt tussen barrièrezand en maaiveld. Dit kan gebeuren als de sleufaanvulling van onderaf verder erodeert. Voor de veiligheid zal moeten worden getoetst of er geen kwelstroom bovenlangs kan ontstaan die tot verdere erosie leidt. Als er geen erosie optreedt, dan is er hooguit sprake van enige wateroverlast indien de stijghoogte in de barrière boven het maaiveld reikt. Door toepassing van een erosiebestendige kleilaag direct bovenop het barrièrezand is dit in belangrijke mate te voorkomen.

60 Opbarsten en heave van de sleuf

De vorige stap leidt, bij voldoende stromingsdruk, vervolgens tot heave van de sleuf, na eventueel opbarsten.

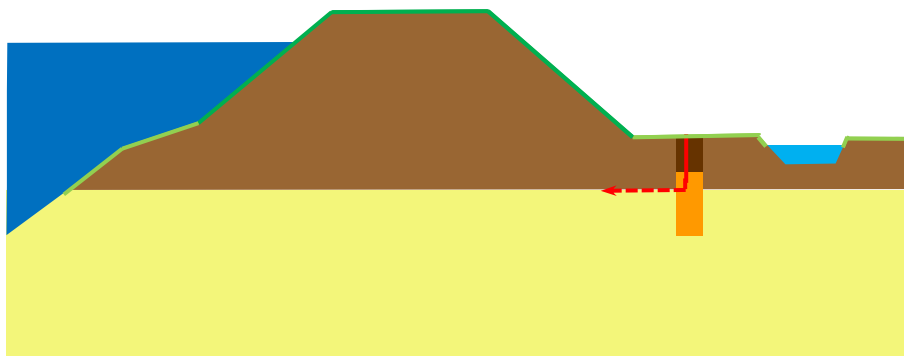
59 Pipe ontwikkelt zich door de sleuf naar het maaiveld

Hierna ontwikkelt de pipe zich via de sleuf naar het maaiveld.

Bij deze oorzaak en het hiervoor beschreven faalpad zal op dit punt in één of meer doorsneden overigens een geheel open verbinding zijn ontstaan tussen het oorspronkelijke uittredpunt en de sleuf.

Bovenloopsheid

*Er ontstaat kortsluiting naar het maaiveld via de afdichting boven de grofzandbarrière (zie Figuur 319). Er is dan sprake van een kwelstroom via de sleuf. Dit leidt echter niet direct tot falen: de barrière biedt nog steeds weerstand. **Bovenloopsheid impliceert dus nog géén falen.** Wel zal de totale weerstand benedenstrooms (als in: stroomafwaarts) van de eigenlijke grofzandbarrière verkleind zijn (tenzij de bovenkant van de sleuf zo hoog ligt dat er uiteindelijk geen kwelstroming optreedt, doordat de stijghoogte ter plaatse lager is dan het maaiveld).*



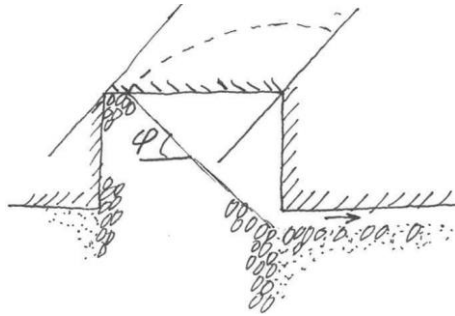
Figuur 319 Bovenloopsheid.

Er treedt dan een herverdeling op van de waterdrukken, waarbij het gedeelte benedenstrooms van de eigenlijke grofzandbarrière (dus: de benedenstroomse pipe(s) en de sleuf samen) een kleiner deel van het verval keren, wat dan gecompenseerd zal moeten worden door het verval over de eigenlijke grofzandbarrière en het achtergrondzand bovenstrooms van de grofzandbarrière samen. De toename van het verval over de eigenlijke grofzandbarrière zelf zal relatief gering zijn: het grootste deel van het verval zal nog steeds worden opgenomen door het gedeelte bovenstrooms van de grofzandbarrière. Om tot falen van de waterkering te komen is nog steeds een reeks van stappen nodig die via doorloopsheid uiteindelijk leidt tot inundatie; hierna zijn de stappen tot aan doorloopsheid beschreven.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft

Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende

zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfronde mini-amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 320.



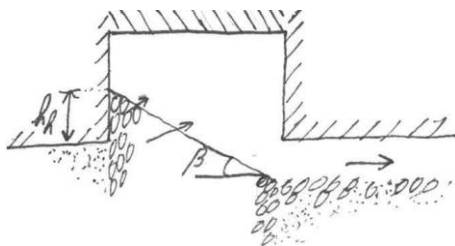
Figuur 320 Uitspoeling van bovendeele barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfitheater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor.

De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 321.



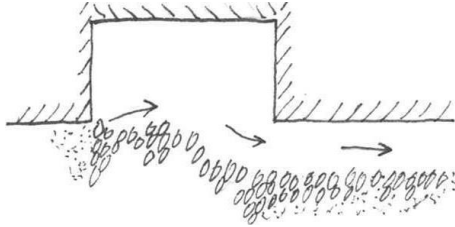
Figuur 321 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand
Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier kortheidshalve niet herhaald.

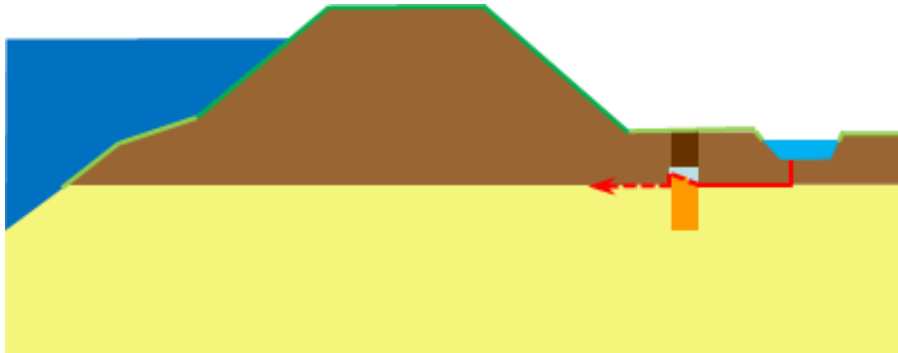
20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 322.



Figuur 322 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 323).



Figuur 323 Doorlooptheid.

C.2.11 Pad 47 Aanvulklei is erosiegevoelig waardoor de sleufaanvulling bezwijkt

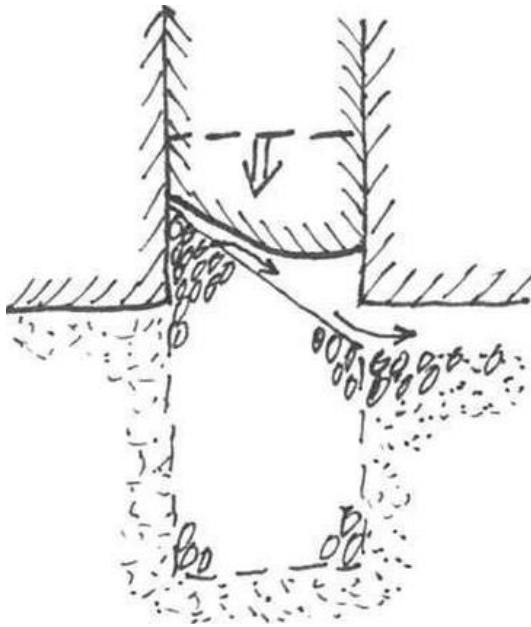
U7 Aanvulklei is erosiegevoelig

Erosie van de aanvulklei kan op drie manieren optreden:

- *Oplossen van klei in water (dispersie).*
- *Directe stromingserosie.*
- *Losraken van kleinere brokjes en eventueel wat grotere brokken.*

Wanneer de klei gevoelig is voor dispersie, dan kan de kleiaanvulling in de loop van de tijd geleidelijk aan verdwijnen. Klei die hiervoor gevoelig is, kan beter niet worden toegepast.

Bij directe stromingserosie kan gedacht worden aan de situatie als in Figuur 324, ook wanneer de zwel naar verhouding minder extreem is. Deze vorm van erosie kan optreden boven het vrije oppervlak, maar over het algemeen zal dit vrij beperkt zijn omdat de stroming nabij de bovenkant van de ontstane holle ruimte vrij zwak zal blijven.



Figuur 324 Situatie waarbij stromingserosie van de kleiaanvulling relatief gemakkelijk zal optreden, met name aan de linkerkant van de grofzandbarrière.

Loslatende brokjes klei zullen betrekkelijk snel worden afgevoerd, zo is de verwachting, mede op basis van waarnemingen bij grootschalige pipingproeven waarbij een deklaag van klei werd gebruikt. Het volledig afgedekt raken van de ontstane helling in het barrièrezand hoeft tijdens een hoogwater niet te worden verwacht (zie hiervoor ook §A.3.4).

62 Erosie van klei uit aanvulling

Het proces start in dit geval met de erosie van de klei uit de sleufaanvulling, door de stroming van onderaf.

61 Sleufaanvulling bezwijkt

De volgende stap is dat de sleufaanvulling bezwijkt, dat wil zeggen: geen volledige afsluiting meer vormt tussen barrièrezand en maaiveld. Dit kan gebeuren als de sleufaanvulling van onderaf verder erodeert. Voor de veiligheid zal moeten worden getoetst of er geen kwelstroom bovenlangs kan ontstaan die tot verdere erosie leidt. Als er geen erosie optreedt, dan is er hooguit sprake van enige wateroverlast indien de stijghoogte in de barrière boven het maaiveld reikt. Door toepassing van een erosiebestendige kleilaag direct bovenop het barrièrezand is dit in belangrijke mate te voorkomen.

60 Opbarsten en heave van de sleuf

De vorige stap leidt, bij voldoende stromingsdruk, vervolgens tot heave van de sleuf, na eventueel opbarsten.

59 Pipe ontwikkelt zich door de sleuf naar het maaiveld

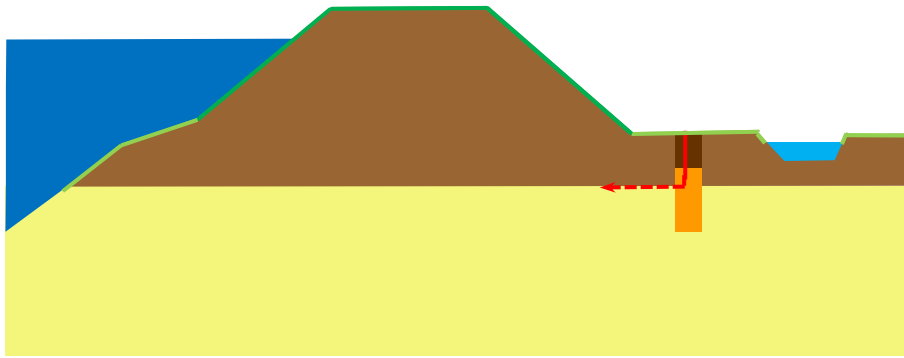
Hierna ontwikkelt de pipe zich via de sleuf naar het maaiveld.

Bij deze oorzaak en het hiervoor beschreven faalpad zal op dit punt in één of meer doorsneden overigens een geheel open verbinding zijn ontstaan tussen het oorspronkelijke uittredepunt en de sleuf.

Bovenloopsheid

Er ontstaat kortsluiting naar het maaiveld via de afdichting boven de grofzandbarrière (zie Figuur 325). Er is dan sprake van een kwelstroom via de sleuf. Dit leidt echter niet direct tot falen: de barrière biedt nog steeds weerstand. **Bovenloopsheid impliceert dus nog géén falen.** Wel zal de totale weerstand benedenstrooms (als in: stroomafwaarts) van de eigenlijke

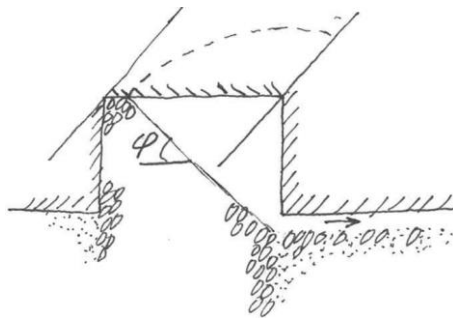
grofzandbarrière verkleind zijn (tenzij de bovenkant van de sleuf zo hoog ligt dat er uiteindelijk geen kwelstroming optreedt, doordat de stijghoogte ter plaatse lager is dan het maaiveld).



Figuur 325 Bovenloopsheid.

Er treedt dan een herverdeling op van de waterdrukken, waarbij het gedeelte benedenstrooms van de eigenlijke grofzandbarrière (dus: de benedenstroomse pipe(s) en de sleuf samen) een kleiner deel van het verval keren, wat dan gecompenseerd zal moeten worden door het verval over de eigenlijke grofzandbarrière en het achtergrondzand bovenstrooms van de grofzandbarrière samen. De toename van het verval over de eigenlijke grofzandbarrière zelf zal relatief gering zijn: het grootste deel van het verval zal nog steeds worden opgenomen door het gedeelte bovenstrooms van de grofzandbarrière. Om tot falen van de waterkering te komen is nog steeds een reeks van stappen nodig die via doorloopsheid uiteindelijk leidt tot inundatie; hierna zijn de stappen tot aan doorloopsheid beschreven.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfrond mini-amfiteater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 326.



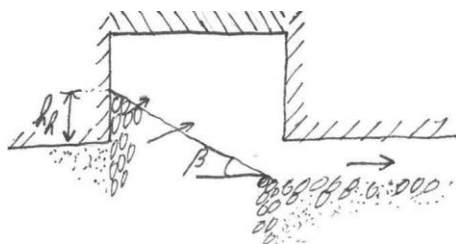
Figuur 326 Uitspoeling van bovendeele barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfiteater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor.

De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 327.



Figuur 327 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

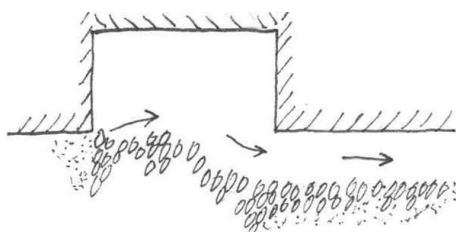
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier korthedshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

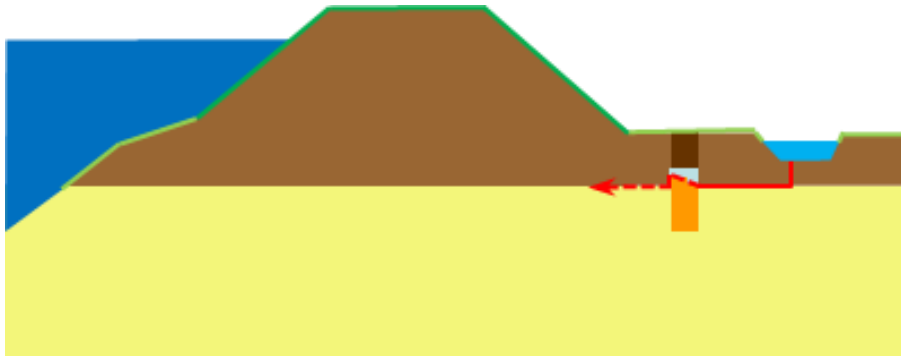
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 328.



Figuur 328 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorloopseheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorloopseheid (zie Figuur 329).

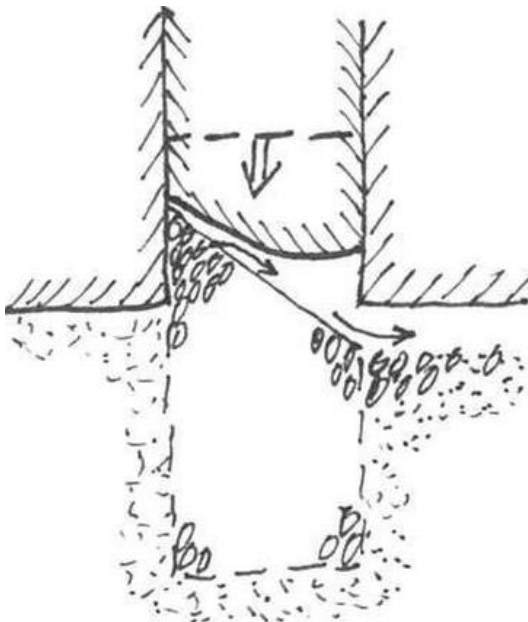


Figuur 329 Doorloopsheld.

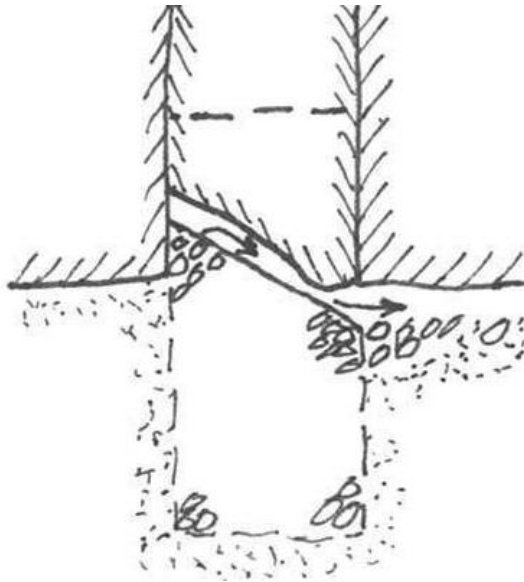
C.2.12 Pad 48 Zwelvermogen aanvulklei is te groot waardoor deze te snel erodeert en sleuf bezwijkt

U5 Aanvulklei zwelt te sterk in de holle ruimte die boven het zand ontstaat. Zodra er korrels uit de inkassing wegstromen, ontstaat daar een holle ruimte. Deze ruimte kan worden opgevuld met klei die onderin de sleufaanvulling is gebruikt. Dit kan gebeuren doordat er brokjes klei loslaten of doordat deze klei opzwellt. In het laatste geval kan de mate van opzwellen zo groot zijn, dat dit een belemmering vormt voor de vrije uitstroming van water op de helling die in de grofzandbarrière ontstaat.

Het proces dat dan optreedt is weergegeven in Figuur 330 en Figuur 331: het zwellen van de klei zorgt voor een vernauwing van het vrije uitstroomoppervlak waardoor hier extra erosie ontstaat (dus meer erosie van het zand dan zonder deze verzakking van het oppervlak van de onderkant de aanvulklei het geval zou zijn geweest). Hierdoor kan falen eerder worden bereikt.



Figuur 330 Zwell van de kleiaanvulling, leidend tot vernauwing van het vrije uitstroomoppervlak op de helling bovenin het barrièrezand.



Figuur 331 Vervolg op voorgaande figuur: verdere zwelling van de aanvulklei met extra erosie van de grofzandbarrière tot gevolg.

Het is reëel om te verwachten dat een sterk zwellende kleisoort zelf zal eroderen onder invloed van de stroming vanuit grofzandbarrière, of dat de klei in brokken uiteenvalt, eerder dan dat een problematisch grote zwelling optreedt. In §A.2.7 (beïnvloedende factor U7) wordt ingegaan op de mogelijkheid van erosie van de klei zelf, het bijbehorende faalpad 47 is direct hiervoor beschreven in §C.2.11.

Door toepassing van niet sterk-zwellende klei, zal de klei min of meer op zijn plaats blijven of anders in brokken uiteenvallen. De neervallende brokken zullen tijdens het hoogwater door de stroming in delen en deeltjes worden afgevoerd, wat geen invloed zal hebben op de helling in de grofzandbarrière. Na afloop van het hoogwater zal de klei ook nog in de eronder ontstane holle ruimte kunnen vallen; dan wordt de klei niet meer afgevoerd en is er wel sprake van een probleem, waarvoor dan wel de gelegenheid bestaat om dit op te lossen. Deze factor die de veiligheid beïnvloedt is nader beschreven als B4 in §A.3.4.

62 Erosie van klei uit aanvulling

Het proces start in dit geval met de erosie van de klei uit de sleufaanvulling, door de stroming van onderaf, erosie van de onderliggende zandkorrels en de zwel van de klei waardoor deze gevoeliger wordt door stromingserosie.

61 Sleufaanvulling bezwijkt

De volgende stap is dat de sleufaanvulling bezwijkt, dat wil zeggen: geen volledige afsluiting meer vormt tussen barrièrezand en maaiveld. Dit kan gebeuren als de sleufaanvulling van onderaf verder erodeert. Voor de veiligheid zal moeten worden getoetst of er geen kwelstroom bovenlangs kan ontstaan die tot verdere erosie leidt. Als er geen erosie optreedt, dan is er hooguit sprake van enige wateroverlast indien de stijghoogte in de barrière boven het maaiveld reikt. Door toepassing van een erosiebestendige kleilaag direct bovenop het barrièrezand is dit in belangrijke mate te voorkomen.

60 Opbarsten en heave van de sleuf

De vorige stap leidt, bij voldoende stromingsdruk, vervolgens tot heave van de sleuf, na eventueel opbarsten.

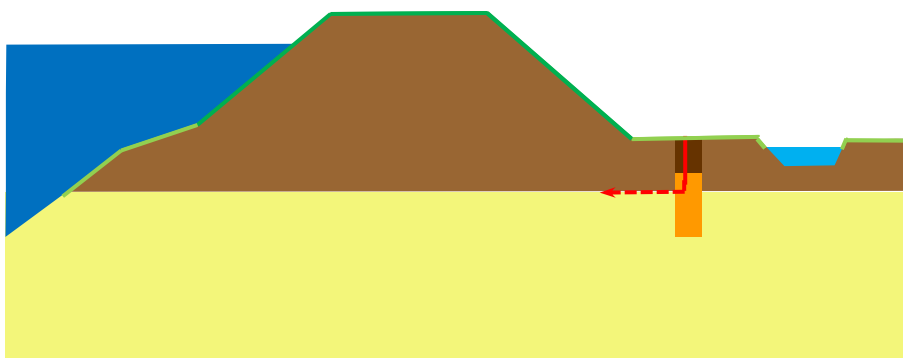
59 Pipe ontwikkelt zich door de sleuf naar het maaiveld

Hierna ontwikkelt de pipe zich via de sleuf naar het maaiveld.

Bij deze oorzaak en het hiervoor beschreven faalpad zal op dit punt in één of meer doorsneden overigens een geheel open verbinding zijn ontstaan tussen het oorspronkelijke uittredepunt en de sleuf.

Bovenloopsheid

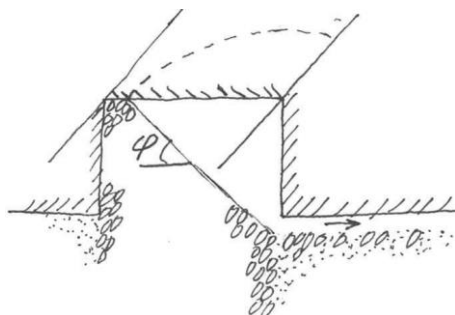
Er ontstaat kortsluiting naar het maaiveld via de afdichting boven de grofzandbarrière (zie Figuur 332). Er is dan sprake van een kwelstroom via de sleuf. Dit leidt echter niet direct tot falen: de barrière biedt nog steeds weerstand. **Bovenloopsheid impliceert dus nog géén falen.** Wel zal de totale weerstand benedenstrooms (als in: stroomafwaarts) van de eigenlijke grofzandbarrière verkleind zijn (tenzij de bovenkant van de sleuf zo hoog ligt dat er uiteindelijk geen kwelstroming optreedt, doordat de stijghoogte ter plaatse lager is dan het maaiveld).



Figuur 332 Bovenloopsheid.

Er treedt dan een herverdeling op van de waterdrukken, waarbij het gedeelte benedenstrooms van de eigenlijke grofzandbarrière (dus: de benedenstroomse pipe(s) en de sleuf samen) een kleiner deel van het verval keren, wat dan gecompenseerd zal moeten worden door het verval over de eigenlijke grofzandbarrière en het achtergrondzand bovenstrooms van de grofzandbarrière samen. De toename van het verval over de eigenlijke grofzandbarrière zelf zal relatief gering zijn: het grootste deel van het verval zal nog steeds worden opgenomen door het gedeelte bovenstrooms van de grofzandbarrière. Om tot falen van de waterkering te komen is nog steeds een reeks van stappen nodig die via doorloopsheid uiteindelijk leidt tot inundatie; hierna zijn de stappen tot aan doorloopsheid beschreven.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft
Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfrond mini-amfiteater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 333.



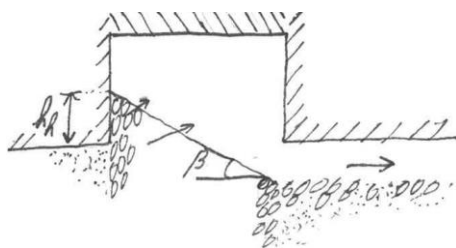
Figuur 333 Uitspoeling van bovendeele barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het ‘amfitheater’ een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor.

De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 334.



Figuur 334 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

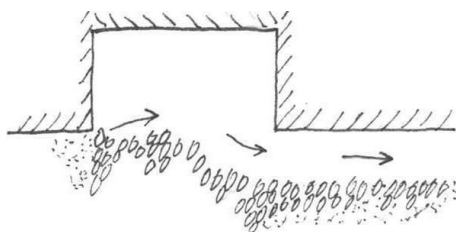
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier korthedshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

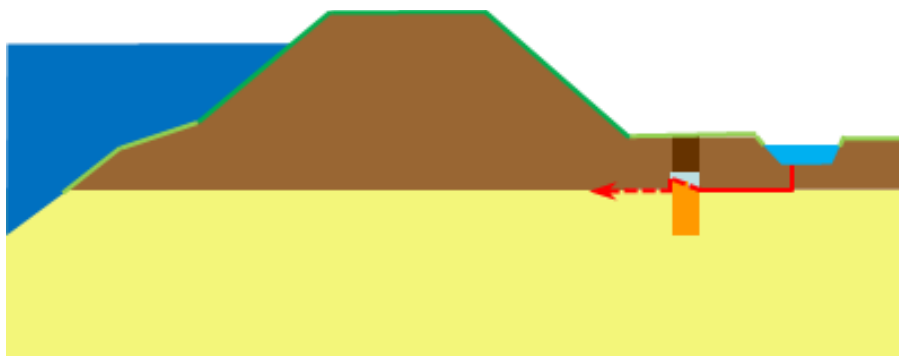
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 335.



Figuur 335 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorloopsheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorloopsheid (zie Figuur 336).



Figuur 336 Doorloopsheid.

C.2.13 Pad 49 Te nat aangebrachte klei in sleuf erodeert gemakkelijk

U8 Aanvulklei is bij aanbrengen te nat

Wanneer de aanvulklei bij aanbrengen te nat is, dan is de vereiste verdichting moeilijker of zelfs niet te realiseren. Wanneer deze nat blijft, dan zal deze klei bovendien relatief gemakkelijk kunnen eroderen.

NB: dit betreft de situatie waarbij ná aanbrengen en vóór een hoogwater géén uitdroging optreedt. Dat is beschreven in faalpad 50 hierna (§C.2.14).

62 Erosie van klei uit aanvulling

Het proces start in dit geval met de erosie van de klei uit de sleufaanvulling, door de stroming van onderaf.

61 Sleufaanvulling bezwijkt

De volgende stap is dat de sleufaanvulling bezwijkt, dat wil zeggen: geen volledige afsluiting meer vormt tussen barrièrezand en maaiveld. Dit kan gebeuren als de sleufaanvulling van onderaf verder erodeert. Voor de veiligheid zal moeten worden getoetst of er geen kwelstroom bovenlangs kan ontstaan die tot verdere erosie leidt. Als er geen erosie optreedt, dan is er hooguit sprake van enige wateroverlast indien de stijghoogte in de barrière boven het maaiveld reikt. Door toepassing van een erosiebestendige kleilaag direct bovenop het barrièrezand is dit in belangrijke mate te voorkomen.

60 Opbarsten en heave van de sleuf

De vorige stap leidt, bij voldoende stromingsdruk, vervolgens tot heave van de sleuf, na eventueel opbarsten.

59 Pipe ontwikkelt zich door de sleuf naar het maaiveld

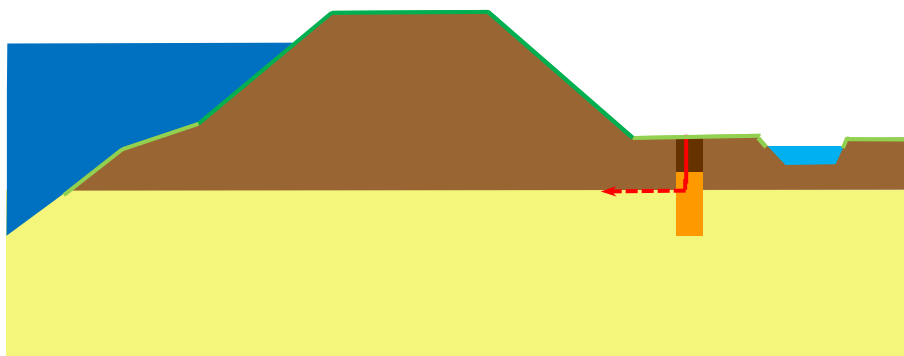
Hierna ontwikkelt de pipe zich via de sleuf naar het maaiveld.

Bij deze oorzaak en het hiervoor beschreven faalpad zal op dit punt in één of meer doorsneden overigens een geheel open verbinding zijn ontstaan tussen het oorspronkelijke uittredepunt en de sleuf.

Bovenloopsheid

*Er ontstaat kortsluiting naar het maaiveld via de afdichting boven de grofzandbarrière (zie Figuur 337). Er is dan sprake van een kwelstroom via de sleuf. Dit leidt echter niet direct tot falen: de barrière biedt nog steeds weerstand. **Bovenloopsheid impliceert dus nog géén falen.** Wel zal de totale weerstand benedenstrooms (als in: stroomafwaarts) van de eigenlijke grofzandbarrière verkleind zijn (tenzij de bovenkant van de sleuf zo hoog ligt dat er*

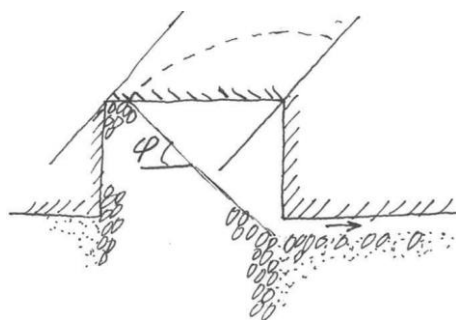
uiteindelijk geen kwelstroming optreedt, doordat de stijghoogte ter plaatse lager is dan het maaiveld).



Figuur 337 Bovenloopseheid.

Er treedt dan een herverdeling op van de waterdrukken, waarbij het gedeelte benedenstrooms van de eigenlijke grofzandbarrière (dus: de benedenstroomse pipe(s) en de sleuf samen) een kleiner deel van het verval keren, wat dan gecompenseerd zal moeten worden door het verval over de eigenlijke grofzandbarrière en het achtergrondzand bovenstrooms van de grofzandbarrière samen. De toename van het verval over de eigenlijke grofzandbarrière zelf zal relatief gering zijn: het grootste deel van het verval zal nog steeds worden opgenomen door het gedeelte bovenstrooms van de grofzandbarrière. Om tot falen van de waterkering te komen is nog steeds een reeks van stappen nodig die via doorloopseheid uiteindelijk leidt tot inundatie; hierna zijn de stappen tot aan doorloopseheid beschreven.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfrond mini-amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 338.



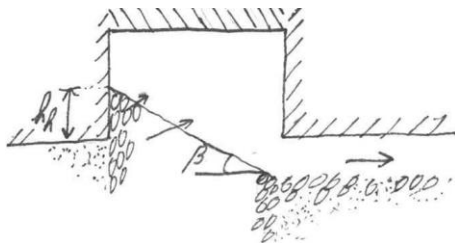
Figuur 338 Uitspoeling van bovendeele barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfitheater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor.

De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 339.



Figuur 339 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

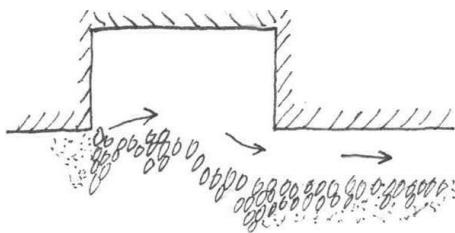
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier korthedshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

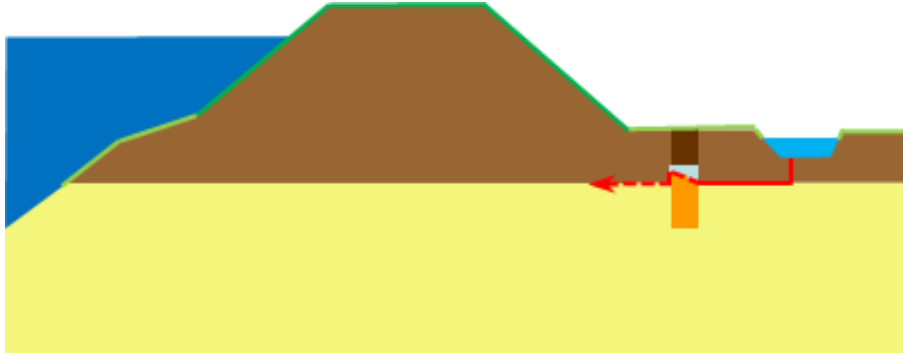
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 340.



Figuur 340 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorloopsheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorloopsheid (zie Figuur 341).



Figuur 341 Doorloopsheid.

C.2.14 Pad 50 Te nat aangebrachte klei in sleuf droogt uit en bovenloopsheid ontstaat via krimpscheuren

U8 Aanvulklei is bij aanbrengen te nat

Wanneer de aanvulklei tijdens het aanbrengen te nat is, dan is de vereiste verdichting moeilijker of zelfs niet te realiseren. Ook kan deze klei, als deze droog kan vallen bijvoorbeeld bij lage buitenwaterstanden, naderhand sterker uitdrogen.

67* Klei droogt uit

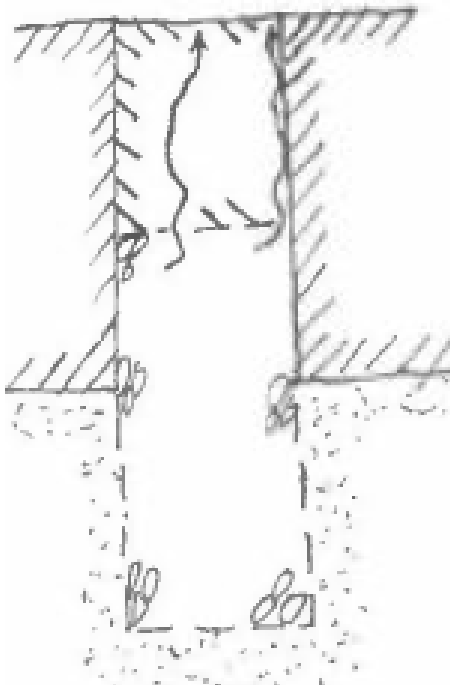
Als de grondwaterstand voldoende laag komt te staan, dan zal de aanvankelijk te natte klei in sterkere mate kunnen uitdrogen dan klei die verwerkt is bij een optimaal watergehalte.

66* Droogtescheuren

Het proces van uitdrogen leidt tot droogtescheuren.

65 Kortsluiting door sleufaanvulling

Via de droogtescheuren zal kortsluiting met het maaiveld kunnen ontstaan, met drainage via de aanvulsleuf tot gevolg, zoals geschetst in Figuur 342.



Figuur 342 Drainage door de kleiaanvulling.

61 Sleufaanvulling bezwijkt

Met de vorige stap is de sleufaanvulling al bezweken, dat wil zeggen dat deze geen volledige afsluiting meer vormt tussen barrièrezand en maaiveld. Voor de veiligheid zal moeten worden getoetst of er geen kwelstroom bovenlangs kan ontstaan die tot verdere erosie leidt. Als er geen erosie optreedt, dan is er hooguit sprake van enige wateroverlast indien de stijghoogte in de barrière boven het maaiveld reikt.

60 Opbarsten en heave van de sleuf

De vorige stap leidt, bij voldoende stromingsdruk, vervolgens tot heave van de sleuf, na eventueel opbarsten.

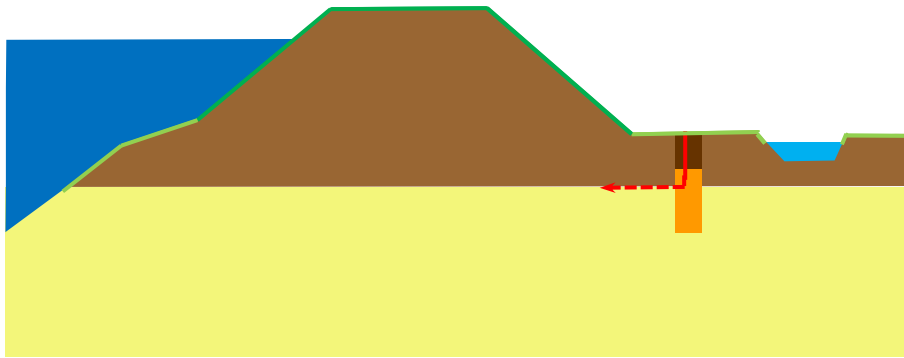
59 Pipe ontwikkelt zich door de sleuf naar het maaiveld

Hierna ontwikkelt de pipe zich via de sleuf naar het maaiveld.

Bij deze oorzaak en het hiervoor beschreven faalpad zal op dit punt in één of meer doorsneden overigens een geheel open verbinding zijn ontstaan tussen het oorspronkelijke uittredepunt en de sleuf.

Bovenloopsheid

*Er ontstaat kortsluiting naar het maaiveld via de afdichting boven de grofzandbarrière (zie Figuur 343). Er is dan sprake van een kwelstroom via de sleuf. Dit leidt echter niet direct tot falen: de barrière biedt nog steeds weerstand. **Bovenloopsheid impliceert dus nog géén falen.** Wel zal de totale weerstand benedenstrooms (als in: stroomafwaarts) van de eigenlijke grofzandbarrière verkleind zijn (tenzij de bovenkant van de sleuf zo hoog ligt dat er uiteindelijk geen kwelstroming optreedt, doordat de stijghoogte ter plaatse lager is dan het maaiveld).*



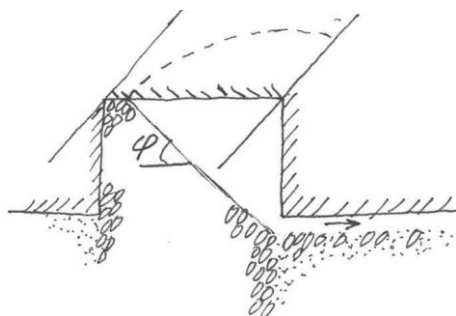
Figuur 343 Bovenloopsheid.

Er treedt dan een herverdeling op van de waterdrukken, waarbij het gedeelte benedenstrooms van de eigenlijke grofzandbarrière (dus: de benedenstroomse pipe(s) en de sleuf samen) een kleiner deel van het verval keren, wat dan gecompenseerd zal moeten worden door het verval over de eigenlijke grofzandbarrière en het achtergrondzand bovenstrooms van de grofzandbarrière samen. De toename van het verval over de eigenlijke grofzandbarrière zelf zal relatief gering zijn: het grootste deel van het verval zal nog steeds worden opgenomen door het gedeelte bovenstrooms van de grofzandbarrière. Om tot falen van de waterkering te komen is nog steeds een reeks van stappen nodig die via doorloopsheid uiteindelijk leidt tot inundatie; hierna zijn de stappen tot aan doorloopsheid beschreven.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft

Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom

een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfmond mini-amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 344.



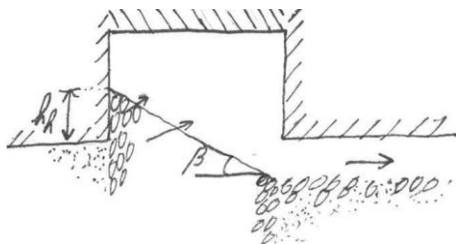
Figuur 344 Uitspoeling van bovendeeel barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfitheater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor.

De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 345.



Figuur 345 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

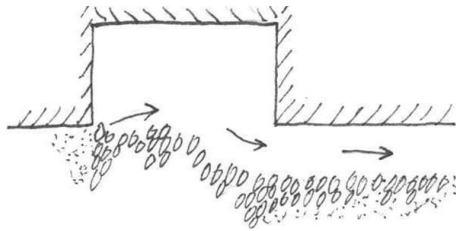
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier korthedshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

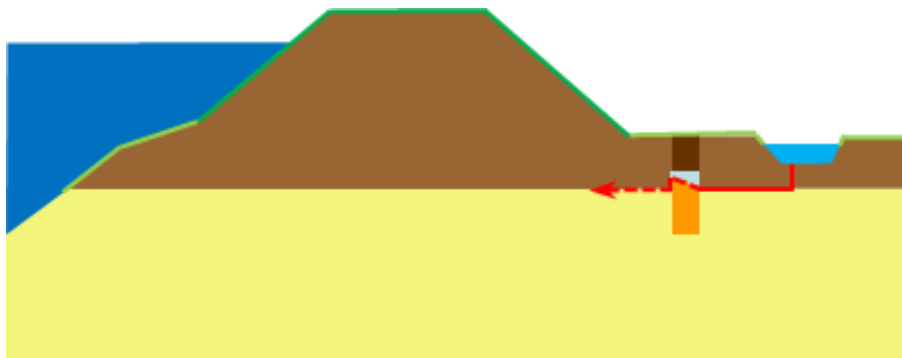
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 346.



Figuur 346 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 347).

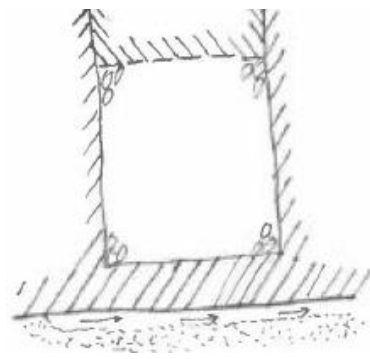


Figuur 347 Doorlooptheid.

C.2.15 Pad 51 Ontgraving is niet diep genoeg, waardoor de pipe onder de barrière door kan

U9 Ontgraving is onvoldoende diep

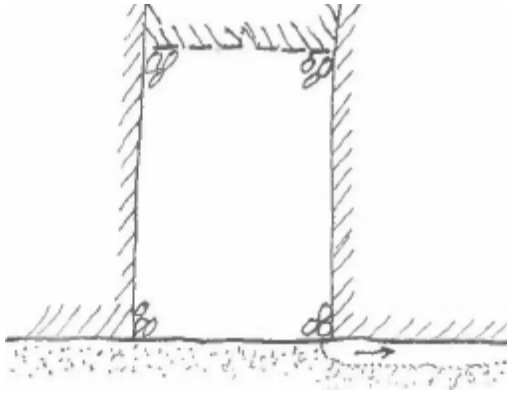
Als bij de uitvoering onvoldoende diep wordt gegraven, dan is er sprake van de situatie zoals geschetst in Figuur 348: de grofzandbarrière steekt niet tot in de pipinggevoelige zandlaag.



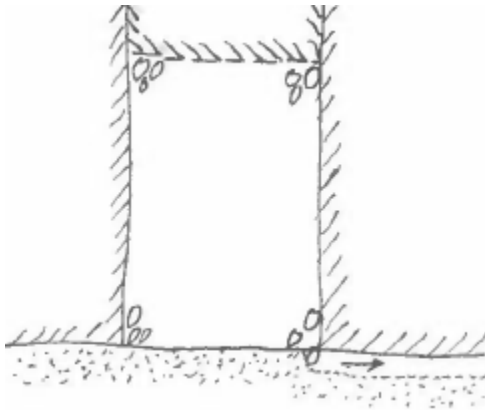
Figuur 348 Barrière is te ondiep en steekt niet tot in de pipinggevoelige zandlaag.

Als de grofzandbarrière juist tot aan de pipinggevoelige zandlaag steekt (zie Figuur 349), dan zal de pipe niet zomaar voorbij de grofzandbarrière kunnen groeien: de korrels van de grofzandbarrière zullen in de pipe vallen (zie Figuur 350). De grove korrels zullen net als anders niet ver weg getransporteerd worden, maar er zal een combinatie ontstaan van een 'plaveisel' in het meest nabije gedeelte van de benedenstroomse pipe (net als anders), en een verzakte grofzandbarrière doordat het fijne zand eronder deels zal eroderen (zie Figuur 351). Uiteindelijk ontstaat er net zo'n uiterste toestand als bij een grofzandbarrière die wél

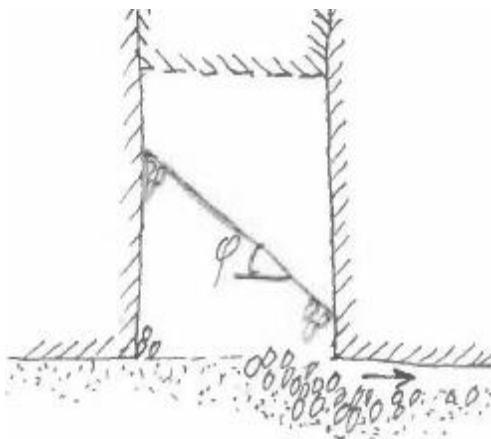
een eindje in de pipinggevoelige zandlaag steekt (zie Figuur 352), al zal het vanwege het deels wegzakken van de barrière in de ondergrond wat rommeliger uitzien en zijn tussenliggende fasen moeilijker te modelleren. De zijdelingse pipeontwikkeling aan de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière zal ook normaal kunnen plaatsvinden.



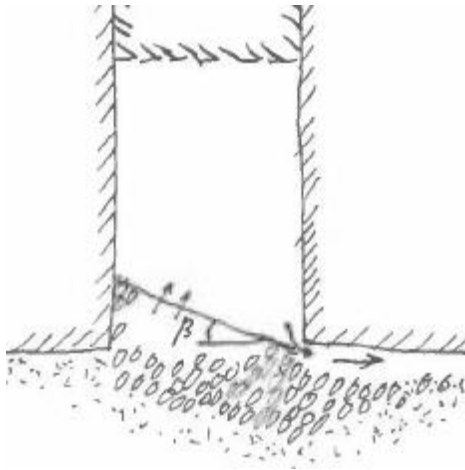
Figuur 349 Pipegroei tot aan een grofzandbarrière die net tot aan de pipinggevoelige zandlaag is aangebracht.



Figuur 350 Vervolg op voorgaande figuur: eerste korrel vanuit de grofzandbarrière in de benedenstroomse pipe.



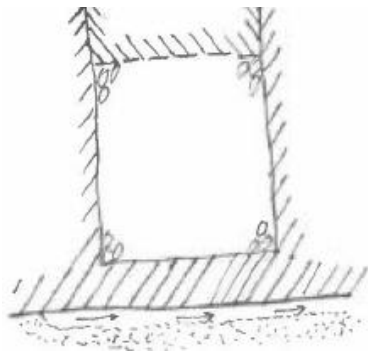
Figuur 351 Vervolg op voorgaande figuur: deels verzakte grofzandbarrière, deels leeggelopen inkassing en plaveisel met grove korrels in de benedenstroomse pipe.



Figuur 352 Uiterste situatie bij een grofzandbarrière die net tot aan de pipinggevoelige zandlaag is aangebracht.

69 Barrière steekt niet diep genoeg; niet tot in de pipinggevoelige zandlaag
 Zoals bij de beschrijving van de beïnvloedende factor hiervoor is toegelicht, is er alleen een probleem als de grofzandbarrière niet tot in de pipinggevoelige zandlaag reikt.

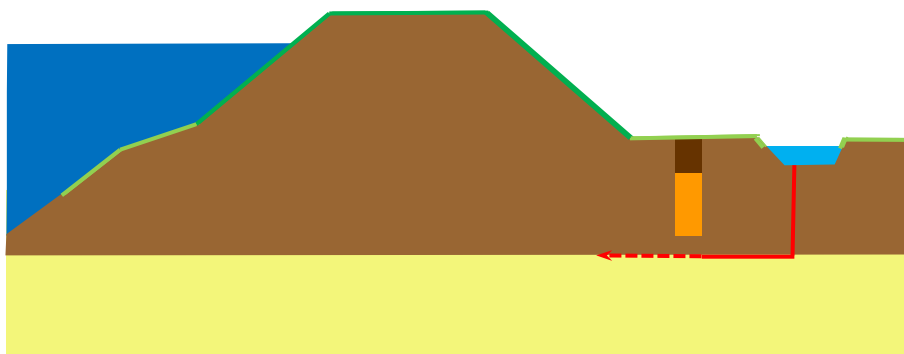
68 Pipe groeit onder de grofzandbarrière door
 Als de grofzandbarrière niet diep genoeg steekt, zodat deze niet tot in de pipinggevoelige zandlaag reikt, dan zal een pipe onder de grofzandbarrière door kunnen passeren (zie Figuur 353).



Figuur 353 Barrière is te ondiep en steekt niet tot in de pipinggevoelige zandlaag.

Onderloopsheid

De pipe ontwikkelt zich onder de barrière door, zodat er sprake is van onderloopsheid (zie Figuur 354).



Figuur 354 Onderloopsheid.

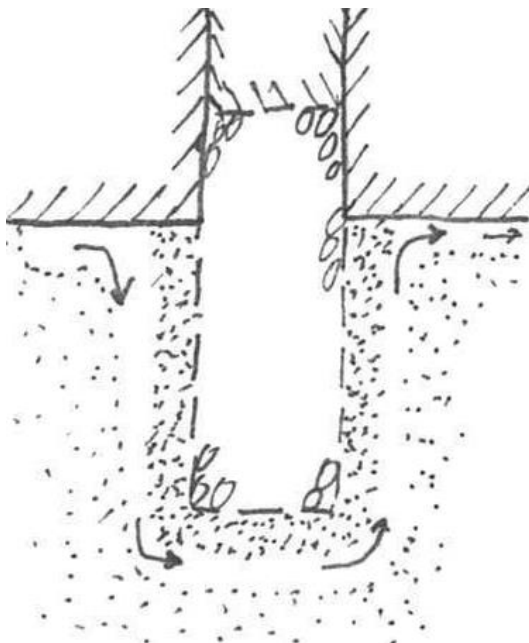
C.2.16 Pad 52 Achtergrondzand raakt in extreme mate verdicht: deel met lage porositeit erodeert niet: schermwerking

U6 Extreme verdichting achtergrondzand

Extreme verdichting van het achtergrondzand kan zich voordoen wanneer de grofzandbarrière grondverdringend wordt aangebracht, bijvoorbeeld in de vorm van losse zandpalen.

Wanneer een benedenstroomse pipe verbinding maakt met een zandpaal, ondanks de lage doorlatendheid en erosieweerstand van het verdichte achtergrondzand rondom de zandpalen, bestaat het risico op de vorming van een langspipe langs de omtrek van de zandpaal wat kan leiden tot falen bij een verval lager dan het maatgevend verval. Zie §A.2.1, Figuur 103 tot en met Figuur 106 en de daarbij behorende tekst, voor een toelichting hierop.

Een andere mogelijkheid is dat een benedenstroomse pipe niet tot aan de zandpaal kan groeien. In dat geval zijn er twee mogelijkheden: vorming van een pipe onder het geheel van zandpalen en extreem verdicht achtergrondzand door (dat geheel functioneert dan in feite als een heavescherm, zie Figuur 355), of voorloopsheid doordat de waterdruk bovenstrooms van deze maatregel zo hoog oploopt dat dáár opbarsten en heave optreden, waarop echter ontworpen zou moeten worden (zie §A.1.20; maatregelen tegen opbarsten en heave bovenstrooms van de grofzandbarrière en de faalpaden 54 en 55 in §§C.2.18-19).



Figuur 355 Heave achter en piping onder extreem verdicht achtergrondzand rondom een grondverdringend aangebrachte grofzandbarrière door.

Het is goed denkbaar dat falen door deze factor pas optreedt bij een verval dat (ruimschoots) groter dan het maatgevend verval, dan vormt dit geen probleem. Voor de relevante processen van heave onder het geheel door en opbarsten bovenstrooms van de barrière kan met berekeningen worden bepaald of hieraan voldaan wordt.

57* Verlaagde porositeit rondom barrière

Door het grondverdringende aanbrengproces worden de korrels in een zone rondom de zandpaal samengedrukt waardoor de porositeit verlaagd wordt.

56* Lage doorlatendheid rondom barrière

Door de lagere porositeit is er ook sprake van een lagere doorlatendheid rondom de barrière, in de zone die beïnvloed is door het aanbrengproces.

98n Slechtdoorlatende deel erodeert NIET of breekt NIET af

Wanneer het pipingproces en (een deel van) het heaveproces optreden zoals aangegeven in Figuur 355, en het slechtdoorlatende deel erodeert niet alsnog en breekt ook niet alsnog af, dan kan de barrière niet zoals bedoeld worden aangesproken op de sterkte. Het heaveproces zal dan verder doorzetten. Wanneer dit deel wel gedeeltelijk erodeert of afbreekt, dan ontstaat de situatie met doorloopsheid zoals beschreven in §C.2.7 (faalpad 43).

70 Barrière werkt als ondoorlatend scherm

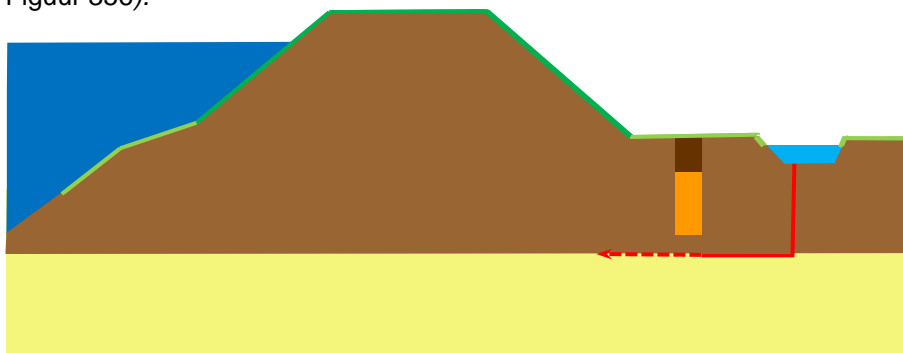
De barrière functioneert hierdoor effectief als een (dik en relatief ondiep) ondoorlatend scherm, niet als een grofzandbarrière met filterwerking.

68 Pipe groeit onder de grofzandbarrière door

De pipe zal onder de grofzandbarrière doorgroeien, waarmee die niet meer is dan een kort en dik heavescherm (zie Figuur 355).

Onderloopsheid

De pipe ontwikkelt zich onder de barrière door, zodat er sprake is van onderloopsheid (zie Figuur 356).



Figuur 356 Onderloopsheid.

C.2.17

Pad 53 Achtergrondzand raakt in extreme mate verdicht: deel met vermalen korrels erodeert niet: schermwerking

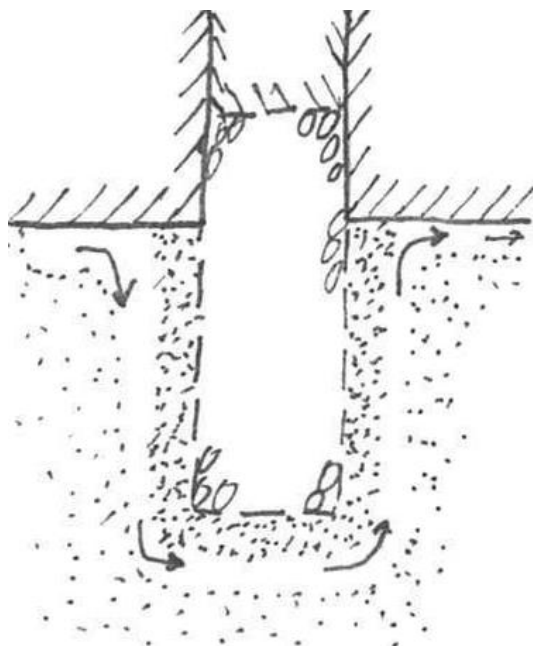
U6 Extreme verdichting achtergrondzand

Extreme verdichting van het achtergrondzand kan zich voordoen wanneer de grofzandbarrière grondverdringend wordt aangebracht, bijvoorbeeld in de vorm van losse zandpalen.

Wanneer een benedenstroomse pipe verbinding maakt met een zandpaal, ondanks de lage doorlatendheid en erosieweerstand van het verdichte achtergrondzand rondom de zandpalen, bestaat het risico op de vorming van een langspipe langs de omtrek van de zandpaal wat kan leiden tot falen bij een verval lager dan het maatgevend verval. Zie §A.2.1, Figuur 103 tot en met Figuur 106 en de daarbij behorende tekst, voor een toelichting hierop.

Een andere mogelijkheid is dat een benedenstroomse pipe niet tot aan de zandpaal kan groeien. In dat geval zijn er twee mogelijkheden: vorming van een pipe onder het geheel van zandpalen en extreem verdicht achtergrondzand door (dat geheel functioneert dan in feite als een heavescherm, zie Figuur 357), of voorloopsheid doordat de waterdruk bovenstrooms van deze maatregel zo hoog oploopt dat dáár opbarsten en heave optreden, waarop echter

ontworpen zou moeten worden (zie §A.1.20; maatregelen tegen opbarsten en heave bovenstrooms van de grofzandbarrière en de faalpaden 54 en 55 in §§C.2.18-19).



Figuur 357 Heave achter en piping onder extreem verdicht achtergrondzand rondom een grondverdringend aangebrachte grofzandbarrière door.

Het is goed denkbaar dat falen door deze factor pas optreedt bij een verval dat (ruimschoots) groter dan het maatgevend verval, dan vormt dit geen probleem. Voor de relevante processen van heave onder het geheel door en opbarsten bovenstrooms van de barrière kan met berekeningen worden bepaald of hieraan voldaan wordt.

58* Vermaling van korrels rondom barrière

Door het grondverdringende aanbrengproces worden de korrels in een zone rondom de zandpaal vermalen waardoor de porositeit verlaagd wordt.

56* Lage doorlatendheid rondom barrière

Door de lagere porositeit is er ook sprake van een lagere doorlatendheid rondom de barrière, in de zone die beïnvloed is door het aanbrengproces.

98n Slechtdoorlatende deel erodeert NIET of breekt NIET af

Wanneer het pipingproces en (een deel van) het heaveproces optreden zoals aangegeven in Figuur 357, en het slechtdoorlatende deel erodeert niet alsnog en breekt ook niet alsnog af, dan kan de barrière niet zoals bedoeld worden aangesproken op de sterkte. Het heaveproces zal dan verder doorzetten. Wanneer dit deel wel gedeeltelijk erodeert of afbreekt, dan ontstaat de situatie met doorlooptheid zoals beschreven in §C.2.8 (faalpad 44).

70 Barrière werkt als ondoorlatend scherm

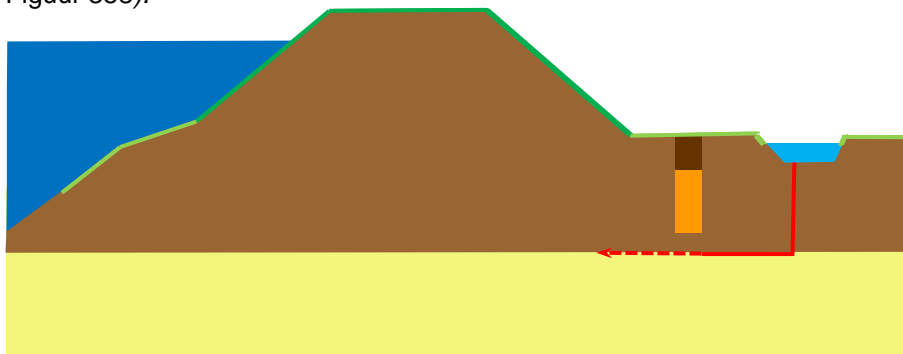
De barrière functioneert hierdoor effectief als een (dik en relatief ondiep) ondoorlatend scherm, niet als een grofzandbarrière met filterwerking.

68 Pipe groeit onder de grofzandbarrière door

De pipe zal onder de grofzandbarrière doorgroeien, waarmee die niet meer is dan een kort en dik heavescherm (zie Figuur 357).

Onderlooptheid

De pipe ontwikkelt zich onder de barrière door, zodat er sprake is van onderloopsheid (zie Figuur 358).



Figuur 358 Onderloopsheid.

C.2.18 **Pad 54 Achtergrondzand raakt in extreme mate verdicht: door verlaagde porositeit drukopbouw bovenstrooms: voorloopsheid**

U6 Extreme verdichting achtergrondzand

Extreme verdichting van het achtergrondzand kan zich voordoen wanneer de grofzandbarrière grondverdringend wordt aangebracht, bijvoorbeeld in de vorm van losse zandpalen.

Wanneer een benedenstroomse pipe verbinding maakt met een zandpaal, ondanks de lage doorlatendheid en erosieweerstand van het verdichte achtergrondzand rondom de zandpalen, bestaat het risico op de vorming van een langspipe langs de omtrek van de zandpaal wat kan leiden tot falen bij een verval lager dan het maatgevend verval. Zie §A.2.1, Figuur 103 tot en met Figuur 106 en de daarbij behorende tekst, voor een toelichting hierop.

Een andere mogelijkheid is dat een benedenstroomse pipe niet tot aan de zandpaal kan groeien. In dat geval zijn er twee mogelijkheden: vorming van een pipe onder het geheel van zandpalen en extreem verdicht achtergrondzand door (dat geheel functioneert dan in feite als een heavescherm, zie de faalpaden 43 en 44 in §§C.2.7-8), of voorloopsheid doordat de waterdruk bovenstrooms van deze maatregel zo hoog oploopt dat dáár opbarsten en heave optreden, waarop echter ontworpen zou moeten worden.

Het is goed denkbaar dat falen door deze factor pas optreedt bij een verval dat (ruimschoots) groter dan het maatgevend verval, dan vormt dit geen probleem. Voor de relevante processen van heave onder het geheel door en opbarsten bovenstrooms van de barrière kan met berekeningen worden bepaald of hieraan voldaan wordt.

57* Verlaagde porositeit rondom barrière

Door het grondverdringende aanbrengproces worden de korrels in een zone rondom de zandpaal samengedrukt waardoor de porositeit verlaagd wordt.

56* Lage doorlatendheid rondom barrière

Door de lagere porositeit is er ook sprake van een lagere doorlatendheid rondom de barrière, in de zone die beïnvloed is door het aanbrengproces.

74 Drukopbouw bovenstrooms van de barrière

Als gevolg van de lage doorlatendheid rondom de barrière, zal zich bovenstrooms van de barrière enige druk opbouwen.

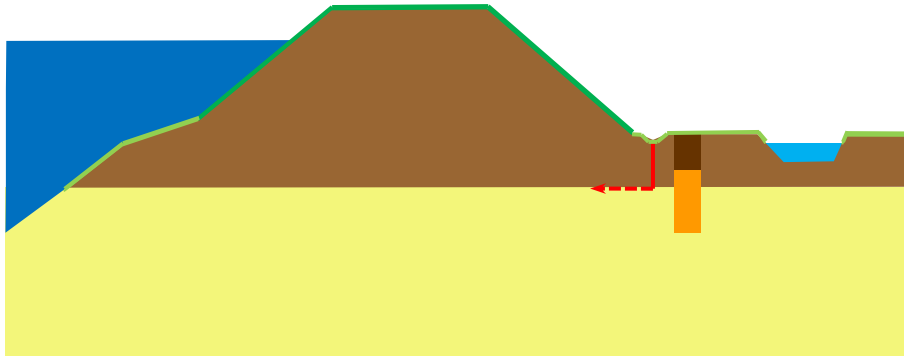
73 Opbarsten en heave bovenstreams van de barrière

Wanneer er onvoldoende rekening gehouden is met de drukopbouw bovenstreams van de barrière en de deklaag daar onvoldoende zwaar is, dan kan tussen de barrière en de dijk opbarsten en eventueel heave optreden.

Om te voorkomen dat dit kan gebeuren, zal het gebied tussen de dijk en de grofzandbarrière gecontroleerd moeten worden op de veiligheid tegen opbarsten en heave, rekening houdend met de mogelijke drukopbouw. Zo nodig moet een ophoging of grondverbetering worden toegepast. Mits inpasbaar, kan de grofzandbarrière in het algemeen het beste zo dicht mogelijk bij de dijk worden aangelegd als voor de uitvoering nog werkbaar is.

Voorloopsheid

Het faalmechanisme piping treedt op bovenstreams van de grofzandbarrière, zodat deze ineffectief is (zie Figuur 359).



Figuur 359 Voorloopsheid.

C.2.19 Pad 55 Achtergrondzand raakt in extreme mate verdicht: vanwege vermalen korrels drukopbouw bovenstreams: voorloopsheid

U6 Extreme verdichting achtergrondzand

Extreme verdichting van het achtergrondzand kan zich voordoen wanneer de grofzandbarrière grondverdringend wordt aangebracht, bijvoorbeeld in de vorm van losse zandpalen.

Wanneer een benedenstroomse pipe verbinding maakt met een zandpaal, ondanks de lage doorlatendheid en erosieweerstand van het verdichte achtergrondzand rondom de zandpalen, bestaat het risico op de vorming van een langspipe langs de omtrek van de zandpaal wat kan leiden tot falen bij een verval lager dan het maatgevend verval. Zie §A.2.1, Figuur 103 tot en met Figuur 106 en de daarbij behorende tekst, voor een toelichting hierop.

Een andere mogelijkheid is dat een benedenstroomse pipe niet tot aan de zandpaal kan groeien. In dat geval zijn er twee mogelijkheden: vorming van een pipe onder het geheel van zandpalen en extreem verdicht achtergrondzand door (dat geheel functioneert dan in feite als een heavescherm, zie de faalpaden 43 en 44 in §§C.2.7-8), of voorloopsheid doordat de waterdruk bovenstreams van deze maatregel zo hoog oploopt dat dáár opbarsten en heave optreden, waarop echter ontworpen zou moeten worden.

Het is goed denkbaar dat falen door deze factor pas optreedt bij een verval dat (ruimschoots) groter dan het maatgevend verval, dan vormt dit geen probleem. Voor de relevante processen van heave onder het geheel door en opbarsten bovenstreams van de barrière kan met berekeningen worden bepaald of hieraan voldaan wordt.

58* Vermaling van korrels rondom barrière

Door het grondverdringende aanbrengproces worden de korrels in een zone rondom de zandpaal vermalen waardoor de porositeit verlaagd wordt.

56* Lage doorlatendheid rondom barrière

Door de lagere porositeit is er ook sprake van een lagere doorlatendheid rondom de barrière, in de zone die beïnvloed is door het aanbrengproces.

74 Drukopbouw bovenstrooms van de barrière

Als gevolg van de lage doorlatendheid rondom de barrière, zal zich bovenstrooms van de barrière enige druk opbouwen.

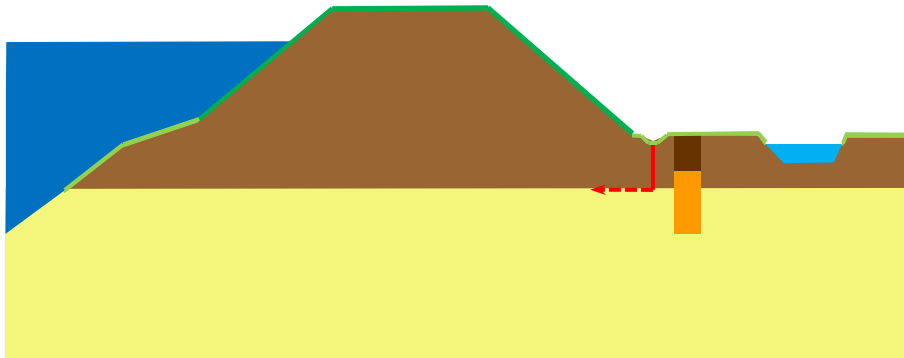
73 Opbarsten en heave bovenstrooms van de barrière

Wanneer er onvoldoende rekening gehouden is met de drukopbouw bovenstrooms van de barrière en de deklaag daar onvoldoende zwaar is, dan kan tussen de barrière en de dijk opbarsten en eventueel heave optreden.

Om te voorkomen dat dit kan gebeuren, zal het gebied tussen de dijk en de grofzandbarrière gecontroleerd moeten worden op de veiligheid tegen opbarsten en heave, rekening houdend met de mogelijke drukopbouw. Zo nodig moet een ophoging of grondverbetering worden toegepast. Mits inpasbaar, kan de grofzandbarrière in het algemeen het beste zo dicht mogelijk bij de dijk worden aangelegd als voor de uitvoering nog werkbaar is.

Voorloopsheid

Het faalmechanisme piping treedt op bovenstrooms van de grofzandbarrière, zodat deze ineffectief is (zie Figuur 360).



Figuur 360 Voorloopsheid.

C.3 Paden die in het beheer geadresseerd kunnen worden

C.3.1 Pad 56 De grofzandbarrière raakt vergeten en doorgraven

B1 Toekomstig gebrek aan kennis over de aanwezigheid en werking van de grofzandbarrière

Door haast onvoorstelbare omstandigheden, zoals een (burger)oorlog of een ernstige pandemie, zou de kennis over de aanwezigheid van een grofzandbarrière en de werking ervan verloren kunnen gaan. In een dergelijke situatie, waarin bijvoorbeeld essentiële leggergegevens verloren zijn gegaan, dan zou de grofzandbarrière onbedoeld verwijderd kunnen worden of vervangen kunnen worden door een minder effectieve maatregel.

De kans dat dit scenario zich voordoet is niet in te schatten en wordt vooralsnog op nul gesteld. Mocht een dergelijke situatie zich voordoen, dan functioneert het huidige raamwerk van het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium immers ook niet meer.

B2 Doorgraven van de barrière door mens of dier

Wanneer de grofzandbarrière zodanig diep wordt doorgraven dat de benodigde heavehoogte wordt aangetast, dan ontbreekt de benodigde weerstand tegen doorloopsheid en is de veiligheid tegen piping globaal terug op het niveau van voor de aanleg van de grofzandbarrière. Dit moet dus worden voorkomen.

Doorgraven door de mens kan worden tegengegaan door opname in de legger van een verbod op graven tot onder het niveau van de bovenzijde van de inkassing (dit is dus inclusief een veiligheidsmarge) en naleving daarvan. Bij overtreding, in eerste instantie te constateren door regelmatige ('dagelijkse') visuele inspectie van de dijk door de dijkbeheerder, zal herstel van de grofzandbarrière moeten plaatsvinden. Bij een toekomstig gebrek aan kennis over de grofzandbarrière zal dit dus niet gebeuren. Sterker nog, mogelijk wordt de grofzandbarrière zelfs doorgraven om een minder effectieve maatregel aan te brengen.

Voor het doorgraven door dieren rijst allereerst de vraag of de locatie van de grofzandbarrière dit waarschijnlijk maakt, of niet. Hierbij spelen parameters als de diepte onder het maaiveld, de diepte ten opzichte van de (variabele!) grondwaterstand, de afstand tot watergangen en de waarschijnlijkheid van de aanwezigheid van gravende dieren (bijvoorbeeld door de ligging ten opzichte van natuurgebieden) een rol. Opgemerkt wordt dat gekeken moet worden naar zowel betrekkelijk droge omstandigheden, waarbij de inkassing eventueel droog komt te staan, als naar (extreme) hoogwatersituaties, waarbij dieren een droog heenkomen kunnen zoeken in en achter de dijk. Voor een verkennende studie naar de invloed van graverijen door dieren op de veiligheid van waterkeringen, ingebed in de hier eveneens gehanteerde faalpadenmethodiek, wordt verwezen naar Koelewijn et al. (2020).

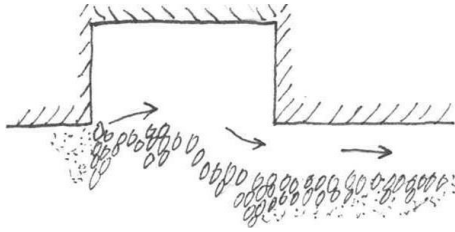
Voor de pilotlocatie bij Gameren geldt dat de bovenzijde van de inkassing van de grofzandbarrière over het algemeen zo'n 3 tot 4 meter beneden maaiveld ligt, met een minimum van 2,5 m en een maximum van ruim 5 m. Alleen bij (nu nog) ongewoon lage grondwaterstanden zal het voor graverijen gevoelige gedeelte over een gedeelte van het tracé droogvallen.

Een diepte van meer dan 2 m sluit ongewenste graverijen door kleinere diersoorten zoals muizen, mollen en ook konijnen al uit. Grotere dieren, zoals vossen, bevers en dassen, kunnen wel meerdere meters diep graven. Voor vossen en dassen geldt dat zij niet onder de grondwaterspiegel graven en dat de ingangen tot hun holen goed zichtbaar zijn, tenzij vegetatie het zicht belemmert. Hierdoor zullen eventuele graafactiviteiten die tot aantasting van de heavehoogte leiden, alleen bij langdurig droge omstandigheden door deze dieren kunnen plaatsvinden. De kans dat dit gebeurt is klein, maar als dit gebeurt, dan is tijdige detectie vrijwel zeker door de goede zichtbaarheid van de ingang(en), eventueel na maaien. Bij een toekomstig gebrek aan kennis over de grofzandbarrière zal betekenisvolle detectie met opvolging door herstelmaatregelen echter achterwege blijven.

Voor bevers geldt dat zij de ingang tot hun burcht onder de waterspiegel plegen te maken. In Gameren geldt echter dat de grofzandbarrière overal tenminste 15 m van een watergang (sloot of kleiput) verwijderd is. Het is zeer onwaarschijnlijk dat de bevergangen op een dergelijke afstand tot de ingang nog tot onder de grondwaterspiegel onder normale en natte omstandigheden zal reiken. Bovendien vormt de dijk een betrekkelijk onaantrekkelijke locatie voor een beverburcht. Bevers zullen de grofzandbarrière dus waarschijnlijk niet doorgraven. Andere soorten mogelijk echter wel.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

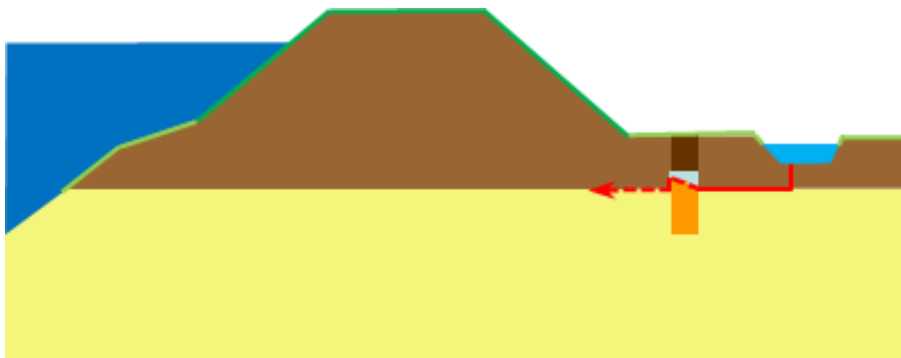
Wanneer de grofzandbarrière doorgraven is, dan ontbreekt de weerstand tegen piping en zal de pipe door de locatie van de barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 361.



Figuur 361 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe ontbreekt als gevolg van doorgraven en gebrek aan tijdig ingrijpen.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 362).



Figuur 362 Doorlooptheid.

C.3.2 Pad 57 Barrière wordt doorgraven

B2 Doorgraven van de barrière door mens of dier

Wanneer de grofzandbarrière zodanig diep wordt doorgraven dat de benodigde heavehoogte wordt aangetast, dan ontbreekt de benodigde weerstand tegen doorlooptheid en is de veiligheid tegen piping globaal terug op het niveau van voor de aanleg van de grofzandbarrière. Dit moet dus worden voorkomen.

Doorgraven door de mens kan worden tegengegaan door opname in de legger van een verbod op graven tot onder het niveau van de bovenzijde van de inkassing (dit is dus inclusief een veiligheidsmarge) en naleving daarvan. Bij overtreding, in eerste instantie te constateren door regelmatige ('dagelijkse') visuele inspectie van de dijk door de dijkbeheerder, zal herstel van de grofzandbarrière moeten plaatsvinden.

Voor het doorgraven door dieren rijst allereerst de vraag of de locatie van de grofzandbarrière dit waarschijnlijk maakt, of niet. Hierbij spelen parameters als de diepte onder het maaiveld, de diepte ten opzichte van de (variabele!) grondwaterstand, de afstand tot watergangen en de waarschijnlijkheid van de aanwezigheid van gravende dieren (bijvoorbeeld door de ligging ten opzichte van natuurgebieden) een rol. Opgemerkt wordt dat gekeken moet worden naar zowel betrekkelijk droge omstandigheden, waarbij de inkassing eventueel droog komt te staan, als naar (extreme) hoogwatersituaties, waarbij dieren een droog heenkomen kunnen zoeken in en achter de dijk. Voor een verkennende studie naar de invloed van graverijen door dieren op de veiligheid van waterkeringen, ingebed in de hier eveneens gehanteerde faalpadenmethodiek, wordt verwezen naar Koelewijn et al. (2020).

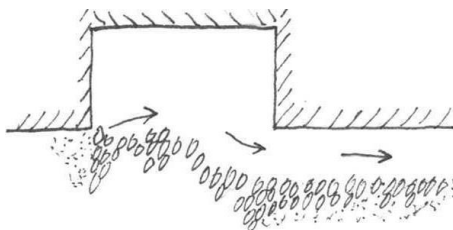
Voor de pilotlocatie bij Gameren geldt dat de bovenzijde van de inkassing van de grofzandbarrière over het algemeen zo'n 3 tot 4 meter beneden maaiveld ligt, met een minimum van 2,5 m en een maximum van ruim 5 m. Alleen bij (nu nog) ongewoon lage grondwaterstanden zal het voor graverijen gevoelige gedeelte over een gedeelte van het tracé droogvallen.

Een diepte van meer dan 2 m sluit ongewenste graverijen door kleinere diersoorten zoals muizen, mollen en ook konijnen al uit. Grotere dieren, zoals vossen, bevers en dassen, kunnen wel meerdere meters diep graven. Voor vossen en dassen geldt dat zij niet onder de grondwaterspiegel graven en dat de ingangen tot hun holen goed zichtbaar zijn, tenzij vegetatie het zicht belemmert. Hierdoor zullen eventuele graafactiviteiten die tot aantasting van de heavehoogte leiden, alleen bij langdurig droge omstandigheden door deze dieren kunnen plaatsvinden. De kans dat dit gebeurt is klein, maar als dit gebeurt, dan is tijdige detectie vrijwel zeker door de goede zichtbaarheid van de ingang(en), eventueel na maaien. Bij bevers ligt dit anders, omdat zij de ingang tot hun burcht onder de waterspiegel plegen te maken. In Gameren geldt echter dat de grofzandbarrière overal tenminste 15 m van een watergang (sloot of kleiput) verwijderd is. Het is zeer onwaarschijnlijk dat de bevergangen op een dergelijke afstand tot de ingang nog tot onder de grondwaterspiegel onder normale en natte omstandigheden zal reiken. Bovendien vormt de dijk een betrekkelijk onaantrekkelijke locatie voor een beverburcht.

Kortom, de kans op een niet tijdig gedetecteerde doorgraving van de grofzandbarrière die een bedreiging vormt voor de veiligheid tegen piping is uiterst klein. Hierbij wordt onder tijdige detectie verstaan dat er na waarneming nog voldoende tijd zal zijn voor herstel voordat een hoogwater langskomt dat zonder functionerende grofzandbarrière niet gekeerd kan worden.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

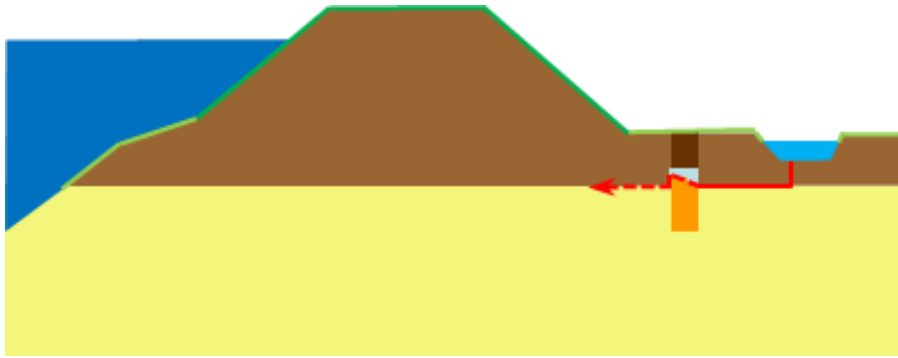
Wanneer de grofzandbarrière doorgraven is, dan ontbreekt de weerstand tegen piping en zal de pipe door de locatie van de barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 363.



Figuur 363 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe ontbreekt als gevolg van doorgraven en gebrek aan tijdig ingrijpen.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 364).



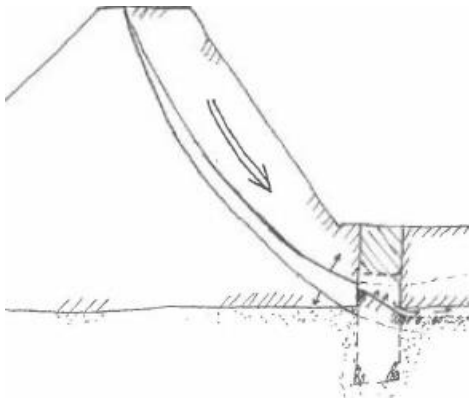
Figuur 364 Doorloopsheld.

C.3.3 Pad 58 Macroinstabiliteit met glijvlak onder grensvlak bij bovenstroomse zijde inkassing: geen negatieve invloed

B3 Macroinstabiliteit leidt tot beschadiging van de barrière

Macroinstabiliteit betreft een ander faalmechanisme dan 'opbarsten, heave en piping' waar de grofzandbarrière een remedie tegen vormt, daarom valt het optreden van macroinstabiliteit volgens de systematiek van het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016a) en het Ontwerpinstrumentarium (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016b) strikt genomen buiten de scope van deze rapportage. Echter, omdat de werking van de grofzandbarrière (nog) niet als algemeen bekend kan worden verondersteld, wordt er hier toch op ingegaan.

Zoals indicatief is aangegeven in Figuur 365, kan een glijvlak onder het essentiële deel van de grofzandbarrière door gaan, er doorheen gaan of dit bovenlangs passeren. Het 'essentiële deel' van de barrière betreft in ieder geval de kritieke helling en de minimale heavehoogte en een beperkte zone daaromheen, alles bij elkaar niet meer dan enkele decimeters hoog.



Figuur 365 Macroinstabiliteit met glijvlakken net boven en net onder het essentiële gedeelte van de grofzandbarrière.

24* Glijvlak steekt aan de bovenstroomse zijde van de barrière onder het grensvlak
Wanneer het glijvlak onderlangs schuift, dan schuift het gehele essentiële deel van de barrière, inclusief de bovenstroomse rand, landinwaarts op.

23* Heavehoogte blijft gelijk of neemt zelfs toe
Door de (meestal kleine) hoekverdraaiing wordt de effectieve breedte van de barrière zelfs iets groter, waardoor de barrière in de dwarsdoorsnede nog wat effectiever kan zijn. Als de afschuiving in de lengterichting van de dijk betrekkelijk geleidelijk verloopt (en er dus geen

abrupte overgang is tussen het afgeschoven gedeelte en het intacte gedeelte van de dijk¹⁸), dan treden er ook geen problemen op wat betreft de zijdelingse pipegroei.

88 Geen aanvullend risico

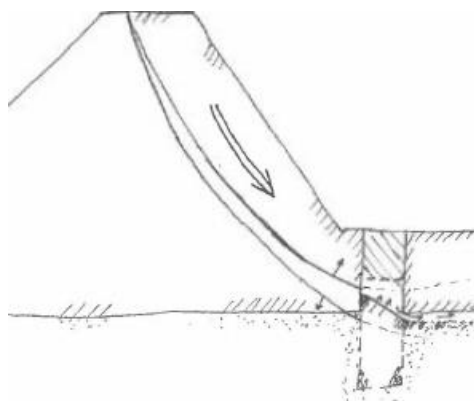
Dit pad levert geen aanvullend risico op. Zie echter wel faalpad 60 in §C.3.5.

C.3.4 Pad 59 Macroinstabiliteit met glijvlak boven bovenstroomse zijde inkassing: geen invloed

B3 Macroinstabiliteit leidt tot beschadiging van de barrière

Macrostabiliiteit betreft een ander faalmechanisme dan 'opbarsten, heave en piping' waar de grofzandbarrière een remedie tegen vormt, daarom valt het optreden van macroinstabiliteit volgens de systematiek van het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016a) en het Ontwerpinstrumentarium (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016b) strikt genomen buiten de scope van deze rapportage. Echter, omdat de werking van de grofzandbarrière (nog) niet als algemeen bekend kan worden verondersteld, wordt er hier toch op ingegaan.

Zoals indicatief is aangegeven in Figuur 366, kan een glijvlak onder het essentiële deel van de grofzandbarrière door gaan, er doorheen gaan of dit bovenlangs passeren. Het 'essentiële deel' van de barrière betreft in ieder geval de kritieke helling en de minimale heavehoogte en een beperkte zone daaromheen, alles bij elkaar niet meer dan enkele decimeters hoog.



Figuur 366 Macrostabiliiteit met glijvlakken net boven en net onder het essentiële gedeelte van de grofzandbarrière.

25* Glijvlak loopt aan de bovenstroomse zijde van de barrière boven de inkassing. Een glijvlak bovenlangs heeft geen wezenlijke invloed: de sleufaanvulling en eventueel zelfs het bovenste gedeelte van de inkassing worden dan opzijgeschoven en vervangen door berm- of dijksmateriaal. De grofzandbarrière zal dan nog steeds zoals bedoeld kunnen functioneren.

88 Geen aanvullend risico

Dit pad levert geen aanvullend risico op. Zie echter wel faalpad 60 in §C.3.5.

C.3.5 Pad 60 Macroinstabiliteit met glijvlak door inkassing aan bovenstroomse zijde, waardoor heavehoogte afneemt

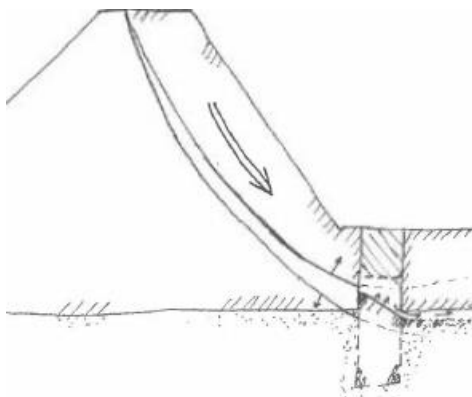
B3 Macroinstabiliteit leidt tot beschadiging van de barrière

Macrostabiliiteit betreft een ander faalmechanisme dan 'opbarsten, heave en piping' waar de grofzandbarrière een remedie tegen vormt, daarom valt het optreden van macroinstabiliteit volgens de systematiek van het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (Ministerie van

¹⁸ Bijvoorbeeld bij de vervormingsproef in Bergambacht in 2001 trad macrostabiliteit met opdrijven op, met een glijvlak van in totaal 110 m lengte, waarbij de maximale vervormingen optraden in de middelste 40 m (Lindenberg et al., 2002).

Infrastructuur en Milieu, 2016a) en het Ontwerpinstrumentarium (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016b) strikt genomen buiten de scope van deze rapportage. Echter, omdat de werking van de grofzandbarrière (nog) niet als algemeen bekend kan worden verondersteld, wordt er hier toch op ingegaan.

Zoals indicatief is aangegeven in Figuur 367, kan een glijvlak onder het essentiële deel van de grofzandbarrière door gaan, er doorheen gaan of dit bovenlangs passeren. Het 'essentiële deel' van de barrière betreft in ieder geval de kritieke helling en de minimale heavehoogte en een beperkte zone daaromheen, alles bij elkaar niet meer dan enkele decimeters hoog.



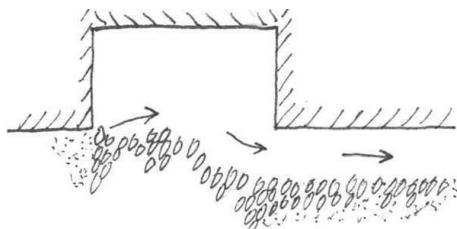
Figuur 367 Macrostabiliteit met glijvlakken net boven en net onder het essentiële gedeelte van de grofzandbarrière.

30 Glijvlak steekt aan de aan de bovenstroomse zijde van de barrière in de inkassing in. Wanneer het glijvlak door het gedeelte gaat waar de grofzandbarrière in essentie zijn sterkte aan ontleent, dan is er wel sprake van een probleem, omdat er dan sneller doorloopbaarheid kan optreden. Dat is overigens ook het geval bij een hoger of lager gelegen primair glijvlak met secundaire vervormingen binnen het essentiële deel.*

*29 Heavehoogte neemt af
De afschuiving heeft tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.*

*26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand
Mits het verval over de kering voldoende groot is, bezwijkt de resterende helling in de grofzandbarrière door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier kortheidshalve niet herhaald.*

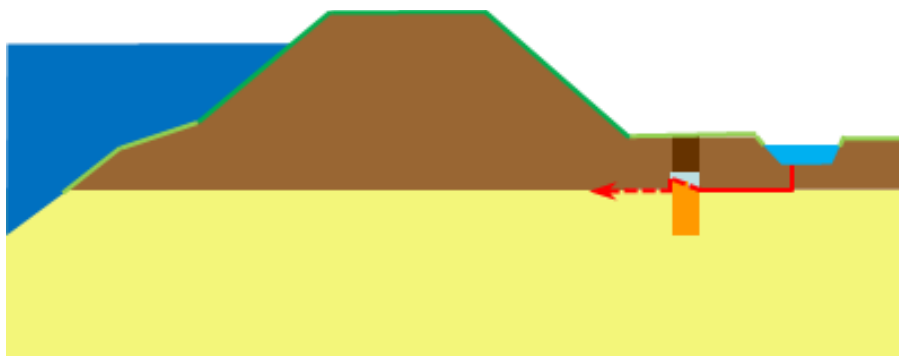
*20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 368.*



Figuur 368 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 369).

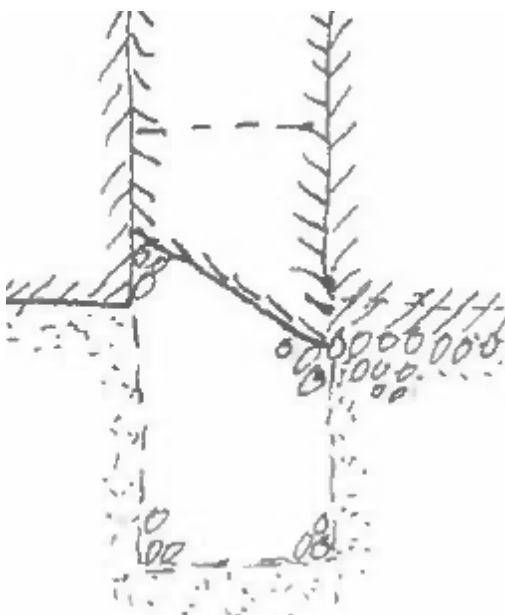


Figuur 369 Doorlooptheid.

C.3.6 Pad 61 Pipe komt bij opeenvolgende hoogwaters steeds dieper te liggen waardoor de resterende heavehoogte afneemt

B4 Na hoogwater nazakken van de deklaag in de pipe in de zandlaag
Na afloop van een hoogwater kan de deklaag nazakken/instorten op de benedenstroomse pipe(s). Daarmee vergelijkbaar is het nazakken van de sleufaanvulling op de grofzandbarrière na gedeeltelijk leeglopen van de inkassing. Dit verschilt in zoverre met het instorten van delen van het bovenliggende kleimateriaal tijdens hoogwater dat dit ná hoogwater niet zal worden afgevoerd door de waterstroming in de pipe respectievelijk de inkassing.

Na verloop van tijd (dit kan mogelijk maanden of zelfs jaren duren) kan de ineensinking min of meer volledig zijn, zoals geschetst in Figuur 370 (zie ook Figuur 109 in §A.2.5).



Figuur 370 Volledig ingestorte holten, enige tijd na afloop van een extreem hoogwater.

Wanneer er dan een nieuw hoogwater optreedt waarbij het verval hoog genoeg is om opnieuw erosie te veroorzaken, dan zal de minimale heavehoogte sneller worden bereikt; de uitgangssituatie is immers ongunstiger dan voorheen, bij een volledig gevulde inkassing. Hierdoor leidt een hoogwatersituatie die niet direct tot falen van de grofzandbarrière leidt, maar wel tot het gedeeltelijk leeglopen van de inkassing, op termijn tot een situatie waarbij

een minder hoog verval kan worden gekeerd dan voorheen. Er is dan feitelijk een situatie ontstaan die in de richting gaat van een 'vlakke' grofzandbarrière, maar nog wel met een gunstige hellingshoek en enige heavehoogte. De sterkte van een vlakke grofzandbarrière ten opzichte van een grofzandbarrière met inkassing is voor vergelijkbare beproefde situaties weergegeven in Figuur 88 in §A.1.11: de sterkte is duidelijk kleiner, maar niet nihil. Bovendien zijn er nog de genoemde hellingshoek en heavehoogte, die voor wat extra sterkte zullen zorgen.

Toch voldoet de bij een extreem hoogwater ontstane situatie, met gedeeltelijk leeglopen van de inkassing, na afloop van het hoogwater niet meer en zal, voordat zich opnieuw een dergelijk hoogwater voordoet, de inkassing moeten worden hersteld.

In §A.3.4 wordt uitgebreid ingegaan op de situatie bij de pilotlocatie bij Gameren: hoe vaak een hoogwater leidend tot gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing mag worden verwacht, hoe dit kan worden gemonitord en dat hiervoor een oplossing gevonden is bestaande uit lokaal herstel van de inkassing.

35* Pipe komt bij opeenvolgende hoogwaters steeds dieper in het zand te liggen
Wanneer niet wordt ingegrepen, dan zal de pipe bij opeenvolgende hoogwaters die tot piping tot aan de grofzandbarrière leiden, steeds dieper in het zand komen te liggen.

29 Heavehoogte neemt af

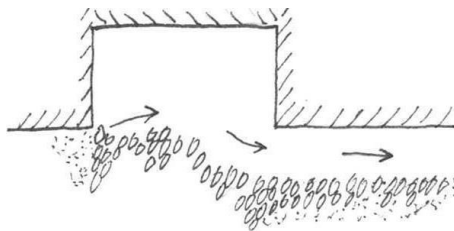
De diepere aansluiting van de pipe op de grofzandbarrière aan de benedenstroomse zijde, leidt er ook toe dat de heavehoogte aan de bovenstroomse zijde afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier korthedshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

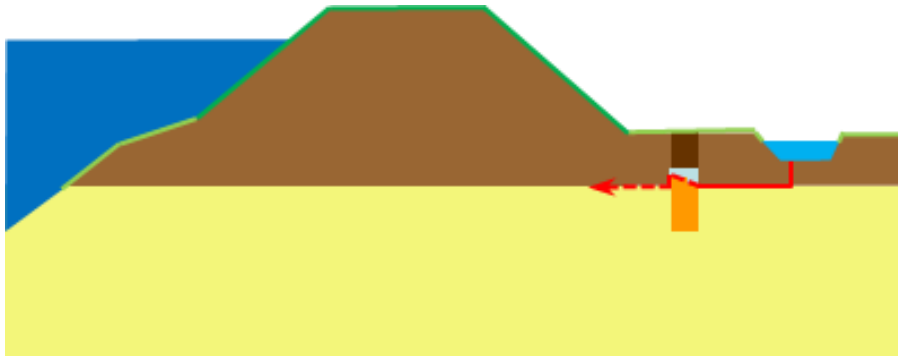
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 371.



Figuur 371 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorloopsheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorloopsheid (zie Figuur 372).



Figuur 372 Doorloopshoogte.

C.3.7 Pad 62 Barrière raakt verdicht in beheerfase waardoor resterende hoogte afneemt

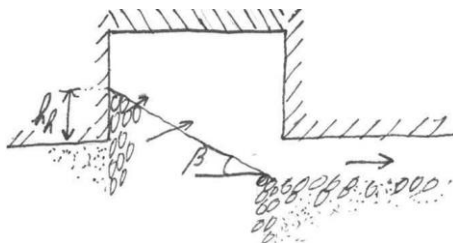
B5 Naverdichten barrière

Tijdens de uitvoering zou al afdoende aandacht moeten zijn besteed aan het aanbrengen van het zand van de grofzandbarrière in een vaste pakking, zie hiervoor §A.2.3.

36* Nazakken barrière

Het nazakken of naverdichten van de barrière is uiterst onwaarschijnlijk vanwege de energie die er tijdens de aanleg is toegepast om tot een goede verdichting te komen. Eventueel is er iets mogelijk zoals het intrillen van een damwand pal naast de barrière. Dit is weinig relevant zolang de inkassing nog gevuld is en de (kritische) helling nog niet is ontstaan.

Echter, wanneer bij een extreem hoogwater de situatie is ontstaan waarbij de uiterste grens qua heavehoogte en/of hellingshoek al dicht is benaderd, zoals geschetst in Figuur 373, dan kan verzakking als gevolg van aanvullende verdichting tot bezwijken leiden. Voor de praktijk moet dan worden gedacht aan een extreme hoogwatersituatie, waarbij dan bovendien verdichting wordt gestimuleerd. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren als een damwand wordt ingetrild bij wijze van noodmaatregel in een aangrenzend gedeelte van dijk. Een dergelijke noodmaatregel mag uiterst onwaarschijnlijk worden geacht, mede gelet op het zware materieel dat daarvoor nodig is en waarvan de aanvoer over het algemeen niet op een veilige manier mogelijk is.



Figuur 373 Uiterste situatie met minimale heavehoogte en maximaal verflauwde helling, waarin verzakking als gevolg van verdichting niet kan worden opgenomen.

Praktisch gezien betekent dit dat er bij extreem hoogwater niet vlak bij de grofzandbarrière een damwand of iets dergelijks mag worden ingetrild.

29 Heavehoogte neemt af

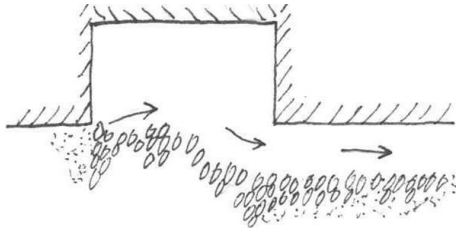
Het inzakken van de grofzandbarrière heeft ook als gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier korthedshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

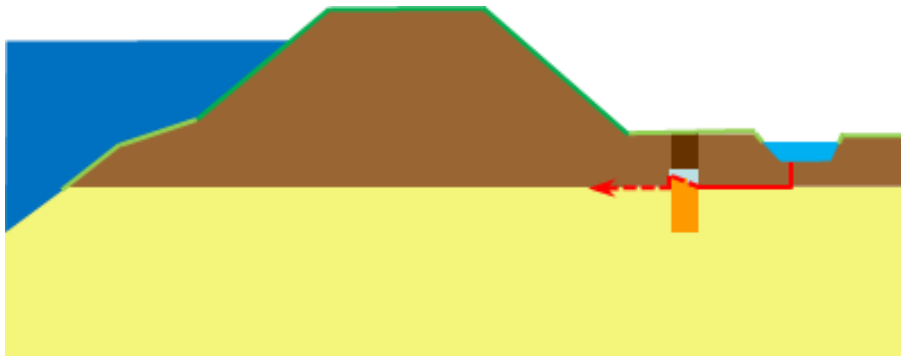
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 374.



Figuur 374 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 375).

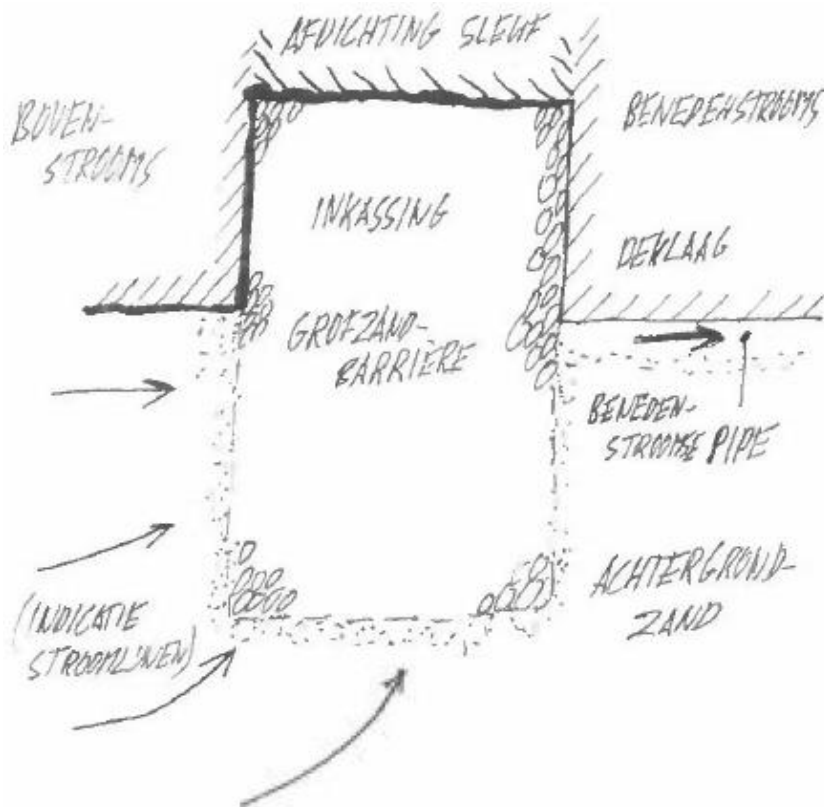


Figuur 375 Doorlooptheid.

C.3.8 Pad 63 De primaire bezwijkvorm door doorlooptheid, zonder verdere bijzonderheden

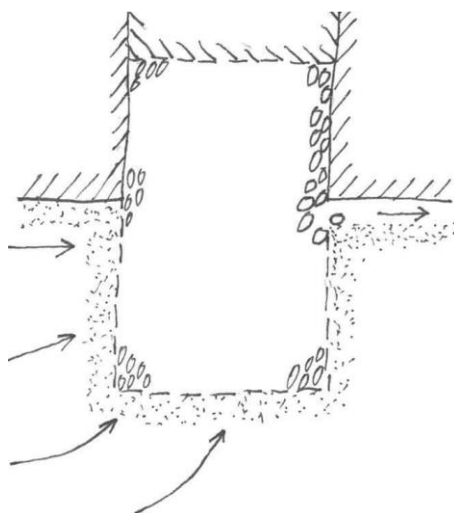
B6 Erosie van de grofzandbarrière zelf bij hoogwater

Een pipe die vanaf de benedenstroomse kant de grofzandbarrière bereikt (zie Figuur 376) maakt het mogelijk dat er korrels vanuit de grofzandbarrière in de aangrenzende pipe rollen.



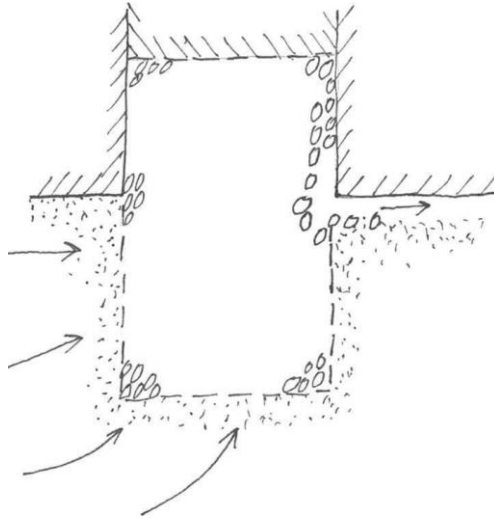
Figuur 376 Zijaanzicht met grofzandbarrière waar een pipe volledig naar toe is gegroeid vanaf het benedenstroomse uittredepunt.

Dit is een kwestie van evenwicht op korrelniveau: wanneer in de situatie van Figuur 376 een korrel uit de grofzandbarrière de zijdelingse steun van het achtergrondzand ontbeert doordat dat zand geërodeerd is, dan zal deze korrel kunnen vallen en mede onder invloed van de stroming zal dit dan ook gebeuren, zie Figuur 377.



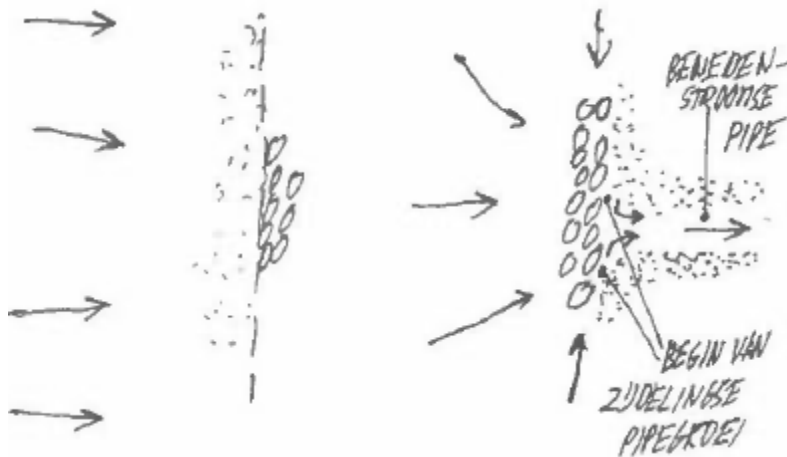
Figuur 377 Zijaanzicht met grofzandbarrière waarvan een eerste korrel is geërodeerd.

Daarna kunnen de volgende korrels volgen, mede geholpen door de zwaartekracht, zie Figuur 378.



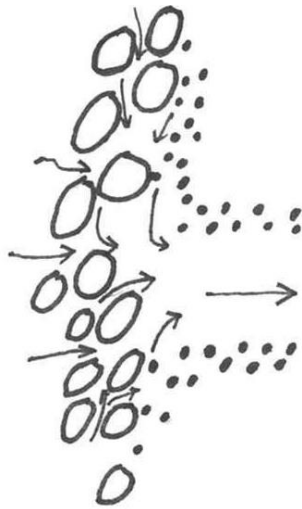
Figuur 378 Zijaanzicht met grofzandbarrière met drie geërodeerde korrels.

Overigens zal er ook erosie optreden in zijwaartse richting, langs de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière. Zie het bovenaanzicht in Figuur 379: het water zal van alle kanten door de barrière naar de pipe toestromen en ook door het achtergrondzand heen gaan.



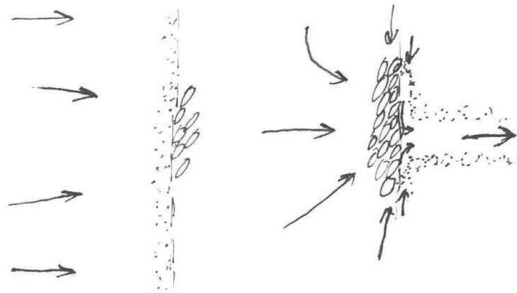
Figuur 379 Bovenaanzicht met allereerste begin van pipegroei in zijwaartse richting.

Hier zal op korrelniveau ook een vorm van contacterosie optreden: korrels behorend bij het achtergrondzand zullen als het ware worden meegezogen door de stroming door het achtergrondzand. Daar passen ze niet door de poriën (er wordt immers voldaan aan de filterregels voor geometrisch dichte filters), maar dit levert wel een zodanige druk op die ene korrel van het achtergrondzand die op de hoek ligt, dat deze als eerste zal eroderen, zie Figuur 380. Daarna zullen de achterliggende korrels van het achtergrondzand stuk voor stuk gemakkelijker getransporteerd kunnen worden dan de grotere korrels van de grofzandbarrière.



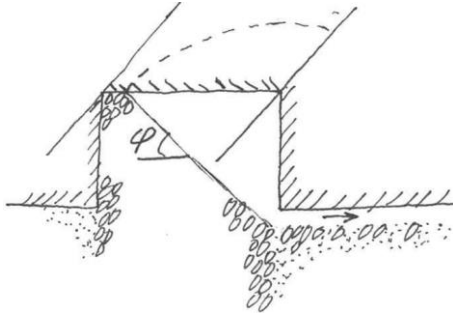
Figuur 380 Schematisch detail van de situatie bij het begin van pipegroei in zijwaartse richting (bovenaanzicht).

Als er eenmaal enkele korrels van het achtergrondzand aan de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière zijn afgevoerd, zal er een begin van een zogenoemde zijdelingse pipe zijn ontstaan, waardoor over het algemeen de kleine korrels van het achtergrondzand gemakkelijker zullen worden afgevoerd dan de korrels van de barrière. Daardoor zullen twee zijdelingse pipes ontstaan, aan weerszijden van de pipe die aansluit op de pipe richting het uittredepunt (deze laatste wordt ook wel aangeduid als 'de benedenstroomse pipe'), zie Figuur 381.



Figuur 381 Verdere zijdelingse pipegroei in het achtergrondzand direct benedenstrooms van de barrière (bovenaanzicht).

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft
 Nadat de eerste korrel in de pipe is gevallen, zullen zoals hiervoor geschetst de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit zandtransport kan zowel korrels uit de grofzandbarrière betreffen als korrels die tot het achtergrondzand behoren. De laatste zijn grotendeels kleiner dan de eerste en zullen daarom gemakkelijker en ook verder getransporteerd worden.
 Mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende afvoer van materiaal plaatsvindt, zal dit proces waarbij korrels uit het bovenste deel van de grofzandbarrière verdwijnen doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfrond mini-amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie het zijaanzicht met enige 3D-suggestie in Figuur 382.



Figuur 382 Uitspoeling van bovendeele barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

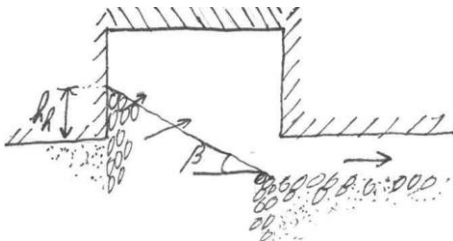
De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen naar verwachting pas in een laat stadium het uittredepunt bereiken. Ondertussen raakt de bodem van de pipe in de nabijheid van de grofzandbarrière meer en meer 'geplaveid' met grovere korrels, hetgeen de stromingsweerstand doet toenemen. Deze hogere weerstand kan er toe leiden dat deze benedenstroomse pipe enigszins zijdelings groeit, met achterlating van een mogelijk grotendeels verstopt gedeelte met meer grof zand, ten gunste van een route waar (vooralsnog) meer achtergrondzand aanwezig is. Hierdoor kan ook het punt waar de benedenstroomse pipe aansluit op de grofzandbarrière in de loop van de tijd variëren, hetgeen er dan ook toe leidt dat de uitspoeling vanuit de grofzandbarrière geometrisch minder fraai gevormd wordt, hetgeen gunstig uitpakt.

Bovendien zullen de korrels uit het bovenste gedeelte van de grofzandbarrière ook op enige afstand van de aansluiting op de benedenstroomse pipe(s) naar beneden rollen in de daar gevormde zijdelingse pipe. Daardoor zal de situatie ondergronds steeds een vorm hebben tussen een halfrond mini-amfitheater en een 2D-doorsnede met één enkele helling in. De omvang van de zijdelingse pipes is enerzijds afhankelijk van de daadwerkelijke afvoer van zand (fijn en grof), hetgeen behalve voldoende verval en daarmee gepaard gaande stroming ook tijd vergt, anderzijds neemt de stroomsnelheid aan de randen af naarmate de pipe groter wordt. Dit kan er toe leiden dat uiteindelijk eerder sprake zal zijn van een enigszins verwijd mini-amfitheater bij de aansluiting op een benedenstroomse pipe. Daarbij is er verder (grotendeels) een zijdelingse pipe met slechts beperkte instorting van de inkassing met daardoor mogelijk een tweede doorgaande holte bovenin. Deze tweede holte bevindt zich dan rechtsboven in de hoek van de inkassing in bijvoorbeeld Figuur 382. Dit zal eerder optreden dan dat er over de hele lengte van de grofzandbarrière sprake zal zijn van een volledig ontwikkelde helling.

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992).

Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud zoals geschetst in Figuur 382, het gaat hier om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 383.



Figuur 383 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

De verflauwing van de hellingshoek in Figuur 383 leidt ook tot een afname van de zogenoemde “heavehoogte”, de verticale afstand tussen de bovenkant van de resterende grofzandbarrière en de onderkant van de deklaag aan de bovenstroomse zijde van de grofzandbarrière, in de voorgaande figuur aangegeven met h_n .

NB: Bij dit faalpad komen dit knooppunt en het voorgaande knooppunt met elkaar overeen, maar er zijn ook andere oorzaken waardoor de heavehoogte kleiner kan zijn of worden¹⁹, daarom zijn beide omschrijvingen hier uit elkaar getrokken.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. Voor de kritieke uitstroombadient op de helling is door Van Rhee & Bezuijen (1992) de volgende vergelijking gegeven:

$$i_{crit} = v / k = - (1 - n) \Delta \sin (\phi - \beta) / \sin \phi \quad (C.3.8.1)$$

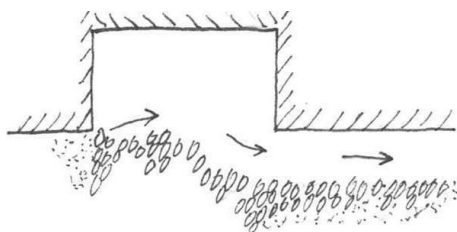
Dit is dezelfde vergelijking als vergelijking (2.8) in §2.2.2.1, waar alle gebruikte symbolen al zijn toegelicht. De hoek β is aangegeven in Figuur 383.

De toepasselijkheid van deze vergelijking voor de situatie van de grofzandbarrière met inkassing is bevestigd door een tweetal validatie-experimenten op medium schaal (Terwindt et al., 2020) en de analyse daarvan, beschreven in Förster (2021a). Het gaat hierbij om de gradiënt welke optreedt in het midden van de helling. Deze helling verloopt niet recht, doch concaaf, maar voor de analyse kan worden gewerkt met één hellingshoek β .

Voor het in de beschreven proeven gebruikte zand geldt een hoek van inwendige wrijving ϕ van 35 graden en een evenwichtshoek β van 10 graden. Voor andere zanden, geschikt voor een grofzandbarrière, zullen deze waarden over het algemeen niet heel anders zijn.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zoals geschetst in Figuur 384.

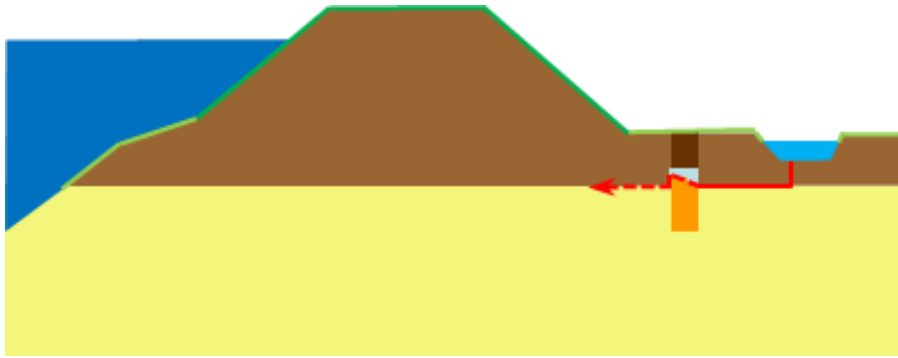


Figuur 384 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorloopbaarheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorloopbaarheid (zie Figuur 385).

¹⁹ Dit betreft grotendeels oorzaken die samenhangen met nazakken. Het gaat om beïnvloedende factoren O7, O8, U3, B3, B4 en B5 (nader beschreven in §§A.1.7, A.1.8, A.2.3, A.3.3, A.3.4 en A.3.5), met de faalpaden 11, 12, 39, 60, 61 en 62 (nader beschreven in §§C.1.11, C.1.12, C.2.3, C.3.5, C.3.6 en C.3.7).



Figuur 385 Doorloopsheld.

C.3.9 Pad 64 Verstopping aan alleen onderrand barrière

B7 Mechanische, chemische of biologische verstopping

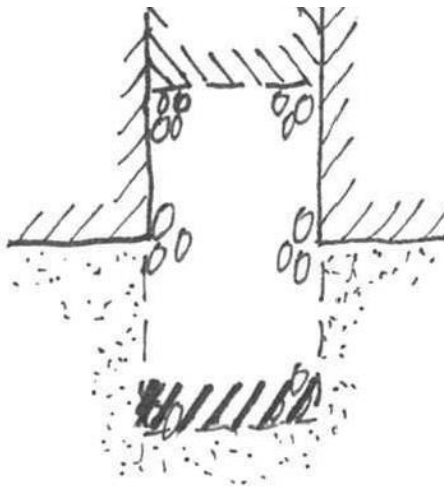
In §A.3.7 is toegelicht dat in de Nederlandse situatie géén verstopping zal optreden bij een grofzandbarrière, mits deze voldoet aan de eisen voor geometrisch dichte filters (zie §6.2). Slechts voor de volledigheid zijn in deze bijlage de meeste (faal)paden geschetst die (theoretisch) bij verstopping zouden kunnen optreden.

95j Alleen barrière verstopt, omgeving niet

De faalpaden met verstopping van de grofzandbarrière zijn ingegeven door de vrees voor de mogelijke gevolgen wanneer dit grove filter verstopt zou raken. Hoewel dit onder de gestelde voorwaarde in de Nederlandse situatie niet mogelijk wordt geacht, is bij elk van de onderscheiden scenario's wel uitgewerkt hoe dit zou uitpakken.

43* Barrière wordt aan de onderrand slechtdoorlatend

Bij deze bijzonder onwaarschijnlijke variant van verstopping tijdens beheer zal de barrière alleen aan de onderrand verstopt raken, zie Figuur 386. Hierdoor zal er veel minder water via de onderrand het grove zand instromen, wat grotendeels gecompenseerd zal worden door meer instroom aan vooral de bovenstroomse rand en, eventueel, aan de benedenstroomse rand. Netto zal er iets minder water de barrière instromen, waardoor de druk op de uiteindelijke helling bovenin de barrière marginaal afneemt.

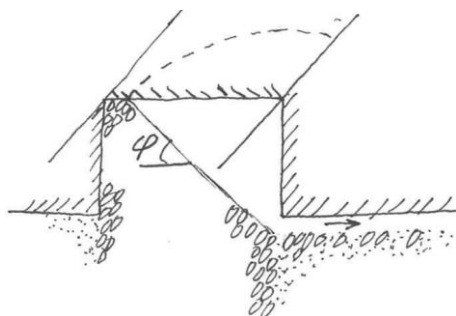


Figuur 386 Verstopping alleen aan de onderrand van de barrière.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft

Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom

een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort half rond mini-amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 387.



Figuur 387 Uitspoeling van bovendeeel barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

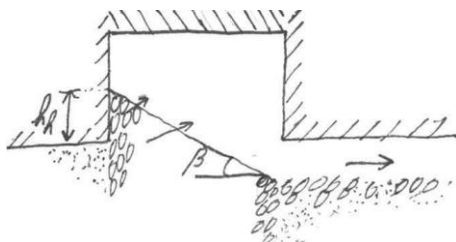
De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfitheater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor.

De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

Uiteindelijk kan er wel over de hele lengte van de grofzandbarrière sprake zijn van een volledig ontwikkelde helling, maar het is waarschijnlijker dat de zijdelingse pipegroei ergens geblokkeerd raakt.

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 388.



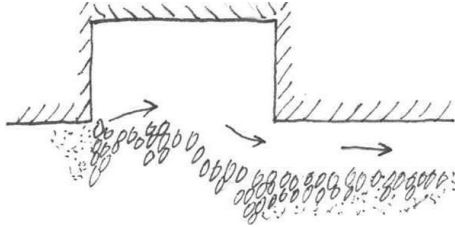
Figuur 388 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand
Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier kortheidshalve niet herhaald.

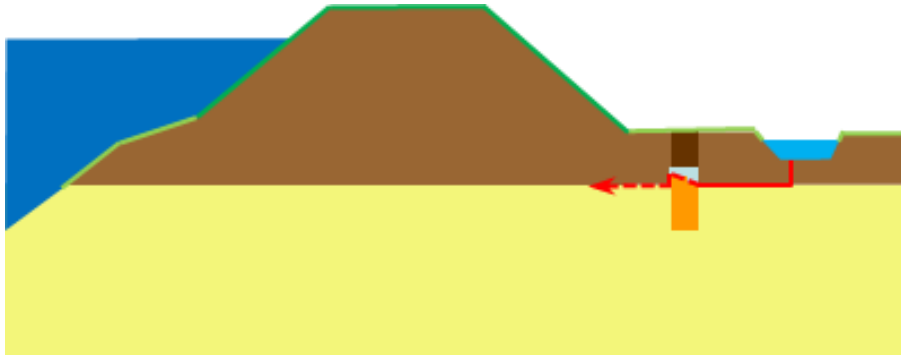
20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 389.



Figuur 389 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 390).



Figuur 390 Doorlooptheid.

C.3.10

Pad 65 Verstopping aan bovenstroomse rand en onderrand: toename van sterkte

B7 Mechanische, chemische of biologische verstopping

In §A.3.7 is toegelicht dat in de Nederlandse situatie géén verstopping zal optreden bij een grofzandbarrière, mits deze voldoet aan de eisen voor geometrisch dichte filters (zie §6.2). Slechts voor de volledigheid zijn in deze bijlage de meeste (faal)paden geschetst die (theoretisch) bij verstopping zouden kunnen optreden.

De faalpaden met verstopping van de grofzandbarrière zijn ingegeven door de vrees voor de mogelijke gevolgen wanneer dit grove filter verstopt zou raken. Hoewel dit onder de gestelde voorwaarde in de Nederlandse situatie niet mogelijk wordt geacht, is bij elk van de onderscheiden scenario's wel uitgewerkt hoe dit zou uitpakken.

Voor dit faalpad geldt dat het overeenkomt met faalpad 27 (beschreven in §C.1.27) met cakevorming als oorzaak – een verschijnsel dat alleen op kleine schaal in het laboratorium is waargenomen.

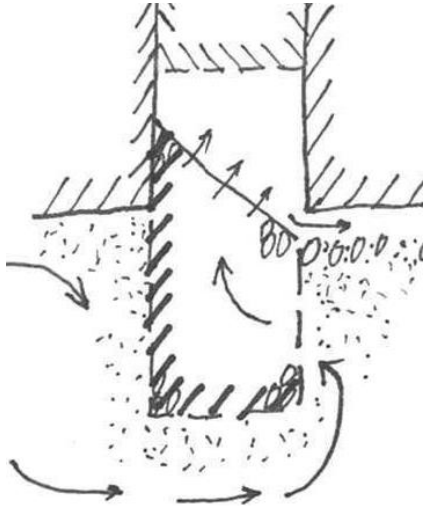
51* Barrière wordt aan de bovenstroomse rand slechtdoorlatend

Door de verstopping wordt de barrière aan de bovenstroomse rand, binnen het grove zand, slechtdoorlatend.

50* Barrière wordt ook aan de onderrand slechtdoorlatend
Het proces van verstopping leidt ook tot een slechte doorlatendheid van de onderrand.

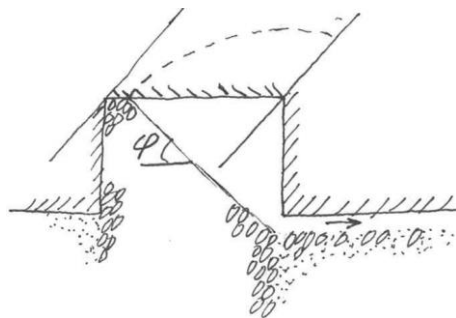
97n Barrière wordt NIET ook benedenstrooms slechtdoorlatend
De barrière wordt niet ook nog aan de benedenstroomse rand slechtdoorlatend. Zie faalpad 76 in §C.3.21 voor als dit wel gebeurt.

49 Waterstroming gaat via onderzijde/benedenstrooms onderaan alsnog de barrière in
Zoals geschetst in Figuur 391 zal de stroming nabij de onderzijde, aan de benedenstroomse kant vervolgens alsnog de barrière in stromen, waarna grotendeels de bekende processen zich zullen afspelen.



Figuur 391 Stromingspatroon bij grofzandbarrière na verstopping aan bovenstroomse zijde en onderzijde, na gedeeltelijk leegstromen van de inkassing.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft
Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfrond mini-amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 392.



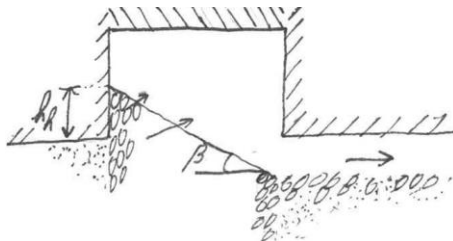
Figuur 392 Uitspoeling van bovendeele barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten

toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfitheater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor. De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 393.



Figuur 393 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

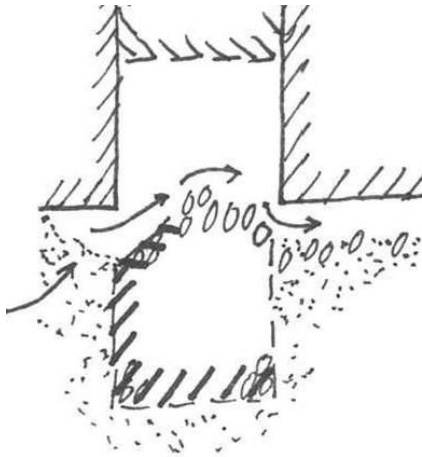
26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier kortheidshalve niet herhaald.

Het feit dat er bij dit faalpad geen of amper water kan instromen via de bovenstroomse rand en de onderrand van de grofzandbarrière leidt er wel toe dat de kritieke gradiënt pas bij een hoger verval over de waterkering zal optreden. De gedeeltelijke verstopping heeft daardoor een positief effect.

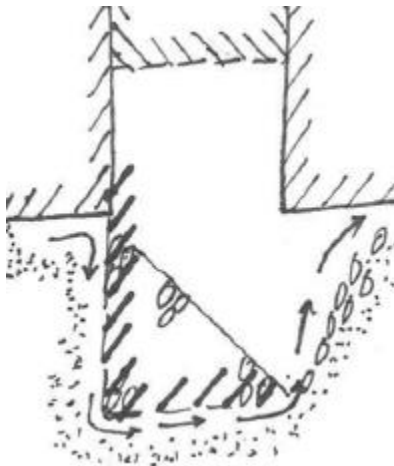
20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, waarbij in dit geval uiteindelijk een breuk zal optreden in de verstopte bovenstroomse rand, zie Figuur 394.



Figuur 394 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld bij een situatie met extreme cakevorming of andersoortige verstopping.

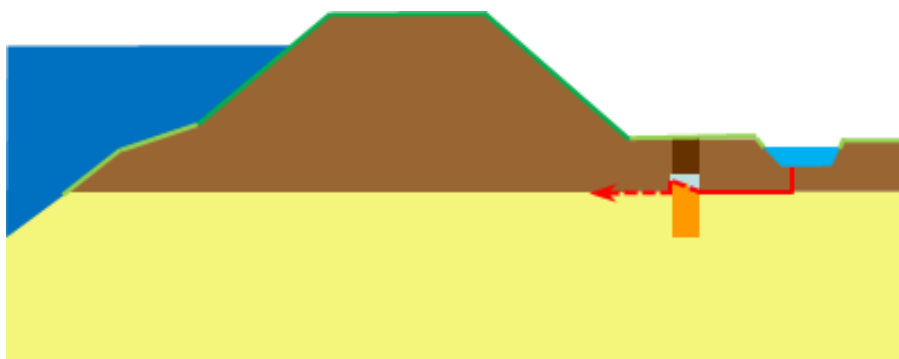
NB: wanneer de verstopte bovenstroomse rand uiteindelijk niet zou breken, dan zou er een vorm van onderloopsheid ontstaan zoals geschetst in Figuur 395, of waarschijnlijker nog: verticale heave direct achter de verstopte rand, met aan weerszijden van het heavekanaal nog korrels. Dit wordt onwaarschijnlijk geacht. Eveneens onwaarschijnlijk, maar hier wel nader uitgewerkt, zijn een andere variant waarbij onderloopsheid ontstaat (zie faalpad 76 in §C.3.21) en een variant met voorloopsheid (zie faalpad 77 in §C.3.22).



Figuur 395 Onderloopsheid na verstopping van de bovenstroomse rand en de onderrand van de grofzandbarrière.

Doorloopsheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorloopsheid (zie Figuur 242).



C.3.11 Pad 66 Verstopping aan bovenstroomse rand: toename van sterkte

B7 Mechanische, chemische of biologische verstopping

In §A.3.7 is toegelicht dat in de Nederlandse situatie géén verstopping zal optreden bij een grofzandbarrière, mits deze voldoet aan de eisen voor geometrisch dichte filters (zie §6.2). Slechts voor de volledigheid zijn in deze bijlage de meeste (faal)paden geschetst die (theoretisch) bij verstopping zouden kunnen optreden.

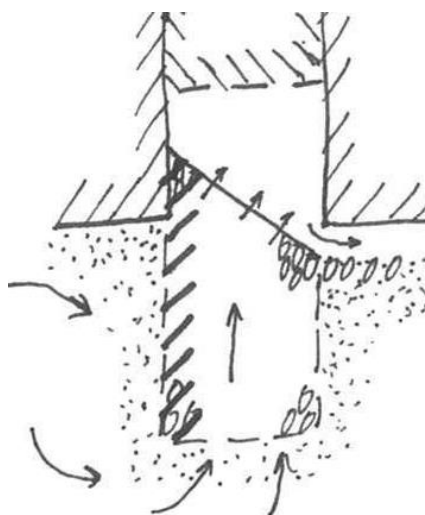
De faalpaden met verstopping van de grofzandbarrière zijn ingegeven door de vrees voor de mogelijke gevolgen wanneer dit grove filter verstopt zou raken. Hoewel dit onder de gestelde voorwaarde in de Nederlandse situatie niet mogelijk wordt geacht, is bij elk van de onderscheiden scenario's wel uitgewerkt hoe dit zou uitpakken.

Voor dit faalpad geldt dat het overeenkomt met faalpad 28 (beschreven in §C.1.28) met cakevorming als oorzaak – een verschijnsel dat alleen op kleine schaal in het laboratorium is waargenomen.

51* Barrière wordt aan de bovenstroomse rand slechtdoorlatend

Door de verstopping wordt de barrière aan de bovenstroomse rand, binnen het grove zand, slechtdoorlatend.

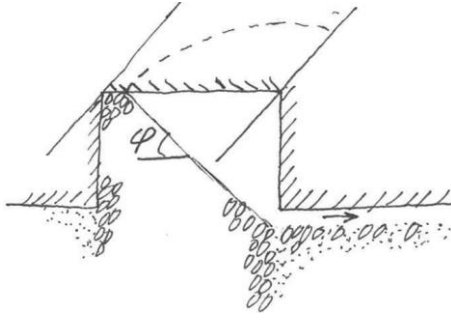
49 Waterstroming gaat via onderzijde/benedenstrooms onderaan alsnog de barrière in
Zoals geschetst in Figuur 397 zal de stroming aan de onderzijde vervolgens alsnog de barrière in stromen, waarna grotendeels de bekende processen zich zullen afspelen.



Figuur 397 Stromingspatroon bij grofzandbarrière na verstopping aan bovenstroomse zijde, na gedeeltelijk leegstromen van de inkassing.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft

Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfrond mini-amfiteater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 398.

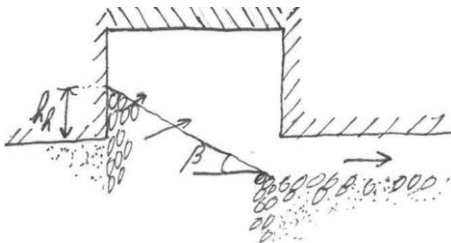


Figuur 398 Uitspoeling van bovendeel barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uitredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfitheater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor. De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 399.



Figuur 399 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

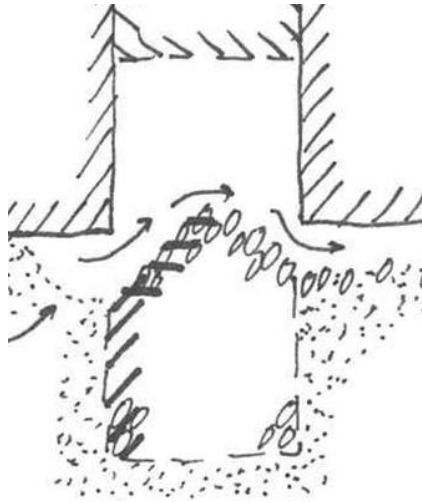
26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier kortheidshalve niet herhaald.

Het feit dat er bij dit faalpad geen of amper water kan instromen via de bovenstroomse rand van de grofzandbarrière leidt er wel toe dat de kritieke gradiënt pas bij een hoger verval over de waterkering zal optreden. De gedeeltelijke verstopping heeft daardoor een positief effect.

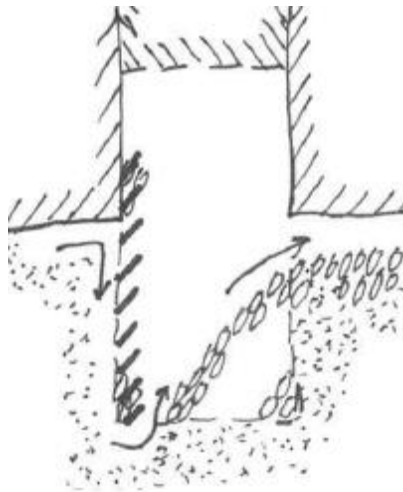
20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, waarbij in dit geval uiteindelijk een breuk zal optreden in de verstopte bovenstroomse rand, zie Figuur 400.



Figuur 400 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld bij een situatie met extreme cakevorming of andersoortige verstopping.

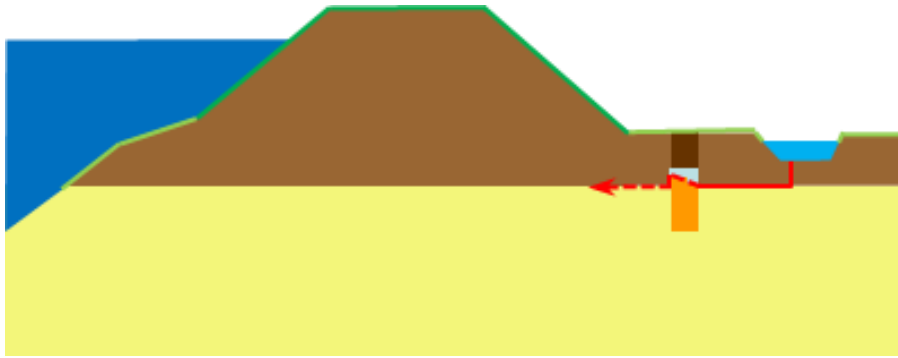
NB: wanneer de verstopte bovenstroomse rand uiteindelijk niet zou breken, dan zou er een vorm van onderloopsheid ontstaan zoals geschetst in Figuur 401, of waarschijnlijker nog: verticale heave direct achter de verstopte rand. Dit wordt onwaarschijnlijk geacht. Eveneens onwaarschijnlijk, maar hier wel nader uitgewerkt, zijn een andere variant waarbij onderloopsheid ontstaat (zie faalpad 76 in §C.3.21) en een variant met voorloopsheid (zie faalpad 77 in §C.3.22).



Figuur 401 Onderloopsheid na verstopping van de bovenstroomse rand van de grofzandbarrière.

Doorloopsheid

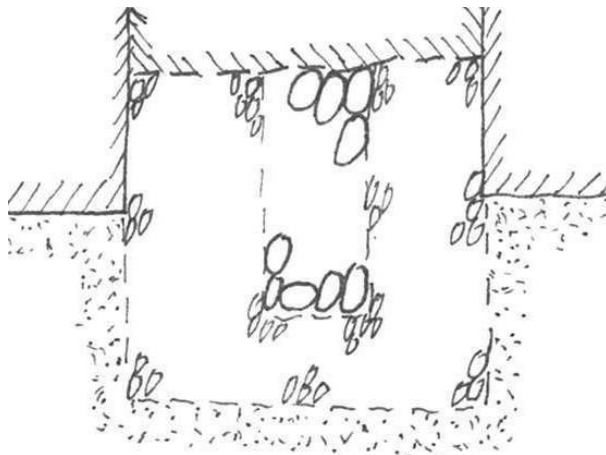
De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorloopsheid (zie Figuur 402).



Figuur 402 Doorloopsheid.

C.3.12 Pad 67 Grove deel dubbel filter raakt na blootlegging bij hoogwater door omgekeerde stroming verstopt, verstopping breekt niet af: doorloopsheid

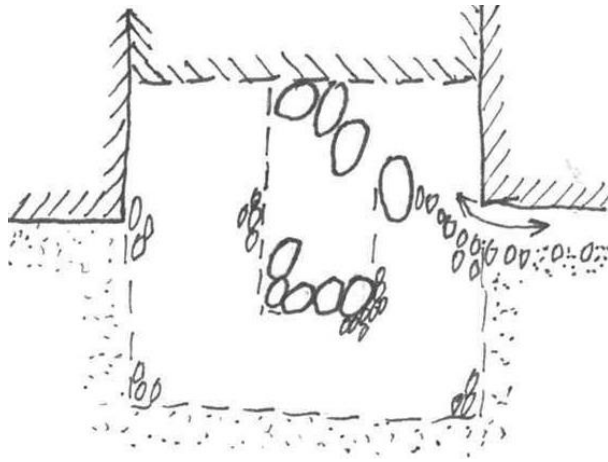
B8 Bij een eerder hoogwater is de grofzandbarrière door piping bloot komen te liggen. Met een 'dubbel filter' wordt bedoeld: een opeenvolging van twee maal een filterovergang met een zodanige samenstelling én vormgeving dat aan de filtereisen (zie §6.2) wordt voldaan. Het principe is geschetst in Figuur 403: een 'normale' grofzandbarrière omhult een nog grover granulair filter (een 'fijngrindbarrière'), behalve aan de bovenkant waar de gangbare afsluiting met klei aanwezig is. Een dergelijk dubbel filter kan een groter verval weerstaan dan een gangbaar enkel filter. Dit idee is op verschillende plaatsen ontstaan als mogelijkheid om tot een extra sterke grofzandbarrière te komen. Het concept is echter nog onvolledig doordacht, zie ook §A.3.8.



Figuur 403 Principe van een dubbel filter toegepast als grofzandbarrière.

99j Er is WEL een dubbel filter aangebracht EN het grove deel van dit filter ligt bloot (door pipevorming)

Er wordt hier uitgegaan van een situatie met een dubbel filter. Wanneer een hoogwater zodanig hoog geweest is dat daarbij het bovenste deel van de barrière (de inkassing) is uitgespoeld en ook het grove deel van het filter bloot is komen te liggen, dan is er een situatie ontstaan als geschetst in Figuur 404.



Figuur 404 Situatie met een openliggend grof gedeelte van een dubbel filter tijdens of na hoogwater.

54* Bij omgekeerde stroming (stroming van landzijde naar buitenwater) komt fijn materiaal (achtergrondzand) in het grove deel van de als meervoudig filter opgebouwde grofzandbarrière

In dit geval stroomt het water de andere kant op dan bij hoogwater, namelijk van de landzijde richting het buitenwater. Dit vergt een aanzienlijke stroming – er moet immers erosie plaatsvinden van het achtergrondzand en dat zand moet via de eerder gevormde benedenstroomse pipe(s) de grofzandbarrière instromen, tot in het grove deel van het dubbele filter. Of, nog minder waarschijnlijk, over een grotere breedte toestromen vanuit ook de zijdelings gevormde pipes.

53* Grofzandbarrière raakt verstopt

In de bij de vorige stap geschetste situatie wordt niet voldaan aan de filtereisen, zodat verstopping van de grofzandbarrière kan optreden. Dit betreft alleen het gedeelte van het grove deel van het dubbele filter waar achtergrondzand in heeft kunnen stromen.

52 Fijne materiaal spoelt niet uit, maar veroorzaakt verstopping

*Bij een volgend hoogwater bestaat de **mogelijkheid** (geen zekerheid) dat het ingestroomde fijne materiaal niet uit het grove deel van de barrière stroomt, maar tot verstopping leidt. Dit betreft naar alle waarschijnlijkheid dan een betrekkelijk kort gedeelte van de grofzandbarrière, omdat een massale toestroming van geërodeerd achtergrondzand eerder, bij de laagwatersituatie met stroming naar het buitenwater toe, uiterst onwaarschijnlijk is; als deze stroming al tot erosie heeft geleid, dan vooral (of uitsluitend) in de benedenstroomse pipe(s).*

98n Slechtdoorlatende deel erodeert NIET of breekt NIET af

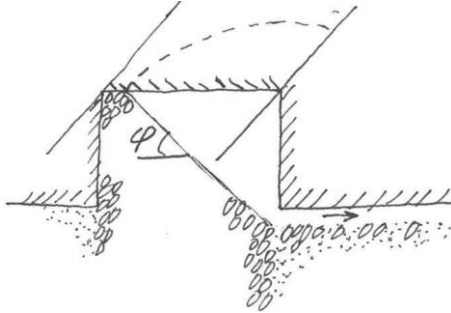
Het slechtdoorlatende deel blijft aanwezig. Indien dit slechts over een beperkte afstand aanwezig is, dan leidt dit tot een verhoging van de stromingsdruk op de omliggende delen van de grofzandbarrière

Bij een grotere lengte van het verstopte gedeelte (in langsrichting van de dijk) rijst de vraag hoe dit gedeelte kan blijven hangen en waarom er niet alsnog erosie/afbreken optreedt.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft

Nadat bij een volgend hoogwater de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfrond mini-

amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 405.



Figuur 405 Uitspoeling van bovendeelel barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

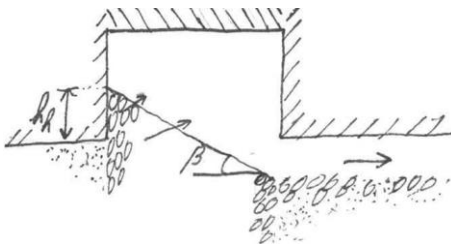
De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfitheater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor.

De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

Uiteindelijk kan er wel over de hele lengte van de grofzandbarrière sprake zijn van een volledig ontwikkelde helling, maar het is waarschijnlijker dat de zijdelingse pipegroei ergens geblokkeerd raakt.

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 406.



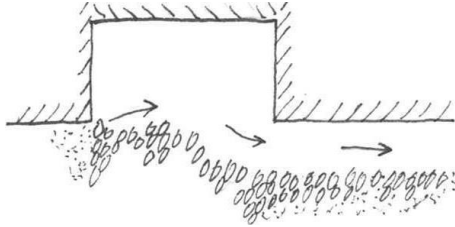
Figuur 406 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand
Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier kortheidshalve niet herhaald.

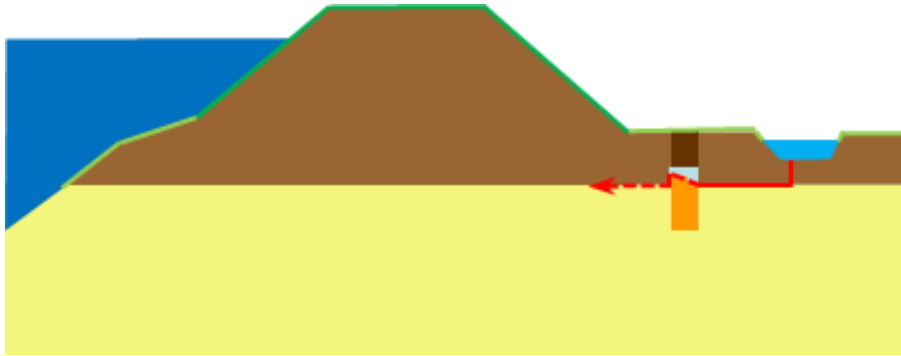
20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 407.



Figuur 407 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorloopsheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorloopsheid (zie Figuur 408).

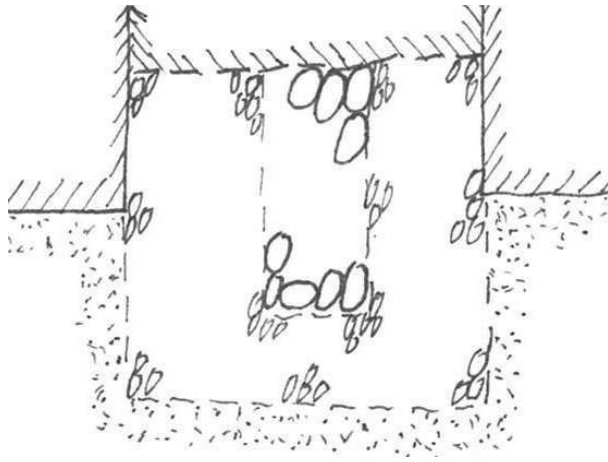


Figuur 408 Doorloopsheid.

NB: Deze situatie met verstopping is uitsluitend relevant bij toepassing van een dubbel filter. Meerdere aannames komen als onwaarschijnlijk over, vooral de mogelijkheid van verstopping over een grotere lengte dan nabij de benedenstroomse pipe(s) en het in stand blijven van de verstopping. Voorafgaand aan de toepassing van een dubbel filter wordt experimenteel laboratoriumonderzoek, bijvoorbeeld met proeven op medium schaal, sterk aanbevolen. Hierbij zal het aspect van verstopping door een retourstroming zeker moeten worden meegenomen.

C.3.13 Pad 68 Grove deel dubbel filter raakt na blootlegging bij hoogwater door omgekeerde stroming verstopt, verstopping breekt af: doorloopsheid

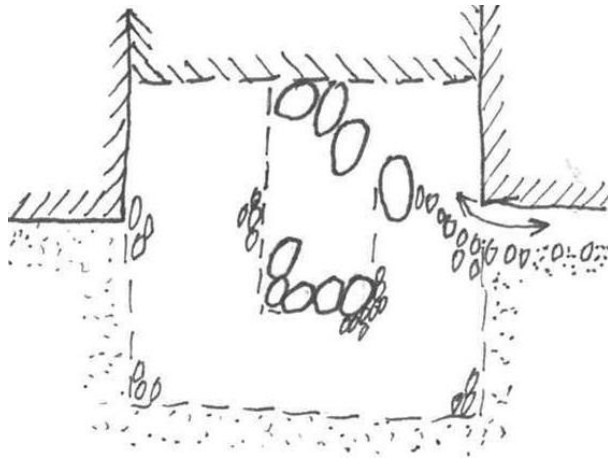
B8 Bij een eerder hoogwater is de grofzandbarrière door piping bloot komen te liggen
Met een 'dubbel filter' wordt bedoeld: een opeenvolging van twee maal een filterovergang met een zodanige samenstelling én vormgeving dat aan de filtereisen (zie §6.2) wordt voldaan. Het principe is geschetst in Figuur 409: een 'normale' grofzandbarrière omhult een nog grover granulaair filter (een 'fijngrindbarrière'), behalve aan de bovenkant waar de gangbare afsluiting met klei aanwezig is. Een dergelijk dubbel filter kan een groter verval weerstaan dan een gangbaar enkel filter. Dit idee is op verschillende plaatsen ontstaan als mogelijkheid om tot een extra sterke grofzandbarrière te komen. Het concept is echter nog onvolledig doordacht, zie ook §A.3.8.



Figuur 409 Principe van een dubbel filter toegepast als grofzandbarrière.

99j Er is WEL een dubbel filter aangebracht EN het grove deel van dit filter ligt bloot (door pipevorming)

Er wordt hier uitgegaan van een situatie met een dubbel filter. Wanneer een hoogwater zodanig hoog geweest is dat daarbij het bovenste deel van de barrière (de inkassing) is uitgespoeld en ook het grove deel van het filter bloot is komen te liggen, dan is er een situatie ontstaan als geschetst in Figuur 410.



Figuur 410 Situatie met een openliggend grof gedeelte van een dubbel filter tijdens of na hoogwater.

54* Bij omgekeerde stroming (stroming van landzijde naar buitenwater) komt fijn materiaal (achtergrondzand) in het grove deel van de als meervoudig filter opgebouwde grofzandbarrière

In dit geval stroomt het water de andere kant op dan bij hoogwater, namelijk van de landzijde richting het buitenwater. Dit vergt een aanzienlijke stroming – er moet immers erosie plaatsvinden van het achtergrondzand en dat zand moet via de eerder gevormde benedenstroomse pipe(s) de grofzandbarrière instromen, tot in het grove deel van het dubbele filter. Of, nog minder waarschijnlijk, over een grotere breedte toestromen vanuit ook de zijdelings gevormde pipes.

53* Grofzandbarrière raakt verstopt

In de bij de vorige stap geschetste situatie wordt niet voldaan aan de filtereisen, zodat verstopping van de grofzandbarrière kan optreden. Dit betreft alleen het gedeelte van het grove deel van het dubbele filter waar achtergrondzand in heeft kunnen stromen.

52 Fijne materiaal spoelt niet uit, maar veroorzaakt verstopping

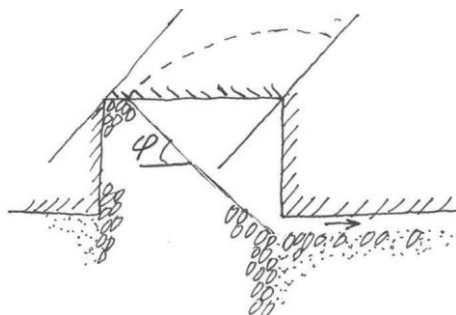
*Bij een volgend hoogwater bestaat de **mogelijkheid** (geen zekerheid) dat het ingestroomde fijne materiaal niet uit het grove deel van de barrière stroomt, maar tot verstopping leidt. Dit betreft naar alle waarschijnlijkheid dan een betrekkelijk kort gedeelte van de grofzandbarrière, omdat een massale toestroming van geërodeerd achtergrondzand eerder, bij de laagwatersituatie met stroming naar het buitenwater toe, uiterst onwaarschijnlijk is; als deze stroming al tot erosie heeft geleid, dan vooral (of uitsluitend) in de benedenstroomse pipe(s).*

98j Slechtdoorlatende deel erodeert WEL of breekt WEL af

Na enige tijd, mogelijk geholpen door erosie van omliggende gedeelten, erodeert het verstopte gedeelte alsnog, of het breekt af. Deze situatie leidt dan minder dan pad 67 (zie §C.3.12), of helemaal niet, tot verzwaarde omstandigheden ten opzichte van de 'standaard situatie', beschreven door faalpad 63 (zie §5.3).

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft

Nadat bij een volgend hoogwater de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfrond mini-amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 411.



Figuur 411 Uitspoeling van bovendeele barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsricting).

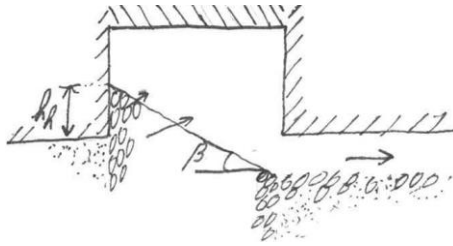
De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uitredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfitheater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor.

De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

Uiteindelijk kan er wel over de hele lengte van de grofzandbarrière sprake zijn van een volledig ontwikkelde helling, maar het is waarschijnlijker dat de zijdelingse pipegroei ergens geblokkeerd raakt.

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 412.



Figuur 412 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

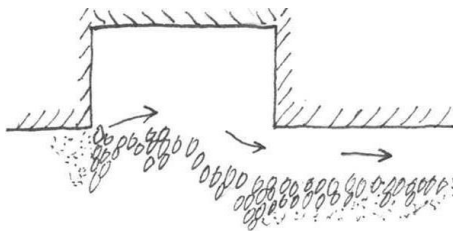
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier kortheidshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

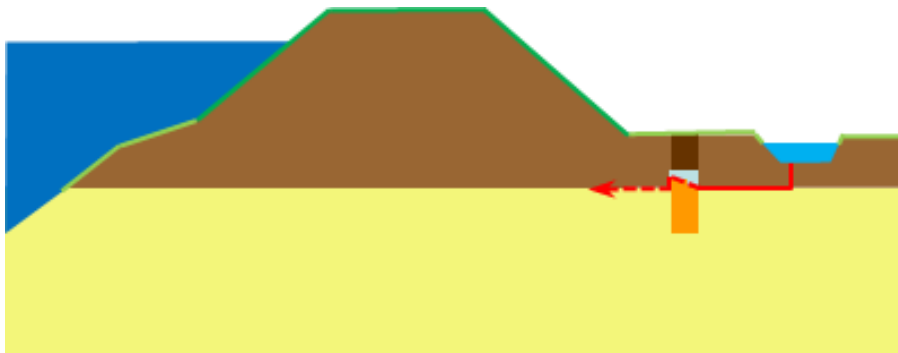
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 413.



Figuur 413 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 414).



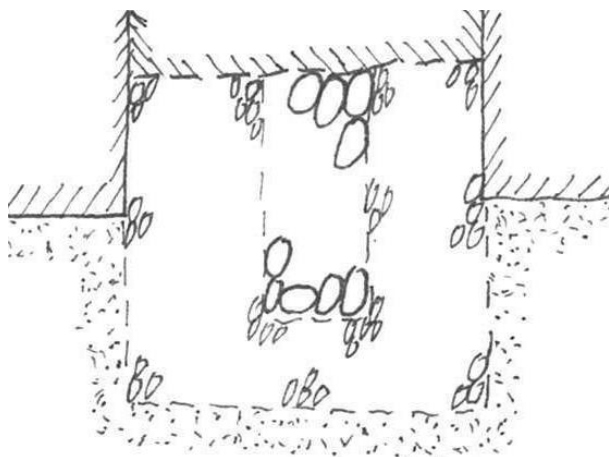
Figuur 414 Doorlooptheid.

NB: Deze situatie met verstopping is uitsluitend relevant bij toepassing van een dubbel filter. Meerdere aannames komen als onwaarschijnlijk over, vooral de mogelijkheid van verstopping over een grotere lengte dan nabij de benedenstroomse pipe(s) en het in stand blijven van de verstopping. Voorafgaand aan de toepassing van een dubbel filter wordt experimenteel laboratoriumonderzoek, bijvoorbeeld met proeven op medium schaal, sterk aanbevolen. Hierbij zal het aspect van verstopping door een retourstroming zeker moeten worden meegenomen.

C.3.14 Pad 69 Barrière raakt na blootlegging bij hoogwater door omgekeerde stroming (deels) gevuld met achtergrondzand, dit vormt geen risico

B8 Bij een eerder hoogwater is de grofzandbarrière door piping bloot komen te liggen. Zodra een benedenstroomse pipe bij de grofzandbarrière aankomt, komt deze strikt genomen al bloot te liggen. Bij deze faaloorzaak gaat het echter primair om wat er verkeerd zou kunnen gaan in het geval van een dubbel filter.

Met een 'dubbel filter' wordt bedoeld: een opeenvolging van twee maal een filterovergang met een zodanige samenstelling én vormgeving dat aan de filtereisen (zie §6.2) wordt voldaan. Het principe is geschetst in Figuur 415: een 'normale' grofzandbarrière omhult een nog grover granulaire filter (een 'fijngrindbarrière'), behalve aan de bovenkant waar de gangbare afsluiting met klei aanwezig is. Een dergelijk dubbel filter kan een groter verval weerstaan dan een gangbaar enkel filter. Dit idee is op verschillende plaatsen ontstaan als mogelijkheid om tot een extra sterke grofzandbarrière te komen. Het concept is echter nog onvolledig doordacht, zie ook §A.3.8.



Figuur 415 Principe van een dubbel filter toegepast als grofzandbarrière.

99n Er is GEEN dubbel filter aangebracht, of er is wel een dubbel filter aangebracht maar het grove deel van dit filter ligt NIET bloot (door pipevorming). Wanneer er een normale grofzandbarrière is toegepast of wanneer bij een dubbel filter alleen het fijne deel daarvan blootligt, dan is er sprake van een wezenlijk andere situatie dan bij de beide faalpaden hiervoor (67 en 68).

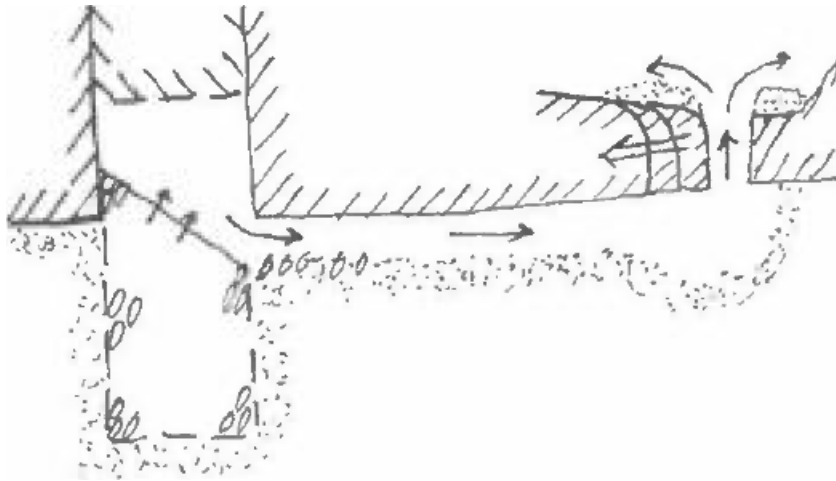
55* Bij omgekeerde stroming (stroming van landzijde naar buitenwater) komt fijn materiaal (achtergrondzand) in de grofzandbarrière – aan de filterregels wordt nog wel voldaan, daarom ontstaat er geen verstopping en vormt dit verder geen risico. Er is dan geen verder risico voor wat betreft de verstopping. Het nazakken van de deklaag (beïnvloedende factor B4) vormt dan nog steeds een risico, zie hiervoor §A.3.4 en §C.3.6.

C.3.15 Pad 70 Uittredepunt verplaatst door afkalving in bovenstroomse richting en bereikt sleuf

B9 Afkalving van de deklaag benedenstrooms van de barrière. Benedenstrooms van de grofzandbarrière kan afkalving van de deklaag ontstaan, hetgeen uiteindelijk kan leiden tot het eroderen van het volledige gebied benedenstrooms van de

grofzandbarrière over een zekere breedte aan weerszijden van de benedenstroomse pipe. Dit leidt tot verlies van de benedenstroomse weerstand en daarmee tot een kleine toename van de gradiënt in de grofzandbarrière.

In Figuur 416 is dit geïllustreerd voor de situatie met afkalving van de deklaag bij het uittredepunt. Doorgaans wordt hier in pipinganalyses geen rekening mee gehouden, maar het is bijvoorbeeld waargenomen bij de proefnemingen in de Willemspolder waar het pipingproces bij een zomerkade tot een ongebruikelijk sterke erosie leidde (anders gezegd: het verval lag rond het kritieke verval (zonder veiligheidsfactoren), hetgeen tot een meer extreme situatie leidde dan gangbaar is bij waarnemingen van zandmeevoerende wellen onder hoogwateromstandigheden elders). In een tijdsbestek van meerdere uren verschoof het uittredepunt daarbij ruim een meter rivierwaarts (Koelewijn, 2017).

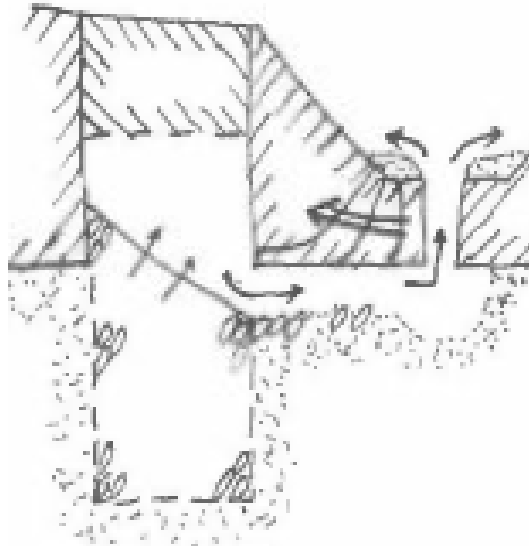


Figuur 416 Afkalving van de deklaag bij het uittredepunt.

Wanneer het uittredepunt in de buurt komt van de grofzandbarrière, kan bovendien interferentie van de onderscheiden erosieprocessen optreden, zoals reeds aangegeven in §A.1.7. Vooralsnog wordt aanbevolen om bij wijze van noodmaatregel grond bij te storten in het erosiegat, uiterlijk wanneer de afstand tot de grofzandbarrière minder dan 5 meter dreigt te worden. Bij die afstand mag dit nog praktisch uitvoerbaar worden geacht.

63 Erosie deklaag nabij barrière

De deklaag erodeert, bijvoorbeeld in de volgorde zoals aangegeven in Figuur 417: eerst bij het uittredepunt (dat hierdoor in bovenstroomse richting opschuift), daarna ook langs de onderkant van de deklaag. Vanwege de korte afstand tot de barrière betreft dit allebei 'erosie nabij barrière'.



Figuur 417 Erosie deklaag bij een uittredepunt nabij de grofzandbarrière.

62 Erosie van klei uit aanvulling

Hierna kan de klei uit de sleufaanvulling eroderen (bij andere oorzaken kan dat overigens ook zonder dat de deklaag benedenstrooms verdwenen is).

61 Sleufaanvulling bezwijkt

De volgende stap is dat de sleufaanvulling bezwijkt, dat wil zeggen: geen volledige afsluiting meer vormt tussen barrièrezand en maaiveld. Dit kan gebeuren als de sleufaanvulling van onderaf verder erodeert. Voor de veiligheid zal moeten worden getoetst of er geen kwelstroom bovenlangs kan ontstaan die tot verdere erosie leidt. Als er geen erosie optreedt, dan is er hooguit sprake van enige wateroverlast indien de stijghoogte in de barrière boven het maaiveld reikt. Door toepassing van een erosiebestendige kleilaag direct bovenop het barrièrezand is dit in belangrijke mate te voorkomen.

Het bezwijken van de sleufaanvulling kan zich ook voordoen in de vorm van opbarsten, waarbij de waterdruk van onderaf de sleufaanvulling doet bezwijken. Dit kan optreden ondanks dat de sleufaanvulling op opbarsten ontworpen is, als gevolg van de erosie van onderaf. Dan valt dit feitelijk onder het volgende punt.

60 Opbarsten en heave van de sleuf

De vorige stap leidt, bij voldoende stromingsdruk, vervolgens tot heave van de sleuf, na eventueel opbarsten.

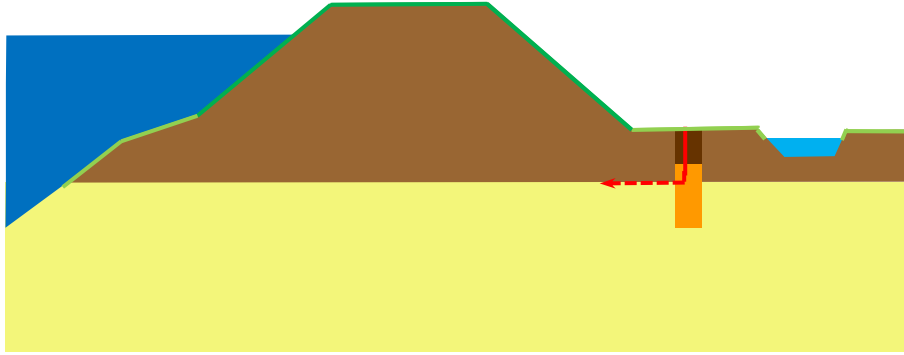
59 Pipe ontwikkelt zich door de sleuf naar het maaiveld

Hierna ontwikkelt de pipe zich via de sleuf naar het maaiveld.

Bij deze oorzaak en het hiervoor beschreven faalpad zal op dit punt in één of meer doorsneden overigens een geheel open verbinding zijn ontstaan tussen het oorspronkelijke uittredepunt en de sleuf.

Bovenloopsheid

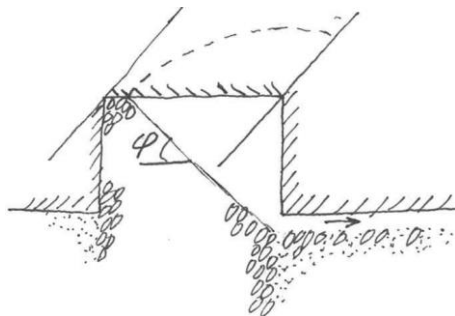
*Er ontstaat kortsluiting naar het maaiveld via de afdichting boven de grofzandbarrière (zie Figuur 418). Er is dan sprake van een kwelstroom via de sleuf. Dit leidt echter niet direct tot falen: de barrière biedt nog steeds weerstand. **Bovenloopsheid impliceert dus nog géén falen.** Wel zal de totale weerstand benedenstrooms (als in: stroomafwaarts) van de eigenlijke grofzandbarrière verkleind zijn (tenzij de bovenkant van de sleuf zo hoog ligt dat er uiteindelijk geen kwelstroming optreedt, doordat de stijghoogte ter plaatse lager is dan het maaiveld).*



Figuur 418 Bovenloopsheid.

Er treedt dan een herverdeling op van de waterdrukken, waarbij het gedeelte benedenstrooms van de eigenlijke grofzandbarrière (dus: de benedenstroomse pipe(s) en de sleuf samen) een kleiner deel van het verval keren, wat dan gecompenseerd zal moeten worden door het verval over de eigenlijke grofzandbarrière en het achtergrondzand bovenstrooms van de grofzandbarrière samen. De toename van het verval over de eigenlijke grofzandbarrière zelf zal relatief gering zijn: het grootste deel van het verval zal nog steeds worden opgenomen door het gedeelte bovenstrooms van de grofzandbarrière. Om tot falen van de waterkering te komen is nog steeds een reeks van stappen nodig die via doorloopsheid uiteindelijk leidt tot inundatie; hierna zijn de stappen tot aan doorloopsheid beschreven.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfrond mini-amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 419.



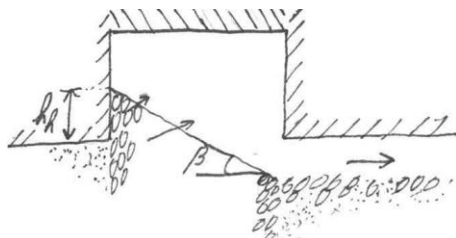
Figuur 419 Uitspoeling van bovendeele barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrichting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfitheater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor. De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan,

bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 420.



Figuur 420 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

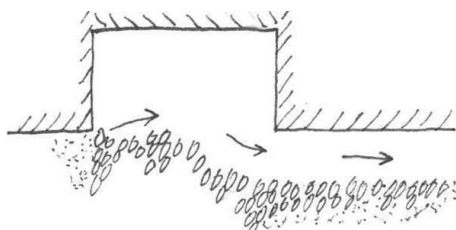
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formule hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier kortheidshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

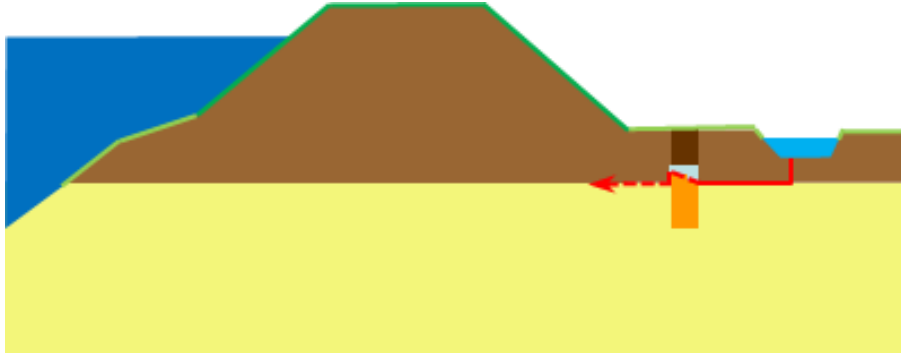
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 421.



Figuur 421 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 422).

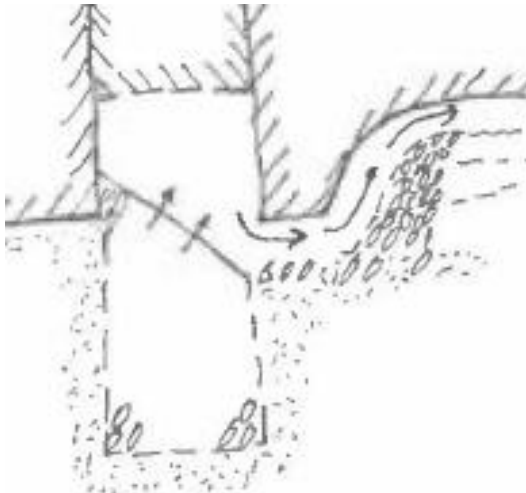


Figuur 422 Doorloopsheid.

C.3.16 Pad 71 Pipe slijt bovenliggende deklaag volledig uit, waardoor uittredepunt meer bovenstrooms komt te liggen, uiteindelijk bij sleuf

B10 Pipe slijt de bovenliggende deklaag uit

De benedenstroomse pipe kan de bovenliggende deklaag uitslijten, zie Figuur 423 voor een schetsmatige indicatie. Dit is bijvoorbeeld bij één van de proeven in de Deltagoot geconstateerd. Daarbij was de bodem van de pipe geleidelijk opgehoogd, voornamelijk met grof zand. Uiteindelijk kan dit leiden tot doorsnijding van het maaiveld ergens tussen de grofzandbarrière en het uittredepunt. Of dit uiteindelijk ook gebeurt is mede afhankelijk van de hoogteligging van het maaiveld, de optredende drukken en de erosiegevoeligheid van de deklaag.



Figuur 423 Uitslijting van de bovenliggende deklaag.

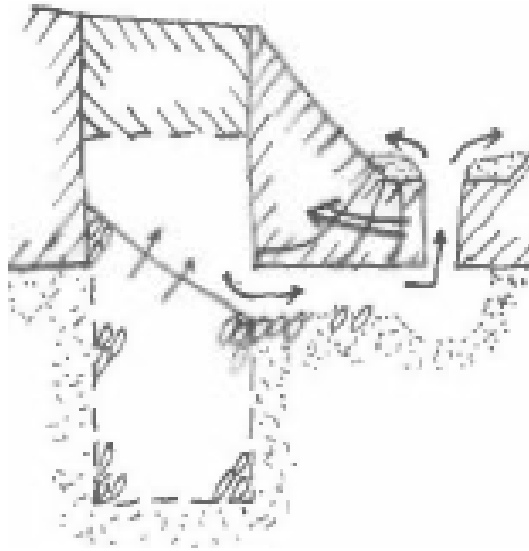
Of dit in de praktijk een probleem vormt, zal nog moeten blijken. Voor de veiligheidsbeschouwing heeft dit niet veel invloed, gelet op de stijghoogte die weer gewonnen wordt en de relatief geringe bijdrage van het gedeelte benedenstrooms van de grofzandbarrière in de sterkteberekeningen.

64 Erosie van klei uit deklaag tussen barrière en uittredepunt

Bij het in de voorgaande omschrijving beschreven proces, erodeert klei uit de deklaag tussen de grofzandbarrière en het uittredepunt.

63 Erosie deklaag nabij barrière

De deklaag erodeert, bijvoorbeeld in de volgorde zoals aangeven in Figuur 424: eerst bij het uittredepunt (dat hierdoor in bovenstroomse richting opschuift), daarna ook langs de onderkant van de deklaag. Vanwege de korte afstand tot de barrière betreft dit allebei 'erosie nabij barrière'.



Figuur 424 Erosie deklaag bij een uitredepunt nabij de grofzandbarrière.

62 Erosie van klei uit aanvulling

Hierna kan de klei uit de sleufaanvulling eroderen (bij andere oorzaken kan dat overigens ook zonder dat de deklaag benedenstrooms verdwenen is).

61 Sleufaanvulling bezwijkt

De volgende stap is dat de sleufaanvulling bezwijkt, dat wil zeggen: geen volledige afsluiting meer vormt tussen barrièrezand en maaiveld. Dit kan gebeuren als de sleufaanvulling van onderaf verder erodeert. Voor de veiligheid zal moeten worden getoetst of er geen kwelstroom bovenlangs kan ontstaan die tot verdere erosie leidt. Als er geen erosie optreedt, dan is er hooguit sprake van enige wateroverlast indien de stijghoogte in de barrière boven het maaiveld reikt. Door toepassing van een erosiebestendige kleilaag direct bovenop het barrièrezand is dit in belangrijke mate te voorkomen.

Het bezwijken van de sleufaanvulling kan zich ook voordoen in de vorm van opbarsten, waarbij de waterdruk van onderaf de sleufaanvulling doet bezwijken. Dit kan optreden ondanks dat de sleufaanvulling op opbarsten ontworpen is, als gevolg van de erosie van onderaf. Dan valt dit feitelijk onder het volgende punt.

60 Opbarsten en heave van de sleuf

De vorige stap leidt, bij voldoende stromingsdruk, vervolgens tot heave van de sleuf, na eventueel opbarsten.

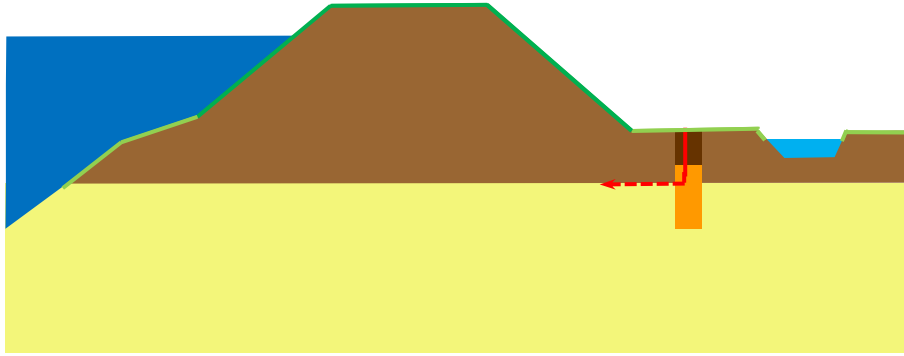
59 Pipe ontwikkelt zich door de sleuf naar het maaiveld

Hierna ontwikkelt de pipe zich via de sleuf naar het maaiveld.

Bij deze oorzaak en het hiervoor beschreven faalpad zal op dit punt in één of meer doorsneden overigens een geheel open verbinding zijn ontstaan tussen het oorspronkelijke uitredepunt en de sleuf.

Bovenloopsheid

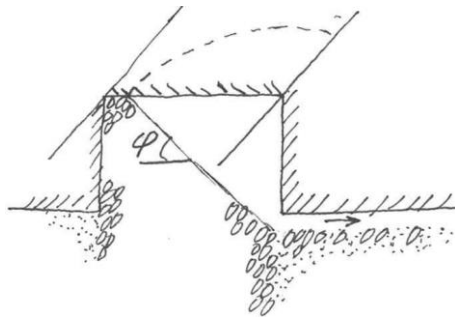
*Er ontstaat kortsluiting naar het maaiveld via de afdichting boven de grofzandbarrière (zie Figuur 425). Er is dan sprake van een kwelstroom via de sleuf. Dit leidt echter niet direct tot falen: de barrière biedt nog steeds weerstand. **Bovenloopsheid impliceert dus nog géén falen.** Wel zal de totale weerstand benedenstrooms (als in: stroomafwaarts) van de eigenlijke grofzandbarrière verkleind zijn (tenzij de bovenkant van de sleuf zo hoog ligt dat er uiteindelijk geen kwelstroming optreedt, doordat de stijghoogte ter plaatse lager is dan het maaiveld).*



Figuur 425 Bovenloopsheid.

Er treedt dan een herverdeling op van de waterdrukken, waarbij het gedeelte benedenstrooms van de eigenlijke grofzandbarrière (dus: de benedenstroomse pipe(s) en de sleuf samen) een kleiner deel van het verval keren, wat dan gecompenseerd zal moeten worden door het verval over de eigenlijke grofzandbarrière en het achtergrondzand bovenstrooms van de grofzandbarrière samen. De toename van het verval over de eigenlijke grofzandbarrière zelf zal relatief gering zijn: het grootste deel van het verval zal nog steeds worden opgenomen door het gedeelte bovenstrooms van de grofzandbarrière. Om tot falen van de waterkering te komen is nog steeds een reeks van stappen nodig die via doorloopsheid uiteindelijk leidt tot inundatie; hierna zijn de stappen tot aan doorloopsheid beschreven.

38 Bovendeel barrière (inkassing) spoelt weg totdat alleen een helling overblijft. Nadat de eerste korrel in de benedenstroomse pipe is gevallen, zullen de bovenliggende korrels kunnen volgen – mits er direct benedenstrooms van de grofzandbarrière voldoende zandtransport plaatsvindt om hier voldoende ruimte aan te bieden. Dit proces zal doorgaan totdat er vanaf de bodem van de pipe waar deze op de grofzandbarrière aansluit half-rondom een helling is gevormd onder een hoek die de hoek van inwendige wrijving van het barrièrezand benadert. Dit levert een soort halfronde mini-amfitheater op ter plaatse van de aansluiting van de benedenstroomse pipe op de grofzandbarrière, zie Figuur 426.



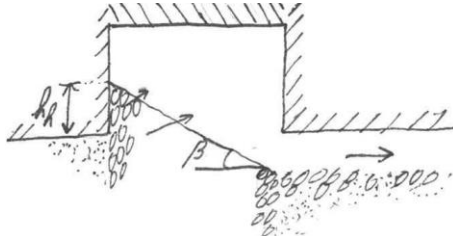
Figuur 426 Uitspoeling van bovendeele barrière aansluitend op benedenstroomse pipe tot ongeveer een hellingshoek gelijk aan de hoek van inwendige wrijving. De geschetste situatie betreft een relatief brede barrière met een relatief lage inkassing (zijaanzicht met enige 3D-suggestie in langsrchting).

De grotere korrels uit de grofzandbarrière zullen minder gemakkelijk het uittredepunt bereiken, terwijl deze korrels de bodemruwheid van de benedenstroomse pipe zullen laten toenemen, en daarmee de stromingsweerstand. Hierdoor zal deze pipe ook in positie kunnen variëren, waardoor het 'amfitheater' een minder mooie ronde vorm krijgt, wat overigens alleen maar gunstig is voor de sterkte door onder meer een lagere 3D-factor. De 3D-factor wordt nog (veel) meer verlaagd door de zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse kant van de barrière, die ook leidt tot een gedeeltelijke uitspoeling van de inkassing op grotere afstand van de benedenstroomse pipe. In de loop van het proces van

gedeeltelijk uitspoelen van de inkassing zal er tijdelijk een tweede holte kunnen ontstaan, bovenin de inkassing (in de rechterbovenhoek van alle schetsen met een dwarsdoorsnede van de grofzandbarrière in deze rapportage).

37 Afname hellingshoek bovenin barrière

Bij een toenemend verval zal de hellingshoek in de barrière vervolgens geleidelijk aan afnemen als gevolg van de stromingsdruk op de korrels als gevolg van de kwelstroom door de barrière. Dit proces is in de literatuur onder andere beschreven door Van Rhee & Bezuijen (1992). Strikt genomen treedt dit al gedeeltelijk op bij het vorige knooppunt, omdat er in die situatie natuurlijk ook al sprake is van een stromingsdruk op de korrels op het talud. Hier gaat het om de verdere verflauwing, zoals getoond in Figuur 427.



Figuur 427 Verder verflauwde helling van de grofzandbarrière onder invloed van de stromingsdruk op de korrels.

29 Heavehoogte neemt af

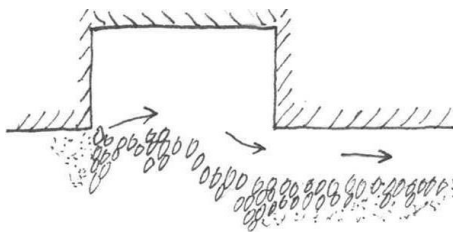
De afname van de hellingshoek heeft ook tot gevolg dat de heavehoogte afneemt.

26 Instabiliteit van het resterende onder een helling liggende grof zand

Uiteindelijk bezwijkt de helling door de stromingsdruk, zoals bekend is van het heave-mechanisme. De formules hiervoor is al weergegeven in §2.2.2.1 en §5.3 en wordt hier kortheidshalve niet herhaald.

20 Pipe ontwikkelt zich door de barrière heen

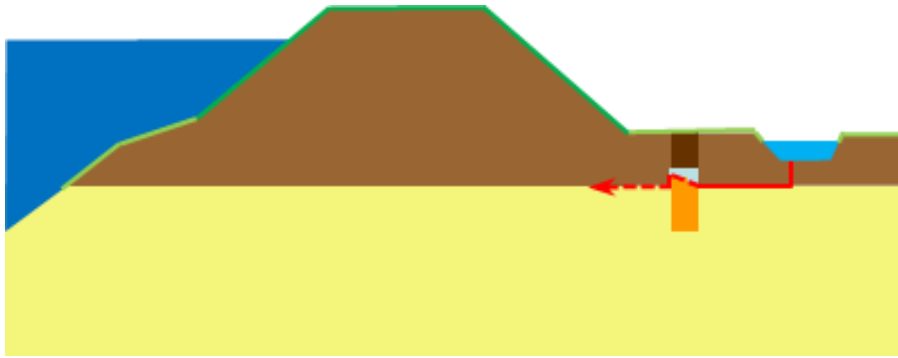
Wanneer de grofzandbarrière onvoldoende weerstand biedt tegen de stromingsdruk, dan zal de pipe ook door het laatste stukje barrière heen groeien naar het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, zie Figuur 260.



Figuur 428 Laatste weerstand van de grofzandbarrière tegen doorgroeien van de pipe is weggespoeld.

Doorlooptheid

De pipe groeit door de grofzandbarrière heen en er is sprake van doorlooptheid (zie Figuur 429).



Figuur 429 Doorloopsheid.

C.3.17 Pad 72 Verstopping vindt alleen plaats in de gehele barrière, pipe groeit onder dichte barrière door

B7 Mechanische, chemische of biologische verstopping

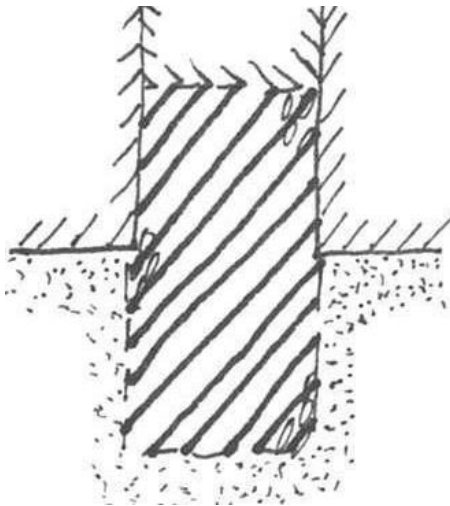
In §A.3.7 is toegelicht dat in de Nederlandse situatie géén verstopping zal optreden bij een grofzandbarrière, mits deze voldoet aan de eisen voor geometrisch dichte filters (zie §6.2). Slechts voor de volledigheid zijn in deze bijlage de meeste (faal)paden geschetst die (theoretisch) bij verstopping zouden kunnen optreden.

95j Alleen barrière verstopt, omgeving niet

De faalpaden met verstopping van de grofzandbarrière zijn ingegeven door de vrees voor de mogelijke gevolgen wanneer dit grove filter verstopt zou raken. Hoewel dit onder de gestelde voorwaarde in de Nederlandse situatie niet mogelijk wordt geacht, is bij elk van de onderscheiden scenario's wel uitgewerkt hoe dit zou uitpakken.

71* Barrière wordt als geheel slechtdoorlatend

In dit geval verstopt de hele grofzandbarrière en wordt deze als geheel slechtdoorlatend, zie Figuur 430.



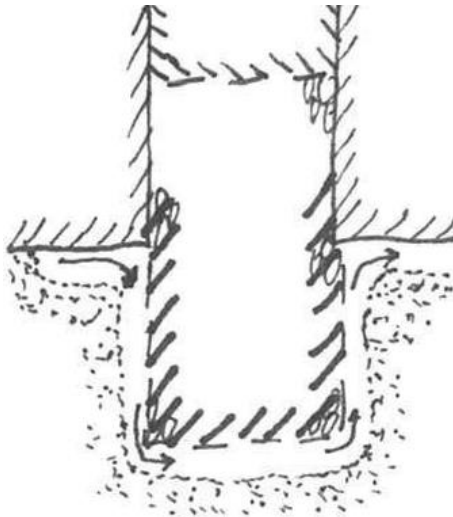
Figuur 430 Verstopping van de hele barrière, maar niet van de omgeving.

70 Barrière werkt als ondoorlatend scherm

De barrière functioneert hierdoor effectief als een (dik) ondoorlatend scherm, niet als een grofzandbarrière met filterwerking.

68 Pipe groeit onder de grofzandbarrière door

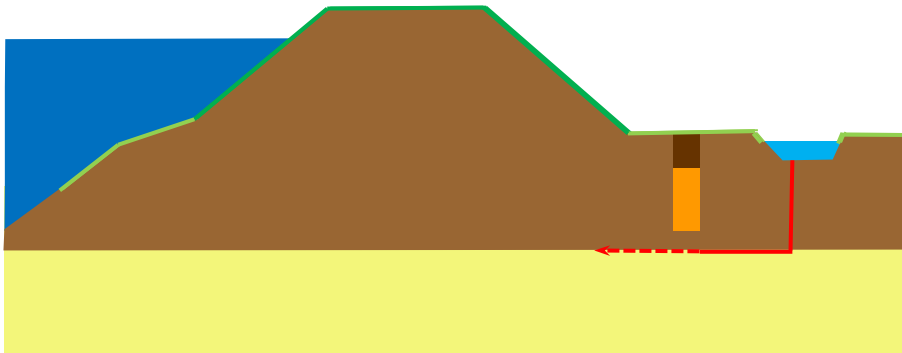
De pipe zal onder de grofzandbarrière doorgroeien, waarmee die niet meer is dan een kort en dik heavescherm (zie Figuur 431).



Figuur 431 Onderloopsheid bij verstopping aan alle randen van de barrière.

Onderloopsheid

De pipe ontwikkelt zich onder de barrière door, zodat er sprake is van onderloopsheid (zie Figuur 432).



Figuur 432 Onderloopsheid.

C.3.18 Pad 73 Verstopping vindt alleen plaats aan de benedenstroomse rand van de barrière en verstopte deel breekt niet af

B7 Mechanische, chemische of biologische verstopping

In §A.3.7 is toegelicht dat in de Nederlandse situatie géén verstopping zal optreden bij een grofzandbarrière, mits deze voldoet aan de eisen voor geometrisch dichte filters (zie §6.2). Slechts voor de volledigheid zijn in deze bijlage de meeste (faal)paden geschetst die (theoretisch) bij verstopping zouden kunnen optreden.

95j Alleen barrière verstopt, omgeving niet

De faalpaden met verstopping van de grofzandbarrière zijn ingegeven door de vrees voor de mogelijke gevolgen wanneer dit grove filter verstopt zou raken. Hoewel dit onder de gestelde voorwaarde in de Nederlandse situatie niet mogelijk wordt geacht, is bij elk van de onderscheiden scenario's wel uitgewerkt hoe dit zou uitpakken.

72* Barrière wordt aan de benedenstroomse rand slechtdoorlatend

De barrière wordt (alleen) aan de benedenstroomse rand slechtdoorlatend.

98n Slechtdoorlatende deel erodeert niet of breekt niet af

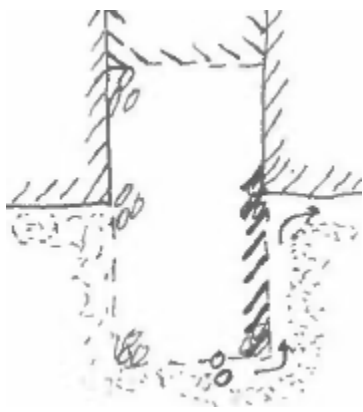
Wanneer de benedenstroomse pipe bij de barrière aankomt en het slechtdoorlatende deel erodeert niet alsnog en breekt ook niet alsnog af, dan kan de barrière niet zoals bedoeld worden aangesproken op de sterkte.

70 Barrière werkt als ondoorlatend scherm

De barrière functioneert hierdoor effectief als een (dik) ondoorlatend scherm, niet als een grofzandbarrière met filterwerking. Er zal heave optreden achter de verstopte grofzandbarrière.

68 Pipe groeit onder de grofzandbarrière door

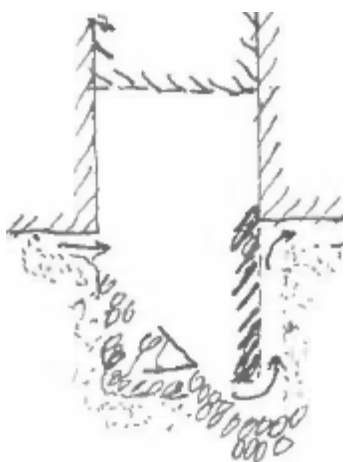
De pipe zal onder de verstopte rand van de grofzandbarrière doorgroeien, waarna eerst de grove korrels van het niet-verstopte deel van de barrière zullen moeten worden afgevoerd voordat verdere groei zal kunnen plaatsvinden, zie Figuur 433.



Figuur 433 Heave bij verstopping aan de benedenstroomse rand van de barrière.

Onderloopsheid

De pipe ontwikkelt zich onder de barrière door na afvoeren van voldoende grof materiaal uit het niet-verstopte deel van de grofzandbarrière, zodat er sprake is van onderloopsheid (zie Figuur 434).



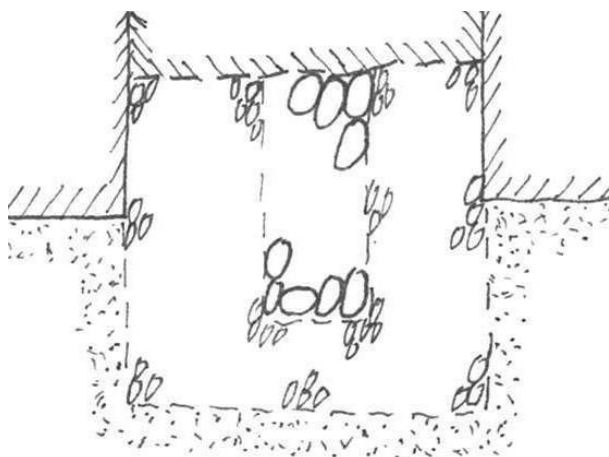
Figuur 434 Onderloopsheid bij verstopping aan de benedenstroomse rand van de barrière.

C.3.19

Pad 74 Inspoeling van achtergrondzand in binnenste laag dubbel filter

B8 Bij een eerder hoogwater is de grofzandbarrière door piping bloot komen te liggen. Met een 'dubbel filter' wordt bedoeld: een opeenvolging van twee maal een filterovergang met een zodanige samenstelling én vormgeving dat aan de filtereisen (zie §6.2) wordt voldaan. Het principe is geschetst in Figuur 435. Figuur 435: een 'normale' grofzandbarrière omhult een nog grover granulaire filter (een 'fijngrindbarrière'), behalve aan de bovenkant waar

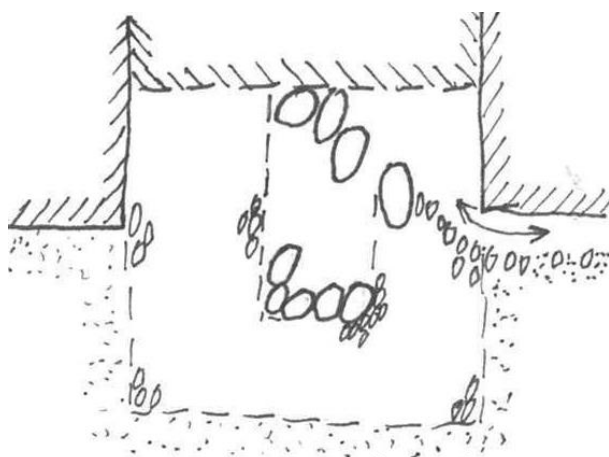
de gangbare afsluiting met klei aanwezig is. Een dergelijk dubbel filter kan een groter verval weerstaan dan een gangbaar enkel filter. Dit idee is op verschillende plaatsen ontstaan als mogelijkheid om tot een extra sterke grofzandbarrière te komen. Het concept is echter nog onvolledig doordacht, zie ook §A.3.8.



Figuur 435 Principe van een dubbel filter toegepast als grofzandbarrière.

99j Er is WEL een dubbel filter aangebracht EN het grove deel van dit filter ligt bloot (door pipevorming)

Er wordt hier uitgegaan van een situatie met een dubbel filter. Wanneer een hoogwater zodanig hoog geweest is dat daarbij het bovenste deel van de barrière (de inkassing) is uitgespoeld en ook het grove deel van het filter bloot is komen te liggen, dan is er een situatie ontstaan als geschetst in Figuur 436.



Figuur 436 Situatie met een openliggend grof gedeelte van een dubbel filter tijdens of na hoogwater.

54* Bij omgekeerde stroming (stroming van landzijde naar buitenwater) komt fijn materiaal (achtergrondzand) in het grove deel van de als meervoudig filter opgebouwde grofzandbarrière

In dit geval stroomt het water de andere kant op dan bij hoogwater, namelijk van de landzijde richting het buitenwater. Dit vergt een aanzienlijke stroming – er moet immers erosie plaatsvinden van het achtergrondzand en dat zand moet via de eerder gevormde benedenstroomse pipe(s) de grofzandbarrière instromen, tot in het grove deel van het dubbele filter. Of, nog minder waarschijnlijk, over een grotere breedte toestromen vanuit ook de zijdelings gevormde pipes.

53* Grofzandbarrière raakt verstopt

In de bij de vorige stap geschetste situatie wordt niet voldaan aan de filtereisen, zodat verstopping van de grofzandbarrière kan optreden. Dit betreft alleen het gedeelte van het grove deel van het dubbele filter waar achtergrondzand in heeft kunnen stromen.

52 Fijne materiaal spoelt niet uit, maar veroorzaakt verstopping

*Bij een volgend hoogwater bestaat de **mogelijkheid** (geen zekerheid) dat het ingestroomde fijne materiaal niet uit het grove deel van de barrière stroomt, maar tot verstopping leidt. Dit betreft naar alle waarschijnlijkheid dan een betrekkelijk kort gedeelte van de grofzandbarrière, omdat een massale toestroming van geërodeerd achtergrondzand eerder, bij de laagwatersituatie met stroming naar het buitenwater toe, uiterst onwaarschijnlijk is; als deze stroming al tot erosie heeft geleid, dan vooral (of uitsluitend) in de benedenstroomse pipe(s).*

98n Slechtdoorlatende deel erodeert NIET of breekt NIET af

Het slechtdoorlatende deel blijft aanwezig. Indien dit slechts over een beperkte afstand aanwezig is, dan leidt dit tot een verhoging van de stromingsdruk op de omliggende delen van de grofzandbarrière

Bij een grotere lengte van het verstopte gedeelte (in langsrichting van de dijk) rijst de vraag hoe dit gedeelte kan blijven hangen en waarom er niet alsnog erosie/afbreken optreedt.

70 Barrière werkt als ondoorlatend scherm

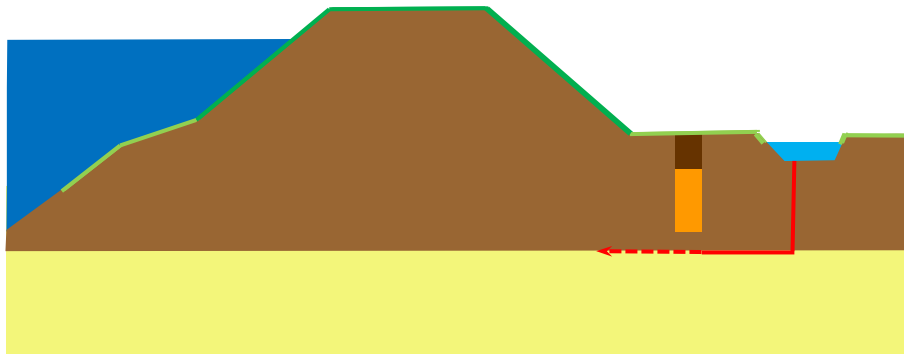
De barrière functioneert hierdoor effectief als een (dik) ondoorlatend scherm, niet als een grofzandbarrière met filterwerking.

68 Pipe groeit onder de grofzandbarrière door

De pipe zal onder de grofzandbarrière doorgroeien, waarmee die niet meer is dan een kort en dik heavescherm.

Onderloopsheid

De pipe ontwikkelt zich onder de barrière door, zodat er sprake is van onderloopsheid (zie Figuur 437).



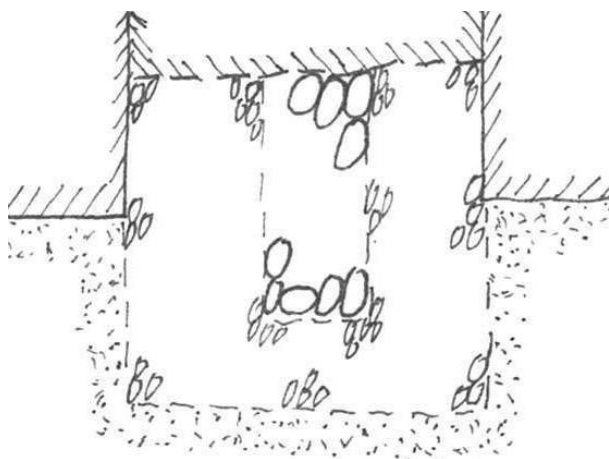
Figuur 437 Onderloopsheid.

NB: Deze situatie met verstopping is uitsluitend relevant bij toepassing van een dubbel filter. Meerdere aannames komen als onwaarschijnlijk over, vooral de mogelijkheid van verstopping over een grotere lengte dan nabij de benedenstroomse pipe(s) en het in stand blijven van de verstopping. Voorafgaand aan de toepassing van een dubbel filter wordt experimenteel laboratoriumonderzoek, bijvoorbeeld met proeven op medium schaal, sterk aanbevolen. Hierbij zal het aspect van verstopping door een retourstroming zeker moeten worden meegenomen.

C.3.20 Pad 75 Inspoeling van achtergrondzand in enkelvoudig filter of buitenste laag van dubbel filter

B8 Bij een eerder hoogwater is de grofzandbarrière door piping bloot komen te liggen. Zodra een benedenstroomse pipe bij de grofzandbarrière aankomt, komt deze strikt genomen al bloot te liggen. Bij deze faaloorzaak gaat het echter primair om wat er verkeerd zou kunnen gaan in het geval van een dubbel filter.

Met een 'dubbel filter' wordt bedoeld: een opeenvolging van twee maal een filterovergang met een zodanige samenstelling én vormgeving dat aan de filtereisen (zie §6.2) wordt voldaan. Het principe is geschetst in Figuur 415: een 'normale' grofzandbarrière omhult een nog grover granulair filter (een 'fijngrindbarrière'), behalve aan de bovenkant waar de gangbare afsluiting met klei aanwezig is. Een dergelijk dubbel filter kan een groter verval weerstaan dan een gangbaar enkel filter. Dit idee is op verschillende plaatsen ontstaan als mogelijkheid om tot een extra sterke grofzandbarrière te komen. Het concept is echter nog onvolledig doordacht, zie ook §A.3.8.



Figuur 438 Principe van een dubbel filter toegepast als grofzandbarrière.

99n Er is GEEN dubbel filter aangebracht, of er is wel een dubbel filter aangebracht maar het grove deel van dit filter ligt NIET bloot (door pipevorming). Wanneer er een normale grofzandbarrière is toegepast of wanneer bij een dubbel filter alleen het fijne deel daarvan blootligt, dan is er sprake van een wezenlijk andere situatie dan bij het faalpad 74 in de vorige paragraaf.

55* Bij omgekeerde stroming (stroming van landzijde naar buitenwater) komt fijn materiaal (achtergrondzand) in de grofzandbarrière – aan de filterregels wordt nog wel voldaan, daarom ontstaat er geen verstopping en vormt dit verder geen risico. Er is dan geen verder risico voor wat betreft de verstopping. Het nazakken van de deklaag (beïnvloedende factor B4) vormt dan nog steeds een risico, zie hiervoor §A.3.4 en §C.3.6.

C.3.21 Pad 76 Verstopping vindt alleen plaats aan alle randen van de barrière

B7 Mechanische, chemische of biologische verstopping

In §A.3.7 is toegelicht dat in de Nederlandse situatie géén verstopping zal optreden bij een grofzandbarrière, mits deze voldoet aan de eisen voor geometrisch dichte filters (zie §6.2). Slechts voor de volledigheid zijn in deze bijlage de meeste (faal)paden geschetst die (theoretisch) bij verstopping zouden kunnen optreden.

95j Alleen barrière verstopt, omgeving niet

De faalpaden met verstopping van de grofzandbarrière zijn ingegeven door de vrees voor de mogelijke gevolgen wanneer dit grove filter verstopt zou raken. Hoewel dit onder de gestelde voorwaarde in de Nederlandse situatie niet mogelijk wordt geacht, is bij elk van de onderscheiden scenario's wel uitgewerkt hoe dit zou uitpakken.

51* Barrière wordt aan de bovenstroomse rand slechtdoorlatend

Door de verstopping wordt de barrière aan de bovenstroomse rand, binnen het grove zand, slechtdoorlatend.

50* Barrière wordt ook aan de onderrand slechtdoorlatend

Het proces van verstopping leidt ook tot een slechte doorlatendheid van de onderrand.

97j Barrière wordt WEL ook benedenstrooms slechtdoorlatend

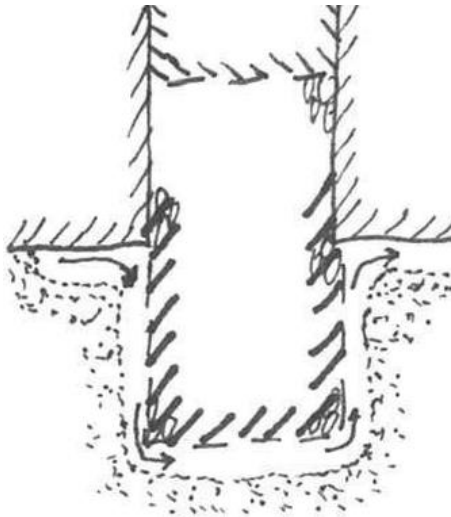
De barrière wordt ook nog aan de benedenstroomse rand slechtdoorlatend. Zie faalpad 65 in §C.3.10 voor als dit niet gebeurt.

70 Barrière werkt als ondoorlatend scherm

De barrière functioneert hierdoor effectief als een (dik) ondoorlatend scherm, niet als een grofzandbarrière met filterwerking.

68 Pipe groeit onder de grofzandbarrière door

De pipe zal onder de grofzandbarrière doorgroeien, waarmee die niet meer is dan een kort en dik heavescherm (zie Figuur 439).



Figuur 439 Onderloopsheid bij verstopping aan de onder- en zijranden van de barrière.

Onderloopsheid

De pipe ontwikkelt zich onder de barrière door, zodat er sprake is van onderloopsheid (zie Figuur 439).

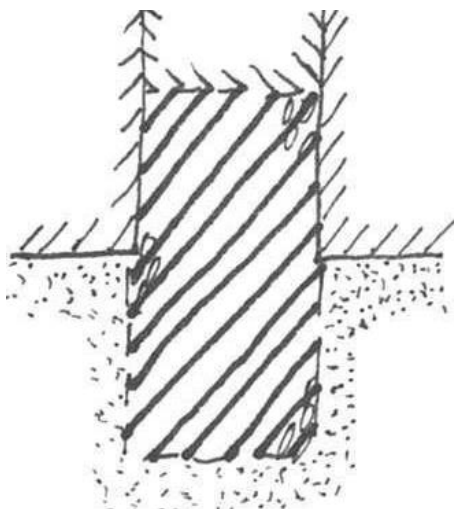
C.3.22 Pad 77 Verstopping vindt alleen plaats in de gehele barrière, drukopbouw bovenstrooms wordt fataal

B7 Mechanische, chemische of biologische verstopping

In §A.3.7 is toegelicht dat in de Nederlandse situatie géén verstopping zal optreden bij een grofzandbarrière, mits deze voldoet aan de eisen voor geometrisch dichte filters (zie §6.2). Slechts voor de volledigheid zijn in deze bijlage de meeste (faal)paden geschetst die (theoretisch) bij verstopping zouden kunnen optreden.

95j Alleen barrière verstopt, omgeving niet

De faalpaden met verstopping van de grofzandbarrière zijn ingegeven door de vrees voor de mogelijke gevolgen wanneer dit grove filter verstopt zou raken. Hoewel dit onder de gestelde voorwaarde in de Nederlandse situatie niet mogelijk wordt geacht, is bij elk van de onderscheiden scenario's wel uitgewerkt hoe dit zou uitpakken.



Figuur 440 Verstopping van de hele barrière, maar niet van de omgeving.

51* Barrière wordt aan de bovenstroomse rand slechtdoorlatend

Door de verstopping wordt de barrière aan de bovenstroomse rand, binnen het grove zand, slechtdoorlatend.

Of de barrière geheel verstoep raakt, zoals hiervoor geschetst in Figuur 440, of alleen aan de bovenstroomse rand, maakt niet uit voor dit faalpad dat tot voorloopsheid leidt.

74 Drukopbouw bovenstrooms van de barrière

Als gevolg van de lage doorlatendheid rondom de barrière, zal zich bovenstrooms van de barrière enige druk opbouwen.

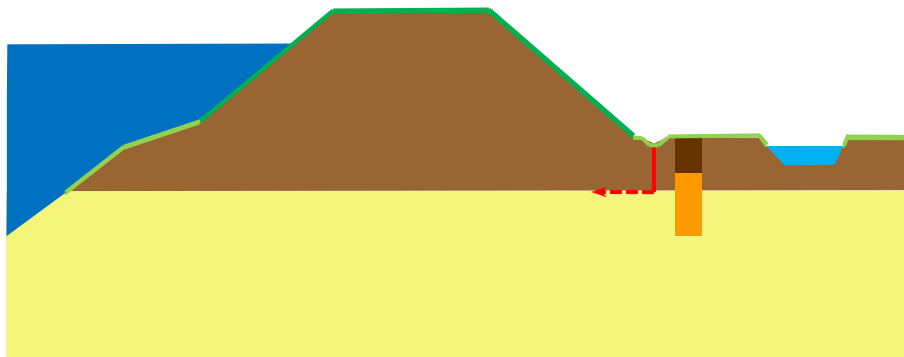
73 Opbarsten en heave bovenstrooms van de barrière

Wanneer er onvoldoende rekening gehouden is met de drukopbouw bovenstrooms van de barrière en de deklaag daar onvoldoende zwaar is, dan kan tussen de barrière en de dijk opbarsten en eventueel heave optreden.

Om te voorkomen dat dit kan gebeuren, zal het gebied tussen de dijk en de grofzandbarrière gecontroleerd moeten worden op de veiligheid tegen opbarsten en heave, rekening houdend met de mogelijke drukopbouw. Zo nodig moet een ophoging of grondverbetering worden toegepast. Mits inpasbaar, kan de grofzandbarrière in het algemeen het beste zo dicht mogelijk bij de dijk worden aangelegd als voor de uitvoering nog werkbaar is.

Voorloopsheid

Het faalmechanisme piping treedt op bovenstrooms van de grofzandbarrière, zodat deze ineffectief is (zie Figuur 441).



Figuur 441 Voorloopsheid.

C.3.23 Pad 78 Verstopping vindt zo massaal plaats dat piping niet meer kan optreden

B7 Mechanische, chemische of biologische verstopping

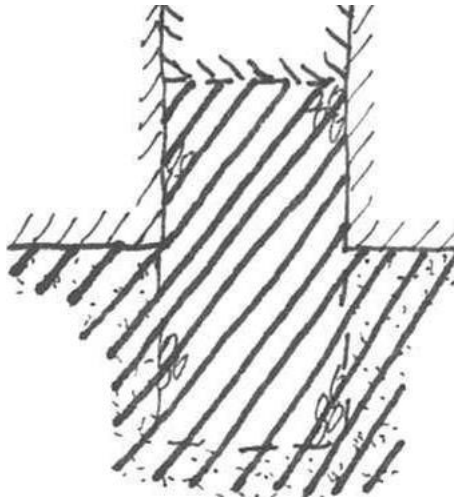
In §A.3.7 is toegelicht dat in de Nederlandse situatie géén verstopping zal optreden bij een grofzandbarrière, mits deze voldoet aan de eisen voor geometrisch dichte filters (zie §6.2). Slechts voor de volledigheid zijn in deze bijlage de meeste (faal)paden geschetst die (theoretisch) bij verstopping zouden kunnen optreden.

95n Niet alleen barrière verstopt, omgeving ook

Behalve het grove zand van de barrière, raakt ook het fijnere achtergrondzand verstopt. Als er al verstopping optreedt, dan is het meest reële scenario dat in elk geval een deel van het fijnere achtergrondzand verstopt en pas daarna ook het grovere zand van de grofzandbarrière. Een uitzondering hierop geldt als de verstopping direct samenhangt met de samenstelling van het zand, bijvoorbeeld door biologische vervuiling. Een dergelijke situatie is echter uiterst onwaarschijnlijk, zo niet onmogelijk.

89 Geen pipingprobleem meer als ook de omgeving verstopt

In dit scenario vindt de verstopping plaats op een dusdanig omvangrijke schaal dat de doorlatendheid te laag wordt om nog zandtransport te kunnen laten optreden, zie Figuur 442. Piping is dan hoe dan ook niet meer aan de orde.



Figuur 442 Algehele verstopping van barrière én achtergrondzand.

D Bepaling 3D-factor

D.1 Inleiding

In de rapportage van de EEM-berekeningen ter ondersteuning van de bepaling van de 3D-factor bij de grofzandbarrière in een concrete situatie (Rosenbrand et al., 2021) is een groot aantal parameters gevarieerd. In deze bijlage wordt voor een drietal locaties bij de pilotlocatie Gameren aangegeven hoe hiermee tot een locatie-specifieke 3D-factor kan worden gekomen, zonder aanvullende berekeningen te hoeven doen.

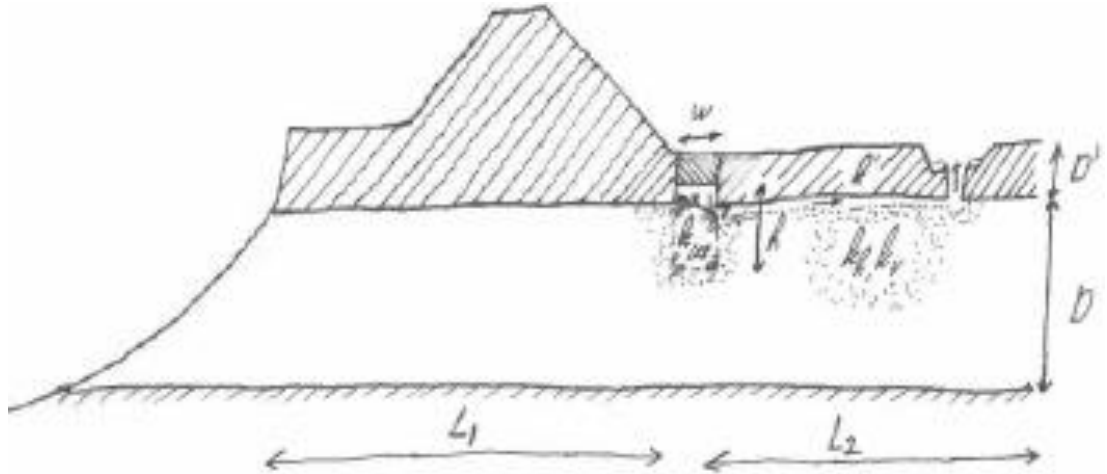
Eerst wordt ingegaan op de invloed die de variatie van verschillende parameters heeft op de 3D-factor. Daarna wordt ingegaan op de situatie van de pilot bij Gameren.

D.2 Invloedsfactoren volgens de verkennende berekeningen

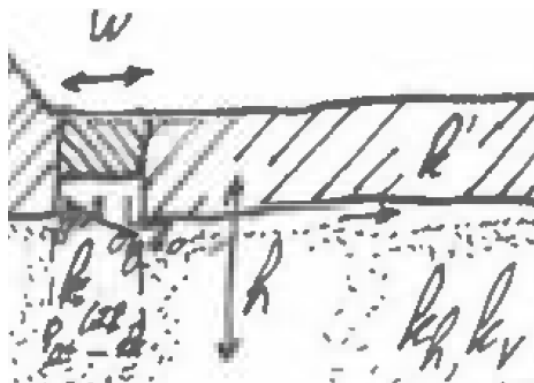
De 3D-factor is gedefinieerd als de verhouding tussen de maximaal optredende gradiënt als gevolg van stromingsconcentratie in een 3D-situatie waarbij de zijdelingse pipegroei vanaf een bepaalde afstand is verhinderd, en de gradiënt waarbij de zijdelingse pipegroei ongehinderd kan plaatsvinden, in symbolen uitgedrukt: $\gamma_{3D} = i_{3D} / i_{2D}$. De piekwaarde in de gradiënt treedt op nabij het uiteinde van de zijdelingse pipe wanneer deze niet verder kan groeien door een obstakel aan de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière. De piek wordt veroorzaakt door de toestroom van water naar de relatief sterk doorlatende barrière toe, ook voorbij het obstakel. Overigens treedt in de berekeningen door de wijze van benaderen met behulp van een eindige-elementennet een extra hoge piek op waarvan de getalswaarde mede afhankelijk is van het gehanteerde elementennet. Er is een praktische werkwijze gehanteerd om daar mee om te gaan.

In Rosenbrand et al. (2021) zijn eerst berekeningen gemaakt voor een situatie met een vlakke barrière, waarbij de gevoeligheid voor verschillende geometrische en geohydrologische parameters is onderzocht. Daarna is voor de situatie met een inkassing onderzocht wat de invloed is van de verschillende wijzen waarop deze kan worden gemodelleerd. Tot slot is een situatie bij de pilotlocatie bij Gameren gemodelleerd. De volledige modellering was door beperkingen in hard- en software niet mogelijk met één model, maar de resultaten uit de verschillende gehanteerde modellen maken het wel mogelijk om voor verschillende situaties een goede schatting te maken van de 3D-factor.

De dwarsdoorsnede met de gebruikte symbolen is hierna herhaald uit §2.2.2.2. Andere relevante parameters, in lengterichting van de dijk, zijn de totale breedte van het (gemodelleerde) watervoerend pakket W en de zijdelingse pipelengte l_z .



Figuur 443 Schematische dwarsdoorsnede van een waterkering met een grofzandbarrière.



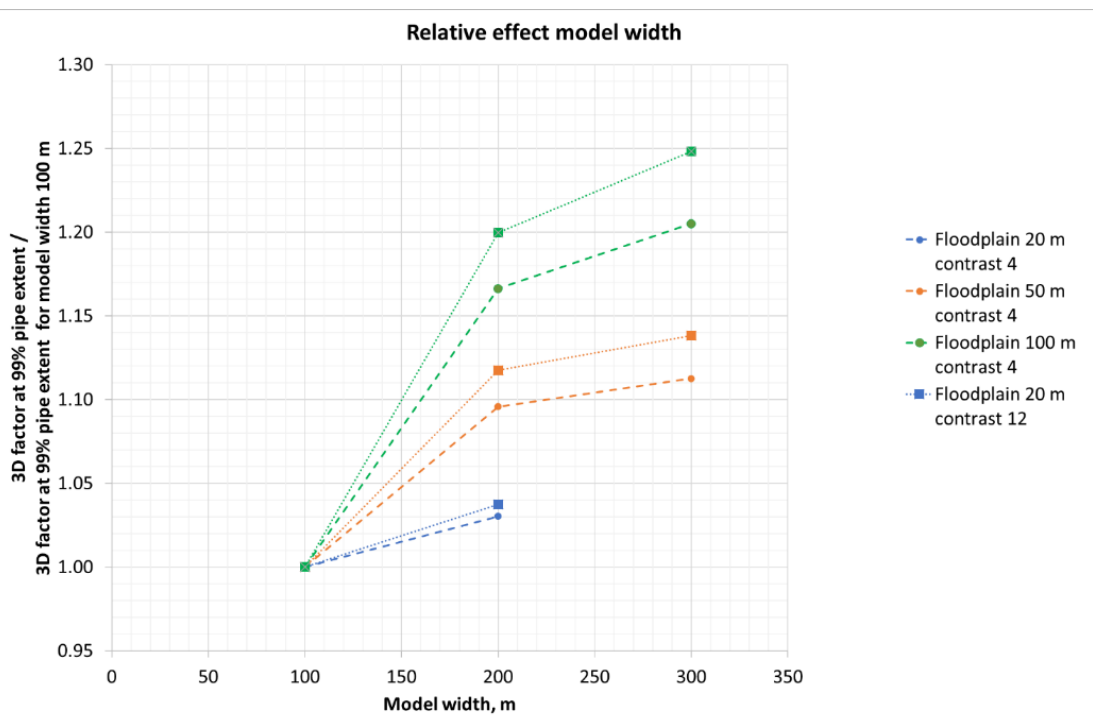
Figuur 444 Detail uit voorgaande figuur, met als symbolen van links naar rechts, van boven naar beneden achtereenvolgens w , k' , k_{GZB} , h , k_h en k_v .

Uit de eerste reeks berekeningen, met een vlakke barrière met een breedte w van 30 cm, is het volgende geconcludeerd:

- 1 De invloed van de diepte van de barrière in de pipinggevoelige zandlaag is verwaarloosbaar (bij een variatie tussen 1 en 2 m geen verschil in uitkomsten).
- 2 De lengte van de zijdelingse pipe l_2 heeft een zeer sterk effect (bij een variatie tussen 1, 5 en 50 m bij een totale breedte W van 100 m, en bij $l_2 = 50$ m en $W = 100, 200$ en 300 m): hoe korter l_2 (dus hoe kleiner gedeelte van de barrière een zijdelingse pipe heeft), hoe groter γ_{3D} (doordat er naar verhouding extra veel water van voorbij het uiteinde van de zijdelingse pipe wordt aangevoerd). Dit is verderop geïllustreerd met berekeningsresultaten in Figuur 448.
- 3 De totale breedte W heeft een niet-verwaarloosbare rol (bij een variatie tussen 100, 200 en 300 m): hoe groter W , hoe groter γ_{3D} . Het verschil is mede afhankelijk van de voorlandlengte L_1 en het doorlatendheidscontrast C en kan in de uitgevoerde berekeningen oplopen tot 25%, zie Figuur 445.
- 4 De dikte van de pipinggevoelige laag D speelt een niet-verwaarloosbare rol (bij een variatie tussen 8, 20 en 40 m): hoe kleiner D , hoe groter γ_{3D} . Het verschil kan in de uitgevoerde berekeningen oplopen tot 29%.
- 5 De lengte van het voorland L_1 speelt een niet-verwaarloosbare rol (bij een variatie tussen 20, 50 en 100 m): hoe groter L_1 , hoe groter γ_{3D} . Bij de uitgevoerde berekeningen varieert dit verschil van ongeveer 20% bij $W = 100$ m tot bijna 40% bij $W = 200$ m, zie ook Figuur 445 direct na deze opsomming.
- 6 De leklengte L_2 heeft een relatief klein, bijna verwaarloosbaar, effect (bij een variatie tussen 50, 130 en 200 m), waarbij geen eenduidig beeld naar voren komt in deze reeks berekeningen.

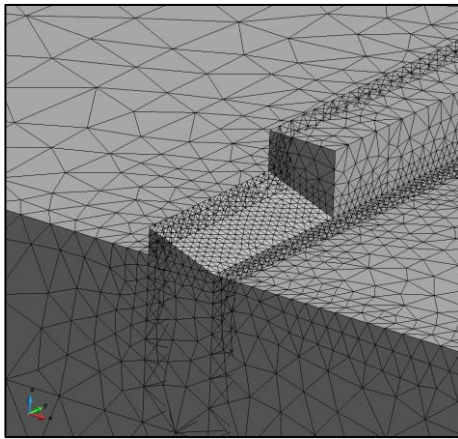
- 7 Het doorlatendheidscontrast $C = k_{GZB} / k_h$ speelt een niet-verwaarloosbare rol (bij een variatie tussen 4 en 12): hoe groter C , hoe groter γ_{3D} , met een variatie die sterk afhankelijk is van de afstand tot de blokkade. Bij Gameren blijkt hoofdzakelijk sprake van een contrast van 9,5 en voor een klein gedeelte een contrast van de helft daarvan: 4,8.
- 8 De anisotropiefactor $A = k_h / k_z$ heeft een merkbare invloed en deze invloed is sterker bij een groter doorlatendheidscontrast (variatie van A tussen 1 en 15 bij een variatie van C tussen 4 en 12): hoe groter A , hoe groter γ_{3D} . Bij $A = 15$ en $C = 4$ kan dit oplopen tot 20% nabij de blokkade en bij $A = 15$ en $C = 12$ tot 30% nabij de blokkade, telkens ten opzichte van de isotrope situatie ($A = 1$).
- 9 Het opnemen van de benedenstroomse pipe in de modellering heeft een beperkt effect: dit verlaagt γ_{3D} met 6-9% ten opzichte van de basissituatie zonder deze pipe.

Hieruit is meer algemeen geconcludeerd dat er niet één 3D-factor kan worden afgeleid die algemeen geldig is. Met de gevonden variaties wordt hierna gepoogd om inschattingen te maken voor afwijkende geometrieën, om zo een reeks 3D-berekeningen voor iedere afwijkende situatie afzonderlijk, te vermijden.

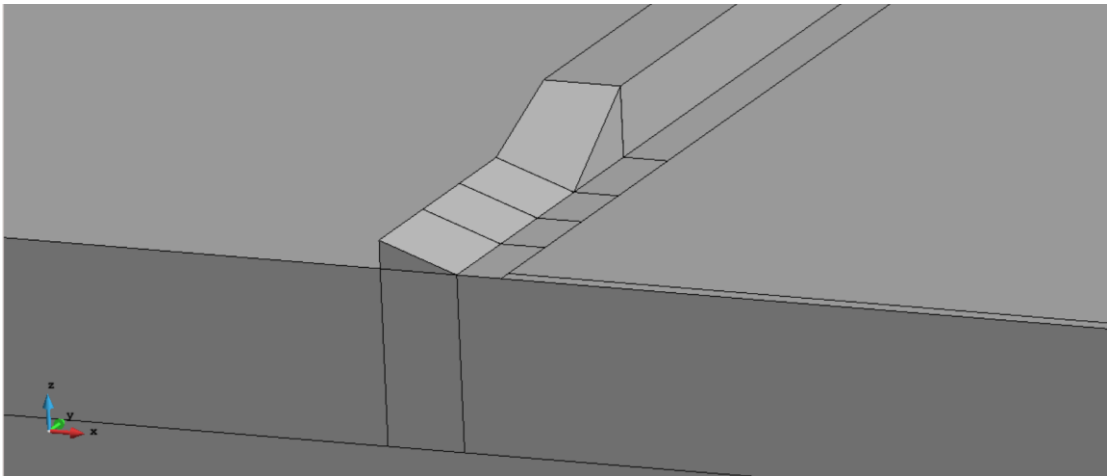


Figuur 445 Invloed van modelbreedte W bij verschillende voorlandlengtes en doorlatendheidscontrasten (overgenomen uit Rosenbrand et al. (2021), bij legenda: 'floodplain' = voorlandlengte L_1 , 'contrast' = C , bij verticale as: keuze voor 99%-waarde lost de problemen met de gevoeligheid van de uitkomsten voor het gebruikte elementennet grotendeels op en is bovendien realistisch, zoals in de tekst hierna wordt toegelicht).

De tweede serie berekeningen is uitgevoerd met een inkassing die 1 m in de deklaag steekt. In deze sommen is een breedte w van 45 cm gehanteerd en een helling in de grofzandbarrière van 20 graden. In de meeste sommen is een verticale rand gemodelleerd op een afstand van l_z tot de symmetrie-as, zoals weergegeven in Figuur 446. In enkele sommen is de meer realistische situatie gemodelleerd zoals getoond in Figuur 447, waarbij de helling in zijwaartse richting eveneens onder een hoek is gemodelleerd. Het voordeel hiervan is dat de gradiënt op de overgang dan niet in theorie naar oneindig gaat, hetgeen zich in eindige-elementen berekeningen vertaalt in een hoge piekwaarde, maar dat een meer realistische waarde wordt gevonden (anderzijds is het creëren van een elementennet met een verticale rand in het zand weer gemakkelijker dan een helling). In deze sommen is ook de zijwaartse helling gemodelleerd onder 20 graden.



Figuur 446 Basisconfiguratie voor de tweede serie berekeningen, met een inkassing en een verticale begrenzing aan het einde van de zijdelingse pipe (overgenomen uit Rosenbrand et al. (2021), linksboven: bovenstrooms, donkere gedeelte: symmetrierand, de grofzandbarrière loopt naar rechts omhoog in de figuur).

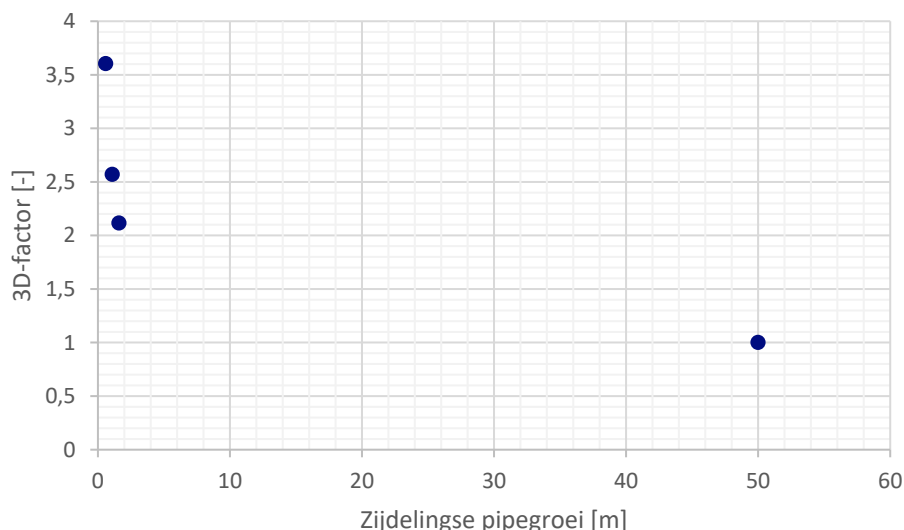


Figuur 447 Aangepaste configuratie met een helling vanaf het einde van de zijdelingse pipe (overgenomen uit Rosenbrand et al., 2021).

Alle berekeningen zijn uitgevoerd met een totale breedte W van 100 m en een doorlatendheidscontrast C van 11,7 met isotroop achtergrondzand ($A = 1$).

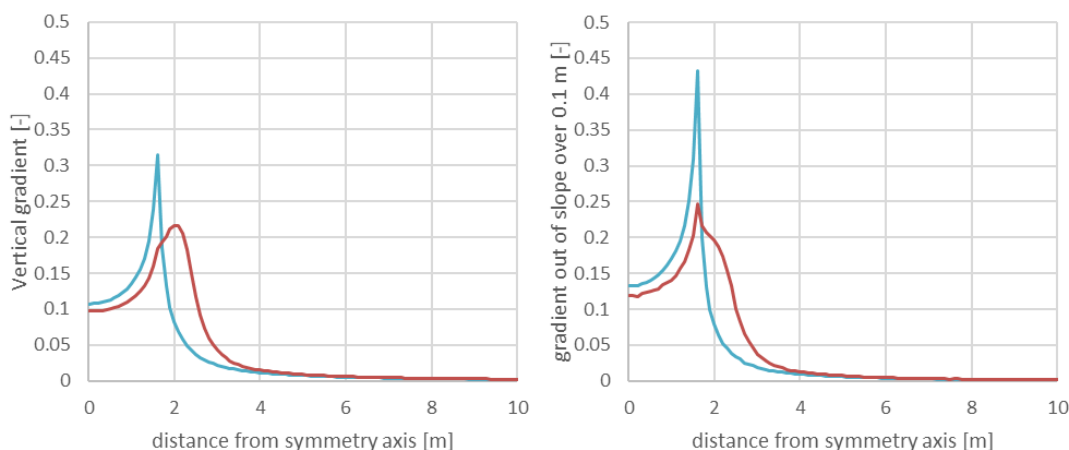
Voor een scenario met $D = 20$ m, $L_1 = 20$ m en $L_2 = 200$ m met een benedenstroomse pipe van eveneens 200 m worden 3D-factoren gevonden van resp. 3,8 bij $l_z = 1,2$ m, van 2,6 bij $l_z = 2,2$ m en van 2,2 bij $l_z = 3,2$ m, telkens bij een verticale begrenzing zoals aangegeven in Figuur 446. Het belangrijkste is wel de snelle afname van de 3D-factor bij een grotere lengte van de zijdelingse pipe. Dit is ook in beeld gebracht in Figuur 448, waarin de horizontale afstand in de gemodelleerde halfruimte²⁰ betreft; deze afstanden moeten verdubbeld worden (zoals in de voorgaande tekst steeds al gedaan is). De voorgaande waarden gelden voor de gradiënten vanuit het midden van de helling, welke doorgaans maatgevend zijn.

²⁰ Door slechts één helft van de symmetrische situatie expliciet te modelleren, kan een fijner elementennet worden gebruikt binnen het gegeven maximale aantal elementen indien de fijnheid van het elementennet een kritische factor vormt. Is dit niet het geval, dan kan nog steeds worden volstaan met de helft van het aantal elementen zonder dat dit ten koste gaat van de resultaten, hetgeen aanzienlijk scheelt in rekentijd. Deze werkwijze is gangbaar mits de te modelleren situatie dit toestaat, maar vergt dan nog wel een omrekening naar de totale ruimte.



Figuur 448 Effect van de zijdelingse pipeontwikkeling op de 3D-factor (overgenomen uit Rosenbrand et al., (2021), de pipegroei heeft betrekking op de berekening in een halfruimte, zie voetnoot 20).

De laatste situatie, dus met $l_z = 3,2$ m, is als enige tevens doorgerekend met een zijwaartse helling, zoals getoond in Figuur 447. De resultaten zijn bij deze meer realistische benadering beduidend gunstiger, zie Figuur 449. Hierin is links de verticale gradiënt langs de bovenstroomse rand van de grofzandbarrière weergegeven en rechts de gradiënt in het midden van de helling, over de eerste tien meter vanaf het midden. De 3D-factor neemt aanzienlijk af ten opzichte van de situatie met een verticale begrenzing aan het einde van de zijdelingse pipe (hiervoor geïllustreerd in Figuur 446 en Figuur 447). Op basis van deze grafieken volgt een reductie met 42% tot $\gamma_{3D} = 1,25$. Voor de verticale gradiënt aan de bovenstroomse zijde, die niet maatgevend is, volgt een reductie met ruim 30%, van 2,1 naar 1,4.



Figuur 449 Berekende gradiënten langs de grofzandbarrière voor een zijdelingse pipelengte van 3,2 m (in de gemodelleerde halfruimte: 1,6 m), links: verticale gradiënt aan de bovenstroomse rand van de barrière, rechts: gradiënt loodrecht op de helling, halverwege de barrière, gemiddeld over een afstand van 10 cm, blauwe lijn: verticale begrenzing bij het einde van de zijdelingse pipe, rode lijn: helling vanaf het einde van de zijdelingse pipe (overgenomen uit Rosenbrand et al., 2021).

Bij deze beide sommen is tevens van belang dat er een zekere verschuiving plaatsvindt tussen de berekende waarden met een zijwaartse helling in vergelijking met een verticale rand. In deze som bedraagt deze verschuiving 0.25 m (in de gemodelleerde halfruimte). In

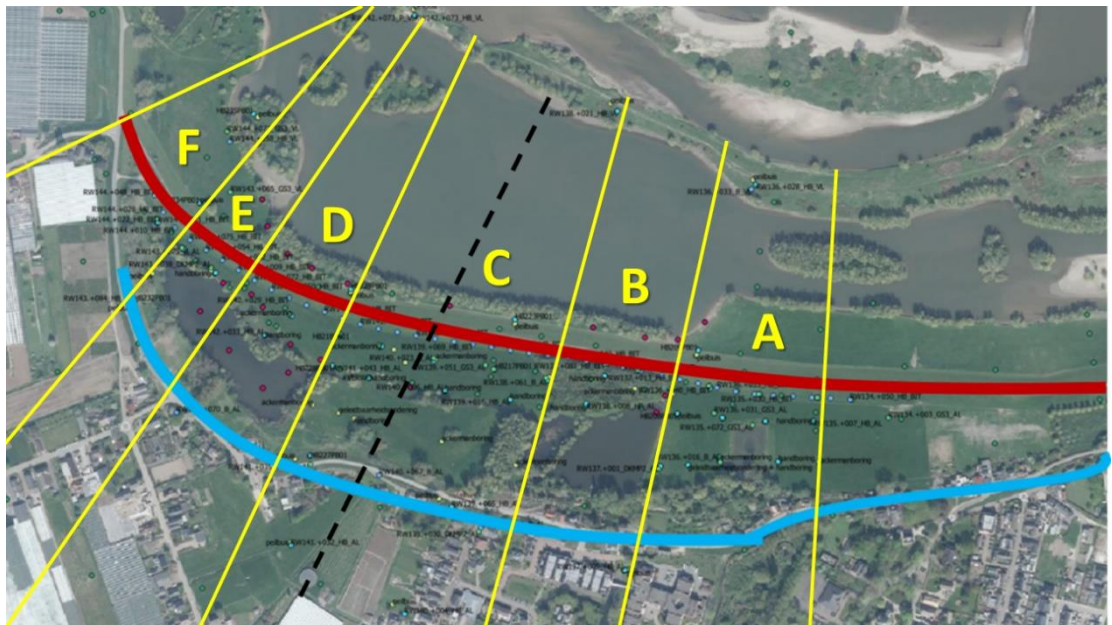
Rosenbrand et al. (2021) wordt betoogd hoe dit gegeven benut kan worden om bij sommen waarvoor alleen met een verticale rand is gerekend, een realistische waarde te verkrijgen (in plaats van een waarde die theoretisch richting het oneindige gaat) door eenzelfde verschuiving toe te passen.

Verder zijn er sommen gedaan met een grotere voorlandlengte, met $L_1 = 120$ m in plaats van 20 m, met een zijwaartse helling en $l_2 = 3,2$ m, en verder dezelfde waarden als voorheen. Dan wordt de 3D-factor een factor 1,6 groter.

Tot slot zijn er nog twee sets sommen gemaakt met $L_1 = 120$ m, $L_2 = 110$ m, $l_2 = 3,2$ m en een benedenstroomse pipe van 25 m lengte. Bij de ene set is $D = 40$ m gehanteerd, met als uitkomst een ruim 10% lagere factor dan bij de basissituatie met $D = 20$ m, en bij de andere set $D = 8$ m (i.p.v. $D = 20$ m), met als uitkomst een bijna 40% hogere factor dan bij de basissituatie. Tussen 40 m en 8 m zit een factor 1,59. Dit staat overigens sterk in contrast met de waarden die in de eerste serie berekeningen zijn gevonden voor $l_2 = 50$ m bij $W = 100$ m en met $C = 4$, met een factor 1,18 tot 1,23; resp. met $C = 8$, met een factor 1,24 tot 1,29.

D.3 3D-factoren voor Gameren

Tot slot zijn in Rosenbrand et al. (2021) berekeningen gerapporteerd voor een specifiek gedeelte in Gameren. Dit betreft vak C in Figuur 450. Voor de 3D-factor is dit het meest ongunstige vak, vanwege de aanwezigheid van de gedempte zandwinput buitendijks (geohydrologisch levert dit een relatief grote voorlandlengte L_1 op) en de afwezigheid van een kleiput (wat een relatief grote lek lengte L_2 oplevert (circa 240 m volgens Rosenbrand et al., 2021), al wordt het achterland hier wel doorsneden door een betrekkelijk brede sloot die tot aan de pipinggevoelige zandlaag steekt, hetgeen in Rosenbrand et al. (2021) genegeerd is om een te grote complexiteit te vermijden). Dat dit vak de meest ongunstige 3D-factor zal kennen bij verder gelijke waarden voor onder andere D , C , A en W , betekent niet dat hier ook vanzelfsprekend de meest ongunstige overall-uitkomst zal worden verkregen, juist vanwege die andere parameters.



Figuur 450 Satellietfoto van de dijken bij Gameren met een indeling in zes vakken met verschillende geohydrologische eigenschappen.

De grenzen zijn als volgt getrokken: vak A loopt tot RW 137+000, vak B tot RW 138+070, vak C tot RW 141+060, vak D tot RW 142+080 en vak E tot RW 143+090.

Gerekend is met verschillende geometrieën rondom de zwarte onderbroken lijn in Figuur 450, om tot voldoende nauwkeurigheid te komen en tegelijkertijd ook de invloed van het achterland goed gerepresenteerd te krijgen. Er is gerekend met een verticale begrenzing aan het einde van de zijdelingse pipe, waarvoor de uitkomsten naderhand gecorrigeerd worden. De meest relevante berekening is uiteindelijk uitgevoerd met het model “Small Short Deklaag Var”, waarbij met een wat grotere doorlatendheid van de deklaag rekening is gehouden. In grote lijnen levert dit compensatie voor de aanwezigheid van de eerdergenoemde sloot die beide kleiputten met elkaar verbindt, uitgaande van de conservatieve schatting voor de doorlatendheid van de deklaag²¹. Voor deze berekening gelden als parameterwaarden $L_1 = 200$ m (effect zandwininput), $L_2 = 60$ m (ruwweg ter plaatse van de sloot), $W = 300$ m, $l_z = 10$ m, $w = 1$ m, $d = 1$ m, $D = 41.2$ m, $C = 9.5$ en $A = 5$.

Rekening houdend met de verschuiving over 0,25 m in verband met de correctie voor de verticale wand en de modellering als halfruimte, mag de uitkomst op 95% vanaf de symmetrieas worden genomen. Volgens de onderste tabel (ongenummerd) op pagina 75 in Rosenbrand et al. (2021), hier herhaald als Tabel 10 en gebaseerd op de waarden vermeld in tabel 4.7 in Rosenbrand et al. (2021), geldt dan een 3D-factor van 4,7 bij $l_z = 10$ m, dus een onderlinge afstand tussen obstakels van 10 m.

Tabel 10 3D-factoren voor vak C bij Gameren, uitgaande van een ononderbroken deklaag met twee varianten voor de doorlatendheid daarvan (tabel onvertaald overgenomen van p.75 in Rosenbrand et al. (2021)).

Model name	Ratio 3D/2D gradient (at % of distance from centre axis)			Ratio 3D/2D gradient (average between specified ranges of distance from centre axis)		
	99%	95%	90%	95-99%	90-99%	90-95%
Small Short	8.6	6.5	5.3	7.3	6.5	5.9
Small Short Deklaag Var	6.3	4.7	3.9	5.4	4.8	4.3

Op basis van Hijma (2020) wordt het scenario dat de afstand tussen obstakels slechts 10 meter bedraagt aangeduid als tamelijk onwaarschijnlijk. Een onderlinge afstand van 50 m wordt als meest waarschijnlijk aangeduid (tabel 5.8 in Rosenbrand et al. (2021), hierna vertaald opgenomen als Tabel 12). Er mag hier worden uitgegaan van het meest waarschijnlijke scenario, hetgeen betekent dat er nog een omrekening moet plaatsvinden naar een scenario waarvoor geen specifieke sommen zijn uitgevoerd (gelet op de aandacht die in Rosenbrand et al. (2021) is besteed aan adequate verfijning van het elementennet, ondanks de beperkingen aan hard- en software, is het ontbreken van aanvullende sommen overigens niet onlogisch). Daarna vindt nog een omrekening plaats naar andere delen binnen Gameren.

²¹ Indien de grotere doorlatendheid van de deklaag meer aansluit bij de werkelijkheid, dan vallen de berekende waarden voor de 3D-factor gunstiger uit.

Tabel 11 Scenario's voor mogelijke afstanden waarover de zijdelingse pipeontwikkeling plaatsvindt (tabel 5.8 uit Rosenbrand et al. (2021)).

Totale lengte van de zijdelingse pipeontwikkeling	Waarschijnlijkheid en uitleg
5 m	Een ontwikkeling tot [slechts] 5 m lijkt onwaarschijnlijk , dit zou betekenen dat er op korte onderlinge afstand twee vrij abrupte heterogeniteiten aanwezig zijn die allebei het proces van zijdelingse pipeontwikkeling tot staan brengen.
10 m	Wat meer waarschijnlijk
50 m	Meest waarschijnlijk
Onbeperkt over de gehele lengte van de grofzandbarrière	Minder waarschijnlijk , het is vrij waarschijnlijk dat de heterogeniteiten op enig punt de pipegroei beperken.

In de discussie in hoofdstuk 5 van Rosenbrand et al. (2021) wordt beargumenteerd dat de resultaten voor een zijdelingse pipegroei van 10 m met een factor 0,4 tot 0,7 mogen worden vermenigvuldigd om op de 3D-factor voor een zijdelingse pipegroei van 50 m te komen. Voor de correctie op de modellering van het uiteinde van de zijdelingse pipe (schuin in plaats van verticaal) geldt echter dat bij een 5 maal grotere lengte niet langer kan worden uitgegaan van de berekende 3D-factor bij 95% van de pipelengte, maar dat van de 99%-waarde moet worden uitgegaan. Deze bedraagt niet 4,7 maar 6,3, zoals af te lezen is in Tabel 10. Tot slot wordt aangegeven dat er een reductie van 6% mag worden toegepast vanwege de invloed van de beperkte afvoercapaciteit van de benedenstroomse pipe (waarvan de locatie langs die 50 m overigens niet uitmaakt, vanwege het grote doorstroomoppervlak van de zijdelingse pipe). Daarmee geldt in vak C een range van 2,4²² tot 4,1²³ voor de 3D-factor op basis van Rosenbrand et al. (2021).

Bij het voorgaande is nog geen rekening gehouden met de fysieke betekenis van deze stromingsconcentratiefactor, waar de 3D-factor op neerkomt. In de uitgevoerde berekeningen is erosie niet opgenomen, terwijl dit in de praktijk wel zal optreden – bij uitstek in het gedeelte waar de sterkste concentratie van stroming optreedt, op voorwaarde dat deze erosie wel kán optreden en niet gehinderd wordt door een obstakel.

De 3D-factor ontstaat bij een obstakel waar de zijdelingse pipe aan de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière niet voorbij kan groeien. In afzonderlijke stappen is het gehele proces als volgt te beschrijven:

1. Benedenstrooms van de grofzandbarrière ontstaat een pipe die tot aan de grofzandbarrière groeit (zie bijvoorbeeld Figuur 2 in §1.2 of Figuur 25 in §5.3).
2. Bij de barrière aangekomen, treedt eerst transport op van het fijne materiaal van het achtergrondzand direct benedenstrooms van de barrière. Dit is het begin van de zijdelingse pipegroei, in beide richtingen evenwijdig aan de dijk (zie Figuur 3 in §1.2 of Figuur 28 en Figuur 29 in §5.3).
3. De zijdelingse pipegroei zet zich verder voort in zijwaartse richting, direct benedenstrooms van de barrière (zie bijvoorbeeld Figuur 30 in §5.3) – dit proces loopt in iedere dwarsdoorsnede steeds vóór op de direct hierna beschreven stap, totdat dit proces stopt vanwege een obstakel.
4. Binnen een dwarsdoorsnede zal het bovenste deel van de inkassing 'leeglopen', eerst daar waar de benedenstroomse pipe is aangekomen en daarna in de naburige dwarsdoorsneden en vervolgens steeds verder, in navolging van de zijdelingse pipegroei.

²² Namelijk 6,3 maal de genoemde ondergrens van 0,4 voor een zijdelingse pipelengte van 50 m maal 0,94 voor de 6% reductie vanwege de benedenstroomse pipe.

²³ Evenzo voor de genoemde bovengrens: $6,3 * 0,7 * 0,94$.

Dit proces begint met de eerste korrel uit de grofzandbarrière (zie Figuur 26 in §5.3), gevolgd door de volgende korrel (zie Figuur 27 in §5.3) en mits het verval over de kering lang genoeg voldoende groot is, vervolgens leiden tot de situatie waarbij het grove zand in de inkassing onder de hoek van inwendige wrijving staat (zie Figuur 4 in §1.2 of Figuur 31 in §5.3). De kritieke situatie is dan nog lang niet bereikt.

5. Bij een verdere toename van het verval is een hellingshoek van 20 graden binnen een dwarsdoorsnede, zoals algemeen aangenomen in de 3D-berekeningen gerapporteerd in Rosenbrand et al. (2021), een reële mogelijkheid. Ook de hoek van 20 graden in lengterichting van de barrière, zoals weergegeven in Figuur 447 in de vorige paragraaf van deze bijlage vormt een realistische tussenfase bij het bereiken van een obstakel in de ondergrond dat verdere groei van de zijdelingse pipe belemmert.
6. De 3D-factor drukt uit in hoeverre er sprake is van een stromingsconcentratie, met name bij een obstakel. De maatgevende situatie is daarbij **niet** de situatie met hellingen van 20 graden, maar die met de kritieke hellingshoek (zie Figuur 5 in § of Figuur 32 in §5.3), die bij het GZB3-mengsel als barrièrezand 10 graden bedraagt. De richting maakt daarbij verder niet uit. Dat betreft dus een 2x zo flauwe helling dan aangegeven in Figuur 447. Dit heeft de volgende consequenties:
 - a. De correctie voor de verticale wand en de modellering als halfruimte wordt hiermee in absolute afstand 2x zo ruim. Er mag dan over 0,50 m worden verschoven in plaats van over 0,25 m. Of, anders gesteld, bij een zijdelingse pipegroei over in totaal 50 m moet niet de waarde bij 99% moet worden genomen, maar mag de waarde bij 98% worden genomen (en bij een zijdelingse pipegroei over 10 m, de waarde bij 90%). Vanwege het sterk niet-lineaire verloop van de 3D-factoren, zoals getoond in Figuur 449 en zoals ook te zien is aan het verloop van de waarden in Tabel 12, kan hier worden gekozen voor het midden van de waarden bij 99% en 95%: een range van 2,1 tot 3,6²⁴.
 - b. De uitslijting en verflauwing tot de kritieke hellingshoek vindt alleen lokaal, nabij het obstakel, plaats. Immers, elders doet deze stromingsconcentratie zich niet voor, *ook niet tijdens de ontstaansgeschiedenis, dus ook niet tijdens het passeren van het 'front' van de zijdelingse pipe of het proces waarbij de helling binnen de inkassing zich instelt onder de hoek van inwendige wrijving en daarna verder versteilt*. Dit betekent dat het optredende debiet het debiet bedraagt dat bij het niet-uitgesleten gedeelte behoort. In het lokaal uitgesleten gedeelte zal het debiet even groot zijn, hetgeen daar vanwege de grotere open doorsnede tot een minder sterke stroming leidt dan wanneer deze uitslijting niet zou hebben plaatsgevonden. Dit leidt weer tot een reductie van de reëel toe te passen 3D-factor.

Het is sterk de vraag of met name dit laatste momenteel wel op betrouwbare wijze kan worden gemodelleerd, gegeven het feit dat voor de reeds uitgevoerde 'eenvoudiger' 3D-berekeningen al meerdere verschillende berekeningen met uiteenlopende elementennetten nodig waren om tot een resultaat te komen. De invloed hiervan wordt als significant ingeschat en daarom wordt gekozen voor een 3D-factor aan de lage kant van de op basis van Rosenbrand et al. (2021) bepaalde range van 2,4 tot 4,1, dus $\gamma_{3D} = 2,4$ voor vak C.

Op basis van Koelwijn et al. (2021) worden de overall meer kritische doorsneden elders in het gebied verwacht, namelijk rond RW 136+050, RW 138+050 en RW 143+050. Daar gelden andere waarden voor de dikte van de pipinggevoelige zandlaag D (door de aanwezigheid van een scheiding makende veenlaag), ten dele een kortere voorlandlengte L_1 , een smallere effectieve breedte W waar geen of amper instroming vanuit de voormalige zandwinput hoeft te worden verwacht en een lager doorlatendheidscontrast C . De

²⁴ Het gemiddelde van 6,3 en 4,7 uit Tabel 12 bedraagt 5,5. Vermenigvuldigd met 0,4 en 0,94 (zie voetnoot 22) levert dit een waarde van 2,1 en vermenigvuldigd met 0,7 en 0,94 (zie voetnoot 23) levert dit een waarde van 3,6.

omrekening is voor elk onderdeel aangegeven in Tabel 12. Deze tabel sluit in de laatste kolom af met de 3D-factor γ_{3D} zoals die voor elk profiel geldt.

Tabel 12 Bepaling van 3D-factor voor enkele andere vakken, gebaseerd op de waarde van 2.4 voor vak C.

Profiel RW ...	Vak	Laagdikte D	Voorland-lengte L_1	Model-breedte W	Doorlatendheids-contrast C	correctie-factor	3D-factor γ_{3D}
140+050 (basis)	C	41.2 m → 1	200 m → 1	300 m → 1	9.5 → 1	1	2.4
136+050	A	8.0 m → 1.18	94 m → 0.85	200 m → 0.95	9.5 → 1	0.95	2.3
138+050	B	6.0 m → 1.30	200 m → 1	300 m → 1	9.5 → 1	1.30	3.1
143+050	E	6.3 m → 1.28	76 m → 0.80	200 m → 0.95	4.8 → 0.86	0.84	2.0

De bepaling van de correctiefactor voor D is gebaseerd op tabellen 2.9 en 2.10 uit Rosenbrand et al. (2021), voor L_1 op tabel 2.6 in datzelfde rapport, voor W op tabellen 2.5 en 2.6 en voor C op tabel 2.11.

E Definitief Ontwerp en aanvullende berekeningen

E.1 Inleiding

In deze bijlage staat in §E.3 het Definitief Ontwerp beschreven, inclusief de bijbehorende berekeningen voor enkele dwarsdoorsneden. Daarvoor wordt eerst het Voorlopig Ontwerp beschreven, inclusief de keuze van maatgevende doorsneden zoals gemaakt op inmiddels, door de laatste laboratoriumproeven, achterhaalde inzichten. Het Definitief Ontwerp is doorgerekend op basis van de laatste inzichten.

E.2 Berekeningen maatgevende doorsneden op basis van oude inzichten

E.2.1 Verkennende berekeningen

Voor de grofzandbarrière bij Gameren was het aanvankelijk de bedoeling om deze dijkversterking met een lengte van circa 1 km met een drietal representatieve dwarsdoorsneden door te rekenen. Al snel bleek dit een te optimistische gedachte, zowel vanwege het gebrek aan ervaring met het rekenen aan een grofzandbarrière als vanwege de complexe geohydrologische situatie (met verschillende kleiputten binnendijks, een grotendeels gedempte zandwinput buitendijks en een tamelijk gevarieerde laagopbouw). Daarom is in de loop van het onderzoek voor elke sectie van 100 m een representatieve grondopbouw en geometrie bepaald en telkens zo nodig bijgesteld op basis van aanvullende grondonderzoekresultaten en andere veldwaarnemingen, zoals beschreven in Koelewijn et al. (2021).

Voor elke sectie zijn verkennende berekeningen uitgevoerd, zowel voor een grofzandbarrière die vlak aansluit op de bovenliggende deklaag, als voor een grofzandbarrière met een inkassing in die deklaag, eveneens beschreven in Koelewijn et al. (2021). Die rapportage sluit af met de navolgende tabel, gevolgd door enkele kanttekeningen.

Tabel 13 Maatgevende gradiënten voor een grofzandbarrière met inkassing.

Profiel RW...+050	locatie	loodrecht op helling barrierezand	verticaal
134	B	0.21	0.16
135	B	0.12	0.10
136	O	0.16	0.17
137	O	0.13	0.13
138	O	0.16	0.17
139	O	0.09	0.09
140	B	0.21	0.16
141	B	0.13	0.10
142	B	0.09	0.07
143	B	0.13	0.10

Deze berekende gradiënten gelden voor een grofzandbarrière met een inkassing van 45 cm diepte en een hellingshoek β van 10 graden, bij een doorlatendheid van de grofzandbarrière van 175 m/dag en een doorlatendheid van het achtergrondzand van 15 m/dag, waarbij het achtergrondzand als isotroop is aangenomen. Verder is gecorrigeerd voor de minimaal te verwachten weerstand in de benedenstroomse pipe.

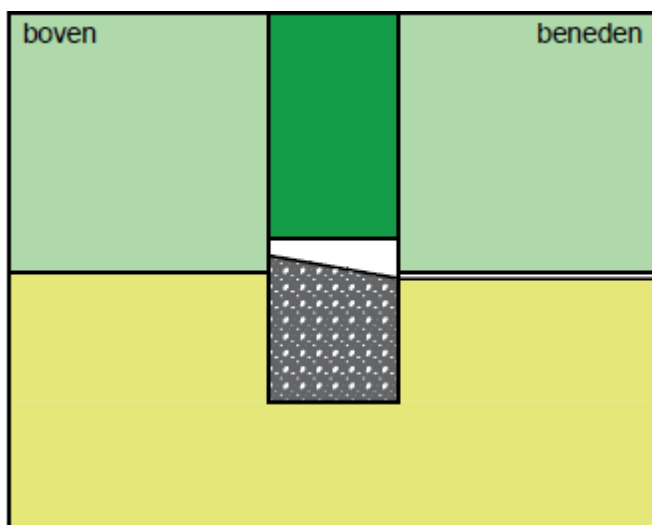
Op basis van deze berekeningsresultaten is medio 2020 bepaald voor welke drie dwarsdoorsneden de berekeningen zouden worden gemaakt ter afsluiting van het Voorlopig Ontwerp. Er is gekozen voor:

- Profiel RW136+050.
- Profiel RW138+050, samen met het voornoemde profiel worden hiervoor de hoogste waarden voor de verticale gradiënt gevonden.
- Profiel RW143+050, waarvoor op basis van het HPT-AMPT-onderzoek is bepaald dat de doorlatendheid van het achtergrondzand met 64 m/dag daar tweemaal zo hoog is als voor de overige profielen, zoals onderbouwd in Rosenbrand & Koelewijn (2020a).

Destijds werd nog gedacht dat de verticale gradiënt aan de bovenstroomse zijde van de grofzandbarrière uiteindelijk bepalend zou zijn voor falen, terwijl aan de gradiënt loodrecht op de helling een ondergeschikte rol werd toegekend. Op basis van drie daarna uitgevoerde laboratoriumproeven op medium schaal, met een grofzandbarrière met inkassing, is enige tijd later geconcludeerd dat de gradiënt loodrecht op de helling juist maatgevend is (Förster, 2021a). De berekeningen waren toen reeds uitgevoerd. De resultaten zijn ten dele echter wel bruikbaar om op voort te bouwen, daarom zijn de resultaten hier wel opgenomen.

E.2.2 Uitgangspunten voor berekeningen

Voor de berekeningen is uitgegaan van het minimaal aanwezige profiel bij uitvoering met een open sleuf. Deze uitvoeringsmethode kent een interne breedte w van 1,0 m, maar vanwege maattoleranties en randeffecten bij het verwijderen van de bekisting wordt in de berekeningen veiligheidshalve uitgegaan van een effectieve breedte van 95 cm waarover een betrouwbaar aangelegde grofzandbarrière minimaal aanwezig zal zijn. Voor de berekeningen is verder uitgegaan van een hellingshoek van 10 graden, een inkassing van 50 cm hoogte en een diepte van de grofzandbarrière onder de overgang deklaag/zandlaag van 100 cm. Het gemiddeld te verwachten profiel, bij het optreden van de kritieke situatie, is op schaal weergegeven in Figuur 451.



Figuur 451 Dwarsdoorsnede van het Voorlopig Ontwerp voor de grofzandbarrière – maatgevende situatie bij gelijk scheidingsniveau deklaag/zandlaag aan boven- en benedenstroomse zijde (geel: zandlaag, lichtgroen: deklaag, donkergroen: sleufaanvulling, grijs: barrièremateriaal, wit: deels leeggestroomde inkassing en benedenstroomse pipe).

Deze situatie is ingepast in de schematiseringen van de in de vorige paragraaf genoemde profielen (beschreven in Koelewijn et al. (2021)) en doorgerekend met de tweedimensionale versie van het grondwaterstromingsmodelleringspakket DG Flow. Daarbij is voor de doorlatendheid van het achtergrondzand naar gelang het profiel een isotrope waarde van 32 of 64 m/dag toegepast en voor de grofzandbarrière een waarde van 304 m/dag, gebaseerd op de formule vermeld in tabel 2.2 van Förster (2021a), een relatieve dichtheid van 90% en omgerekend naar een bodemtemperatuur van 10 graden Celsius.

Het verval over de kering is verwerkt door aan de buitendijkse rand een stijghoogte van NAP + 9.00 m op te leggen en aan de binnendijkse rand een stijghoogte van NAP +1.80 m, overeenkomend met het polderpeil, op te leggen. Bovendien is dit polderpeil in de berekeningen ook opgelegd als stijghoogte bij het begin van de benedenstroomse pipe, ter plaatse van de aansluiting op de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière. De benedenstroomse pipe zelf is niet expliciet gemodelleerd.

E.2.3 Resultaten van berekeningen

De berekende gemiddelde gradiënt $i_{calc,d}$ over de middelste 20 cm van de kritieke helling op basis van de uitstroomsnelheden bedraagt:

- Voor profiel RW136+050: 0,100.
- Voor profiel RW138+050: 0,100.
- Voor profiel RW143+050: 0,117.

E.2.4 Toepassing van partiële veiligheidsfactoren

Zoals uiteengezet in hoofdstuk 2, gelden er diverse partiële veiligheidsfactoren. De volledige formule voor de berekening van de rekenwaarde van de kritieke gradiënt, gecombineerd uit vergelijkingen (2.5), (2.6) en de correctiefactor voor het gebruikte barrièrezand en de toegepaste relatieve dichtheid zoals genoemd in §2.2.2.1 luidt:

$$i_{crit,d} = i_{crit,rep} * (i_{crit,zand} / i_{crit,zand,ref}) / (\gamma_{3D} * \gamma_m * \gamma_b * \gamma_n) \quad (E.2.1)$$

Ingevuld met de waarde voor $i_{crit,rep}$ uit §2.2.2.1, de verder onafgeronde waarden voor $i_{crit,zand}$ en $i_{crit,zand,ref}$ uit Tabel 9 in §C.2.4, de waarden voor γ_{3D} uit §2.3.2.1 (of Tabel 12 in §D.3), de waarde voor γ_m uit §2.2.2.1, de waarde voor γ_b uit §2.3.2.2 en de waarde voor γ_n uit §2.3.2.3, levert dit:

- Voor profiel RW136+050 $i_{crit,d} = 0.55 * (1.037 / 1.044) / (2,3 * 1,0 * 1,1 * 1,60) = 0,135$.
- Voor profiel RW138+050 $i_{crit,d} = 0.55 * (1.037 / 1.044) / (3,1 * 1,0 * 1,1 * 1,60) = 0,100$.
- Voor profiel RW143+050 $i_{crit,d} = 0.55 * (1.037 / 1.044) / (2,0 * 1,0 * 1,1 * 1,60) = 0,155$.

Hierbij wordt opgemerkt dat de waarden voor γ_{3D} zijn bepaald op basis van een anisotropiefactor $A = 5$, terwijl hier isotrop is gerekend. Bovengenoemde uitkomsten zijn daarom aan de conservatieve kant.

E.2.5 Conclusie ten aanzien van het Voorlopig Ontwerp

Het criterium zoals gegeven door vergelijking (2.4) in §2.1.2 luidt:

$$i_{calc,d} < i_{crit,d} \quad (E.2.2)$$

Voor de profielen RW136+050 en RW143+050 wordt voor het primaire faalpad voldaan met een marge van respectievelijk 35% en 32%. Voor het profiel RW138+050 zijn beide waarden echter gelijk. Voor dat profiel is er dus geen enkele reserve voor de overige faalmechanismen, afgezien van de marges door conservatieve aannames zoals benoemd in bijlage F, maar daar tegenover staan niet alleen onzekerheden ten aanzien van de juiste waarde van verwachtingswaarden (voor zover die zijn gehanteerd), maar ook factoren waarvan onbekend is in hoeverre die conservatief of optimistisch zijn ingeschat.

Wel geldt dat er enige reserve benut zou kunnen worden in de berekeningen, zoals bijvoorbeeld met de (an)isotropie mogelijk is. Ook kan aanvullende veiligheid worden ingebouwd door het toepassen van een betrouwbare bovenstroomse afdichting ('een kleimuurtje'). Dit is gedaan ten behoeve van het Definitief Ontwerp.

E.3 Definitief Ontwerp

E.3.1 Aanvullend grondonderzoek

In de loop van het voorjaar van 2021 ontstond er behoefte aan een gedetailleerder inzicht in de grondopbouw specifiek in het tracé van de grofzandbarrière en korrelverdelingen in de bovenste meter van de pipinggevoelige zandlaag. Het eerdere grondonderzoek, grotendeels beschreven door Stellema (2019), stak voor een gedeelte niet diep genoeg of bevond zich tot op 15 meter afstand van het tracé van de grofzandbarrière. In Figuur 452 is een bovenaanzicht gegeven met het tracé van de grofzandbarrière en de locaties van de daarbij uitgevoerde sonderingen. In Figuur 453 en Figuur 454 is het lengteprofiel van west naar oost weergegeven met een onderscheid naar klei- en zandlagen. Voor het niveau van de grenslaag waarop de grofzandbarrière aangelegd wordt, is uitgegaan van de onderkant van de onderste van de twee min of meer doorlopende kleilaag in het profiel. Waar deze niet doorlopen, is in verband met de gewenste continuïteit van de grofzandbarrière een overbruggingsmaatregel getroffen, waarvoor ook bij de berekening van de opbarstveiligheid mee rekening is gehouden. Nadere details daarover zijn te vinden in hoofdstuk 3 van Koelewijn (2021).



Figuur 452 Bovenaanzicht met indicatie van dijkpalen, tracé grofzandbarrière (doorgetrokken rode lijn) en uitgevoerde sonderingen nabij en in het tracé van de grofzandbarrière (rode driehoeken), met het noorden naar rechts (Geurtjens, 2021).

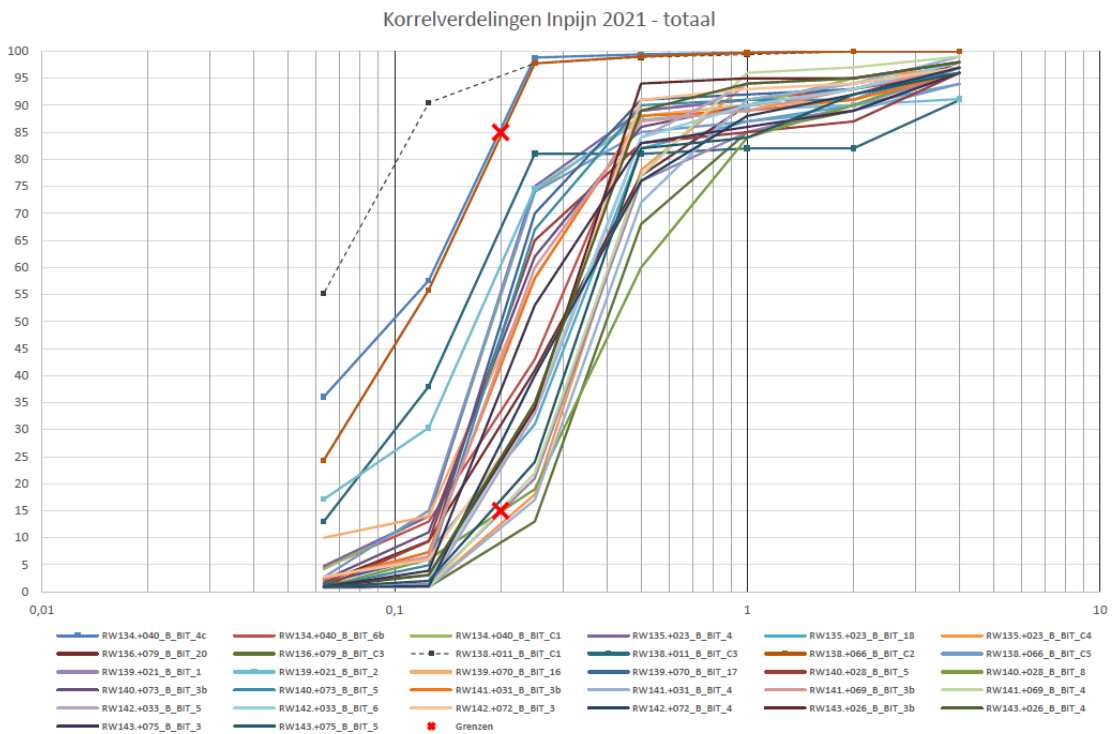


Figuur 453 Lengteprofiel met sonderingen en onderscheid naar klei- en zandlagen (resp. groen en geel), van RW145+000 tot RW142+058, van RW142+058 tot RW140+050 en van RW140+050 tot RW139+015 (Geurtjens, 2021).

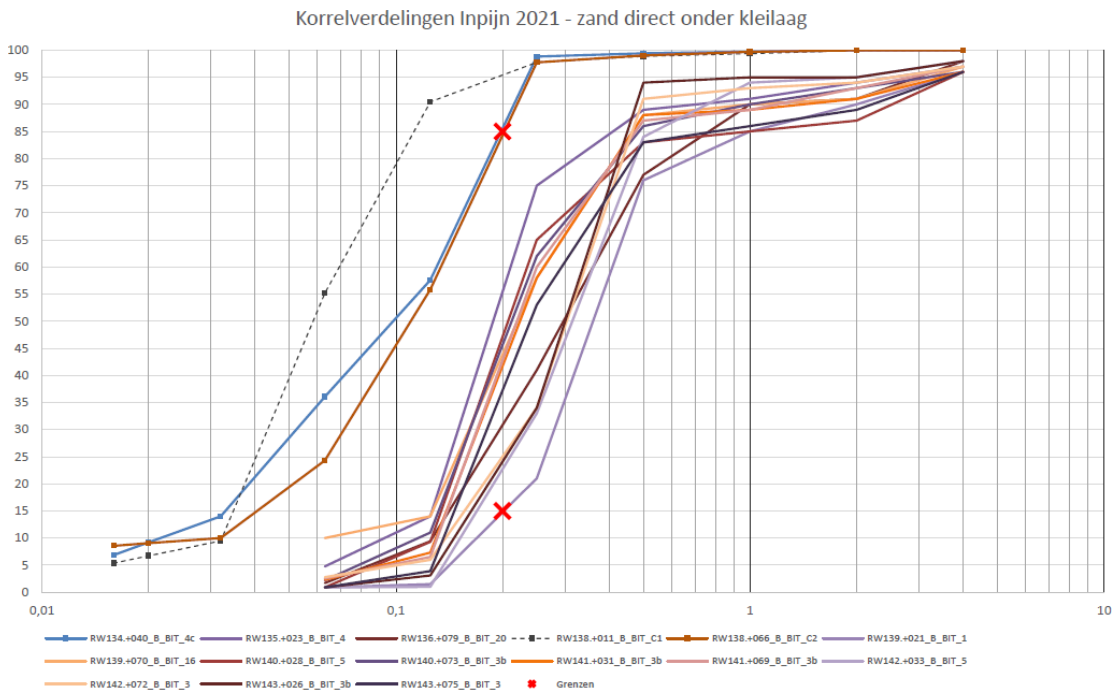


Figuur 454 Lengteprofiel met sonderingen en onderscheid naar klei- en zandlagen (resp. groen en geel), van RW139+027 tot RW137+000, van RW137+082 tot RW135+062 en van RW135+062 tot RW133+065 (Geurtjens, 2021).

In Figuur 455 zijn alle nieuw bepaalde korrelverdelingen (Boone, 2021c) weergegeven. In Figuur 456 is daarvan het gedeelte dat direct onder de kleilaag zit weergegeven en Figuur 457 geeft de korrelverdelingen uit de iets dieper gelegen zandlagen weer.

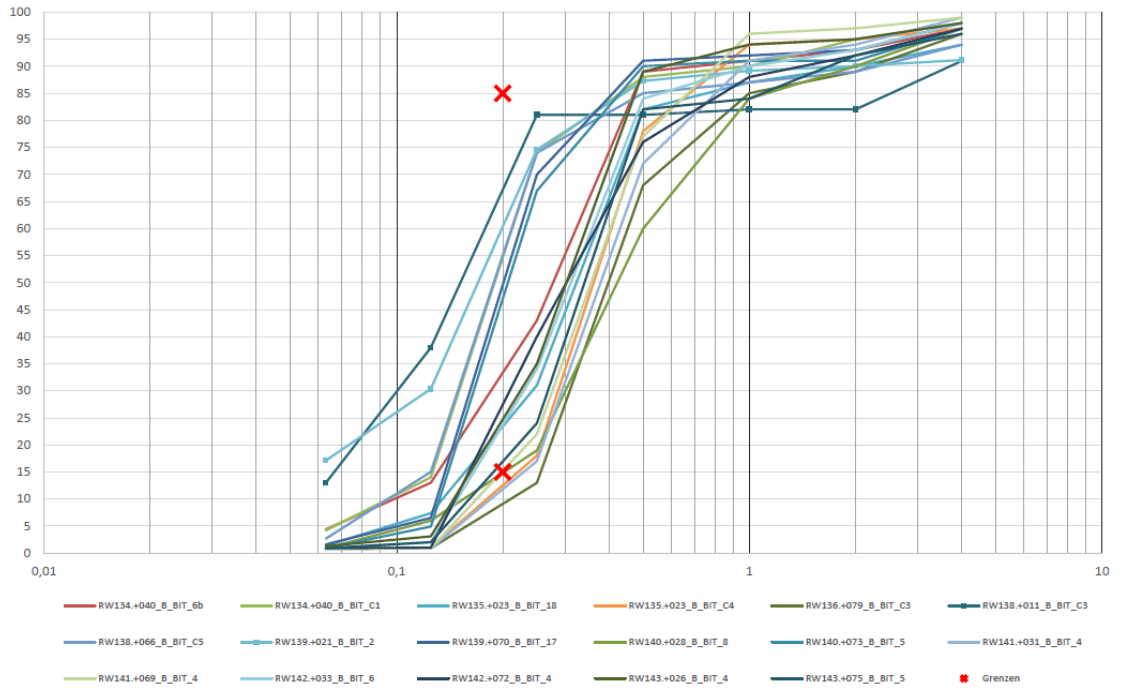


Figuur 455 Overzicht van alle nieuw bepaalde korrelverdelingen (Boone, 2021c).



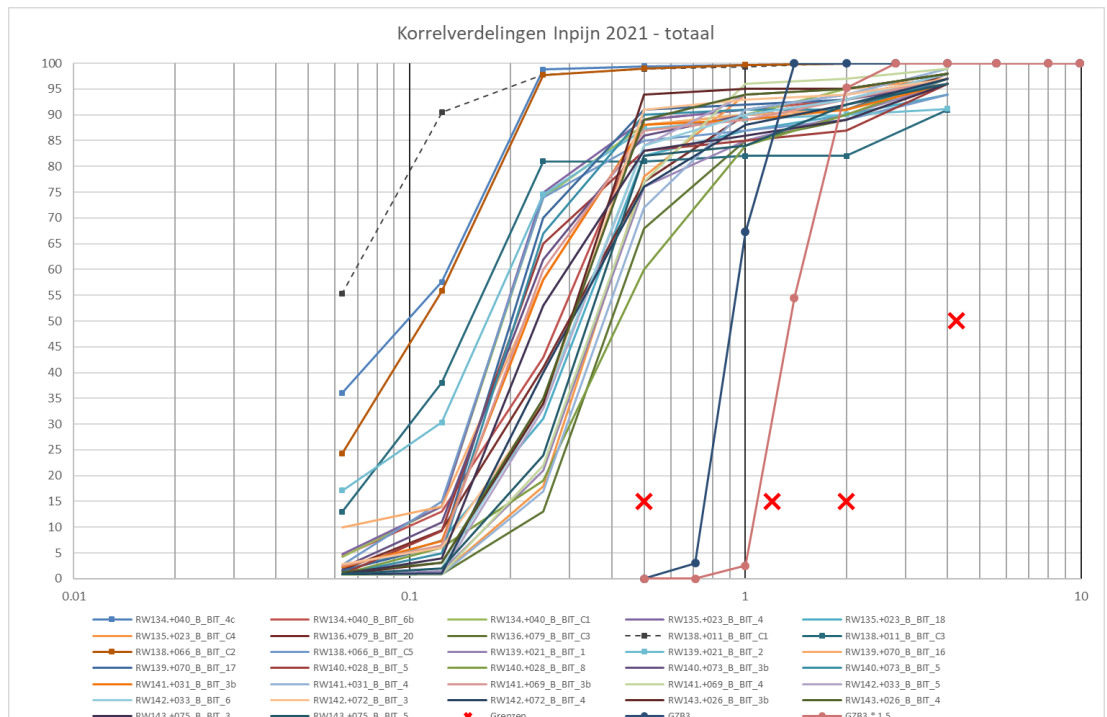
Figuur 456 Gedeelte van de nieuw bepaalde korrelverdelingen direct onder de zandlaag (Boone, 2021c).

Korrelverdelingen Inpijn 2021 - diepere zandlaag



Figuur 457 Gedeelte van de nieuw bepaalde korrelverdelingen op wat grotere diepte (Boone, 2021c).

Voor de bepaling van de eisen aan de korrelverdeling van het barrièrezand is géén rekening gehouden met de drie monsters van siitlagen. De argumentatie hiervoor is gegeven in §A.1.6. De resulterende eisen aan de korrelgroottes zijn met rode kruisjes weergegeven in Figuur 458, met de kanttekening dat het meest rechtsonder gelegen punt in de figuur niet maatgevend is. Het meest linkse kruisje betreft een minimumeis, terwijl de andere kruisjes maximumeisen betreffen. Voor nadere details wordt verwezen naar Koelewijn (2021).



Figuur 458 Korrelverdelingen als in Figuur 455, aangevuld met de korrelverdeling van GZB3 en een anderhalf maal zo grof zand dat nog aan de eisen (aangegeven met rode kruisjes) voldoet.

In de voorgaande figuur is ook de korrelverdeling van barrièrezand GZB3 opgenomen als voorbeeld, evenals een fictief materiaal dat 1,5 maal grover is dan GZB3. Opgemerkt wordt dat naast de eisen aan de korrelgrootte er nog andere eisen zijn aan het barrièrezand (zie §6.2), waarvan de (hoge) eis aan de doorlatendheid aparte vermelding verdient. Vanwege de geconstateerde relatief hoge doorlatendheid van het achtergrondzand en de noodzaak tot een significant doorlatendheidscontrast tussen het barrièrezand en het achtergrondzand, zal het te gebruiken mengsel een hoge doorlatendheid moeten kennen. Dit is het gemakkelijkst te bereiken met een relatief steile korrelverdelingscurve.

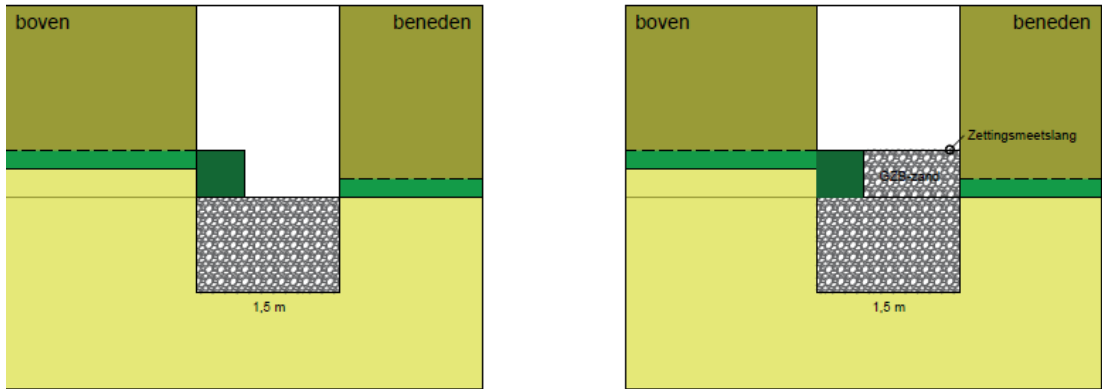
E.3.2 Principe-doorsnede met bovenstroomse afdichting

De variatie in de grondopbouw in Gameren is dusdanig dat toepassing van een bovenstroomse afdichting (of 'kleimuurtje') onontkoombaar is, zie hiervoor §A.1.12. Uitgaande van het Voorlopig Ontwerp is daarom een aanpassing gemaakt waarmee dit op een betrouwbare manier gerealiseerd kan worden. De praktische uitvoerbaarheid heeft hierbij een belangrijke rol gespeeld.

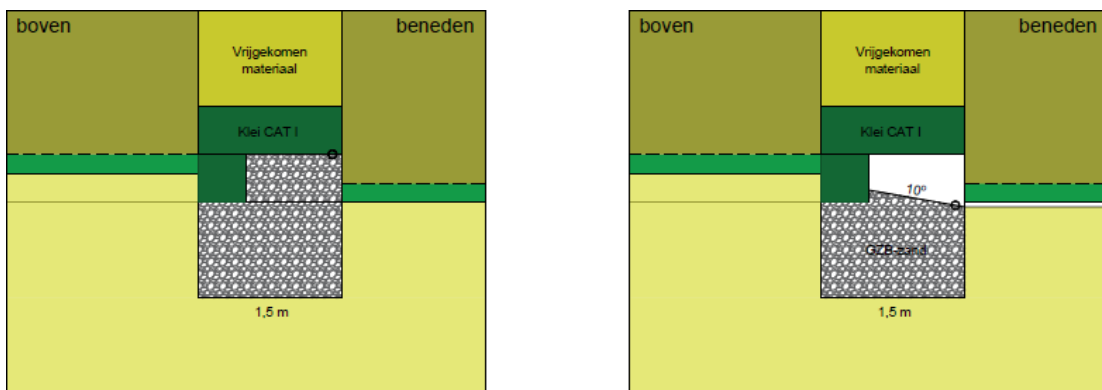
In vergelijking met het Voorlopig Ontwerp is aan de bovenstroomse kant een halve meter toegevoegd aan de sleufbreedte, uitgaande van een open sleufmethode. Aan de ene kant kost dit meer materiaal, aan de andere kant neemt de voortgangssnelheid hiermee toe (ondanks de grotere volumes). Eerst wordt het onderste deel van de sleuf, tot aan de grenslaagdiepte, gevuld met zand. Daarna wordt hierop 0,5 m erosiebestendige klei aangebracht. Dit gebeurt in een aantal slagen zodat een juiste verdichtingsgraad kan worden bereikt over de volledige hoogte van de kleilaag (Figuur 459). Daarna wordt aan de benedenstroomse kant de klei verwijderd over een breedte van 1,0 m, waarna het ontstane gat wordt opgevuld met grof zand (met de juiste verdichtingsgraad) en kan ook een zettingsmeetslang (zie §A.3.4 voor nadere details, werking en doel hiervan) worden aangebracht (Figuur 460). Daarna wordt daarboven over de hele breedte nog klei aangebracht over een hoogte van 0,5 m en de rest van de sleuf aangevuld met vrijgekomen materiaal (Figuur 461).



Figuur 459 Aanleg Definitief Ontwerp, fase 1 (links, onderste 1,5 meter gevuld met grof zand) en fase 2 (rechts, inkassing geheel gevuld met klei) (Boone, 2021b).



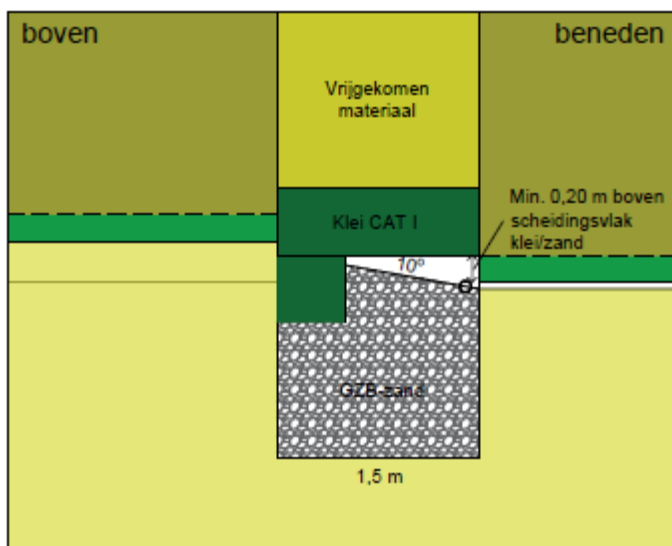
Figuur 460 Aanleg Definitief Ontwerp, fase 3 (links, klei verwijderd uit benedenstroomse meter) en fase 4 (rechts, benedenstroomse deel inkassing gevuld met grof zand en zettingsmeetslang aangebracht) (Boone, 2021b).



Figuur 461 Definitief ontwerp na voltooiing (links, na aanvulling met erosiebestendige klei en vrijgekomen materiaal) en in uiterste situatie (rechts, met een helling van 10 graden en de minimale heavehoogte) (Boone, 2021b).

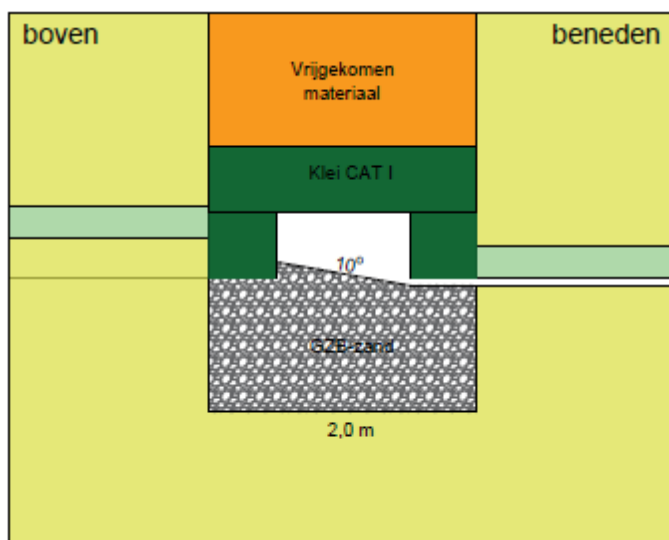
In Figuur 461 is aan de rechterkant de situatie weergegeven onder uiterste omstandigheden. De functie van de bovenstroomse afdichting is hiermee duidelijk geïllustreerd, in dit geval voor een hoogteverschil van de grenslaag van 20 cm tussen de bovenstroomse en de benedenstroomse kant. Zoals ook aangegeven is in §A.1.12 kan dit hoogteverschil in Gameren oplopen tot maximaal 30 cm (Hijma, 2020).

Tegen deze oplossing is als bezwaar ingebracht dat bij een vrij dunne kleilaag benedenstrooms, zoals in Gameren op meerdere plaatsen voorkomt, er zand uit de benedenstroomse zandlaag bóven de kleilaag in de inkassing kan stromen wanneer die in de loop van het proces gedeeltelijk leegstroomt. Als oplossing is wel geopperd om de grofzandbarrière op die gedeelten iets lager aan te leggen, tot maximaal 30 cm lager (zie Figuur 462), maar ook dat biedt geen volledige garantie. Overigens zal in zo'n situatie er eventueel een depressie aan het maaiveld ontstaan, maar het functioneren van de grofzandbarrière komt niet direct in gevaar, zie voor een wat extremere variant beïnvloedende factor B9 in §A.3.9 en faalpad 70 in §C.3.15.



Figuur 462 Diepere aanleg om uitspoeling van zand aan de benedenstroomse zijde te vermijden in het geval van een betrekkelijk dunne benedenstroomse kleilaag (Boone, 2021b).

Een andere variant die geopperd is om dit eventuele leegstromen van zand uit de deklaag aan de benedenstroomse kant te vermijden, is getoond in Figuur 463. Dit is echter géén acceptabele variant, omdat hierbij de zijwaartse pipegroei langs de benedenstroomse kant niet kan plaatsvinden. Daardoor stroomt de inkassing alleen leeg daar waar een pipe onder het benedenstroomse kleigedeelte door groeit, waarbij er een sterke stromingsconcentratie ontstaat met een (zeer) hoge bijbehorende 3D-factor γ_{3D} , zie voor een indicatie Figuur 448 in §D.2.



Figuur 463 Variant met een halve meter dikke kleimuur aan zowel boven- als benedenstroomse kant (Boone, 2021a).

E.3.3 Aanvullende berekeningen

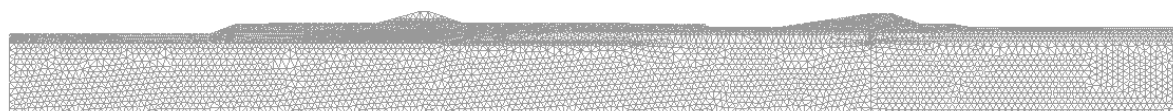
E.3.3.1. Keuze doorsneden

Op basis van Tabel 13 én de nieuwe kennis dat de gradiënt loodrecht op de helling maatgevend is, is een nieuwe keuze gemaakt van de door te rekenen doorsneden. Daarbij is ook rekening gehouden met de wens om de resultaten voor het Voorlopig Ontwerp te kunnen vergelijken met de resultaten voor het Definitief Ontwerp.

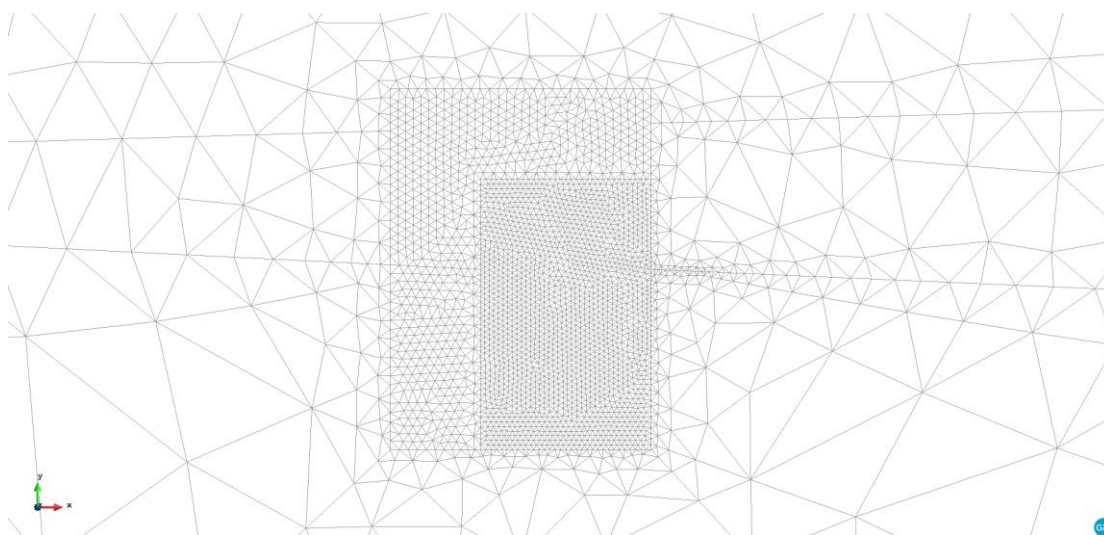
De hoogste waarden voor de gradiënt loodrecht op de helling worden gevonden voor de profielen RW134+050 en RW140+050, gevolgd door de profielen RW136+050 en RW138+050. Het profiel RW134+050 ligt op de rand van het te versterken gebied of zelfs daarbuiten, daarom is gekozen om in ieder geval profiel RW140+050 hiervoor door te rekenen. Dit is ook het profiel waarvoor de 3D-analyse oorspronkelijk is uitgevoerd (zie bijlage D en Rosenbrand et al. (2021)). Voor de vergelijkbaarheid is verder gekozen voor RW136+050, hetgeen ook het profiel is waarvoor de meeste grondonderzoeksdata beschikbaar is. Dit is eveneens het profiel waarvoor de doorlatendheden zijn gekalibreerd op basis van de grondwatermonitoringsdata (zie Koelewijn et al., 2021).

Hierna wordt ingegaan op de beide berekeningen. Veiligheidshalve is daarin met een 5 cm smallere grofzandbarrière gerekend, net als bij het Voorlopig Ontwerp, om daarmee eventuele tekortkomingen in de maatvoering op te kunnen vangen. Dit is in mindering gebracht op het benedenstroomse deel van het Definitief Ontwerp.

- E.3.3.2. Profiel RW136+050: elementennet, doorlatendheden, randvoorwaarden en resultaten
Het gehanteerde elementennet is getoond in Figuur 464 en, meer in detail bij de grofzandbarrière, in Figuur 465.



Figuur 464 Elementennet zoals gebruikt voor profiel RW136+050 (overzicht).



Figuur 465 Detail van het elementennet voor profiel RW136+050 bij de grofzandbarrière

In Tabel 14 zijn de doorlatendheden vermeld voor alle grondlagen die voorkomen in profiel RW136+050, in de volgorde zoals vermeld in de legenda bij Figuur 466 tot en met Figuur 468.

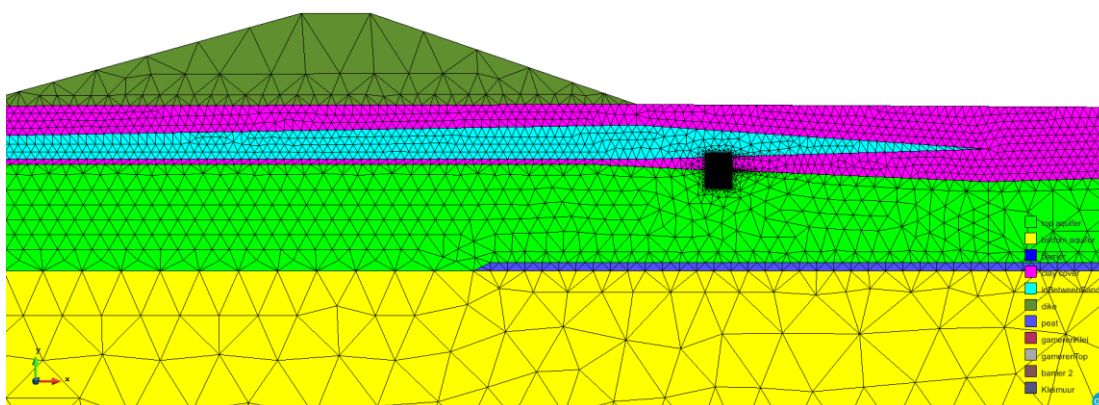
Tabel 14 Doorlatendheden per grondlaag zoals benoemd in de berekeningen voor profiel RW136+050.

Grondlaag	Hydraulische doorlatendheid bij 10 graden Celsius (m/dag)
top aquifer bottom aquifer	32
barrier	304
clay cover	0.1
inBetweenSand	1.5
dike	0.001
peat	0.005
gamerenKlei gamerenTop	1.5
barrier 2	30400
Kleimuur	0.001

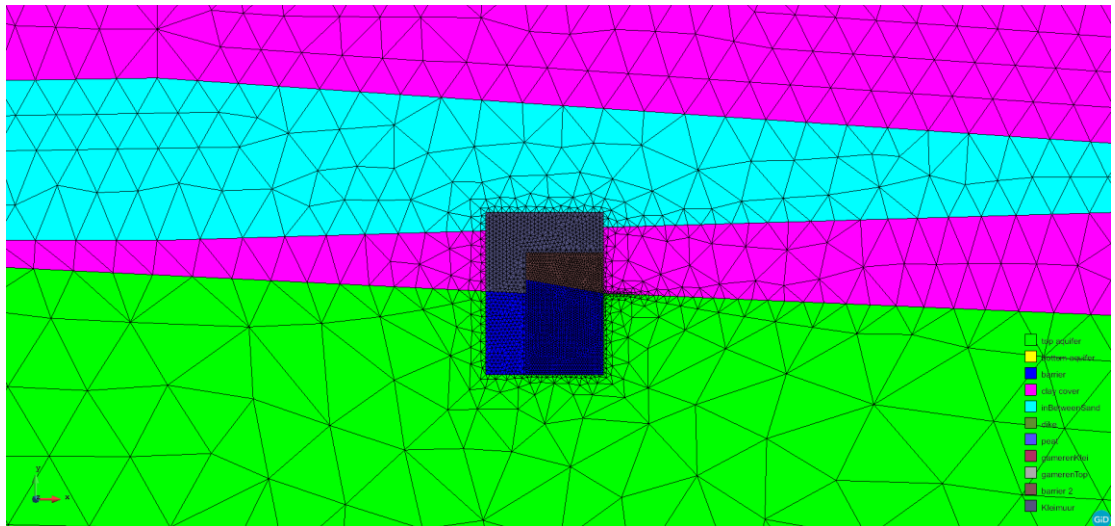


- top aquifer
- bottom aquifer
- barrier
- clay cover
- inBetweenSand
- dike
- peat
- gamerenKlei
- gamerenTop
- barrier 2
- Kleimuur

Figuur 466 Materialen zoals toegekend aan de verschillende elementen in profiel RW136+050 (overzicht, voor de schaal: de afstand tussen de buitenkruinlijnen van beide dijken bedraagt 208 m).

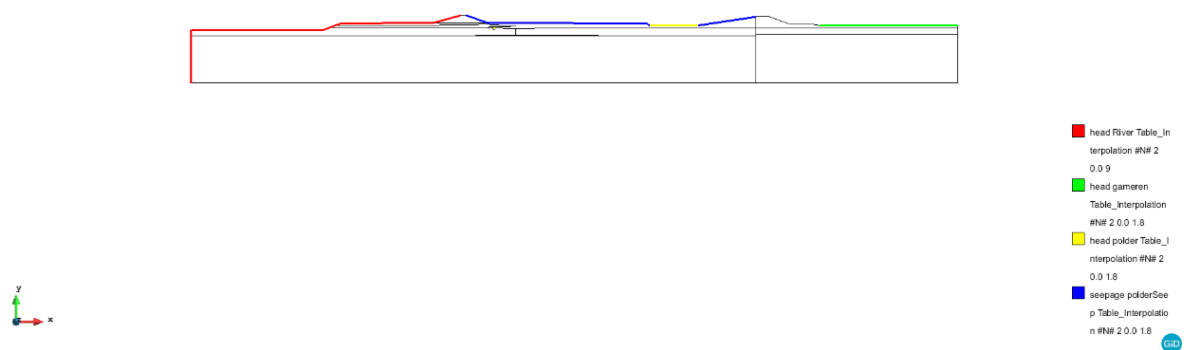


Figuur 467 Materialen zoals toegekend aan de verschillende elementen in profiel RW136+050 (omgeving primaire waterkering).

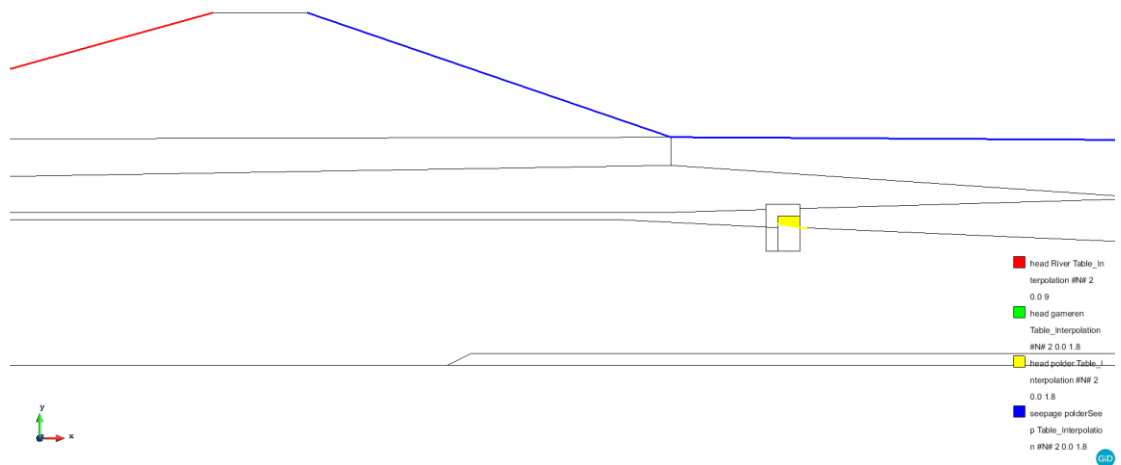


Figuur 468 Materialen zoals toegekend aan de verschillende elementen in profiel RW136+050 (omgeving grofzandbarrière).

De randvoorwaarden zoals toegepast zijn getoond in Figuur 469 en Figuur 470: het buitenwater op een niveau van NAP +9.00 m aangegeven met rood, het polderpeil op een niveau van NAP +1.80 m aangegeven met groen (achterland binnendijs van de Waalbandijk) en met geel (deel van het gebied tussen beide dijken én in het leeggelopen gedeelte van de inkassing van de grofzandbarrière en aansluitend daarop 26 cm richting het achterland, aan de bovenkant van de zandlaag) en een kwelconditie aangegeven met blauw (grootste deel tussen de kruinen van de beide dijken).

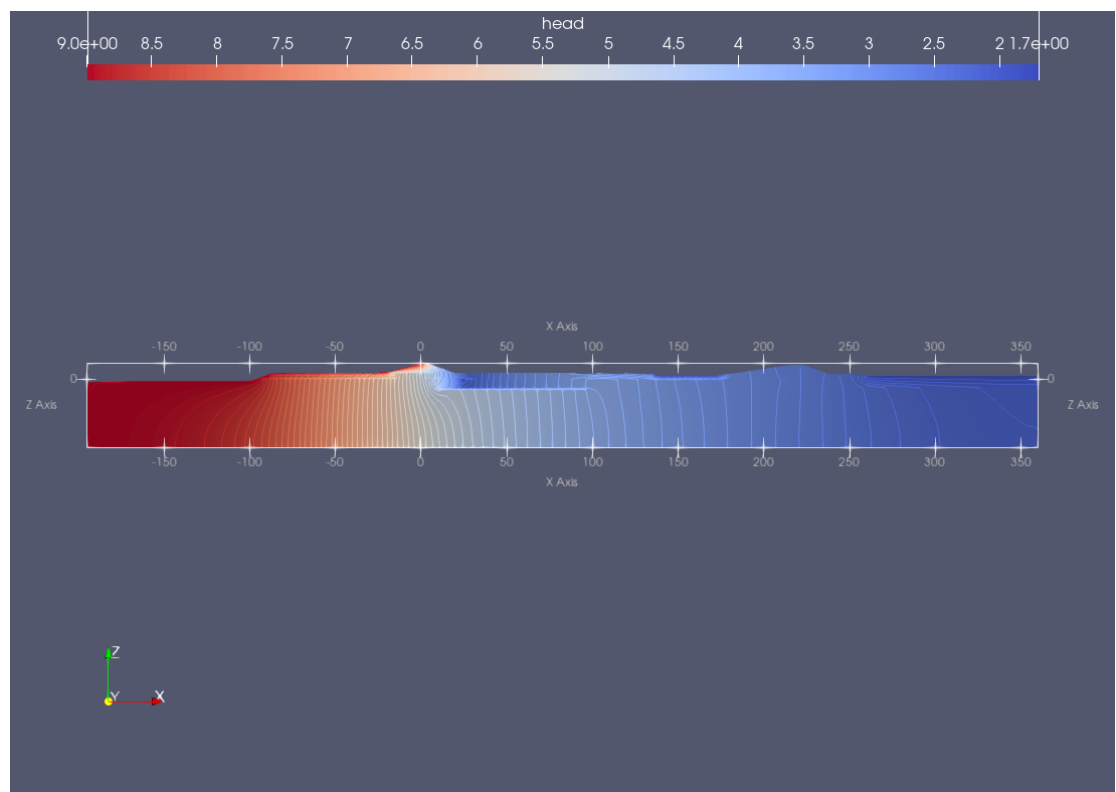


Figuur 469 Randvoorwaarden zoals toegepast bij profiel RW136+050 (overzicht).

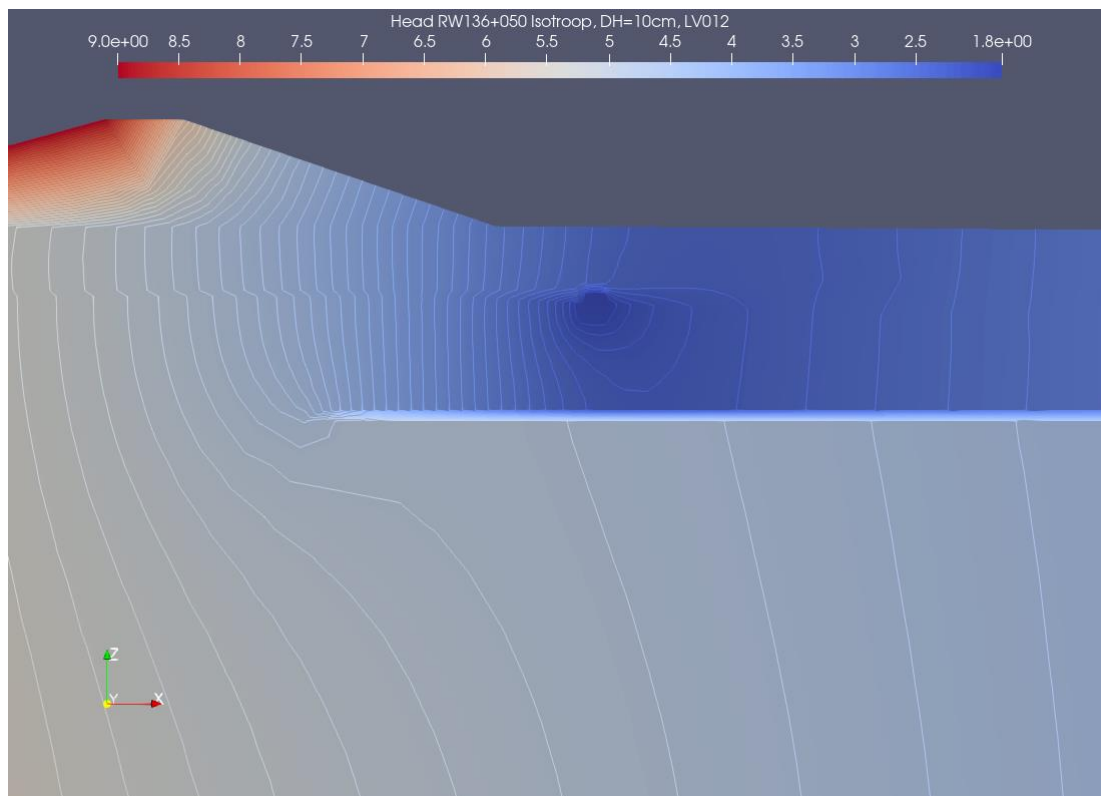


Figuur 470 Randvoorwaarden zoals toegepast bij profiel RW136+050 (omgeving primaire waterkering).

De resultaten zijn getoond in Figuur 471 en Figuur 472 in termen van de stijghoogte. De invloed van de veenlaag is hierin duidelijk zichtbaar. De veenlaag is hierin gemodelleerd tot daar waar deze concreet is aangetroffen in het grondonderzoek en niet tot daar waar deze met zekerheid niet meer aanwezig is. De invloed van de resterende onzekerheden ten aanzien van de laagopbouw blijkt betrekkelijk gering te zijn en is verwerkt in de schematiseringsfactor γ_b (zie voor nadere details Koelewijn et al. (2021), met name §7.2.11 daarin).



Figuur 471 Stijghoogteverdeling zoals berekend voor profiel RW136+050 (overzicht).



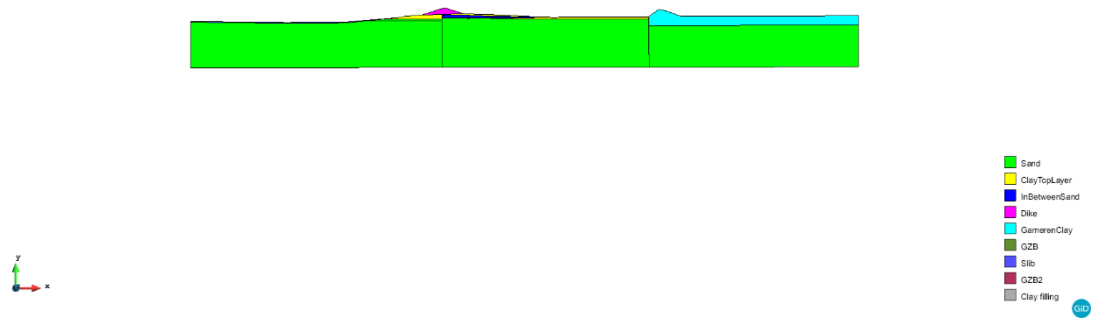
Figuur 472 Stijghoogteverdeling zoals berekend voor profiel RW136+050 (omgeving primaire waterkering).

Uitgaande van isotrope doorlatendheden, dus $A = k_h / k_v = 1$, voor de zandlagen boven en onder de veenlaag wordt voor de berekende gemiddelde gradiënt $i_{calc,d}$ een waarde van 0,0981 gevonden, dus een 2% lagere waarde dan voor het Voorlopig Ontwerp (zie §E.2.3). De invloed van de halve meter grof zand aan de bovenstroomse kant, onder de bovenstroomse afdichting, blijkt voor de berekende gradiënt dus betrekkelijk gering te zijn.

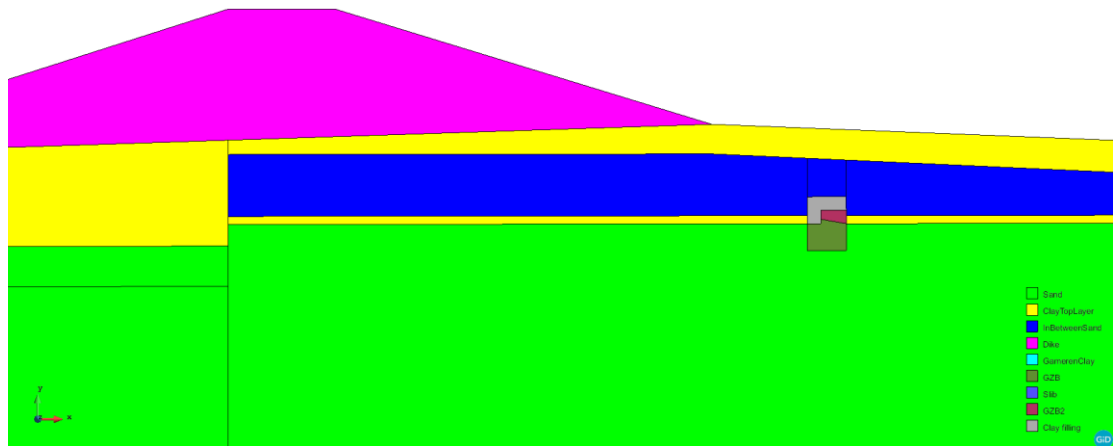
De invloed van anisotropie blijkt echter veel groter te zijn. Met een nog steeds wat conservatieve waarde van $A = 5$ (waar in het veld in dit dwarsprofiel waarden van 9 tot 12 zijn bepaald, zie Rosenbrand & Koelewijn (2020a)) voor alleen de bovenste zandlaag, wordt voor de gradiënt een waarde van 0,0867 gevonden en bij toepassing voor beide zandlagen daalt dit tot 0,0804. Dit laatste is maar liefst 20% lager dan het eerder gevonden resultaat voor het Voorlopig Ontwerp met isotrope doorlatendheden.

E.3.3.3. Profiel RW140+050: laagopbouw en resultaten

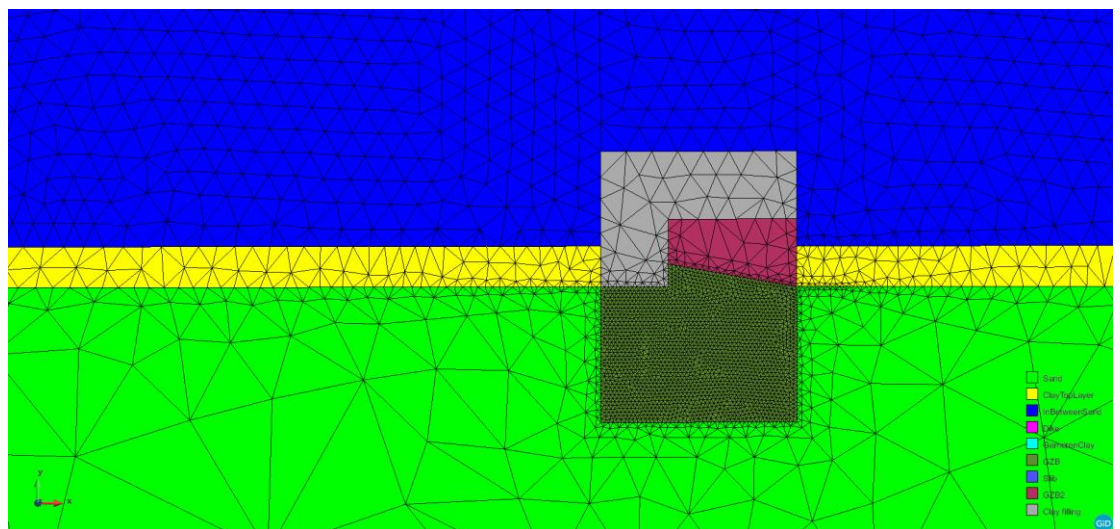
De gemodelleerde laagopbouw voor profiel RW140+050, inclusief het elementennet bij de grofzandbarrière, is getoond in Figuur 473 tot en met Figuur 475.



Figuur 473 Materialen zoals toegekend aan de verschillende elementen in profiel RW140+050 (overzicht, voor de schaal: de afstand tussen de buitenkruinlijnen van beide dijken bedraagt 181 m).



Figuur 474 Materialen zoals toegekend aan de verschillende zones in profiel RW140+050 (omgeving primaire waterkering).



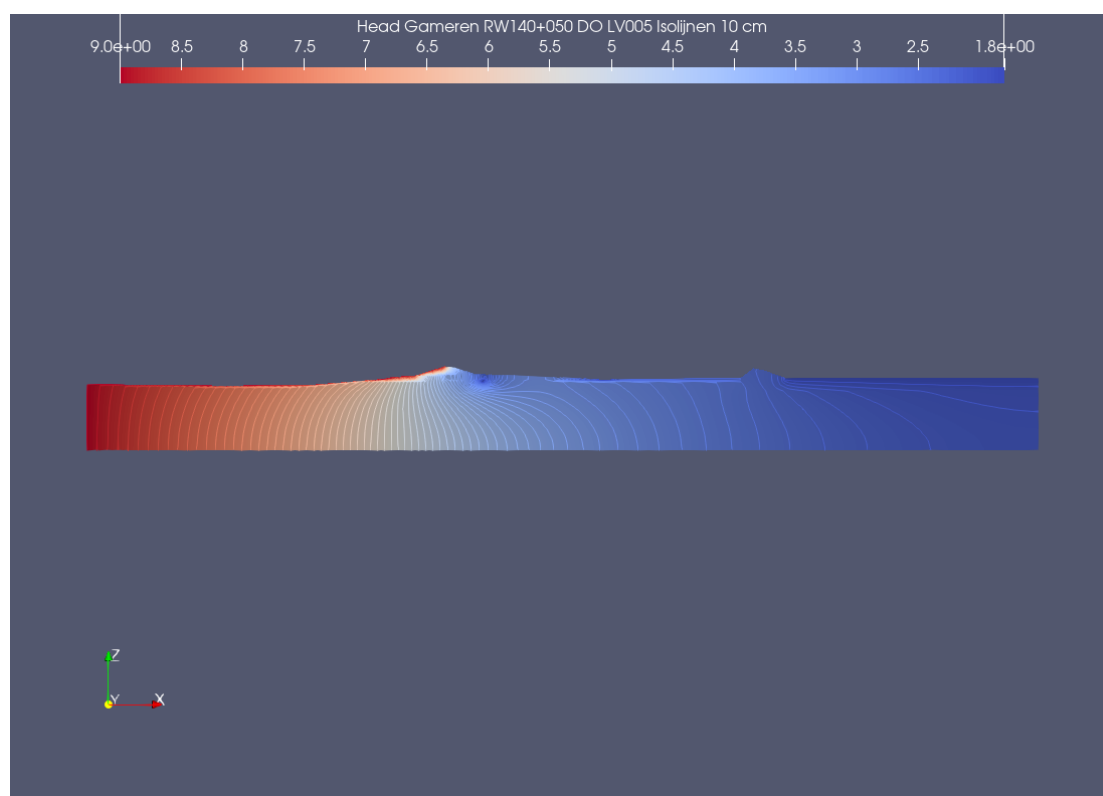
Figuur 475 Materialen zoals toegekend aan de verschillende elementen in profiel RW140+050 (omgeving grofzandbarrière).

In Tabel 15 zijn de doorlatendheden vermeld voor alle grondlagen die voorkomen in profiel RW140+050, in de volgorde zoals vermeld in de legenda bij de voorgaande drie figuren.

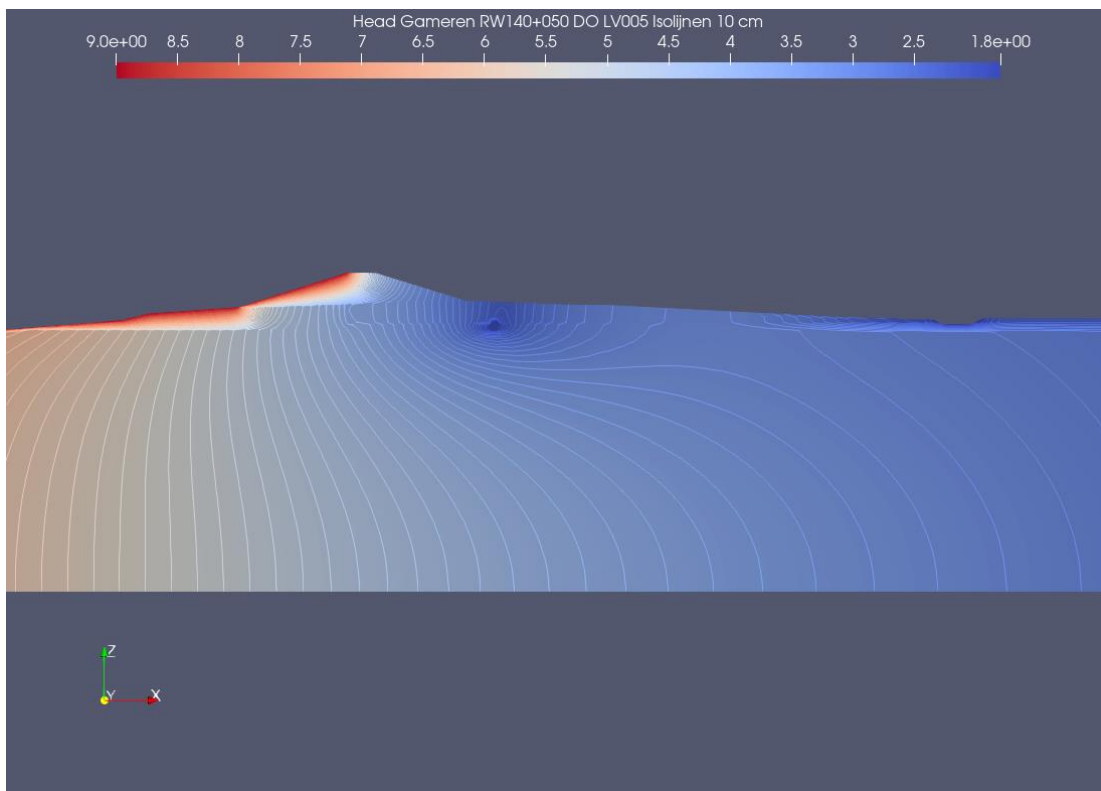
Tabel 15 Doorlatendheden per grondlaag zoals benoemd in de berekeningen voor profiel RW140+050.

Grondlaag	Hydraulische doorlatendheid bij 10 graden Celsius (m/dag)
Sand	32
ClayTopLayer InBetweenSand	1.5
Dike	0.001
GamerenClay	1.5
GZB	304
Slib	0.15
GZB2	30400
Clay filling	0.001

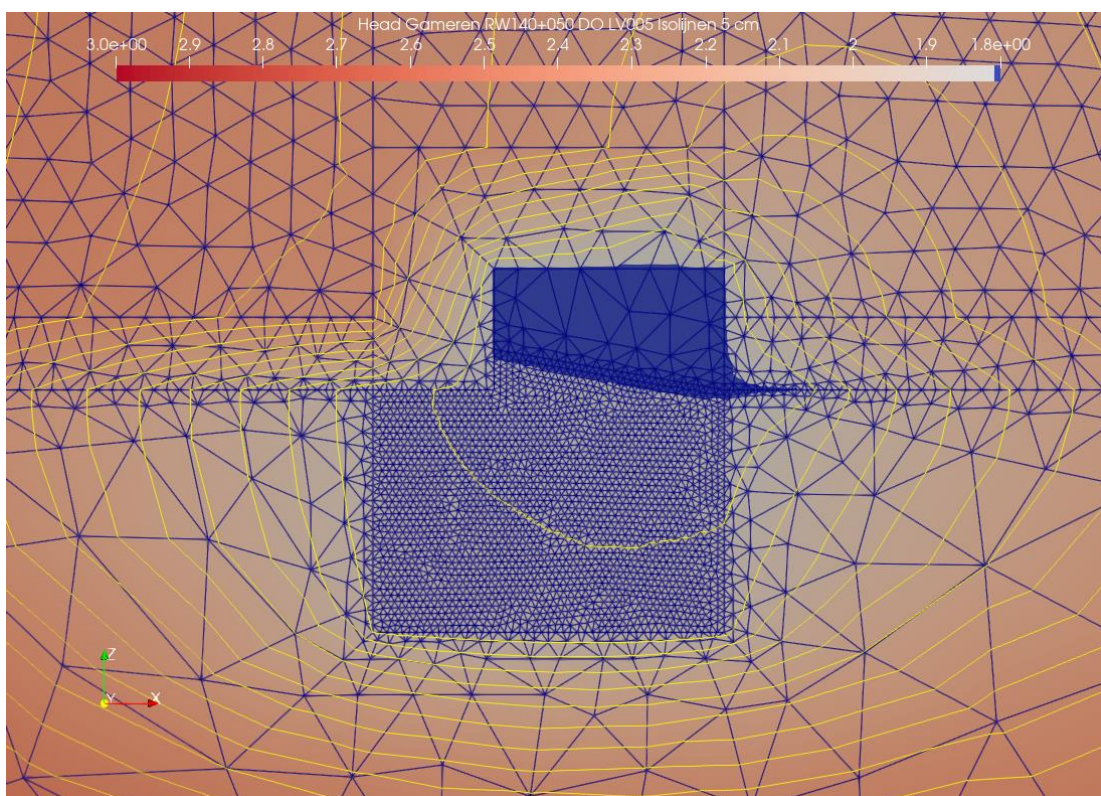
De resultaten zijn getoond in Figuur 476 tot en met Figuur 478 in termen van de stijghoogte. In dit profiel is over het algemeen geen veenlaag aangetroffen en daarom is deze ook niet gemodelleerd.



Figuur 476 Stijghoogteverdeling zoals berekend voor profiel RW140+050 (overzicht).



Figuur 477 Stijghoogteverdeling zoals berekend voor profiel RW140+050 (omgeving primaire waterkering).



Figuur 478 Stijghoogteverdeling zoals berekend voor profiel RW140+050 (omgeving grofzandbarrière).

Voor isotrope doorlatendheden wordt voor de gradiënt $i_{calc,d}$ een waarde gevonden van 0,1154. Bij een anisotropiefactor $A = 5$ daalt dit met 25% tot 0,0863. Het effect van

anisotropie is hier groter omdat de zandlaag hier effectief (veel) dikker is. Voor de toelaatbare gradiënt geldt voor dit profiel, met een 3D-factor van 2,4 (zie §D.3), een waarde van 0.129.

E.3.4 Conclusie

In Tabel 16 zijn de berekende waarden aangegeven, alsmede de benodigde waarde.

Tabel 16 Berekende gemiddelde gradiënt over de middelste 20 cm van de helling in de grofzandbarrière onder maatgevende omstandigheden, uitgaande van de uitstroomsnelheden, voor de berekende profielen, vergeleken met de toelaatbare waarde, $i_{crit,d}$.

Profiel	$i_{calc,d}$			$i_{crit,d}$
	A = 1, VO	A = 1, DO	A = 5, DO	
RW136+050	0.100	0.0981	0.0804	0.135
RW138+050	0.100	-	-	0.100
RW140+050	-	0.1154	0.0863	0.129
RW143+050	0.117	-	-	0.155

Voor het Definitief Ontwerp kan, bij toepassing van anisotropie voor de pipinggevoelige zandlaag met een licht conservatieve factor 5, worden geconcludeerd dat de berekende gradiënt duidelijk kleiner is dan de toelaatbare gradiënt. De uitkomsten voor profiel RW136+050 en RW140+050 maken aannemelijk dat toepassing van deze zelfde factor voor de anisotropie in de andere profielen tot een vergelijkbare verlaging van de berekende gradiënt zou leiden.

Het voorgaande heeft betrekking op het primaire faalpad zoals aangegeven in Figuur 6 in hoofdstuk 2 (faalpad 63 zoals aangegeven in Figuur 23 in §5.2, nader uitgewerkt in §5.3). Het is dan van belang dat de faalkansen alle overige faalpaden die betrekking hebben op piping, zoals aangegeven in dezelfde figuren, klein zijn en bij voorkeur verwaarloosbaar, bijvoorbeeld door maatregelen als een bovenstroomse afdichting. Deze overige faalpaden zijn uitgebreid toegelicht in bijlage C en kort samengevat in hoofdstuk 7.

F Overzicht van keuzes en onzekerheden

F.1 Inleiding

Deze bijlage bevat een overzicht van alle gemaakte keuzes die gemaakt zijn bij het ontwerp, en de onzekerheden daarin. Over het algemeen bestaat er met betrekking tot de onzekerheden vooral een indruk of deze (licht-)conservatief, realistisch (conform verwachting) of mogelijk optimistisch zijn ingeschat.

F.2 Veldsituatie

Voor de situatie in Gameren zijn de volgende parameters van belang:

- Schematisering ondergrondopbouw: dit is gedaan op basis van het beschikbare onderzoek, met enkele tussentijdse updates naarmate er meer data beschikbaar kwam (zie Koelewijn et al. (2021) en §E.3.1). De invloed van de resterende onzekerheid in de laagopbouw is onderzocht met een aantal variantberekeningen, dit leverde steeds minder dan 10% variatie in de berekende gradiënt (zie §7.2 in Koelewijn et al. (2021)).
- Doorlatendheid zandlaag: hiervoor zijn voor de horizontale doorlatendheid de (verwachtings)waarden gebruikt uit het HPT-AMPT-onderzoek, met onderscheid naar de oude doorbraaklocatie en de rest van het traject (Rosenbrand & Koelewijn, 2020a).
- Anisotropie zandlaag: hiervoor is uiteindelijk een verhouding $A = k_v/k_h$ van 5 toegepast. Dit is conservatiever dan de waarden van 7 tot 12 die uit het HPT-AMPT-onderzoek kwamen, maar minder conservatief dan gangbaar is door met isotrope eigenschappen te rekenen. De invloed op de waarden van de berekende gradiënt is vrij groot: orde 20% (zie §E.3.3).
- Doorlatendheden overige grondlagen: deze zijn zo goed mogelijk ingeschat en gekalibreerd op basis van stijghoogtemetingen (zie Koelewijn et al., 2021), het gaat hier om verwachtingswaarden die eventueel iets te optimistisch kunnen zijn.
- Hoogteverschillen in de onderkant van de deklaag: dit is ingeschat als maximaal 30 cm over een afstand van 1 m, abrupt dan wel geleidelijk (Hijma, 2020). De bovengrens van 30 cm is aangehouden bij het ontwerp als een harde waarde om rekening mee te houden, dit is conservatief.
- Afstand tussen obstakels voor wat betreft de zijdelingse pipeontwikkeling aan de benedenstroomse kant van de grofzandbarrière: naar verwachting 50 m (Hijma, 2020; Rosenbrand et al., 2021). Deze waarde heeft een dominante invloed bij de bepaling van de 3D-factor, die op zichzelf ook dominant is in het ontwerp (zie bijlage D).
- Weerstand in de benedenstroomse pipe(s): er is gerekend met slechts één benedenstroomse pipe, die door de grote omvang die daarvan verwacht mag worden relatief weinig weerstand heeft. Als er meer pipes ontstaan met aansluiting op de grofzandbarrière in hetzelfde gedeelte tussen twee obstakels, dan zal de weerstand groter zijn dan de nu laag (daarmee conservatief) ingeschatte waarde van 6% (Rosenbrand et al., 2021).

F.3 Onderliggende laboratoriumproeven / modelfactor en modelonzekerheid

Uiteindelijk is de waarde voor $\dot{I}_{crit,rep}$ gebaseerd op de analyse van een tweetal proeven door Förster (2021a) en een inschatting van de onzekerheid. Dit kan het beste omschreven worden als een verwachtingswaarde, waar echter wel enige onzekerheid van toepassing is. Aanscherping hiervan is alleen mogelijk met aanvullende proeven. Deze zouden ook nodig zijn om een modelfactor te kunnen bepalen en de modelonzekerheid te kwantificeren.

F.4 3D-factor

De 3D-factor is zeer dominant in het ontwerp. Bij de bepaling ervan door Rosenbrand et al. (2021) is aanvankelijk uitgegaan van een conservatieve waarde van 10 m voor de zijdelingse pipeontwikkeling, waardoor voor alle berekende profielen later een vertaalslag nodig was naar de meer realistische waarde van 50 m. Bovendien was voor de meeste profielen ook voor andere geometrische parameters een omrekening nodig (zie bijlage D). Dit komt de nauwkeurigheid van deze dominante factor niet ten goede, dit kan zowel conservatief als optimistisch uitpakken. Daarbij geldt wel dat er vrij veel aspecten aan de conservatieve kant zijn ingeschat, maar dat betreft slechts inschattingen. Aanbevolen wordt om dit aspect nader aan te scherpen, bijvoorbeeld met behulp van experimenteel onderzoek.

F.5 Schadefactor

Voor de schadefactor zijn nu conservatieve schattingen gehanteerd. Deze factor is aan te scherpen door kalibratie met een evaluatie van het hele veiligheidsformat met semi-probabilistische en probabilistische analyses, zoals eerder is gedaan voor het model van Sellmeijer (zie ook §2.1.4).

F.6 Uitvoering-gerelateerde aspecten

De volgende aspecten hangen sterk samen met de uitvoering:

- Doorlatendheid grofzandbarrière, in relatie tot de bereikte dichtheid: voor de berekeningen is een relatief hoge dichtheid aangenomen, die gepaard gaat met een relatief lage doorlatendheid. Voor de optredende gradiënt is dit een meer conservatieve combinatie dan zou optreden bij de als minimaal voorgeschreven relatieve dichtheid. Op basis van hetgeen in het veld haalbaar is, zijn hierdoor voor de dichtheid en de doorlatendheid waarden gehanteerd in de berekeningen die variëren van 'conform verwachting' tot 'conservatief', waarschijnlijk 'licht conservatief'.
- Breedte grofzandbarrière: hiervoor is een marge van 5 cm opgenomen, in plaats van de verwachtingswaarde van 100 cm breedte is een (sterk) conservatieve schatting van 95 cm gehanteerd.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl