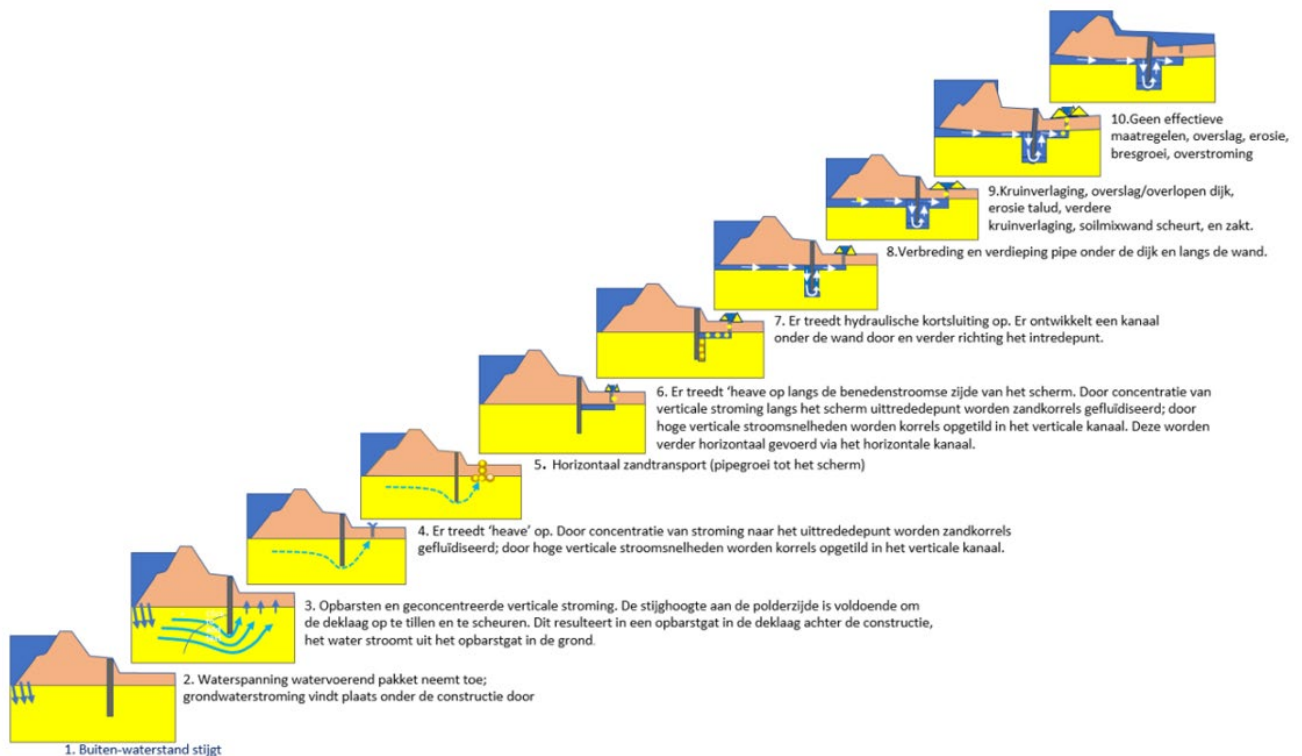


BIJLAGE B: NADERE BESCHRIJVING FYSISCHE PROCESSEN FAALPAD ONDERLOOPSHEID

Voor de fenomenologische beschrijving van backward erosion piping in het algemeen wordt verwezen naar Nederlandse en internationale literatuur. Bronnen zoals [1], [2], [3] geven een goed en vrij gedetailleerde beschrijving ondersteund met foto's. Hieronder is een beschrijving gegeven van de verschillende stadia in het proces van piping voor de situatie dat er een heavescherm onder de dijk is toegepast. In onderstaande beschrijving is uitgegaan van een heavescherm dat is geplaatst onder de binnenberm van een dijk en waarbij er een cohesieve deklaag aanwezig is. Voor andere situaties kan het faalpad afwijken van onderstaande, bijvoorbeeld bij een verdiepte constructie of een situatie zonder deklaag. Onderstaande faalpad is in deze publicatie verder uitgewerkt.



Figuur B-1 Faalpad onderloopsheid voor dijk met heavescherm en deklaag [4]

Bovenstaande is een beschrijving van onderloopsheid in een situatie met een deklaag. In die situatie moeten er meerdere initiërende gebeurtenissen plaatsvinden zoals welvorming en erosiepijpvorming voordat het proces van heave en verticale erosie ter plaatse van het scherm kan optreden. Indien er (vrijwel) geen deklaag aanwezig is, wordt de beschrijving van het faalpad wat eenvoudiger. Er is dan sprake van vrije uitstroming zonder sterke concentratie van kwelstroming bij een wel. In dit geval is het faalpad eenvoudiger en kunnen de knopen 2 t/m 5 worden overgeslagen. Deze laatste situatie wordt vaak in de technische leidraden over piping bij kunstwerken beschreven. Voorliggende publicatie focust op de situatie van heaveschermen bij dijken met een deklaag.

Hieronder volgt een nadere uitleg over de fysische processen met verwijzing naar relevante onderzoeken.

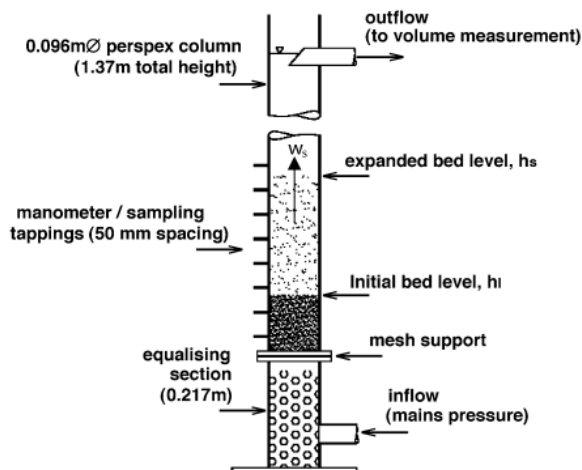
Knoop 1, 2 en 3: Toename buitenwaterstand en stijghoogte onder deklaag, opbarsten en geconcentreerde verticale stroming

Door toename van de stijghoogte onder de deklaag wordt de deklaag aan de polderzijde opgetild en kan de deklaag scheuren. Via scheuren of (bestaande) lokale gaten kan welvorming optreden. Er ontstaat geconcentreerde kwelstroming via de wel richting het maaiveld of naar de bodem van een sloot.

Knoop 4: Fluïdisatie van zand en optreden van zandmeevoerende wel

Bij sterke grondwaterstroming in het watervoerende pakket in de richting van de wel, kan lokaal door de sterke stromingsgradiënt drijfzand ontstaan: de korrelspanning is lokaal gelijk aan nul. Juist onder de wel is de stromingsgradiënt het grootst. Bij sterke gradiënten is dit de plek waar het eerst drijfzand ontstaat: het zand gaat van een vaste pakking over in een zand-water suspensie. Bij toenemende stroming zal de suspensie verdunnen en zal de suspensie de scheur of het gat van de wel gaan vullen. Uiteindelijk zal de suspensie aan de oppervlakte komen. Er is dan sprake van een zandmeevoerende wel. Garai [5] geeft aan dat zeer fijn zand met relatief hoge doorlatendheid zelfs al uit de vaste pakking kan loskomen voordat het zand in suspensie is. Zand met dergelijke eigenschappen komt echter nauwelijks voor in het watervoerend pakket in Nederland. Daarom kan er voor Nederlandse toepassingen worden gesteld dat zand pas verticaal kan eroderen als het in suspensie is, ofwel nadat drijfzand is ontstaan.

In cylinderproeven is o.a. door Baldock [6] gekeken naar het gedrag van een zand-water suspensie wanneer deze verticaal van onder wordt aangestroomd. Hierbij wordt gestart met zand in een vaste pakking op de bodem van de cylinder. Wanneer de gradiënt in het zand de kritieke gradiënt bereikt dan raakt het zand in een drijfzandconditie. In paragraaf 0 wordt nader ingegaan op deze kritieke gradiënt. Bij toenemende stroomsnelheid expandeert de suspensie waarbij de dichtheid afneemt. Baldock vond een relatie tussen stroomsnelheid en de hoogte van de zand-water suspensie in de cylinder, Figuur B-1. Hoe hoger de stroomsnelheid (w_s), hoe hoger de suspensie in de kolom (h_s) en des te lager de dichtheid van de suspensie.

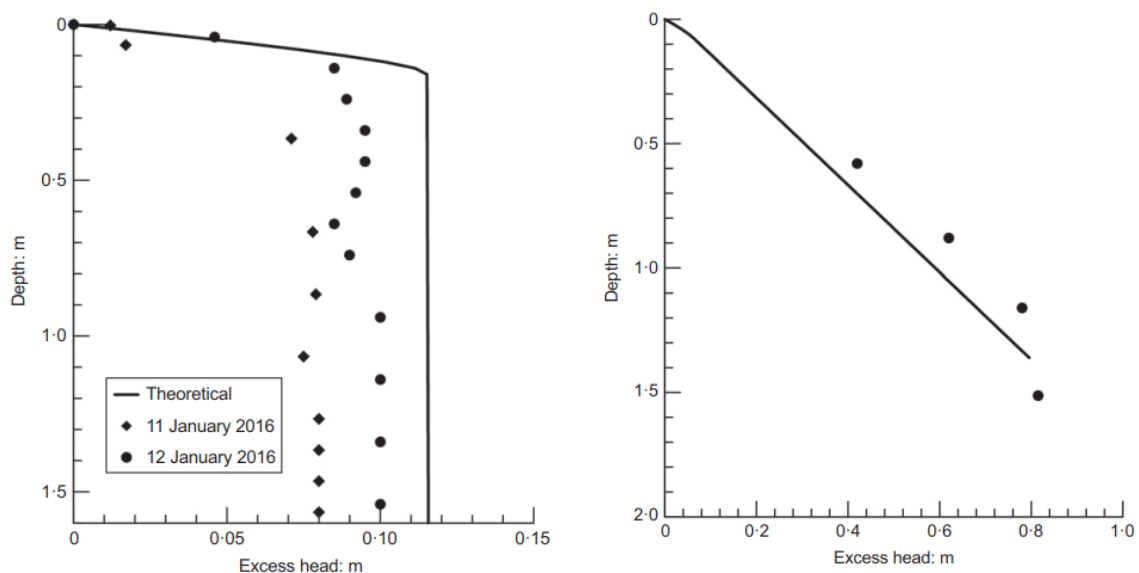


Figuur B-1 Fluïdisatie en sedimentatie kolomproef [6]

Recent hebben Robbins e.a. [7] dit principe van expanderende suspensie bij toenemende aanstroomsnelheid toegepast op het proces in een zandmeevoerende wel. Op basis van vergelijkingen uit de stromingsleer is het drukhoogteverlies in het opbarstkanaal bepaald. Deze berekende drukhoogte is vergeleken met de gemeten drukhoogteverliezen bij twee zandmeevoerende wellen in de praktijk: een wel bij IJzendoorn, langs de Waal in de Neder-Betuwe,

met relatief grof zand en een wel met fijn zand langs de Mississippi bij Mayersville. Voor beide situaties bleek het drukhoogteverlies goed te verklaren met de theorie, zie Figuur B-2. Het drukhoogteverlies bij IJzendoorn bedroeg ca. 0.6 keer de dikte van de deklaag en bij Mayersville was dit bijna 0. Opgemerkt moet worden dat de dikte van de deklaag in beide gevallen beperkt was (ca. 1,5m). De onderzoekers concluderen dat de grootte van het drukhoogteverlies afhankelijk is van de korrel diameter, de afmetingen van de wel (de diameter van het gat in de deklaag in dit geval) en de stroomsnelheid in de wel. Het drukhoogteverlies neemt af bij: afname van korrel diameter, afname van de diameter van het gat en de toename van het debiet. Dit onderzoek geeft vooral een beeld van belangrijke invloedsfactoren die het drukverloop de wel kunnen bepalen. De absolute waarde van de gemeten drukken zelf kan niet één op één worden toegepast op andere situaties. Momenteel zijn er nog onvoldoende praktijkwaarnemingen zoals [7] beschikbaar om generieke vuistregels af te leiden waarbij parameters zoals het debiet in de wel en een korrelverdelingsparameter van het zand onder de wel als input worden gebruikt. De drukval in de wel kan gedurende de verschillende stadia van piping veranderen als gevolg van de veranderende water en zandtoevoer naar de wel. Zelfs afwisselend schoonspoelen en verzanden in de wel is mogelijk. Het is raadzaam meerder scenario's te onderzoeken en niet a priori een uitgangspunt voor de drukval te kiezen.

Het recente onderzoek van Robbins lijkt een verklaring te geven voor enkele afwijkende waarnemingen tijdens een inventarisatie van wellen langs de Lower Mississippi River door Mansur in 1956 in opdracht van het US Army Corps of Engineers. In dit onderzoek is voor iedere wel de gradiënt over de deklaag bepaald via metingen in de nabijheid van een wel (niet in de wel). De gradiënten zijn vergeleken met waarnemingen, zoals kweldebiet en of de wel al dan niet zandmeevoerend was. De inventarisatie liet over het algemeen een beeld zien waarbij zandmeevoerende wellen en wellen met een sterk kweldebiet optraden bij hogere gradiënten (vaak boven de 0,5) terwijl wellen met lagere kweldebieten optraden bij aanzienlijk lagere gradiënten. Maar er werden ook enkele zandmeevoerende wellen aangetroffen met aanzienlijk lagere gradiënten (0,15 en 0,23). Dit laatste zou verklaard kunnen worden met het effect dat door Robbins is beschreven. Bij grotere debieten kan het drukverlies over de wel dus sterk afnemen.



Figuur B-2 Links: Vergelijk van veldmetingen met berekende drukhoogteverloop in de wel voor de zandmeevoerende wel bij Mayersville (Mississippi, VS); Rechts: Vergelijk van veldmetingen met berekende drukhoogteverloop zandmeevoerende wel bij IJzendoorn (Neder-Betuwe) uit onderzoek [7]

Knoop 5: Horizontaal zandtransport en pijpvorming tot het scherm

Het ontstaan van een zandmeevoerende wel gaat gepaard met het ontstaan van een erosiezone in het zandpakket recht onder de wel. Experimenteel onderzoek in een proefopstelling met een wel als een gat in een doorzichtige plaat, heeft laten zien dat er onder de wel eerst een cirkelvormige en vrij platte erosielenis ontstaat. Deze erosielenis groeit met name horizontaal, waarbij de diameter toeneemt. Op een gegeven moment gaat het erosieproces van de expanderende lens over in pijpvorming waarbij er een horizontale erosiepijp “ontspringt” vanuit de erosielenis en daarna groeit tegen de richting van de grondwaterstroming.

Erosiepijpen groeien in de richting waar zandtransport het makkelijkst op gang komt en dit is in de meeste gevallen in het horizontale vlak. Het proces van erosie naar de pijp toe wordt ook wel “zandhonger” genoemd. Korrels worden makkelijker horizontaal verplaatst dan vertikaal omdat het voor horizontale erosie voldoende is om de korrels aan het rollen te brengen terwijl het voor een verticale erosie nodig is om de korrels tegen de zwaartekracht in omhoog te duwen. Uit vergelijking van diverse waarnemingen (experimenteel onderzoek en praktijkproeven) blijkt dat het proces van pijpvorming grillig is en geen vast patroon kent. Er zijn voorbeelden van experimenteel onderzoek waarbij de erosiepijp zich op één plek vastlegt en zich steeds verder verdiept en er voorbeelden van een vertakt en vlechtend erosiepijpentelsel, waarbij er uiteindelijk een netwerk van erosiepijpen ontstaat vanuit meerdere dichtbij elkaar liggende wellen. Dit is o.a. waargenomen in de mediumschaal proeven uitgevoerd door Silvis zonder scherm (Figuur B-3)

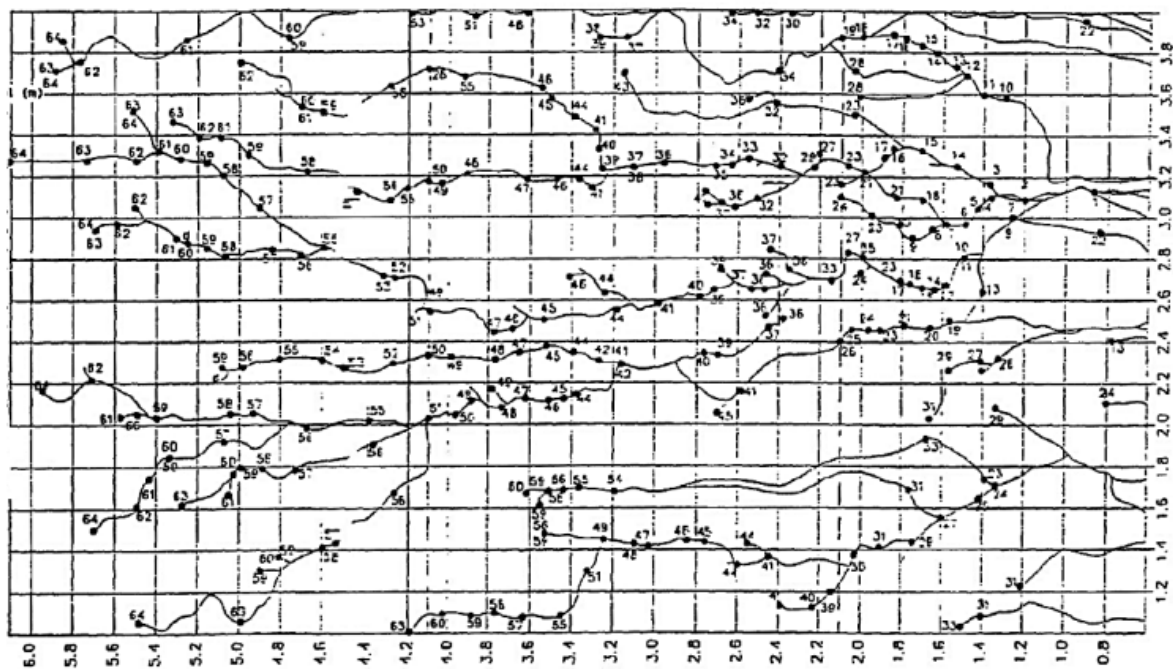
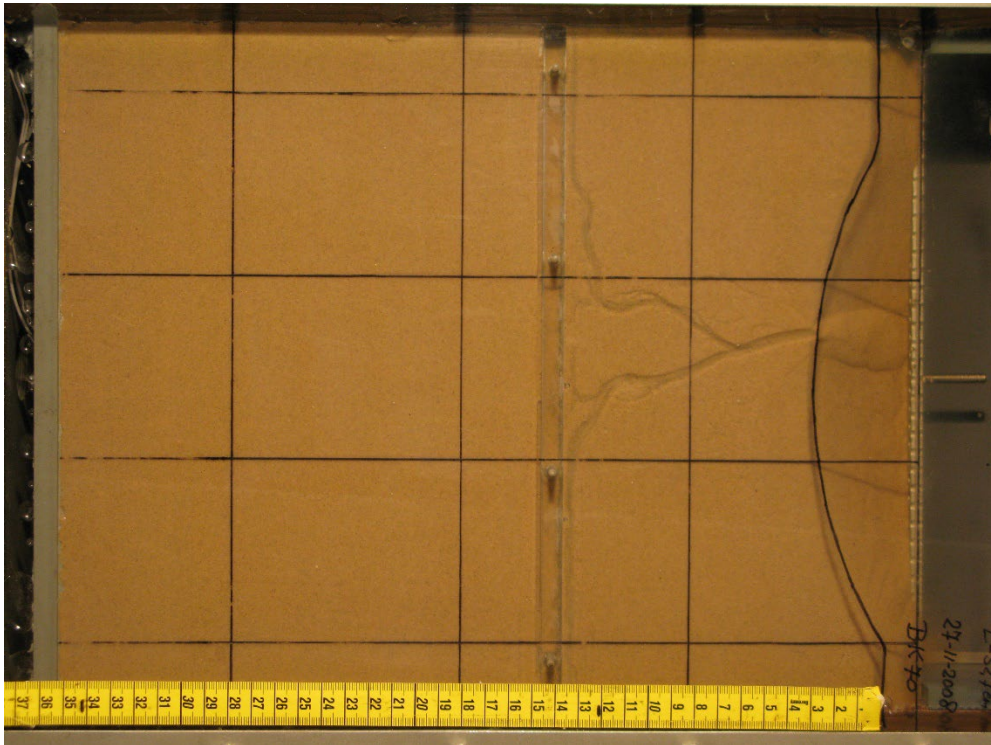


Figure 1-2 Top view of the aquifer for a full scale (length = 6m & width = 4m) piping experiment showing the arbitrary behavior of pipe growth. The pipes develop from the right side (downstream end) towards the left side (upstream side of dike). The numbers along the pipes indicate time of passing in minutes (Silvis, 1991)

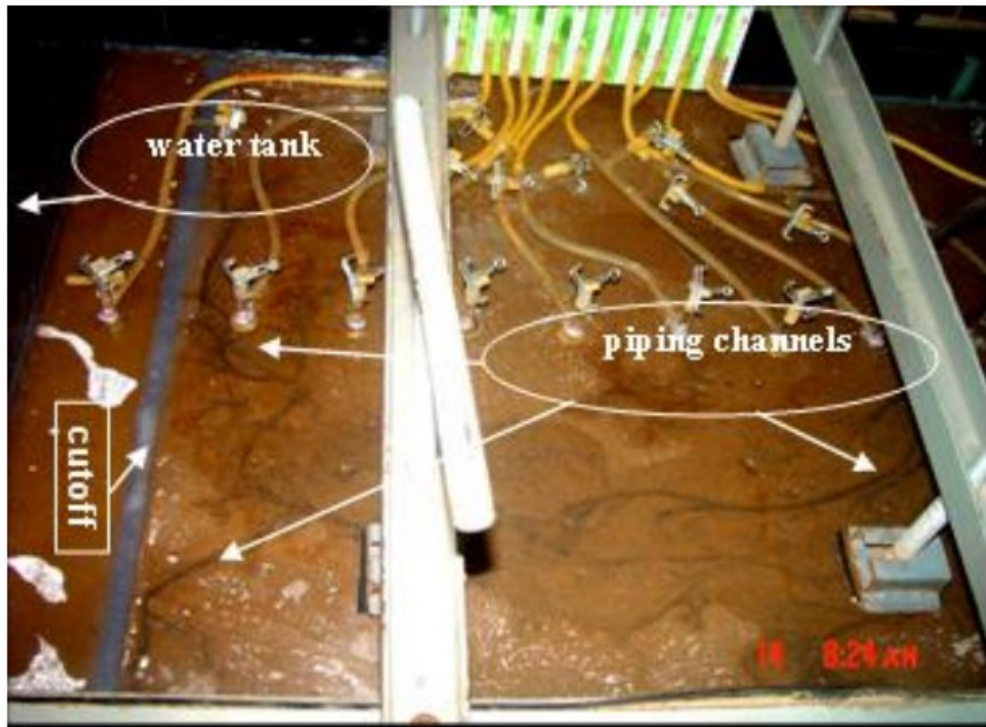
Figuur B-3 Sterk vertakt pijpstelsel bij een grote schaal experiment zonder scherm (Silvis, 1991)

Bovenstaande heeft betrekking op onderzoek dat is uitgevoerd zonder verticale blokkade, zoals een heavescherm. Een scherm zal het stroombeeld veranderen en dat zal ook invloed hebben op de

pijpvorming. Er zijn verschillende proeven uitgevoerd voor de situatie met een scherm en ook daar zijn verschillende pijpstelsels geobserveerd. In de kleine schaalproeven met een scherm, die zijn uitgevoerd als onderdeel van het onderzoek naar SoSEAL, is een vertakt pijpstelsel vanuit een enkele wel waargenomen. In het laatste geval ging het om proeven in een 10cm smalle bak. In onderzoek dat is uitgevoerd door Van den Ham is een T-vormig pijpstelsel waargenomen: De enkele erosiepijp groeide achter het scherm in lengterichting van het scherm verder (Figuur B-4). Vergelijkbare waarnemingen zijn beschreven door Ding e.a. [8] (Figuur B-8 en B-9).



Figuur B-4 T-vormig pijpstelsel bij een filterscherm in een kleine schaalproef door Van den Ham (Foto Deltares)



Figuur D-5 Pijpgroei loodrecht op stroomrichting achter het heavescherm in medium schaalproef Ding e.a. [8]

De vorm en omvang van het pijpstelsel heeft invloed op het drukverloop in de erosiepijpen. Bij toenemende stroomsnelheid in de erosiepijp zullen meer korrels uit de bodem en de wanden van de erosiepijp worden geërodeerd. Door het verdiepen en verbreden van de erosiepijp neemt de hydraulische weerstand af en daardoor neemt ook de gradiënt in de erosiepijp verder af. In onderzoeken bij de IJkdijk, de Deltagoot, en in medium-scale testen, zijn metingen verricht die een beeld geven van het drukverloop in de erosiepijp als functie van het specifiek debiet in de erosiepijp [9]. Deze metingen zijn vergeleken met modelberekeningen uitgaande van laminaire en turbulente stroming. De berekeningen zijn uitgevoerd voor zowel 3D erosiepijpen van verschillende afmetingen als voor een 2D gemodelleerde erosie“blanket”. Uit de berekeningen blijkt dat de gradiënten in de erosiepijp in een 3D situatie lager zijn dan in de 2D situatie. Dit komt omdat de stroming bij een 2D situatie meer verspreid kan worden, waardoor de 2D erosiepijp relatief ondiep blijft. De gemeten gradiënten liggen over het algemeen lager dan de berekende waarden voor een 2D erosiepijp uitgaande van de situatie waarbij erosiepijpgroei evenwicht heeft bereikt. De berekende gradiënten voor diverse 3D erosiepijp configuraties zijn over het algemeen aanzienlijk lager dan de gemeten waarden. Wanneer de gradiënt in de erosiepijp een belangrijk uitgangspunt is voor het ontwerp, bijvoorbeeld bij een grote afstand tussen wel en scherm, dan kunnen de bevindingen uit deze studie worden gebruikt om een gradiënt te schatten.

Knoop 6a. Hydraulische grondbreuk achter de wand

Hydraulische grondbreuk of hydraulic heave wordt vaak beschouwd door de gemiddelde gradiënt over de hoogte van het scherm te vergelijken met de kritische hydraulische gradient (verder genoemd critical hydraulic gradient). In vele publicaties is de critical hydraulic gradient i_c beschreven, zie intermezzo. De kritieke gradiënt heeft een eenvoudige relatie met de porositeit of met de relatieve dichtheid. Deze theoretische kritieke gradiënt wordt daarom ook wel als een state parameter beschouwd.

Kritieke gradiënt

De grondwaterstromingsgradiënt waarbij zand overgaat van een vast korrelskelet naar drijfzand wordt in de internationale literatuur de 'critical hydraulic gradient' genoemd. Deze kritieke gradiënt kan met cilinderproeven eenvoudig worden gemeten en de relatie en basis kengetallen van grond kan in verschillende vormen worden gepresenteerd:

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad (B-1)$$

of

$$i_c = (1 - n)(G_s - 1) \quad (B-2)$$

of

$$i_c = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (B-3)$$

of

$$i_c = \frac{(1 - n)(\gamma_k - \gamma_w)}{\gamma_w} \quad (B-4)$$

Gebruikte parameters in bovenstaande vergelijkingen:

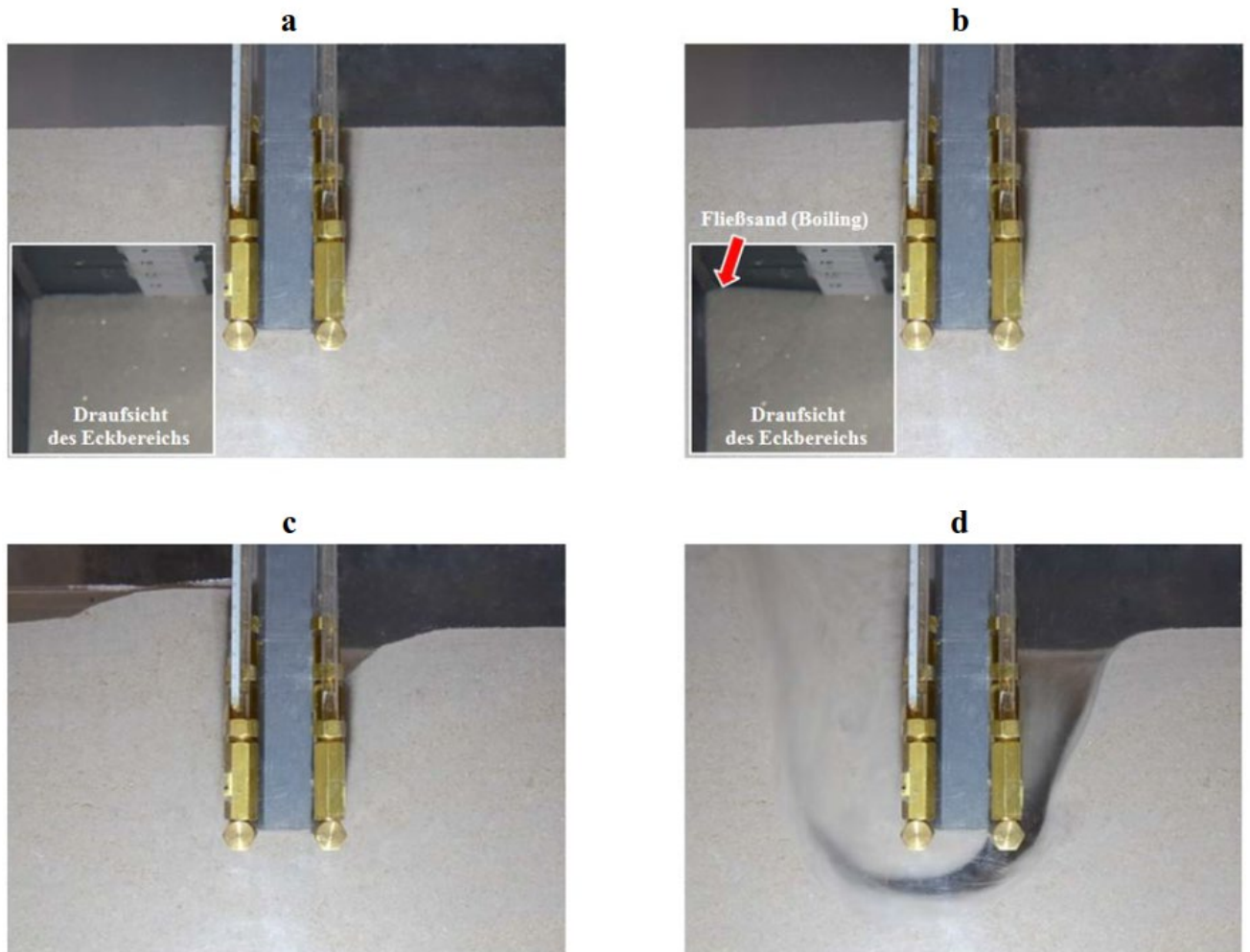
i_c	verticale stromingsgradiënt waarbij juist drijfzandconditie ontstaat	[-]
γ'	ondergedompelede volumegewicht grond	[kN/m ³]
γ_s	totaal volumegewicht grond	[kN/m ³]
γ_w	volumegewicht water	[kN/m ³]
γ_k	volumegewicht gewicht korrel	[kN/m ³]
G_s	specifiek gewicht korrel	[-]
n	porositeit	[-]
e	Poriëngetal (void ratio)	[-]

Bovenstaande relatie komt vrij exact overeen met de resultaten van cilinderproeven maar hoe werkt het op grotere schaal waarbij de gradiënt over de hoogte niet per definitie constant is en er slechts gedeeltelijke fluidisatie plaatsvindt?

Heave in experimenten met vrije uitstroom

Er is in het verleden en ook vrij recent kleine-schaal en medium-schaal experimenteel onderzoek gedaan naar het bezwijken als gevolg van onderloopsheid bij een gesteunde wand. In diverse literatuur is hierover gerapporteerd, o.a. in het proefschrift van Koltuk [10], onderzoek van Ding et al. [8], Tanaka et al. [11] en Achmus & Mansour [12]. Vrijwel al deze onderzoeken hebben met name betrekking op hydraulische heave zoals deze kan optreden bij bouwputten en waterkerende kunstwerken

op een zandondergrond en zijn uitgevoerd voor situatie met een vrije uitstroming aan de benedenstrooms zijde van het scherm. Alleen het onderzoek van Ding et al. is ook uitgevoerd met een geconcentreerde uitstroom waarmee het effect van een wel in een deklaag is gesimuleerd. Verder hebben Ding et al. en Achmus & Mansour proeven gedaan met schermen onder een waterkerende constructie met een horizontale vloer. Hierbij heeft Ding et al. ook gevarieerd met de locatie van het scherm. In deze onderzoeken zijn destijds gangbare ontwerpregels voor heave gevalideerd.



Figuur B-6 Waargenomen stadia van heave bij experimenteel onderzoek met fijn en matig fijn zand [10]

Uit onderzoeken voor de situatie met vrije uitstroom blijkt dat onderloopsheid vrij plotseling kan optreden wanneer het zand achter de wand aan de benedenstroomse zijde van het scherm over de volledige hoogte van het scherm is gefluidiseerd. In de onderzoeken [8] en [10] wordt beschreven dat eerst een erosietrog aan de bovenstroomse zijde van het scherm wordt waargenomen die gepaard gaat met sterke toename van zandtransport en dat hydraulische heave optreedt bij verder verhogen van het verval. Bij hydraulische heave komt het zand aan de benedenstroomse zijde omhoog. Deze situatie gaat gepaard met doorgaande erosie en collapse. De gradiënt waarbij plotseling grootschalig zandtransport van de instabiele grond aan weerszijden van het scherm optreedt, wordt in dat geval goed benaderd door een eenvoudige beschouwing van het verticaal krachtenevenwicht rond een

denkbeeldige rechthoekige moot grond achter het scherm. Deze benadering is als eerste door Terzaghi afgeleid op basis van onderzoek en waarnemingen in de periode van 1919 tot 1922 [13].

Achmus & Mansour [12] hebben experimenten uitgevoerd waarbij de kritieke uittredegradiënt benedenstrooms van het scherm is bepaald bij verschillende dichtheden en meerdere lagen. De uittredegradiënt waarbij hydraulic heave achter het scherm optrad was afhankelijk van de dichtheid en de dikte van het watervoerende zandpakket en varieerde van 0,5 à 0,7 bij los zand en 0,6 à 0,9 bij vast zand, zie *Figuur B-7*.

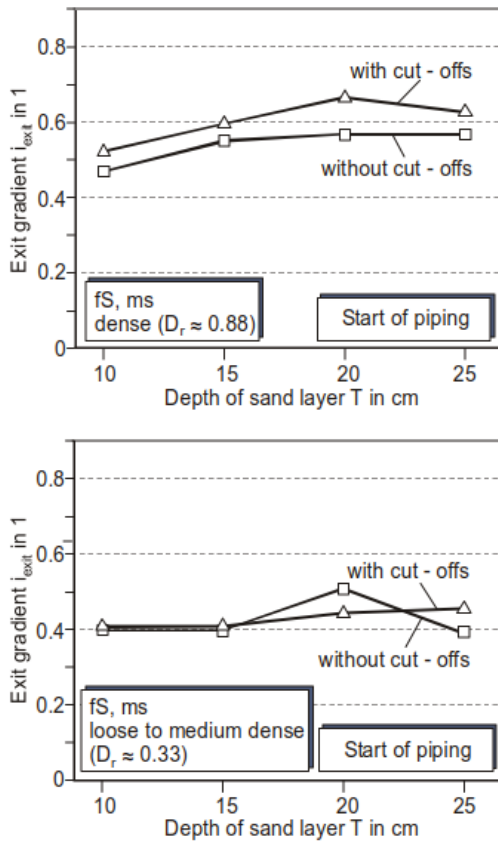


Figure 9. Exit gradients at the start of piping determined for dense sand (top) and for loose to medium dense sand (bottom)

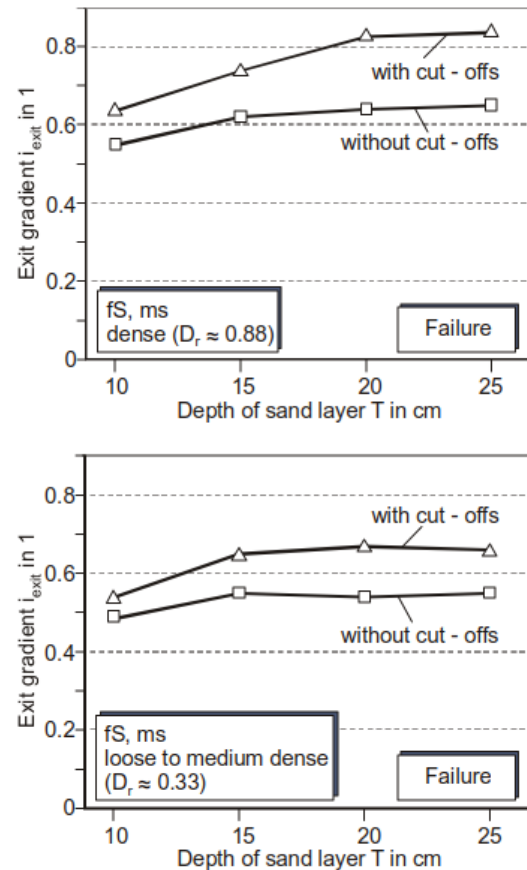
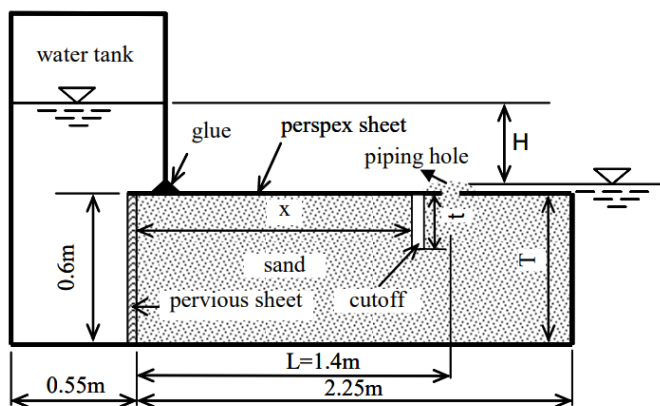


Figure 10. Exit gradients at ultimate failure determined for dense sand (top) and for loose to medium dense sand (bottom)

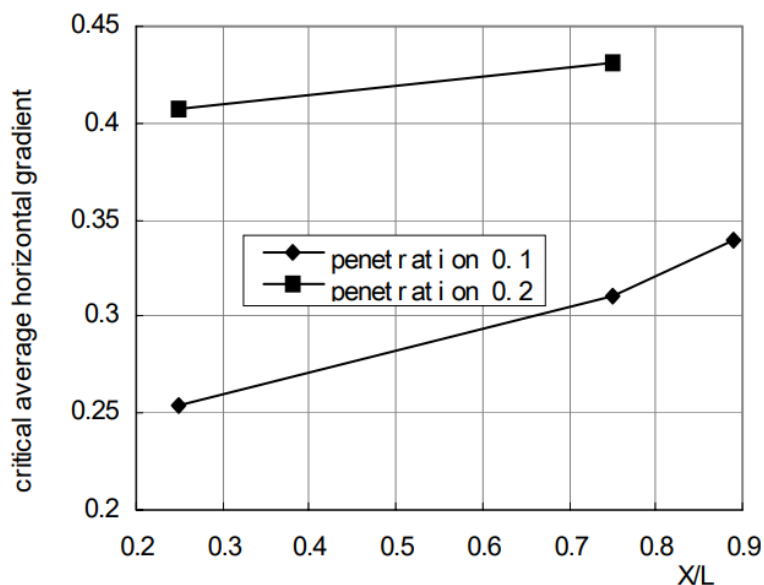
Figuur B-7 Gradiënt bij begin van piping (links) en bij falen (rechts) bij verschillende dichtheden, experimenteel onderzoek Achmus en Mansour [12]. De experimenten zijn uitgevoerd met en zonder scherm (cut-off). Zowel in de situatie met als zonder scherm was er nog een constructie met enige breedte aanwezig. Het zand aan de benedenstroomse zijde is bewust beschadigd met een naald. Dit is een mogelijke oorzaak voor de lage waarde van de gradiënt. De exit gradiënt betreft hier een gemiddelde gradiënt over de vertikaal aan de uitstroom zijde, het is dus geen lokale exit gradiënt.

Heave bij geconcentreerde uitstroom (beschikbaar onderzoek)

Aangenomen wordt dat er in de situatie van een scherm onder een deklaag iets vergelijkbaars kan optreden als is waargenomen bij de onderloopsheidproeven zonder deklaag. Ding e.a. [8] heeft medium schaal onderzoek uitgevoerd naar hydraulische heave waarbij de situatie van een deklaag en dijk is gesimuleerd door een perspex plaat met een gat aan de benedenstroomse zijde van het heavescherm. De beschrijving van de proces van hydraulische heave en de processen die daaraan voorafgaan komen goed overeen met de beschrijvingen van hydraulische heave bij wanden met vrije uitstroom. In Ding is geen vergelijking gemaakt tussen de situatie bij vrije uitstroom en geconcentreerde uitstroom. In het onderzoek is gevarieerd met de diepte en positie van het scherm. Een scherm nabij het uitstroompunt bleek aanmerkelijk effectiever, zie Figuur B-9.



Figuur B-8 Opstelling medium schaal testen voor situatie met geconcentreerde uitstroom. Onderzoek Ding e.a. [8]

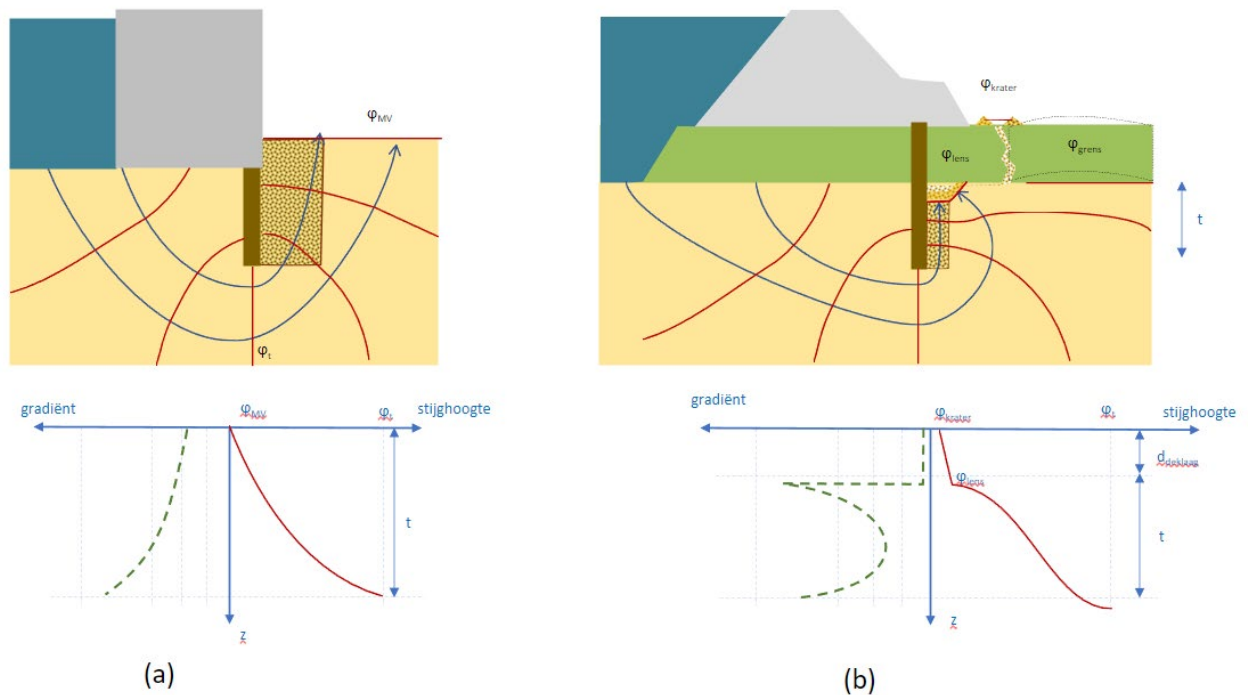


Figuur B-9 Effect van de positie van het scherm, kleine waarde van X/L betekent dat scherm ver van de wel af zit. De penetratie ratio is het verhoudingsgetal tussen de diepte van het scherm en de diepte van de watervoerende laag. Onderzoek Ding e.a. [8]

Heave bij geconcentreerde uitstroom (op basis van beschouwing)

Er zijn een aantal belangrijke verschillen tussen de situatie met vrije uitstroom en de situatie met geconcentreerde uitstroom naar een open ruimte onder een deklaag zoals een erosielens of erosiepijp, zie Figuur B-10:

- Bij de situatie van geconcentreerde uitstroom (figuur b) is er bij toenemend verval sprake van een lokaal hoge gradiënt ter plaatse van de uitstroomopening. Deze hoge lokale gradiënt zal zorgen voor initiatie van lokale heave of erosie waardoor er een erosielens of gefluidiseerde zone kan ontstaan rond de uitstroomopening. Bij een vrije uitstroom (figuur a) is de gradiënt gelijkmatiger verdeeld over de hoogte van het scherm, met uitzondering van het onderste deel van het scherm waar de gradiënt hoger is vanwege de radiale stroming rond de teen.
- Het al dan niet aanwezig zijn van een deklaag heeft een sterk effect op de weerstand tegen hydraulische heave. Bij een vrije uitstroom (figuur a) is geen deklaag aanwezig en zal er bij een toenemend verval op een gegeven moment een situatie ontstaan waarbij de korrelspanning over de gehele hoogte van het scherm naar nul nadert en er een groot volume aan grond achter het scherm in een drijfzandconditie raakt. Dit is in vele experimenten aangetroffen. Terzaghi heeft uit zijn experimenten en waarnemingen van hydraulische heave geconcludeerd dat de breedte van deze "heave zone" (de zone waarover het zand omhoog kwam achter de wand) ongeveer gelijk is aan de helft van de diepte waarover heave optrad [13]. In de situatie van geconcentreerde uitstroom met een deklaag (figuur b) zorgt de deklaag voor een extra weerstand tegen heave. In de beginsituatie zal een groot deel van het volume aan de grond achter de wand als gevolg van het gewicht van de deklaag een hogere korrelspanning bezitten en daarmee is de weerstand tegen hydraulische heave groter dan bij vrije uitstroom zonder deklaag. Alleen direct onder de pijp is de korrelspanning nul. Met toenemende diepte onder de pijp zal het effect van de korrelspanning de omgeving van de pipe groter worden. Dit zal zorgen voor toenemende weerstand tegen fluidisatie.
- Een ander verschil dat ontstaat door de aanwezigheid van een deklaag (figuur b) is de stroming van water door de erosiepijp of het pijpstelsel onder de deklaag. De druk in de erosiepijp is lastig te voorspellen als gevolg van een groot aantal factoren die de invloed hebben op de processen zoals beschreven in de knopen t/m 5. Hierdoor is deze randvoorwaarde in de tijd en gedurende de verschillende stadia van het begin van piping niet constant. Dit zal vertragend kunnen werken op het proces van hydraulische heave. Deze processen moeten in tijd en ruimte worden beschouwd.



Figuur B-10 Vergelijk van het stroombeeld voor de situatie met vrije uitstroom zonder deklaag (a) met de situatie van geconcentreerde uitstroom naar een erosie lens onder de deklaag die in verbinding staat met een wel (b)

Bovenstaande beschouwing over het proces bij geconcentreerde uitstroom is gebaseerd op een grondmechanische beschouwing en beperkt beschikbaar experimenteel onderzoek. DIV heeft een onderzoeksvoorstel ingediend om de hypothesen te toetsen met experimenteel onderzoek.

Knoop 6b. Lokale voortschrijdende fluïdisatie

Bovenstaande heeft steeds betrekking op hydraulische grondbreuk (hydraulic heave) van een groot volume grond dat opeens in drijfzand conditie raakt. In theorie is ook een lokaal voortschrijdend proces van fluïdisatie van boven naar beneden denkbaar. Dit proces is niet aangetroffen in proeven maar is ook moeilijk waar te nemen omdat bij proeven vaak niet in de ondergrond gekeken kan worden: het zicht is beperkt tot wat je door een perspex plaat kunt zien. Er zijn gedocumenteerde proeven waar wel naar bewegingen in de ondergrond is gekeken, Koltuk [10]. In deze proeven, die betrekking hadden op vrije uitstroming, is waargenomen dat de vervormingen van onder naar boven migreerden. Bij proeven met geconcentreerde uitstroming is waargenomen dat het zandtransport door de wel en het pijpstelsel toeneemt voordat hydraulische heave optreedt. De trog aan de bovenstroomse zijde van het scherm ontstaat ook al voordat de “blowout” (op eens bezwijken door hydraulische grondbreuk) optreedt. Mogelijk duidt dit op het begin van onderloopsheid voor het stadium van bezwijken. Uit proefdocumentatie bleek dat het stadium van trogvorming en bezwijken echter vrij dicht achter elkaar plaatsvinden. Daarom wordt in deze publicatie geen onderscheid gemaakt tussen deze verschijnselen.

Knoop 6c. Erosie van individuele korrels zonder fluïdisatie of grondbreuk

Lokale interne erosie bij een heavescherm is in Nederlandse gronden minder waarschijnlijk.

Knoop 7 t/m 10. Vervolgprocessen

Knoop 7: Er treedt hydraulische kortsluiting op: Er ontwikkelt een kanaal onder de wand door en verder richting het intredepunt. In veel gevallen kan ook bezwijken optreden van het binnenbeloop van de dijk als gevolg van het ontstaan van drijfzand. In dat geval vervolgt het faalpad direct met knoop 9 en knoop 10.

Knoop 8: Ruiming van de erosiepijp onder en langs de wand. Stroomsnelheid in de erosiepijp neemt toe. Het ruimingsproces ontwikkelt zich in de richting van de stroming: er erodeert steeds meer grond waardoor de erosiepijp wordt verbreed en verdiept. Vanwege de hogere gemiddelde gradiënt over de waterkering dan bij een groene dijk zal dit proces naar verwachting sneller optreden dan bij een groene dijk.

Knoop 9. Kruinverlaging, overslag/overlopen dijk, erosie talud, verdere kruinverlaging. Door verbreding van de erosiepijp zakt de kruin, dit leidt tot overslag/overlopen wat weer leidt tot erosie en verdere kruinverlaging en/of instabiliteit van de dijk/bekleding/constructieve dijkonderdelen.

Knoop 10. Geen effectieve maatregelen, overslag, erosie, bresgroei, overstroming. De snelheid van de stroming over de kruin en onder de wand is te hoog om effectieve maatregelen in te zetten. De bres groeit en de polder stroomt onder.

Referenties bij bijlage B

- [1] Deltares, „Onderzoeksrapportage Zandmeevoerende Wellen, 1202123-003,” 2012.
- [2] Deltares, „Het pipingproces in stripvorm,” 2013.
- [3] V. Van Beek, A. Bezuijen en H. Sellmeijer, „Backward erosion piping (chapter 3),” in *Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees*, 2013.
- [4] Deltares, „Soilmix als heavescherm dijkversterking GoWa - Fase 1 Voorbereidingsfase Bureaustudie,” 2022a.
- [5] J. Garai, „Hydraulic failure by heave and piping,” 2016.
- [6] T. Baldock en e. al, „Settling velocity of sediments at high concentrations,” *Coastal Engineering*, 2003.
- [7] B. A. Robbins en e. al, „Field measurements of sand boil hydraulics,” 2019.
- [8] L. Y. Q. S. D. Ding, „Experimental studies on the seepage control effects of suspended cutoffs in dike foundation,” in *4th International Symposium on Flood Defence*, Toronto, Canada, 2008.
- [9] V. Van Beek, „Coarse and barrier - Pipe gradient analysis,” 2022.
- [10] S. Koltuk, „Untersuchungen zum hydraulischen Grundbruch in Baugruben in nichtbindigen Böden - Dissertation,” 2016.
- [11] T. Tanaka en A. Verruijt, „Seepage failure of sand behind sheet piles - the mechanism and practical approach to analyze,” in *Soils and foundations*, Japanese Geotechnical Society, 1999, pp. 27-35.
- [12] M. Achmus en B. Mansour, „Untersuchungen zum Nachweis gegen Erosionsgrundbruch an Stauwerken,” Hannover, 2006.
- [13] K. Terzaghi, R. Peck en G. Mesri, *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 1996 (3rd edition).
- [14] Lane en ACSE, „Security from under-seepage masonry dams on earth foundations,” 1935.
- [15] RWS Bouwdienst, *Ontwerpen van schutsluizen*, Rijkswaterstaat, 2000.
- [16] C. C731, *The International Levee Handbook*, London, 2013.
- [17] Mansur, „Investigation of underseepage and its control - Lower Mississippi River Levees, Technical Memorandum No. 3-424,” Waterways Experimental Station, Vicksburg, Mississippi, 1959.
- [18] J. Pol, „Time-dependent development of backward erosion piping - dissertatie,” TU Delft, 2022.