

POVM Opbarsten

Cluster Rekentechnieken



**Authors: André van Hoven,
Aron Noordam, Ane Wiersma**
Date: juli 2019

Version: 1.0

Titel **Projectnummer**
POVM Opbarsten 11201267-002

Trefwoorden

Opbarsten, opdrijven, macrostabiliteit binnenwaarts, dijkversterking, HWBP, POV Macrostabiliteit, eindige elementenmethode, deklaag

Samenvatting

Bij het opbarsten van de deklaag in relatie tot macrostabiliteit binnenwaarts wordt gevreesd voor het volledig verloren gaan van de steun die de deklaag biedt aan het dijktaalud, door het uitknikken van de deklaag. Dit kan gebeuren bij een hoge buitenwaterstand, waardoor de waterdruk in het onderliggende zand toeneemt, de deklaag aanvankelijk opdrukt en daarna laat opbarsten. De vrees voor opbarsten wordt momenteel in rekening gebracht door ervan uit te gaan dat de deklaag geen enkele schuifsterkte meer heeft in het geval van een opdrukveiligheid van 1,2 (-) of lager en een deklaagdikte van 4 m of minder. Deze methode berust op expert judgement en is niet onderbouwd. Algemeen wordt echter gedacht dat de methode conservatief is en leidt tot een overgedimensioneerd ontwerp, zoals te lezen in [1]. Het onderzoek naar opbarsten heeft als doel om het begrip in het mechanisme te vergroten en daarmee het veronderstelde conservatisme onderbouwd te kunnen aanscherpen.

In een eerdere fase van het onderzoek naar opbarsten is een literatuuronderzoek uitgevoerd, is conceptueel naar het mechanisme gekeken, is een consequentieanalyse uitgevoerd en een voorstel gegeven voor nader onderzoek [2], [3], [4] en [5]. Uit de consequentieanalyse bleek voldoende belang om het onderzoek naar opbarsten voor te zetten met onderhavige stap, het modelleren van het mechanisme. Hierbij zijn drie wegen bewandeld:

1. Numeriek modelleren van het opbarsten van de deklaag, zie separate rapportage [9].
2. Numeriek modelleren van de grondwaterstroming bij aanwezigheid van een opbarstkanaal of scheur in samenspraak met deskundigen op het gebied van piping (zie Bijlage A).
3. Afstemming met deskundigen op het gebied van piping en een check van laagdiktes in de bestaande database van ruim 494 bekende wellen in het rivierengebied (zie Bijlage B).

Ad 1. Voor het eerst is het gelukt om het opbarsten van de deklaag te modelleren. Opbarsten gebeurde bij een deklaagdikte van 1m en een relatief slappe deklaag. Bij een deklaag van 2m en 3m trad een niet voorzien mechanisme op waarbij de deklaag als een slappe veer indrukt, zonder te bezwijken, maar waardoor het dijktaalud wel afschuift. De resultaten van deze berekeningen liggen tussen de resultaten van klassieke glijvlakberekeningen met en zonder sterkte van de deklaag, hetgeen een indicatie geeft dat een volledige sterktereductie te conservatief is, maar dat het volledig intact veronderstellen van de deklaag te optimistisch is. De variantenstudie is te beperkt geweest om op basis hiervan een voorstel te doen voor aanscherping van de rekenregels. Daarom wordt aanbevolen om de modelstudie verder uit te breiden. Naast het uitbreiden van de studie wordt eveneens aanbevolen om met behulp van een experiment, ofwel op prototype schaal ofwel grootschalig laboratoriumonderzoek of geo-centrifuge de proef op de som te nemen en het model te valideren.

Ad 2. Een niet onder punt 1 meegenomen aspect is dat lokaal opbarsten van de deklaag, bijvoorbeeld bij een sloot, leidt tot drukverlies in het zandpakket. Er zijn talloze waarnemingen van zandmeevoerende wellen in het bovenrivierengebied bij hoogwater, een indicatie van (lokaal)

Titel **Projectnummer**
POVM Opbarsten 11201267-002

opbarsten, echter geen waarnemingen van het opbarsten op de schaal van een afschuiving. Mogelijk dat lokaal opbarsten structureel leidt tot drukverlies, waardoor het opbarsten beperkt blijft tot een lengteschaal kleiner dan de lengteschaal van een afschuiving. In dat geval is een volledige reductie van de deklaagsterkte onterecht. Er is een variatiestudie verricht met D-GeoFlow, waarin dit effect is aangetoond. Ook werd echter aangetoond dat indien er in het opbarstkanaal of scheur een zandsuspensie omhoog komt, het begin van piping, het gat zich als het ware verstopt en het gunstige effect van drukverlies daarmee ook verloren gaat. Aanbevolen wordt om de equivalente doorlatendheid van de perforatie met daarin een zandsuspensie beter in te kaderen met behulp van kennis uit het pipingonderzoek en daarnaast het effect mee te modelleren in Diana. Dit zou kunnen door de gescheurde zones in de deklaag een hogere doorlatendheid te geven.

Ad3. In het pipingonderzoek is een database opgesteld van 494 zandmeevoerende wellen. Deze is gecombineerd met een ondergrondmodel, om te kijken naar de deklaagdikte. Het optreden van een zandmeevoerende wel is namelijk een sterke aanwijzing dat (lokaal) opbarsten hier is opgetreden. Uit de studie blijkt dat in 10% van de gevallen de deklaagdikte groter was dan de rekenwaarde zoals aangehouden bij macrostabiliteit, namelijk 4m. Dit zou kunnen betekenen dat 4 m een onveilige rekenwaarde is, in elk geval niet voor opbarsten op lokale schaal. Bij de analyse hoort echter de kanttekening dat er zowel in de database als in het bodemmodel onnauwkeurigheden zitten die van invloed kunnen zijn op deze 10%. Het verdient daarom de aanbeveling om de nauwkeurigheid te vergroten door het toevoegen van informatie aan het ondergrondmodel. Indien hierbij gebruik wordt gemaakt van lokaal uit te voeren grondonderzoek, dan kan een dergelijke case worden gebruikt als validatiemateriaal voor de onder punt 1 aangeduide numerieke analyses.

Naast het ontsluiten van de hierboven samengevatte resultaten is in de onderhavige rapportage ten slotte ook het verband gelegd tussen de uitgevoerde activiteiten en het totale 'faaltraject' voor macrostabiliteit binnenwaarts.

Versie	Datum	Auteurs	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
0.1	okt. 2018	ir. A. van Hoven A.F. Noordam dr. A.P. Wiersma		ir. M.A.T. Visschedijk		ir. L. Voogt	
1.0	juli 2019	ir. A. van Hoven A.F. Noordam dr. A.P. Wiersma	<i>AA</i> <i>AFN</i> <i>APW</i>	ir. M.A.T. Visschedijk	<i>202</i>	ir. L. Voogt	<i>LV</i>

Status
definitief

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Kader	1
1.2	Achtergrond	1
1.3	Onderzoeksstappen	1
2	Fenomenologische beschrijving falen dijk bij opbarsten en plaatsing onderzoek in faaltraject	3
2.1	Inleiding	3
2.2	Fenomenologische beschrijving macrostabiliteit in het WBI2017	3
2.3	Nadere uitwerking met opdrijven	4
2.4	Plaatsing van het uitgevoerde onderzoek in het faaltraject	7
3	Conclusies en aanbevelingen	9
3.1	Conclusies en aanbevelingen invloed lokale lekkage deklaag op waterdruk in zandlaag	9
3.2	Conclusies en aanbevelingen ten aanzien van de database van wellen en relatie met deklaagdikte	10
3.3	Conclusies en aanbevelingen ten aanzien van het modelleren van opbarsten met FEM	10
	Referenties	12
	Bijlagen	
A	Effect lekkage deklaag door bestaande wellen of scheuren als gevolg van lokaal opbarsten op de waterdruk in de zandlaag	A-1
A.1	Modellering	A-2
A.1.1	Geometrie en randvoorwaarden	A-2
A.1.2	Theorie stromingsmodel	A-4
A.1.3	Theorie doorlatendheid in het opbarstkanaal	A-5
A.1.4	Theorie opbarstlengte	A-8
A.1.5	Theorie invloedssfeer dijk	A-9
A.1.6	Parameters	A-9
A.2	Scenario's perforatie deklaag	A-9
A.2.1	Resultaten stijghoogteverloop en uitstroom	A-10
A.2.2	Invloed in rekening brengen van turbulente stroming	A-12
A.2.3	Stroomsnelheid en stroomrichting	A-12
A.3	Scenario's zandlaag	A-13
A.3.1	Resultaten stijghoogteverloop en uitstroom	A-14
A.4	Invloed randvoorwaarden	A-18
A.5	3D-stroming	A-20
A.5.1	Resultaten	A-20
A.5.2	Turbulente stroming	A-23
A.5.3	Vergelijking met 2D-stromingsberekeningen	A-23
A.6	Conclusies	A-24



8 juli 2019, versie 1.0, definitief

A.7	Literatuur	A-24
B	Database deklaagdikte bij wellen	B-1
B.1	Inleiding	B-1
B.2	Analyse	B-1
B.3	Discussie	B-9
B.4	Conclusie	B-11
B.5	Referentie	B-11

1 Inleiding

1.1 Kader

In het kader van de POV Macrostabiliiteit (POV: Project Overstijgende Verkenning) is onderzoek gedaan naar het opbarsten van de deklaag in relatie tot de binnenwaartse macrostabiliiteit. Het onderzoek is uitgevoerd onder het cluster Rekentechnieken.

1.2 Achtergrond

Bij het opbarsten van de deklaag in relatie tot macrostabiliiteit binnenwaarts wordt gevreesd voor het volledig verloren gaan van de steun die de deklaag biedt aan het dijktaalud, door het uitknikken van de deklaag. Dit kan gebeuren bij een hoge buitenwaterstand, waardoor de waterdruk in het onderliggende zand toeneemt, de deklaag aanvankelijk opdrukt en daarna laat opbarsten.

De vrees voor opbarsten wordt momenteel in rekening gebracht door in het geval van een opdrukveiligheid van 1,2 (-) of lager en een deklaagdikte van 4 m of minder ervan uit te gaan dat de deklaag geen enkele schuifsterkte meer heeft. Alleen het gewicht van de deklaag geeft nog steun aan het dijktaalud. Deze methode berust op expert judgement en is niet onderbouwd. Algemeen wordt echter gedacht dat de methode conservatief is en leidt tot een overgedimensioneerd ontwerp, zoals te lezen in [1].

De doelstelling van het onderzoek naar opbarsten is een beter begrip van het mechanisme te krijgen en het op basis daarvan beperken van het verwachte conservatisme in de huidige methode. In deze fase wordt getracht het begrip te vergroten door modellering. Daarnaast is uitdrukkelijk gevraagd naar afstemming met deskundigen op het gebied van piping.

1.3 Onderzoeksstappen

In een eerdere fase is een literatuuronderzoek uitgevoerd, is conceptueel naar het mechanisme gekeken, is een consequentieanalyse uitgevoerd en een voorstel gegeven voor nader onderzoek [2], [3], [4] en [5]. Uit de consequentieanalyse bleek voldoende belang om het onderzoek naar opbarsten voor te zetten met onderhavige stap, het modelleren van het mechanisme. Hierbij zijn drie wegen bewandeld:

1. Numeriek modelleren van het opbarsten van de deklaag, zie rapportage [9].
2. Numeriek modelleren van de grondwaterstroming bij aanwezigheid van een opbarstkanaal of scheur in samenspraak met deskundigen op het gebied van piping (zie Bijlage A).
3. Afstemming met deskundigen op het gebied van piping en een check van laagdiktes in de bestaande database van ruim 450 bekende wellen in het rivierengebied (zie Bijlage B).

Het was aanvankelijk de bedoeling om op basis van het modelleren van opbarsten te komen tot een voorstel tot wijziging van de methode hoe om te gaan met opbarsten. Gaande het onderzoek is gebleken dat veel inspanning nodig was om het mechanisme te vangen in een model, hetgeen overigens binnen dit project is gelukt en heeft geleid tot meer begrip van het mechanisme. De met het model vervolgens uitgevoerde variatiestudie was echter te beperkt van omvang en complexiteit om tot generieke conclusies te komen. Hierop is besloten de voorziene implementatie-stap op te schorten en een plan te maken voor het uitbreiden van de



8 juli 2019, versie 1.0, definitief

variantenstudie. Het plan maakt geen onderdeel uit van dit document en zal later apart worden geleverd.

Onderhavige rapportage is opgesteld om de drie activiteiten, zoals gerapporteerd in [9], bijlage A en bijlage B te ontsluiten en te plaatsen in het faaltraject voor macrostabiliteit binnenwaarts.

2 Fenomenologische beschrijving falen dijk bij opbarsten en plaatsing onderzoek in faaltraject

2.1 Inleiding

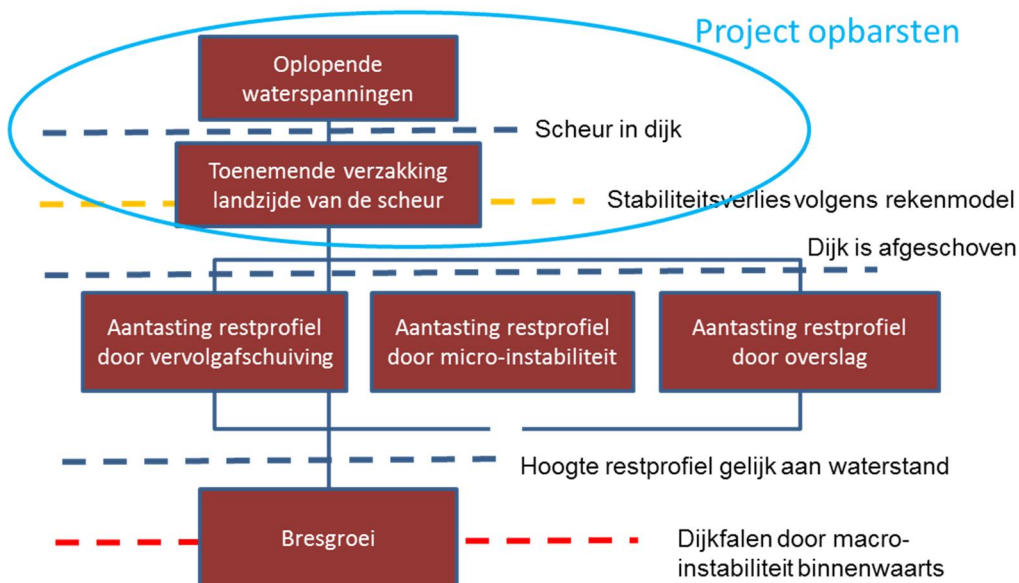
Het bezwijken van het binnentalud van een dijk, ingeleid door opbarsten van de deklaag, valt onder het faalmechanisme macrostabiliteit. In het WBI is voor macrostabiliteit binnenwaarts een fenomenologische beschrijving opgenomen die ingaat op de processen tot een doorbraak en hoe met deze processen wordt omgegaan bij de veiligheidsbeoordeling [6]. In dit hoofdstuk wordt de fenomenologische beschrijving van macro instabiliteit verder uitgewerkt voor het specifieke geval van een taludinstabiliteit bij het opbarsten van de deklaag.

Het doel van de uitwerking is om inzichtelijk te maken welke processen nodig zijn voor het optreden van een taludinstabiliteit als gevolg van opbarsten van de deklaag, welke uiteindelijk leidt tot een overstroming.

Binnen het in deze oplegnotitie besproken project worden alleen zogenaamde groene dijken beschouwd, dus zonder damwanden, diepwanden, verankeringen of deuvels. Binnen dit project bestaat de standaard grondopbouw aan de binnenzijde van de dijk verder altijd uit een deklaag van klei en/of veen met variabele dikte, op een watervoerende zandlaag.

2.2 Fenomenologische beschrijving macrostabiliteit in het WBI2017

In de fenomenologische beschrijving binnen het WBI worden verschillende gebeurtenissen onderscheiden die leiden tot falen van de dijk. De opeenvolging van deze gebeurtenissen vormt het zo genoemde faaltraject, zoals getoond in Figuur 2.1.



Figuur 2.1 Gebeurtenissen leidend tot falen van de dijk na binnenwaartse macro-instabiliteit uit Fenomenologische beschrijving in het WBI [6]

De in de voorliggende notitie behandelde studie richt zich enkel op de bovenste twee cellen van Figuur 2.1. Dat wil zeggen: de oplopende waterspanningen, het optreden van scheuren bij

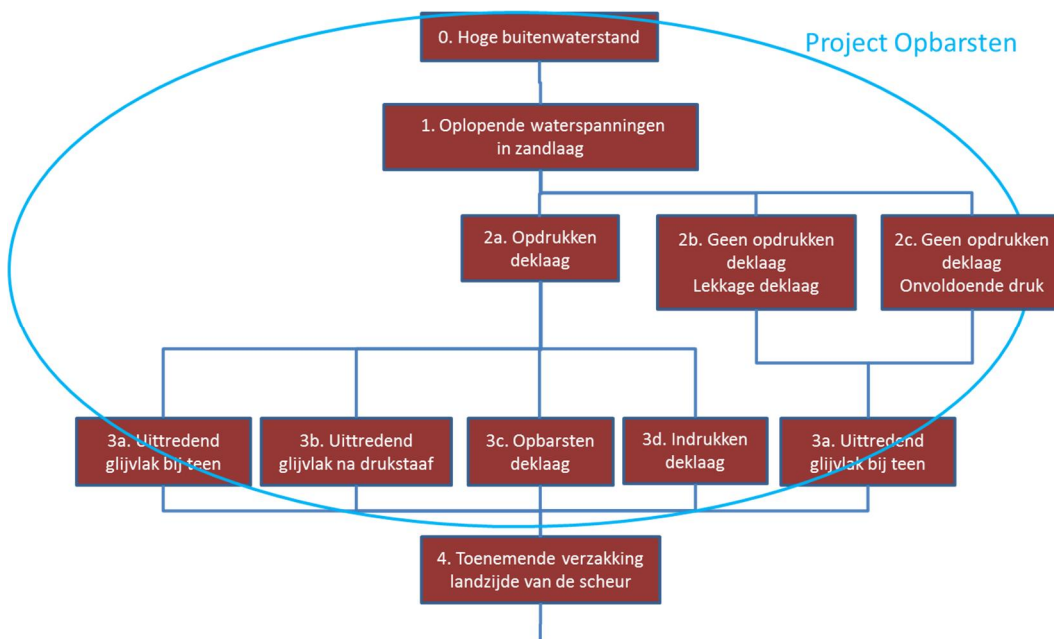
het intredepunt van de afschuiving, bijvoorbeeld in de kruin van de dijk, en de toenemende verzakking aan de landzijde van de scheur. De fenomenologische beschrijving maakt hierbij onderscheid tussen:

- Afschuiven, met een volledig ontwikkeld glijvlak.
- een glijvlak dat ‘doodloopt’ op het scheidingsvlak tussen de deklaag en het zandpakket.

In het tweede geval kan een verzakking optreden van de grondmoot aan de binnenkant van het intredepunt als gevolg van vervorming van de deklaag. Er wordt niet gedefinieerd of deze vervorming een gevolg is van een uittredend glijvlak, uitknikken van de deklaag, dan wel enkel vervorming van de deklaag zonder dat er sprake is van bezwijken door een glijvlak.

2.3 Nadere uitwerking met opdrijven

De bovenste twee cellen in Figuur 2.1 zijn voor het geval van hoge waterspanningen in de zandlaag nader uitgewerkt in Figuur 2.2. Het resterende deel van de gebeurtenissen leidend tot falen is hierin niet herhaald.



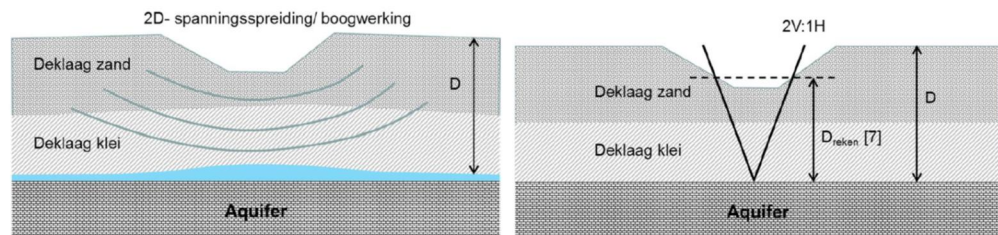
Figuur 2.2 Uitwerking gebeurtenissen van hoge buitenwaterstand tot toenemende verzakking landzijde van de scheur (gebeurtenissen tot falen in Figuur 2.1)

Bij het oplopen van de waterspanningen in de zandlaag wordt onderscheid gemaakt in drie scenario's. Het onderscheid wordt gemaakt, omdat elk van de scenario's leidt tot ander gedrag van de deklaag bij een hoge buitenwaterstand.

- 2a. De waterdruk wordt over enige lengte in het achterland (nagenoeg) gelijk aan het gewicht van de deklaag, waardoor deze wordt opgedrukt of de effectieve spanning tussen de deklaag en het zand zodanig vermindert dat de deklaag over het zand kan slippen.
- 2b. De waterdruk in de zandlaag loopt op, maar door lekkage door de deklaag is geen sprake van opdrukken van de laag. Deze lekkage kan komen door:
 - i. Lokale lekkage door reeds aanwezige wellen.

8 juli 2019, versie 1.0, definitief

- ii. Lokale lekkage door lokaal opbarsten van de deklaag bij bijvoorbeeld een langssloot of een kopsloot. Bij relatief ondiepe en smalle sloten kan de invloed hiervan worden verwaarloosd bij de analyse van opdrijven. Dit kan worden bepaald met de geometrische beoordeling zoals beschreven in [8] en geïllustreerd door Figuur 2.3.



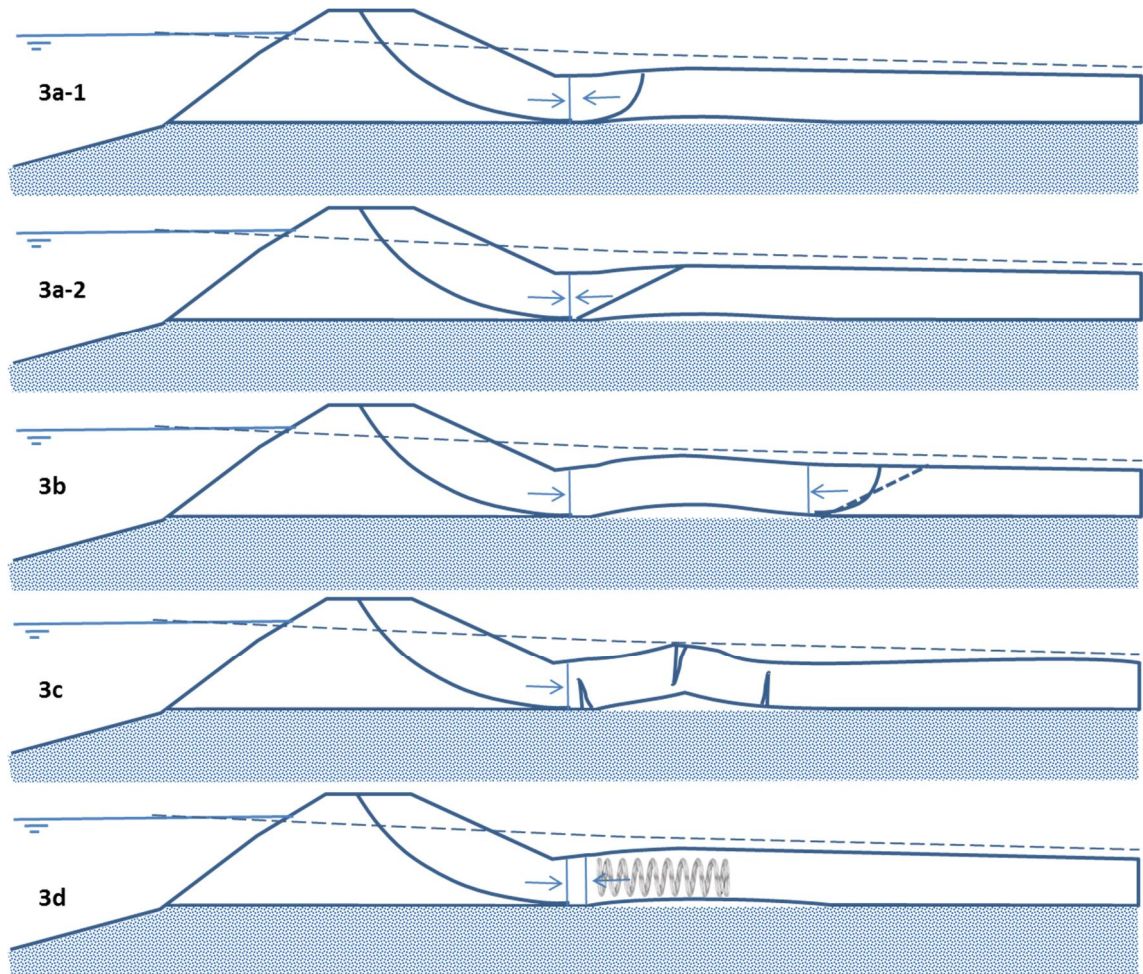
Figuur 2.3 Spanningsverspreiding bij een sloot of greppel, links conceptueel, rechts rekenregel uit [8]

- iii. Een hoge bulkdoorlatendheid van de deklaag. Indien de doorlatendheid gelijk is of hoger is dan die van het zandpakket, dan zal er zich onder de deklaag geen druk opbouwen. Een hoge bulkdoorlatendheid van de deklaag kan worden veroorzaakt door bodemstructuurvormende processen, indien de deklaag onder dagelijkse omstandigheden of langere droge perioden boven het freatisch vlak ligt. Vooral in het bovenrivierengebied komt dit voor.
- 2c. Bij een kortdurend hoogwater, bijvoorbeeld in stormgedreven watersystemen, in combinatie met relatief slecht doorlatende zandlagen al dan niet in combinatie met relatief dikke en of zware deklagen, blijft de waterspanning lager dan het gewicht van de deklaag en treedt geen opdrukken van de deklaag op.

De onderhavige studie heeft zich gericht op het geval 2a. Bij geval 2c. kan worden volstaan met gangbare glijvlakmodellen, met een uittredend glijvlak binnendijs door de deklaag. Geval 2b. is een complexere vorm van 2a., welke in de variantenstudie [9] nog niet aan bod is gekomen.

Gegeven het geval 2a. (opdrukken van de deklaag), kan er op verschillende manieren een 'toenemende verzakking landzijde van de scheur' (bij het intredepunt van het glijvlak) optreden, welke uiteindelijk leidt tot een overstrooming. De steun die de deklaag biedt kan namelijk op verschillende manieren tekort schieten. Dit is schetsmatig weergegeven in Figuur 2.4.

8 juli 2019, versie 1.0, definitief



Figuur 2.4 Schetsmatige manieren waarop de steun vanuit de deklaag te kort kan schieten bij ondersteuning van het talud in geval van hoogwater en opdrukken van de deklaag

Geval 3a-1 en 3a-2 in Figuur 2.4 betreffen het passief afschuiven van de deklaag bij de teen van de dijk, ofwel cirkelvormig (3a-1) of als passieve wig, (3a-2). De in de deklaag aanwezige schuifsterkte langs het passieve deel van het glijvlak wordt hierbij benut. Bezwijken volgens dergelijke glijvlakken kan worden voorspeld met de gangbare glijvlakmodellen, die ook wel 'Limit Equilibrium Method' (LEM) modellen worden genoemd. Tot deze LEM modellen behoren LiftVan (cirkelvorm van intredend en uittredend deel) en 'Spencer van der Meij' (vrije glijvlakvorm).

In geval 3b is er eveneens sprake van een uittredend glijvlak, dat ook weer cirkelvormig kan zijn, dan wel wigvormig. Het uittredende glijvlak bevindt zich nu echter voorbij de opgedreven deklaag. De deklaag tussen het talud en het uittredende glijvlak blijft intact en kan de kracht zonder veel indrukking overdragen vanuit het talud naar de passieve kant van het glijvlak. De in de deklaag aanwezige schuifsterkte langs het glijvlak wordt benut. Bezwijken via dit mechanisme kan eveneens worden voorspeld met LiftVan en Spencer van der Meij.

In geval 3c barst de deklaag op. De deklaag welke als een drukstaaf wordt ingedrukt knikt uit voordat de maximale passieve weerstand in de deklaag kan worden gemobiliseerd. De steun die de deklaag kan bieden aan het talud is kleiner dan de steun welke wordt gevonden bij een gangbaar passief uittredend glijvlak (gevallen 3a en 3b). De schuifsterkte in de deklaag langs

8 juli 2019, versie 1.0, definitief

een potentieel passief glijvlak wordt niet volledig benut, omdat voorafgaand al uitknikken van de deklaag optreedt. Rekenkundig wordt hiermee in de gangbare LEM modellen momenteel omgegaan door de schuifsterkte tot nul te reduceren.

In het laatste geval (3d) treedt geen bezwijken op van de deklaag, maar drukt deze als een slappe veer in. Aan de actieve zijde van het glijvlak, dat door de dijk gaat, kan de schuifsterkte volledig zijn gemobiliseerd of overschreden, zonder dat dit aan de passieve zijde in de deklaag gebeurt. Dit kan gebeuren bij slappe dekragen die over enige lengte opdrijven. Ook in dit geval wordt de in de deklaag aanwezige schuifsterkte niet volledig benut. Deze faalmodus kan alleen berekend worden door de stijfheid van de dijk en de deklaag in rekening te brengen (zie [1] en [7]).

Met de eindige-elementensoftware Diana is een variantenstudie uitgevoerd, waarbinnen de bezwijkgevallen 3a, 3c en 3d optraden. Welk bezwijkgeval in een bepaalde variant optrad, was afhankelijk van de sterkte, stijfheid en dikte van de deklaag en van de dikte en doorlatendheid van de zandlaag [9].

2.4 Plaatsing van het uitgevoerde onderzoek in het faaltraject

Kort samengevat heeft het onderhavige project zich gericht op stap 2 en 3 in het faaltraject van een hoge buitenwaterstand naar uiteindelijk een overstroming door macro-instabiliteit (Figuur 2.2). Hierna wordt voor de verschillende (deel)stappen aangeduid waar gebruik kan worden gemaakt van al bestaande kennis en waar deelonderzoek is uitgevoerd om de op voorhand nog ontbrekende kennis te verkrijgen.

Stap 2 – Wel of niet opdrukken deklaag

- 2a. Opdrukken deklaag
Grondwaterstroming, vervorming en stabiliteit samen gemodelleerd met **Diana, zie [9]**.
Nu alleen nog horizontaal maaiveld en constante deklaagdikte en gewicht.
- 2b. Geen opdrukken door lekkage:
Grondwaterstroming gemodelleerd met de eindige-elementensoftware D-GeoFlow, zie **Bijlage A**.
- 2c. Geen opdrukken door waterdruk lager dan deklaag gewicht (bestaande kennis), of geen drukopbouw door hoge bulkdoorlatendheid (geen onderdeel van deze studie).

Stap 3 – Vervorming deklaag leidend tot taludinstabiliteit, gegeven *opdrukken deklaag*

- 3a. Uittreden glijvlak nabij teen van het talud.
Bestaande kennis.
- 3b. Uittredend glijvlak na drukstaaf.
Bestaande kennis.
- 3c. Opbarsten deklaag.
Grondwaterstroming, vervorming en stabiliteit samen gemodelleerd met **Diana, zie [9]**.
Bij welke deklaagdikte kan opbarsten optreden, zie **Bijlage B**.
- 3d. Indrukken deklaag.
Grondwaterstroming, vervorming en stabiliteit samen gemodelleerd met **Diana, zie [9]**.

Stap 3 – Vervorming deklaag leidend tot taludinstabiliteit, gegeven *geen opdrukken deklaag*.

- 3a. Uittreden glijvlak nabij teen van het talud.
Bestaande kennis.

3 Conclusies en aanbevelingen

3.1 Conclusies en aanbevelingen invloed lokale lekkage deklaag op waterdruk in zandlaag

Bij hoogwater worden binnendijs veelvuldig wellen aangetroffen maar is, voor zover achterhaald, nooit opbarsten van de deklaag opgetreden op afschuif-schaal (orde tien tot enkele tientallen meters). De hypothese is daarom dat de waterdruk ontsnapt door lokaal opbarsten ter plaatse van de zwakke plekken in de deklaag. De druk rondom de opgebarsten plekken neemt af, waardoor opdrijven en opbarsten op grotere schaal wordt voorkomen. Indien dit een effect is dat algemeen optreedt en dat in rekening kan worden gebracht, dan is dat gunstig bij de beoordeling van de binnenwaartse stabiliteit van dijken waarbij opbarsten speelt.

Dit effect is modelmatig onderzocht, waarbij gebruik is gemaakt van de grondwaterstromingssoftware D-GeoFlow, om gaten in de deklaag te modelleren. Voor de afmetingen en doorlatendheidschattingen van de lekkages en andere parameters is gebruik gemaakt van de kennis van experts op het gebied van piping en het literatuuronderzoek [2]. Het onderzoek is beschreven in **Bijlage A**.

In de berekeningen is onderscheid gemaakt tussen twee situaties:

1. Gaten in de deklaag, die bij opbarsten bij kopsloten of bij kleine zwakke plekken in de deklaag zouden kunnen ontstaan.
2. Langsscheuren waardoor een spleet in de deklaag ontstaat. Dit zou kunnen voorkomen bij opbarsten van een langssloot, zonder dat dit direct leidt tot de bovenliggende gebeurtenis van een taludinstabiliteit.

Voor de meeste van de uitgevoerde variaties in deklaagperforaties en aquifer doorlatendheden blijkt het ontlastende effect van een perforatie in de deklaag. Voor spleten is het effect logischerwijs veel groter dan voor een enkel gat of enkele gaten op flinke afstand van elkaar. De invloedssfeer van een spleet is in de orde van meer dan 10 m dwars op de spleet en bij een gat is dat in de orde van 5 à 10 m rondom het gat. Dit heeft een significant positief effect op de stabiliteit, omdat rondom de perforatie de potentiaal daalt onder de grenspotentiaal, waardoor er spanningen uit de dijk kunnen worden overgedragen naar het zandpakket. Deze berekeningen onderschrijven de genoemde waarnemingen in het veld bij hoogwater.

Vanuit het pipingonderzoek is echter bekend dat indien in de wellen een zandsuspensie of slurry omhoog komt, ofwel het begin van piping, de weerstand in het opbarstkanaal sterk toeneemt. Het gat verstopt zichzelf als het ware. In deze studie zijn hier enkele varianten voor berekend, waaruit blijkt dat het berekende positieve effect hierdoor bijna geheel teniet wordt gedaan.

Dit sluit op het eerste gezicht niet goed aan bij de hypothese ten aanzien van de waarnemingen, echter er zijn twee kanttekeningen te plaatsen. Ten eerste is bij de berekeningen uit gegaan van relatief ongunstige waarden van de doorlatendheid van de perforatie bij aanwezigheid van een zandsuspensie. Hier is vanuit het pipingonderzoek meer over bekend, en dit zou beter kunnen worden uitgediept. Een tweede kanttekening is dat bij verstopping van het gat de druk weer zal oplopen, waardoor er toch weer een buigen of barsten situatie kan ontstaan. Ofwel de scheur of het gat zal door de druktoename weer wat verder open kunnen gaan staan, of de

zandsuspensie krijgt een lagere dichtheid, of er ontstaat een scheur dan wel gat naast het eerdere, dan wel een vertakking hiervan zoals gerapporteerd in [2].

Het verdient aanbeveling om deze twee kanttekeningen verder te verkennen, in samenwerking met de deskundigen op het gebied van piping. Het verdient ook de aanbeveling om het opbarsten en het ontsnappen van druk bij opbarsten te modelleren in combinatie met een vervormingsvoorspelling door bij de gescheurde grond uit te gaan van een toenemende doorlatendheid. De koppeling tussen vervorming, waterberging, doorlatendheid en waterdrukken zit niet in D-GeoFlow, maar kan wel worden gemodelleerd met de eindige-elementensoftware Diana (zie § 3.3). Hiermee kan het inzicht in lokaal opbarsten verder worden onderzocht, om de hypothese ten aanzien van de veldwaarnemingen bij hoogwater te kunnen toetsen. Als we het verschijnsel kunnen doorgronden, dan kunnen we het in rekening brengen, ook bij waterstanden die hoger zijn dan waarbij de huidige waarnemingen zijn gedaan.

3.2 Conclusies en aanbevelingen ten aanzien van de database van wellen en relatie met deklaagdikte

Er is een studie gedaan naar de correlatie tussen deklaagdikte en het optreden van wellen, op basis van een database van wellen en een ondergrondmodel met ondiepe zandbanen. Deze database is eerder al opgesteld in het kader van onderzoek naar piping. De studie naar de correlatie is gerapporteerd in **Bijlage B**. Het doel van de studie was om de rekenwaarde van de kritische deklaagdikte van 4 m zoals gehanteerd bij de beoordeling op macrostabiliteit binnenwaarts te valideren.

Er is een sterke overeenkomst gevonden tussen de locatie van zandmeevoerende wellen en ondiepe zandbanen. Echter ook bij een deklaagdikte van meer dan 4 meter lijken nog steeds zandmeevoerende wellen aanwezig, namelijk circa 10% van de 494 wellen. Bij piping wordt opbarsten van de deklaag gezien als voorwaarde voor het ontstaan van zandmeevoerende wellen. Dit zou betekenen dat de rekenwaarde van 4 m mogelijk niet voldoende veilig is.

Hierbij zijn echter enkele kanttekeningen te plaatsen die betrekking hebben op de beperkte verfijning van de database, een bestand met de coördinaten van de bekende wellen, en het ondergrondmodel. Het is namelijk niet zo dat bij elke wel lokaal grondonderzoek beschikbaar is. De kartering van de ondiepe zandbanen die in het ondergrondmodel zijn opgenomen bevat een zekere onnauwkeurigheid, waardoor het lijkt alsof een wel net naast de zandbaan zit, terwijl dat in werkelijkheid misschien niet zo is.

De constatering dat bij 10% van de wellen de deklaag dikker is dan de rekenwaarde van de kritische deklaagdikte is ongemakkelijk. Daarom is het aan te bevelen om meer lokale informatie in te winnen bij deze wellen, danwel door nauwkeuriger naar bestaande data te kijken of te proberen aanvullende data te vinden ten aanzien van de grondopbouw bij wellen, of ter plaatse onderzoek uit te laten voeren.

Ten eerste kan hiermee worden gekeken in hoeverre de nu gehanteerde 4 m een goede rekenwaarde is en ten tweede kan een plaatselijk onderzochte locatie dienen als na te rekenen case voor het modelleren van opbarsten met Diana zoals gerapporteerd in [9].

3.3 Conclusies en aanbevelingen ten aanzien van het modelleren van opbarsten met EEM

Met het eindige-elementen (EEM) softwarepakket Diana is voor een eenvoudige geometrie, grondlaagopbouw en grondgedrag een modelstudie uitgevoerd naar opdrijven en het effect

8 juli 2019, versie 1.0, definitief

hiervan op waterspanningen en de taludstabiliteit, inclusief geometrisch niet-lineaire effecten (uitknikken) en inclusief scheurvorming van de deklaag. Type 3c (scheuren en uitknikken van de deklaag) en 3d (compressie van de deklaag) van Figuur 2.4 werden gereproduceerd. Er is gebruik gemaakt van een gekoppelde berekening van grondwaterspanningen, stroming en vervorming van de grond en van een interface tussen de zandlaag en de deklaag welke kan openen, waarin waterberging mogelijk is en welke bij opening ook in horizontale richting zeer doorlatend wordt. De deklaag is gemodelleerd met een ongedraineerde schuifsterkte en een beperkte treksterkte in combinatie met een scheurmodel. Met het model is een variatiestudie uitgevoerd, waarbij de deklaagdikte (1, 2 en 3 m), de dikte en doorlatendheid van het zand en de sterkte en stijfheidsparameters van de deklaag en dijk zijn gevarieerd. De studie is beschreven in een afzonderlijke rapportage [9].

Uit de studie blijkt dat bij een opdrukveiligheid van 1 zowel type 3c als type 3d kan zorgen voor een verzakking aan de landzijde van de scheur, gebeurtenis 4 in het faaltraject (Figuur 2.2). De deklaagsterkte waarbij afschuiving plaatsvindt ligt in alle gevallen tussen de onder- en bovengrens uit een glijvlakberekening. Deze grenzen worden gevonden door de sterkte van de deklaag tijdens opdrijven wel en niet mee te nemen. Type 3c trad in de studie alleen op bij een deklaagdikte gelijk aan 1 m in combinatie met een lage deklaagstijfheid. In de andere gevallen trad type 3d op, wat vooraf niet voldoende was voorzien.

De beperkte variatiestudie duidt er op dat de huidige aanpak conservatief is voor type 3c (uitknikken en scheuren). Deze aanpak bestaat uit een abrupte afname van de deklaagsterkte naar nul bij een opdrukveiligheid lager dan 1,2 en een deklaagdikte kleiner dan 4 m. De studie heeft geleid tot meer begrip van zowel type 3c als 3d. Zo blijkt ook de stijfheid van de deklaag van belang, een parameter die momenteel bij gangbare LEM analyses nog niet wordt beschouwd. De studie is echter nog te beperkt om als basis voor aanscherping van de huidige aanpak te kunnen dienen. Enerzijds is het is nog onvoldoende helder voor welke gevallen aanscherping mogelijk is en op welke manier. Zo is er tot nu toe bijvoorbeeld alleen nog gerekend met een eenvoudige geometrie, waarbij de deklaag een constante dikte heeft en uit één grondsoort bestaat. Anderzijds is het nog niet duidelijk in hoeverre de numerieke resultaten overeen komen met de fysieke werkelijkheid.

Controle op type 3d (grote elastische samendrukking van de deklaag) wordt tot op heden veelal niet uitgevoerd, maar blijkt op grond van de resultaten misschien wel nodig. Daarom wordt aanbevolen om te onderzoeken hoe op een zo eenvoudig mogelijke wijze ook op type 3d gecontroleerd kan worden. Daarvoor moet in praktijk de lengte van de oprijfzone en van de elastische samendrukking in die zone kunnen worden voorspeld. Idealiter kan deze informatie voor de praktijk hopelijk worden teruggebracht tot een equivalente gereduceerde deklaagsterkte voor de LEM glijvlakberekening.

Aanbevolen wordt verder om de variatiestudie uit te breiden met een meer realistische geometrie (inclusief mogelijke sloot) en grondlaagopbouw en een meer realistische modellering van het grondgedrag. Indien daaruit een eenduidige mogelijkheid voor aanscherping voor type 3c volgt wordt aanbevolen om het model daarna te verifiëren met veldproeven, grote schaal laboratoriumproeven of centrifugeproeven. Hierbij zou ook kunnen worden gekeken of het bezwijken van de damwandproef, waarbij mogelijk opbarsten optrad, kan worden nagerekend.

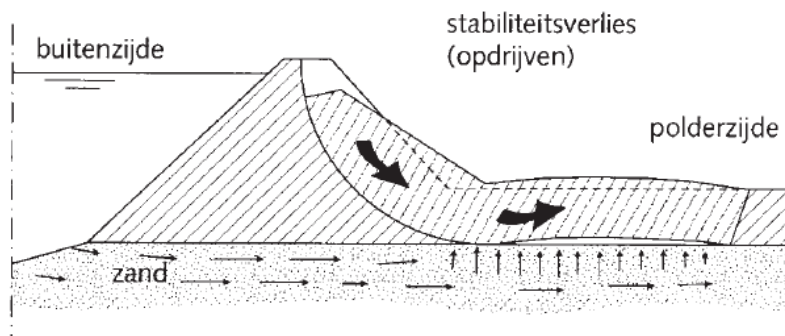
Referenties

- [1] *Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies, Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden.* Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, RWS-DWW, ISBN 90-369-3776-0, zie www.enwinfo.nl. Delft, juni 2001.
- [2] *POVM Macrostabieliteit Opbarsten, Literatuur, A. van Hoven, december 2016, Deltares projectnummer 1220504*
- [3] *POVM Macrostabieliteit Opbarsten, Conceptueel model, dr. Ir. G.J.C.M. Hoffmans, mei 2016, Deltares projectnummer 1220504*
- [4] *POVM Macrostabieliteit Opbarsten, Consequentie-analyse en vervolgonderzoek, Arcadis R. Koopmans, J. van Zuijlen, Deltares A. van Hoven, december 2016, Deltares projectnummer 1220504*
- [5] *POVM Macrostabieliteit Opbarsten, Managementsamenvatting, A. van Hoven, maart 2017, Deltares projectnummer 1220504*
- [6] Fenomenologische beschrijving faalmechanismen WBI, Robert 't Hart. Deltares projectnummer 11200574-007, versie C2, maart 2018
- [7] Leidraad voor het ontwerp van rivierdijken, deel 2 benedenrivierengebied, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Uitgeverij Waltman Delft, 1989
- [8] Technische Rapport Zandmeevoerende wellen, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Maart 1999
- [9] FEM Analysis of uplift, POV Macrostabieliteit, cluster rekentechnieken, C. Hoffman, Diana FEA, M.A.T. Visschedijk, Deltares, augustus 2018, versie 1.0 Draft

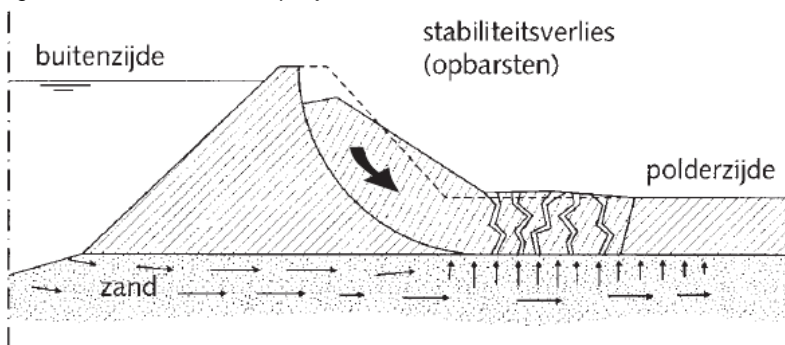
A Effect lekkage deklaag door bestaande wellen of scheuren als gevolg van lokaal opbarsten op de waterdruk in de zandlaag

Integraal opgenomen memo van Aron Noordam, Deltares, mei 2018, betreffende grondwaterstromingsberekeningen bij lokale lekkage van de deklaag. De studie is mede met inbreng van deskundigen op het gebied van het faalmechanisme piping Vera van Beek en Ane Wiersma tot stand gekomen.

Bij het modelleren van de macrostabiliteit van dijktaluds met dunne deklaagen met een lage opdrukveiligheid wordt uitgegaan van verlies van schuifsterkte van de deklaag over een brede zone loodrecht op de dijk en in dijkrichting. Er wordt bij opdrukken van de deklaag uitgegaan opdrijven van de deklaag, danwel het verloren gaan van de structuur van de deklaag door uitknikken (opbarsten), zoals geïllustreerd in Figuur A.1 en Figuur A.2 uit [A1].



Figuur A.1 Schematisatie opdrijven



Figuur A.2 Schematisatie opbarsten

Het opbarsten, dan wel uitknikken van de deklaag, wat er gebeurt in welke gevallen is niet zeker, is in de praktijk bij dijken niet waargenomen over grote oppervlaktes, orde schaal van een afschuiving. Dit is overigens wel het geval bij bouwputten. Bij dijken komen regelmatig wellen voor, wat doet vermoeden dat opbarsten optreedt op een kleinere schaal, op enkele zwakke plekken in de deklaag, maar niet op een schaal ter grootte van een afschuiving van enkele tientallen meters. Dat bij een dijk tot dusver alleen op enkele plekken wellen worden gezien kan als reden hebben dat bij het opbarsten op een zwakke plek, de waterdruk in het zandpakket rondom het opbarstpunt zodanig daalt dat opbarsten verder niet kan optreden. De

8 juli 2019, versie 1.0, definitief

lokaal opgebarsten plekken fungeren als natuurlijke ontlastputten. Als dit inderdaad het geval is, dan kan hiermee mogelijk worden beredeneerd dat:

- 1) Opbarsten bij dijken een lokaal fenomeen is ten opzichte van de schaal van een afschuiving, waardoor de aanname van een volledig verlies van de schuifsterkte van de deklaag niet terecht is en kan worden aangescherpt en
- 2) de afname van de waterspanning rondom het opbarstpunt, na opbarsten, leidt tot een hogere schuifspanning tussen deklaag, dijk en onderliggend zandpakket. Mogelijk kan ook dit gunstige effect in rekening worden gebracht, waarbij gelijk de kanttekening dat dit pas optreedt na opbarsten.

Het doel van dit project is om na te gaan hoeveel invloed een opbarstkanaal in de deklaag achter een dijk kan hebben op het potentiaalverloop onder de deklaag.

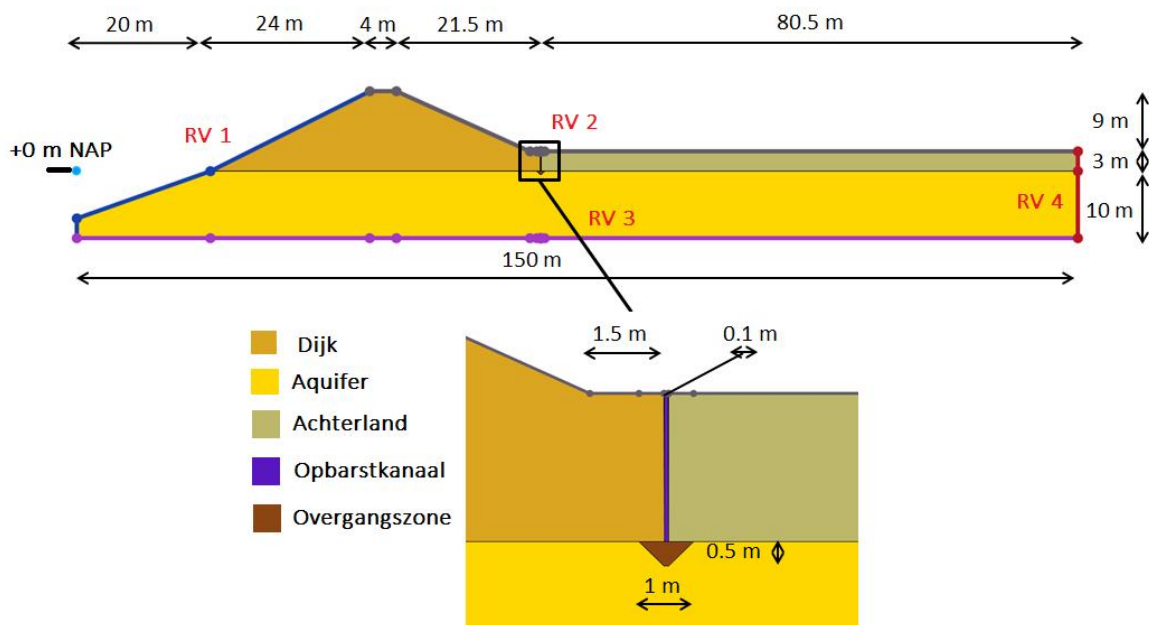
A.1 Modelling

Om het 2D effect van een opbarstkanaal inzichtelijk te maken is een dijk gemodelleerd in D-Geo Flow [A2].

A.1.1 Geometrie en randvoorwaarden

2D-geometrie

Er is gekozen om de berekeningen uit te voeren in een zelfde geometrie. De variaties in de berekening variëren in stromingsparameters. In Figuur A.3 is de gebruikte geometrie weergegeven en zijn de randvoorwaarden weergegeven.



Figuur A.3 Geometrie en randvoorwaarden

Randvoorwaarde RV 1 is een Submerging randvoorwaarde, dat wil zeggen: er is geen stroming om de plek waar de stijghoogte t.o.v. het maaiveld lager dan 0 is. Verder wordt de stijghoogte opgegeven en wordt de buitenwaterdruk meegenomen. Randvoorwaarde RV 2 is een sijnpelrandvoorwaarde, dat houdt in dat er geen stroming is wanneer de stijghoogte t.o.v. maaiveld lager dan 0 is. Randvoorwaarde RV 3 is een No Flow randvoorwaarde, waar geen

8 juli 2019, versie 1.0, definitief

stroming mogelijk is. En Randvoorwaarde RV 4 is een randvoorwaarde met opgegeven stijghoogte. In Tabel A.1 zijn de randvoorwaarden samengevat.

Tabel A.1 Randvoorwaarden model

Randvoorwaarde	Type randvoorwaarde	Beschrijving	Maximale stijghoogte
RV1	Submerging	Buitenkant dijk	NAP +10 m
RV2	Sijpelrand	Binnenkant dijk en achterland	-
RV3	No-Flow	Bodem geometrie	-
RV4	Stijghoogte	Achterlandpeil (Sloot)	NAP +1 m

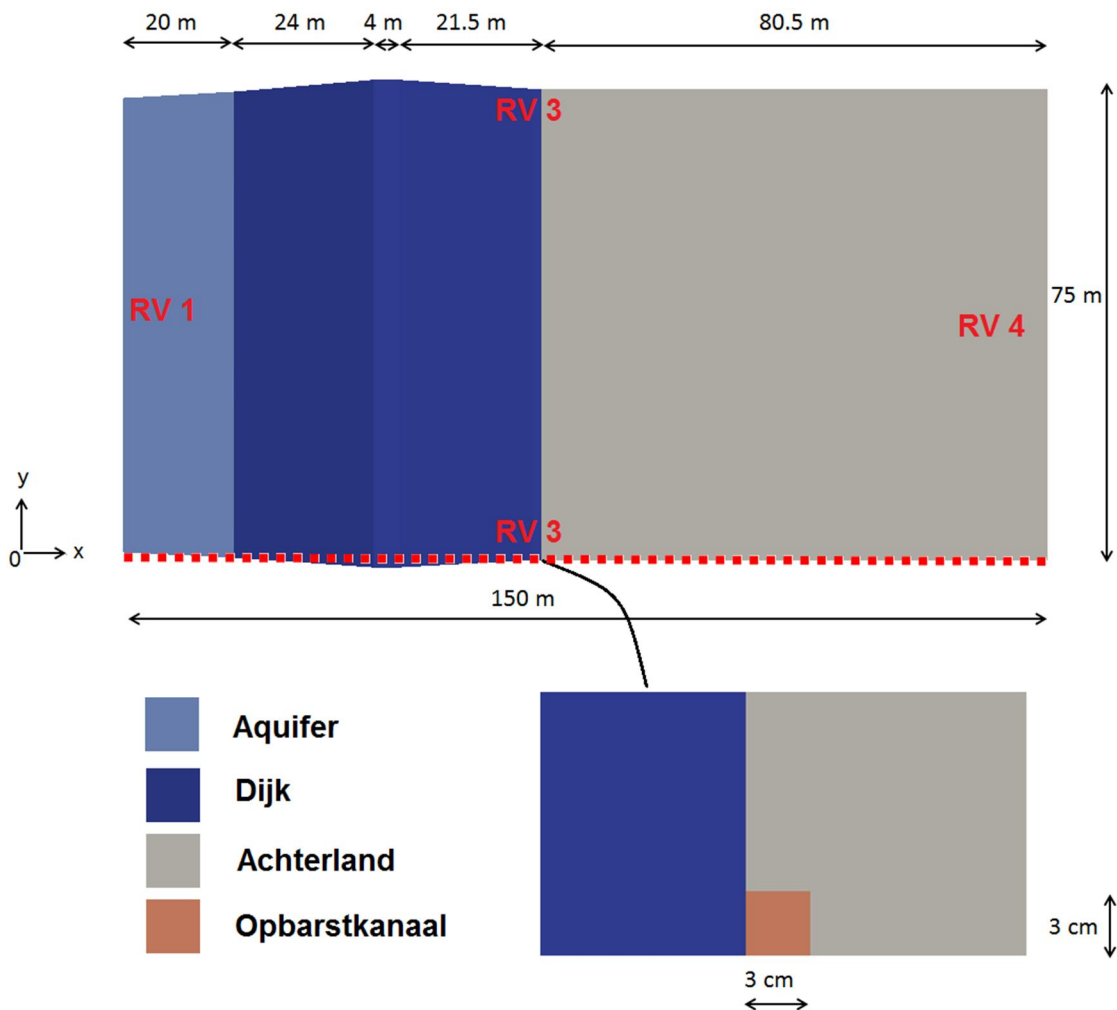
3D-geometrie

Om het 3D-effect van een opbarstkanaal inzichtelijk te maken is er één 3D-berekening uitgevoerd met de rekenkern van D-Geo Flow, DG-Flow. Om het 3D-mesh te maken is DG-Flow aangesloten aan de GID-preprocessor [A3].

Het bovenaanzicht van de geometrie die is gebruikt is weergegeven in Figuur A.4, het zijaanzicht is gelijk aan de geometrie, gebruikt in de 2D-berekeningen met uitzondering van het opbarstkanaal, die in de 3D-berekening een breedte heeft van 3 cm. De randen van de geometrie op $y = 0$ m en op $y = 75$ m zijn gemodelleerd met No-Flow-randvoorwaardes (RV 3). De randvoorwaardes aan de buitenkant en binnenkant van de dijk zijn respectievelijk een submerging randvoorwaarde (RV1) en een stijghoogte randvoorwaarde (RV4).

De geometrie is zo gemaakt dat het een dijk modelleert waarbij er elke 150 m een perforatie van 3 bij 6 cm is. Dit is uitgaande van symmetrie in de y -richting. De symmetrielij is weergegeven als de rode stippelij op $y = 0$ in Figuur A.4.

8 juli 2019, versie 1.0, definitief



Figuur A.4 Bovenaanzicht 3D-geometrie

A.1.2 Theorie stromingsmodel

Het grondwaterstromingsmodel in dg-flow is gebaseerd op het behoud van massa principe en de wet van Darcy [A2]. In de modellering wordt het grondskelet en het water aangenomen als onsamendrukbaar, dit resulteert in de volgende grondwaterstromingsvergelijking:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(K_{xx} \frac{\delta h}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(K_{yy} \frac{\delta h}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(K_{zz} \frac{\delta h}{\delta z} \right) = 0$$

Waar:

- x = x-coördinaat (m)
- y = y-coördinaat (m)
- z = z-coördinaat (m)
- K = doorlatendheid in de bijbehorende richting (m/s)

Verder is er geen onverzadigde stroming en berging gemodelleerd. De gemodelleerde stroming is stationair.

A.1.3 Theorie doorlatendheid in het opbarstkanaal

Het opbarstkanaal is gemodelleerd als een spleet en als een buis. De doorlatendheid in het opbarstkanaal kan variëren tussen de doorlatendheid van de deklaag en de doorlatendheid die overeenkomt met Poiseuille-stroming. Dat wil zeggen, het debiet per strekkende meter wat door poreuze grond stroomt is gelijk aan het debiet per strekkende meter wat volgt uit de Poiseuille vergelijking, $Q_{grond} = Q_{poiseuille}$. Voor het debiet per strekkende meter in een oneindig lange spleet en laminaire stroming geldt:

$$Q_{grond,spleet} = d_{spleet} K_{spleet} \frac{\delta h}{\delta z}$$

$$Q_{poiseuille,spleet} = \frac{\rho_w g d_{spleet}^3}{12 \mu} \frac{\delta h}{\delta z}$$

Waar:

$Q_{grond,spleet}$	= debiet per strekkende meter door poreuze grond. (m ³ /s/m)
$Q_{poiseuille,spleet}$	= debiet per strekkende meter door een oneindig lange spleet. (m ³ /s/m)
d_{spleet}	= breedte spleet (m)
K_{spleet}	= doorlatendheid poreuze grond in de spleet (m/s)
h	= stijghoogte (m)
z	= z-coördinaat (m)
ρ_w	= dichtheid water (1000 kg/m ³)
g	= gravitatie constante (9.81 m/s ²)
μ	= dynamische viscositeit water (0.001 kg/s m)

Hieruit volgt:

$$d_{spleet} * K_{spleet} * \frac{\delta h}{\delta z} = \frac{\rho_w g d_{spleet}^3}{12 \mu} \frac{\delta h}{\delta z}$$

$$K_{spleet} = \frac{\rho_w g d_{spleet}^2}{12 \mu}$$

Voor Poiseuille stroming in een buis geldt:

$$Q_{grond,buis} = \frac{1}{4} \pi d^2 K_{buis} \frac{\delta h}{\delta z}$$

$$Q_{poiseuille,buis} = \frac{\pi \rho_w g d_{buis}^4}{128 \mu} \frac{\delta h}{\delta z}$$

Waar:

$Q_{grond,buis}$	= debiet door poreuze grond (m ³ /s)
$Q_{poiseuille,buis}$	= debiet door een buis (m ³ /s)
d_{buis}	= diameter buis (m)
K_{buis}	= doorlatendheid poreuze grond in de buis (m/s)

De equivalente doorlatendheid in de gemodelleerde spleet wordt berekend door het debiet in de buis gelijk te stellen aan het debiet in de spleet met opgegeven lengte.

8 juli 2019, versie 1.0, definitief

Hieruit volgt:

$$Q_{grond,spleet}L = Q_{grond,buis}$$

$$K_{spleet,equivalent} = \frac{\pi d_{buis}^2 K_{buis}}{4 d_{spleet} L}$$

Of:

$$Q_{grond,spleet}L = Q_{poiseuille,buis}$$

$$K_{spleet,equivalent} = \frac{\pi \rho_w g d_{buis}^4}{128 \mu d_{spleet} L}$$

Waar:

L = Hart op hart afstand buizen (m)

Turbulente stroming door opbarstspleet

De Poiseuille vergelijking is gebaseerd op de aanname dat de stroming laminair is, echter in een open spleet kunnen grote stroomsnelheden voorkomen, wat kan resulteren in turbulente stroming. De weerstand in een spleet is in het geval van turbulente stroming afhankelijk van de relatieve ruwheid van de wand ten opzichte van de spleetbreedte en van het Reynoldsgetal. In de modellering wordt uitgegaan van een relatieve wandruwheid van 5%. Dit is bijvoorbeeld een wandruwheid van 5 mm bij een spleetbreedte van 0.1 m of een wandruwheid van 1.5 mm bij een gat van 3 cm. Bij een relatieve wandruwheid van 0.05 is de stroming turbulent bij een Reynoldsgetal, Re , van 1×10^4 (-). Het Reynoldsgetal wordt gegeven door:

$$Re = \frac{\rho_w U D_h}{\mu}$$

Waar:

$$D_h = \frac{4A}{O} = \frac{4d_{spleet}}{2} = 2d_{spleet}$$

Waar:

U = stroomsnelheid (m/s)

D_h = hydraulische diameter (m)

A = oppervlak van de stroming per strekkende meter (m^2/m)

O = de natte omtrek per strekkende meter (m/m)

Turbulente stroming kan worden berekend door uit te gaan van impulsbalans, waar de wandschuifspanning gelijk wordt gesteld aan de weerstand.

De wandschuifspanning wordt gegeven door:

$$\tau_{0,spleet} = \rho_w g \frac{\delta h D_h}{\delta z 4}$$

Waar:

$\tau_{0,spleet}$ = wandschuifspanning (N/m^2)

In een evenwichtssituatie is de wandschuifspanning gelijk aan de weerstandsfactor:

$$\tau_{0,spleet} = \frac{f}{8} \rho_w U^2 = \rho_w g \frac{\delta h d_{spleet}}{\delta z 2}$$

8 juli 2019, versie 1.0, definitief

Waar:

f = relatieve wandruwheid (-)

Na het omschrijven van U in $Q_{spleet,turbulent}$ volgt:

$$Q_{spleet,turbulent}^2 = \frac{4gd_{spleet}^3 \delta h}{f \delta z}$$

Of,

$$Q_{spleet,turbulent} = \frac{4gd_{spleet}^3}{f} \frac{1}{Q_{spleet,turbulent}} \frac{\delta h}{\delta z}$$

Hieruit volgt:

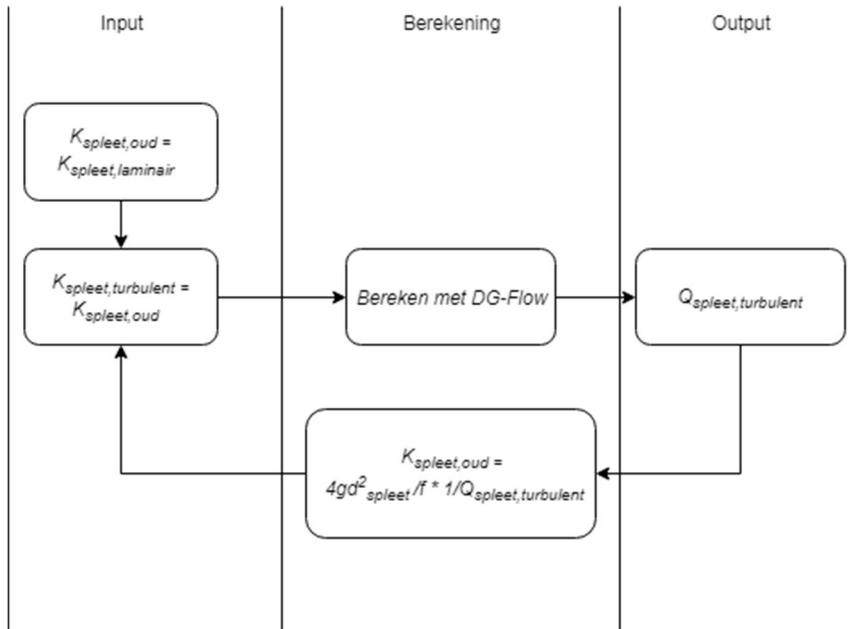
$$K_{spleet,turbulent} = \frac{4gd_{spleet}^2}{f} \frac{1}{Q_{spleet,turbulent}}$$

Waar:

$Q_{spleet,turbulent}$ = debiet per strekkende meter door een spleet bij turbulente stroming (m³/s/m)

$K_{spleet,turbulent}$ = representatieve doorlatendheid in een spleet bij turbulente stroming (m/s)

In de bovenstaande vergelijking zijn zowel $K_{spleet,turbulent}$ als $Q_{spleet,turbulent}$ onbekend. Om toch een schatting te maken van de invloed van het in rekening brengen van turbulente stroming is een iteratief proces uitgevoerd, weergegeven in het schema in Figuur A.5.



Figuur A.5 Iteratieschema linearisering $K_{spleet,turbulent}$

In een buis geldt:

$$Q_{buis,turbulent} = \frac{gd_{buis}^3}{f} \frac{1}{Q_{buis,turbulent}} \frac{\delta h}{\delta z}$$

8 juli 2019, versie 1.0, definitief

Waaruit volgt:

$$K_{buis,turbulent} = \frac{gd_{buis}}{f} \frac{1}{Q_{buis,turbulent}}$$

Waar:

$Q_{buis,turbulent}$ = debiet door een buis bij turbulente stroming (m³/s)

$K_{buis,turbulent}$ = representatieve doorlatendheid in een buis bij turbulente stroming (m/s)

Bovenstaande vergelijkingen gelden alleen in een open spleet of in een open buis, als er een slurry aanwezig is kan deze methode om de representatieve doorlatendheid bij turbulente stroming te schatten niet worden gebruikt. Een slurry heeft een andere dichtheid dan water, dus ook een ander Reynolds getal. Verder zal de relatieve wandruwheid een andere invloed hebben op de stroming als het in aanraking komt met de korrels in de slurry.

A.1.4 Theorie opbarstlengte

De stijghoogte onder de opdrijfzone heeft een bovengrens. Wanneer de waterdruk onder de deklaag hoger wordt dan het gewicht van de deklaag, zal de deklaag over een bepaalde zone opdrijven en zal de waterdruk niet verder stijgen. Ofwel, de potentiaal zal stijgen tot de grenspotentiaal onder de toplaag is bereikt. De grenspotentiaal wordt gegeven door:

$$\phi_g = \frac{\gamma_t D_t}{\gamma_w} + z_{zt} = 5.4 \text{ m}$$

Waar:

ϕ_g = grenspotentiaal (m)

γ_t = nat volumiek gewicht toplaag (18 kN/m³)

D_t = dikte toplaag (3 m)

γ_w = volumiek gewicht water (10 kN/m³)

z_{zt} = z-coördinaat top van de zandlaag (0 m)

De analytische formule voor de lengte van de toplaag wat op zal drijven wanneer het grenspotentiaal is bereikt is [A4]:

$$L_{3,m+1} = \frac{2D}{\pi} \operatorname{arccosh} \left(\sin \left(\frac{D(\phi_g - \phi_p) \cosh\left(\frac{L_4}{L_{lek}}\right) - (\phi_a - \phi_p)}{\lambda(\phi_r - \phi_g) \sinh\left(\frac{L_4}{L_{lek}}\right)} * \left(\frac{\pi\lambda'}{2D} + \operatorname{arcsinh} \left(\frac{\sinh\left(\frac{(L_2 + L_{3,m})\pi}{2D}\right)}{\cosh\left(\frac{L_{3,m}\pi}{2D}\right)} \right) \right) \right) \right)^{-1}$$

Waar:

L_2 = Lengte dijk met berm (m)

L_3 = Opdrijflengte (m)

L_4 = Lengte achterland (m)

D_z = Dikte zandlaag (m)

ϕ_p = Polderpotentiaal (m)

ϕ_a = Potentiaal in achterland (m)

ϕ_r = Rivierpotentiaal (m)

λ = Leklengte voorland (m)

L_{lek} = Leklengte achterland (m)

m = Iteratienummer (-)

De polderpotentiaal wordt gelijk aangenomen als het potentiaal in het achterland. Er is geen voorland, λ is daarom 0 m. De leklengte van het achterland wordt gegeven door:

$$L_{lek} = \sqrt{\frac{K_z D_z D_t}{K_t}}$$

K_z = doorlatendheid zand (m/s)
 K_t = doorlatendheid toplaag (m/s)

De grenspotentiaal als bovengrens wordt niet gemodelleerd in D-Geo Flow. Daarom zijn aparte cases gemodelleerd, cases waarbij de grond niet is opgebarsten en cases waarbij de grond wel is opgebarsten. Deze cases zijn beschreven in hoofdstuk A.2 en hoofdstuk A.3.

A.1.5 Theorie invloedssfeer dijk

De invloedssfeer van de dijk is de afstand vanaf de dijk richting de polder tot waar het rivierpeil invloed heeft op de stijghoogte direct onder de deklaag. Deze invloedssfeer is ongeveer 3 maal de leklengte. Idealiter zou het gemodelleerde achterland deze lengte moeten hebben wanneer er geen sloot gemodelleerd wordt (geen stijghoogte randvoorwaarde in de polder).

A.1.6 Parameters

In Tabel A.2 zijn de stromingsparameters weergegeven voor de verschillende grondlagen in de geometrie. De doorlatendheid van het opbarstkanaal en de overgangszone varieert per scenario en wordt in hoofdstuk A.2 en hoofdstuk A.3 beschreven.

Tabel A.2 Stromingsparameters model

	Doorlatendheid (m/s)	Porositeit (-)	Samendrukbaarheid (m ² /N)
Dijk	7.5 x 10 ⁻⁸	0.42	0
Aquifer (zandlaag)	7.5 x 10 ⁻⁴	0.36	0
Achterland	7.5 x 10 ⁻⁸	0.42	0

A.2 Scenario's perforatie deklaag

In Tabel A.3 zijn de gemodelleerde scenario's weergegeven. De scenario's zijn gekozen zodanig dat een breed bereik van doorlatendheden van perforaties van de deklaag wordt gemodelleerd en zodanig dat rekening wordt gehouden met veldobservaties van wellen [A5]. Gezien alleen gemodelleerd wordt in 2D en de breedte van het opbarstkanaal niet wordt aangepast, is voor de modellering van scenario 3, 4 en 5 een representatieve doorlatendheid berekend die wordt toegepast ter plaatse van het opbarstkanaal in het 2D model. De doorlatendheid van de spleet wordt in hoge mate bepaald door de aanwezigheid van opwellend zand. De berekeningen zijn uitgevoerd voor een extreem hoge equivalente waarde van de doorlatendheid, alsof er geen zand aanwezig is, en voor waarden waarbij wordt uitgegaan van een zekere verzadiging van de stroming door opwellend zand. Een ondergrens van de doorlatendheid is die van extreem los gepakt zand, ofwel geschat orde 10⁻¹ à 10⁻² m/s. De bovengrens volgt uit de Poiseuille vergelijking, en wordt toegepast in de scenario's waar het opbarstkanaal als een opening wordt gemodelleerd. De doorlatendheid in de overgangszone is gelijk aangehouden aan de doorlatendheid in het opbarstkanaal.

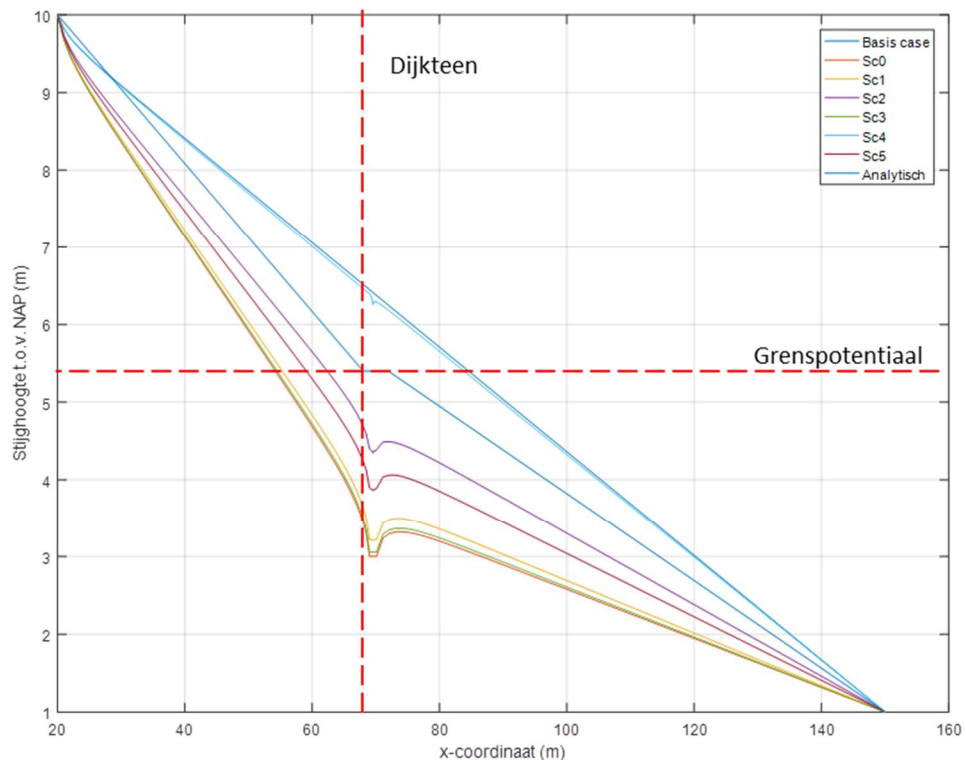
8 juli 2019, versie 1.0, definitief

Tabel A.3 Scenario's perforatie deklaag

Scenario	Beschrijving	Doorlatendheid in perforatie K_{gat} (m/s)	Representatieve doorlatendheid in perforatie K_{rep} (m/s)
Basis	Geen opening	-	-
0	Spleet 0.1 m	Open	8.18×10^3
1	Spleet 0.1 m	0.1	0.1
2	Spleet 0.1 m	0.01	0.01
3	Gaten h.o.h. 5 m, diameter 3 cm	Open	0.39
4	Gaten h.o.h. 5 m, diameter 3 cm	0.1	1.41×10^{-4}
5	Gaten h.o.h. 100 m, diameter 3 cm	Open	0.02

A.2.1 Resultaten stijghoogteverloop en uitstroom

In Figuur A.6 is het stijghoogteverloop t.o.v. NAP voor elk berekend scenario uitgezet tegen de x-coördinaat bij een rivierwaterstand van 10m + NAP en een polderwaterstand van 1m + NAP ter hoogte van de scheiding tussen de zandlaag en de deklaag (NAP +0m). Ter vergelijking is het stijghoogteverloop wat volgt uit de analytische vergelijking voor opdrijven ook geplot. De resultaten ter plaatse van het opbarstkanaal zijn samengevat in Tabel A.4.



Figuur A.6 Stijghoogte tegen x-coördinaat onder de deklaag

8 juli 2019, versie 1.0, definitief

Tabel A.4 Stijghoogte resultaten scenario's perforatie deklaag

Scenario	Beschrijving	Representatieve doorlatendheid in perforatie K_{rep} (m/s)	Stijghoogte t.o.v. NAP onderkant opbarstkanaal (m)	Verlies in stijghoogte na opbarsten (m)
Basis	Geen opening	7.5×10^{-8}	6.41	0
0	Spleet 0.1 m	8.18×10^3	3.00	3.41
1	Spleet 0.1 m	0.1	3.21	3.20
2	Spleet 0.1 m	0.01	4.35	2.06
3	Gaten h.o.h. 5 m, diameter 3 cm	0.39	3.06	2.91
4	Gaten h.o.h. 5 m, diameter 3 cm	1.41×10^{-4}	6.26	0.15
5	Gaten h.o.h. 100 m, diameter 3 cm	0.02	3.86	2.55

Tabel A.5 Debiet resultaten scenario's perforatie deklaag

Scenario	Beschrijving	Representatieve doorlatendheid in perforatie K_{rep} (m/s)	Debiet opbarstkanaal ($m^3/s/m$)	Debiet onder dijk ($m^3/s/m$)	Debiet opbarstkanaal/ debiet onder dijk (-)
Basis	Geen opening	7.5×10^{-8}	7.46×10^{-9}	5.02×10^{-4}	1.49×10^{-5}
0	Spleet 0.1 m	8.18×10^3	6.50×10^{-4}	9.04×10^{-4}	0.72
1	Spleet 0.1 m	0.1	6.09×10^{-4}	8.79×10^{-4}	0.69
2	Spleet 0.1 m	0.01	3.86×10^{-4}	7.41×10^{-4}	0.52
3	Gaten h.o.h. 5 m, diameter 3 cm	0.39	6.39×10^{-4}	8.98×10^{-4}	0.71
4	Gaten h.o.h. 5 m, diameter 3 cm	1.41×10^{-4}	1.32×10^{-5}	5.10×10^{-4}	0.03
5	Gaten h.o.h. 100 m, diameter 3 cm	0.02	4.82×10^{-4}	8.00×10^{-4}	0.60

Het berekende debiet door de perforatie of spleet varieert van enkele tot ca. 70% van het debiet dat onder de dijk door stroomt. Dit is uiteraard zeer afhankelijk van de gemodelleerde doorlatendheid van de spleet of het gat. Bij een spleet van 0.1 m zal, ongeacht of er sprake is van vulling hiervan door een zand- watermengsel, ongeveer de helft van het water dat onder de dijk stroomt ontsnappen door de spleet. Bij met slurry gevulde perforaties op enige afstand van elkaar is dit slechts in de orde van enkele procenten.

Uit de resultaten van scenario 4 blijkt dat een enkel gat om de 5 meter weinig invloed heeft op het stijghoogteverloop als dit gat gevuld is met een slurry. Echter wanneer dit gat volledig open is (scenario 3), zal de stijghoogte onder de perforatie substantieel afnemen (een afname van 2.91 m ten opzichte van het basisscenario). Niet alleen recht onder de perforatie zakt de stijghoogte, maar de stijghoogte kan lager zijn over een grote lengte. De berekende stijghoogte na opbarsten is naast scenario 4 in alle scenario's lager dan de met de analytische formule berekende stijghoogte. Hoe hoger de representatieve doorlatendheid in de perforatie, hoe groter het stijghoogteverlies wordt na opbarsten (tot een minimum stijghoogte waar de stijghoogte gelijk is aan het maaiveld).

A.2.2 Invloed in rekening brengen van turbulente stroming

Het schema weergegeven in Figuur A.5 is toegepast op scenario 0 (open spleet). Het Reynoldsgetal onderaan de spleet is 1.30×10^3 (-). Met de aanname dat turbulente stroming voorkomt bij Reynoldsgetallen vanaf 1.0×10^4 , volgt er dat er geen turbulente stroming plaats vindt in de open spleet. Om toch inzicht te krijgen in het effect van turbulente stroming is er aangenomen dat turbulente stroming wel plaats vindt, de doorlatendheid in de spleet is dus berekend aan de hand van de methode beschreven in Figuur A.5. In Tabel A.6 zijn de resultaten per uitgevoerde iteratie weergegeven.

Tabel A.6 Resultaten linearisering $K_{spleet, turbulent}$

Iteratie (-)	K_{nieuw} (m/s)	$Q_{spleet, turbulent}$ (m ³ /s/m)	$K_{spleet, turbulent}$ (m/s)
1	8.18×10^3	6.50×10^{-4}	1.21×10^4
2	1.21×10^4	6.50×10^{-4}	1.21×10^4

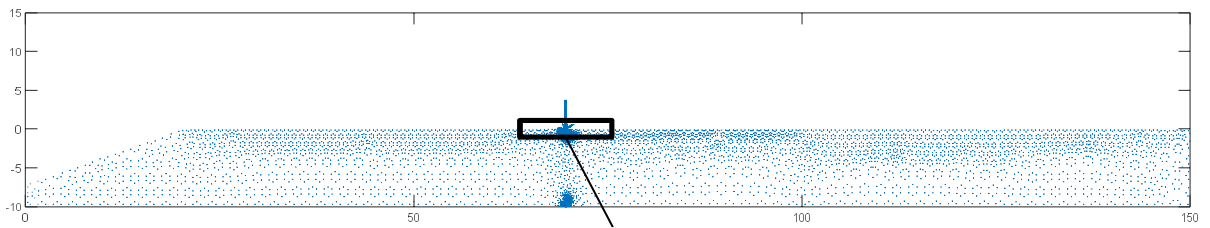
In Tabel A.6 is te zien dat het in rekening brengen van turbulente stroming weinig invloed heeft op het uitstromend debiet door het gat. Het verschil in uitstromend debiet is binnen 1 iteratie al kleiner dan een factor 0.01, ondanks een toename in doorlatendheid van een factor 1.5. Bij stroomsnelheden waarbij turbulente stroming voorkomt, wordt de uitstroom vooral gelimiteerd door watertoevoer (de breedte van het gat en de doorlatendheid van het zandpakket), minimaal door de doorlatendheid in de opening. Een aanpassing van de doorlatendheid met een factor 1.5 heeft dus minimale invloed op de uitstroom.

A.2.3 Stroomsnelheid en stroomrichting

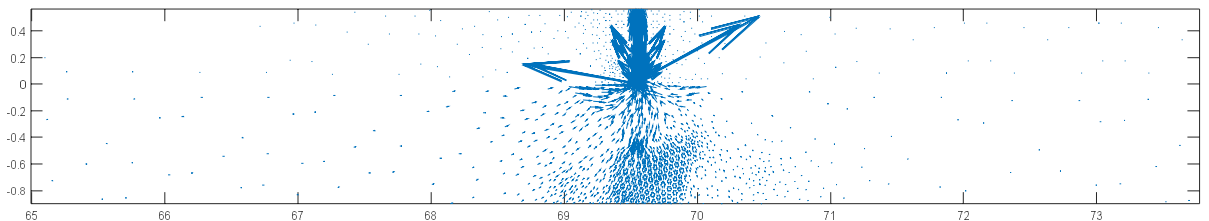
Om de stroming inzichtelijk te maken is in Figuur A.7 een vectorplot weergegeven van scenario 2, waar de richting van de pijlen de stroomrichting aangeeft en de grootte van de pijlen de stroomsnelheid aangeeft. In Figuur A.8 is er ingezoomd ter plaatsen van het uittredepunt. Er is te zien dat de stroomsnelheid bij het uittredepunt veel groter is dan in de rest van de geometrie. Ook in de overgangszone is de stroomsnelheid relatief klein in vergelijking met de stroomsnelheid in het kanaal. Op de bodem van de zandlaag is een wolk van vectoren te zien, het grid is hier erg fijn, er worden daarom veel vectoren bij elkaar geplott.

8 juli 2019, versie 1.0, definitief

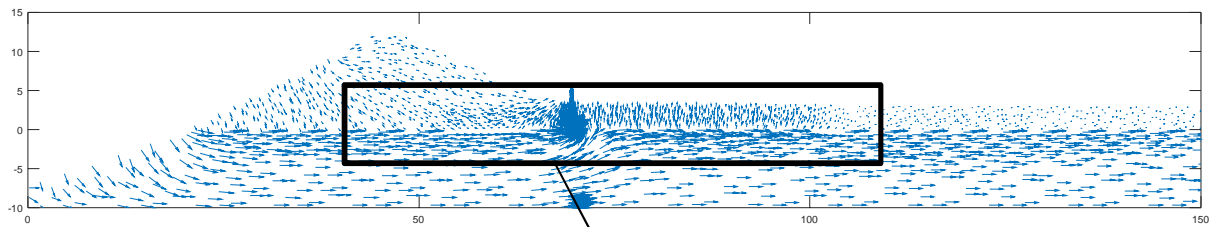
Omdat de vectoren in de geometrie weg van het uitrede punt erg klein zijn en de stroomrichting niet te zien is, is in Figuur A.9 een plot weergegeven waar de vectoren in \log_{10} -formaat zijn geplott. In Figuur A.10 is er ingezoomd ter plaatsten van het opbarstkanaal. Er is te zien dat het grootste gedeelte van het water horizontaal door de zandlaag heen stroomt, ter hoogte van het uitrededpunt stroomt het water in de zandlaag omhoog, hierna stroom het water weer in horizontale richting door de zandlaag heen.



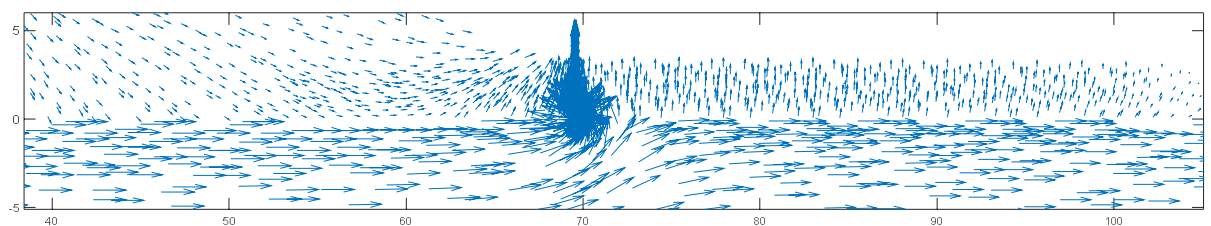
Figuur A.7 Vectorplot scenario 2



Figuur A.8 Zoom vectorplot scenario 2



Figuur A.9 Vectorplot scenario 2 in \log_{10} -formaat



Figuur A.10 Zoom vectorplot scenario 2 in \log_{10} -formaat

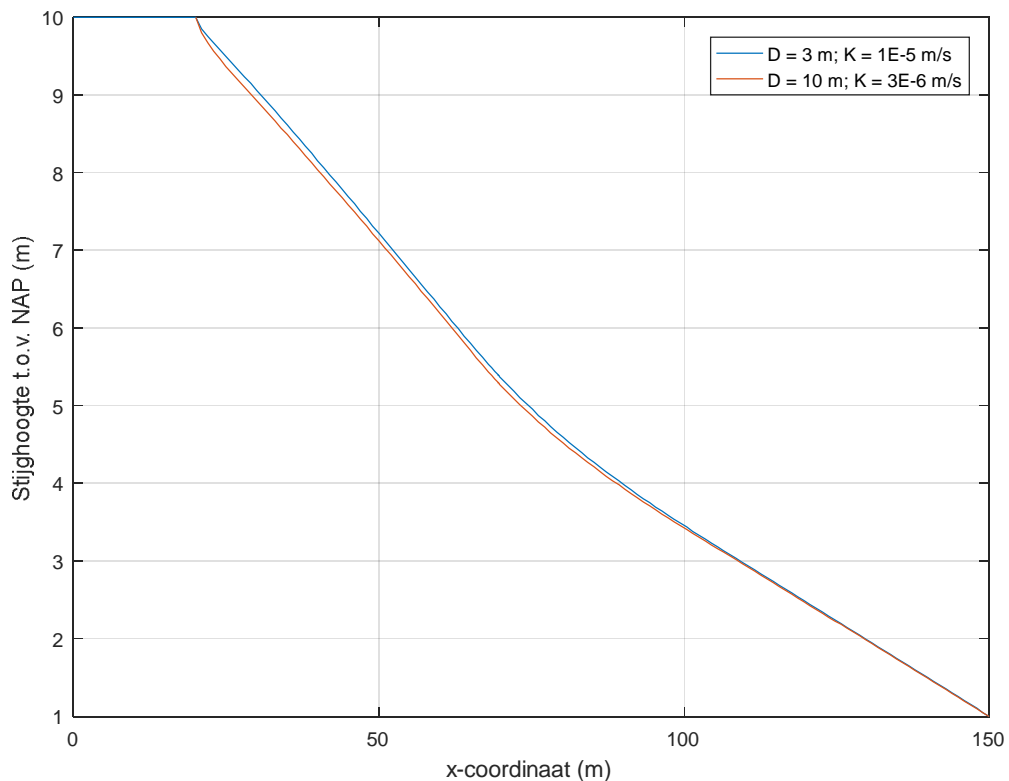
A.3 Scenario's zandlaag

De berekende scenario's uit hoofdstuk A.2 zijn berekend met een zelfde leklengte. Grondwaterstroming is echter ook afhankelijk van de leklente. In dit hoofdstuk staan berekeningen beschreven met verschillende leklengtes, waarbij de leklengte is aangepast door variaties te maken in de zandlaag.

Voor de zandlaag scenario's wordt er één geometrie gebruikt voor de modellering, verschillende zandlaagdiktes worden gemodelleerd door de doorlatendheid in het zand zo aan te passen dat de leklengte gelijk blijft.

8 juli 2019, versie 1.0, definitief

In Figuur A.11 is één voorbeeld weergegeven dat aantoont dat het stijghoogteverloop nagenoeg gelijk is voor een geometrie met een zandlaag dikte van 10 m en een doorlatendheid van 3×10^{-6} m/s en een geometrie met een zandlaagdikte van 3 m en een doorlatendheid van 1×10^{-5} m/s (gelijke lek lengtes).



Figuur A.11 Stijghoogte tegen x-coördinaat voor verschillende geometrieën met gelijke lek lengtes

In Tabel A.7 zijn de verschillende zandlaagsscenario's weergegeven. Deze scenario's zijn op basis van perforatiescenario 2 (een doorlatendheid van 0.01 m/s in het opbarstkanaal).

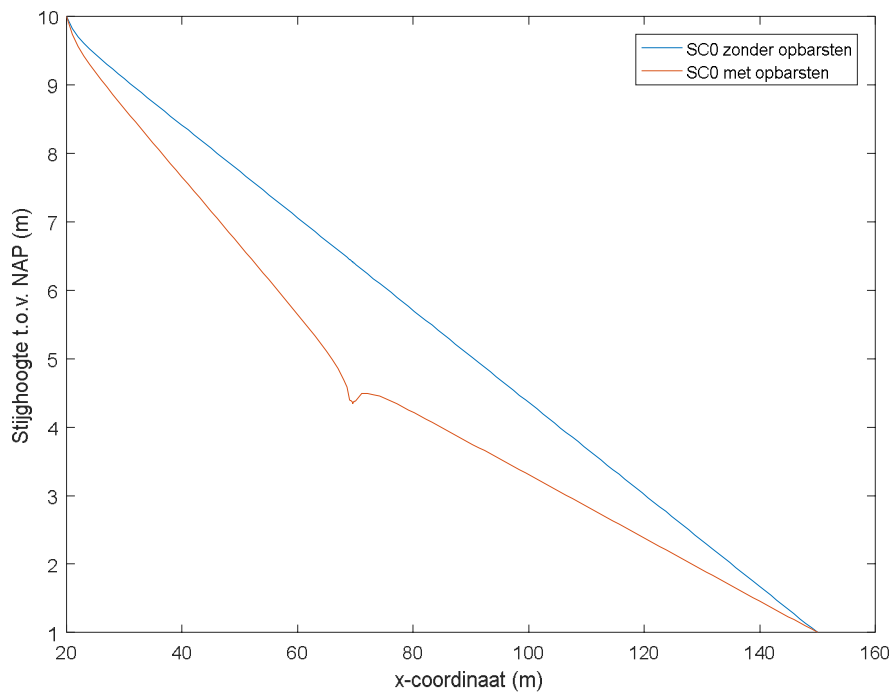
Tabel A.7 Zandlaagscenario's

Scenario	Dikte zandlaag (m)	Doorlatendheid zandlaag (m/s)	Dikte klei (m)	Doorlatendheid klei (m/s)	Lek lengte (m)	Representatieve doorlatendheid zand (m/s)
0	10	0.7×10^{-3}	3	7.50×10^{-8}	529	0.7×10^{-3}
1	3	1.0×10^{-4}	3	7.50×10^{-8}	110	3.0×10^{-5}
2	30	0.5×10^{-3}	3	7.50×10^{-8}	775	1.50×10^{-3}
3	3	1.0×10^{-5}	3	7.50×10^{-8}	35	3.0×10^{-6}

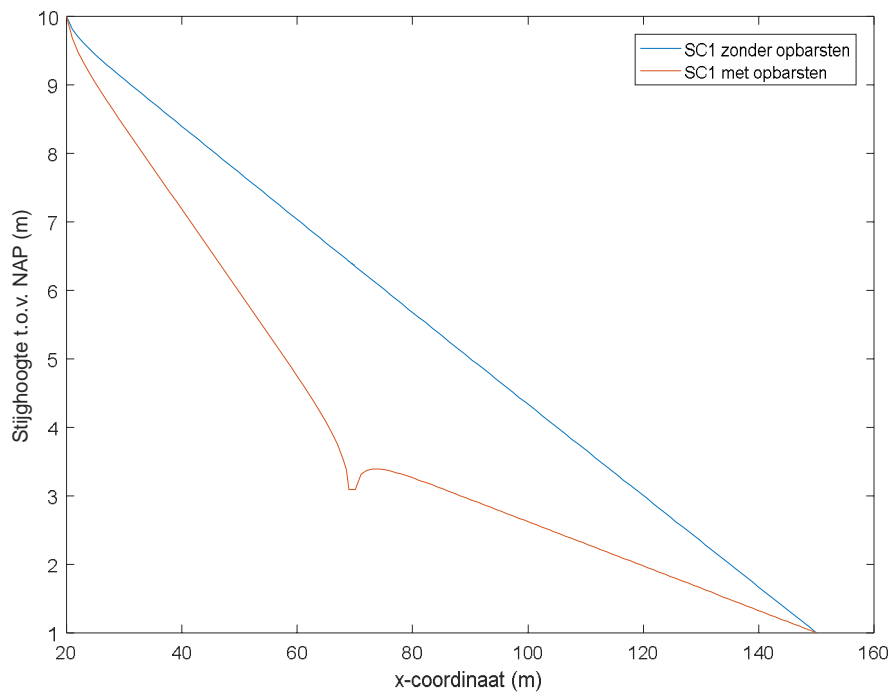
A.3.1 Resultaten stijghoogteverloop en uitstroom

Omdat de lek lengtes verschillen, zal het stijghoogteverloop zonder opbarsten ook verschillen per zandlaagscenario. In Figuur A.12 tot en met Figuur A.15 zijn de stijghoogteverlopen ter hoogte van de onderkant van de deklaag per zandlaagscenario weergegeven waarbij geen opbarsten is opgetreden en waarbij de deklaag wel is opgebarsten.

8 juli 2019, versie 1.0, definitief

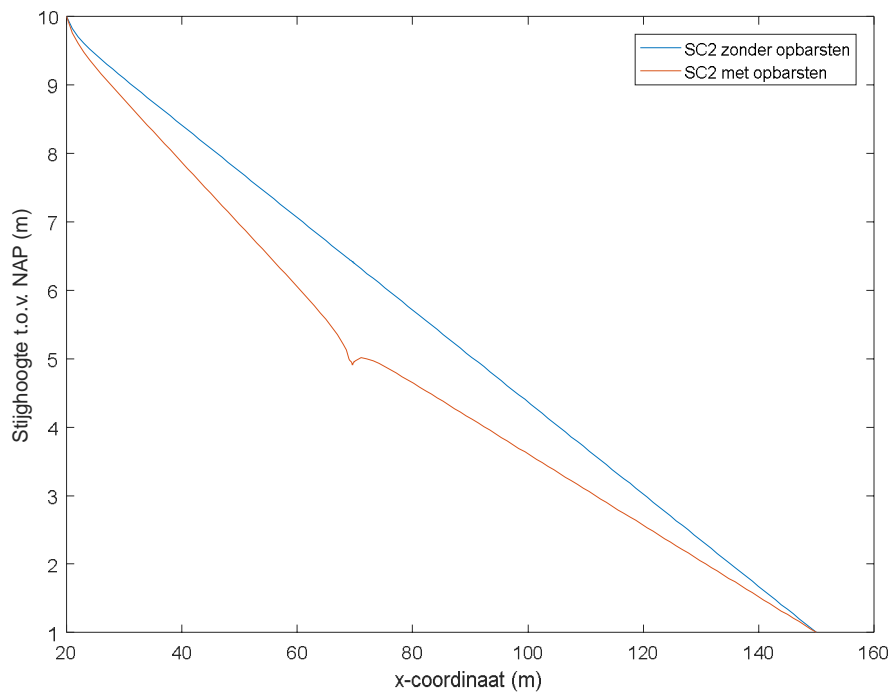


Figuur A.12 Stijghoogte tegen x-coördinaat met en zonder opbarstkanaal zandlaagscenario 0

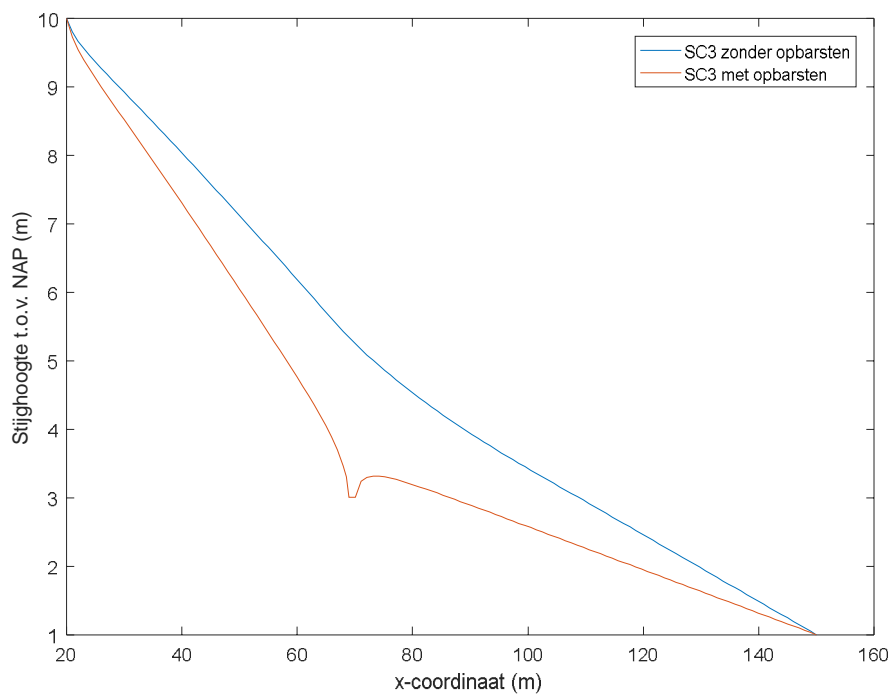


Figuur A.13 Stijghoogte tegen x-coördinaat met en zonder opbarstkanaal zandlaagscenario 1

8 juli 2019, versie 1.0, definitief



Figuur A.14 Stijghoogte tegen x-coördinaat met en zonder opbarstkanaal zandlaagscenario 2



Figuur A.15 Stijghoogte tegen x-coördinaat met en zonder opbarstkanaal zandlaagscenario 3

8 juli 2019, versie 1.0, definitief

Tabel A.8 Stijghoogte resultaten zandlaagscenario's

Scenario	Leklengte (m)	Stijghoogte onderkant opbarstkanaal (m)	Verlies in stijghoogte na opbarsten (m)
0	529	4.35	2.06
1	110	3.09	3.30
2	775	4.92	1.50
3	35	3.01	2.29

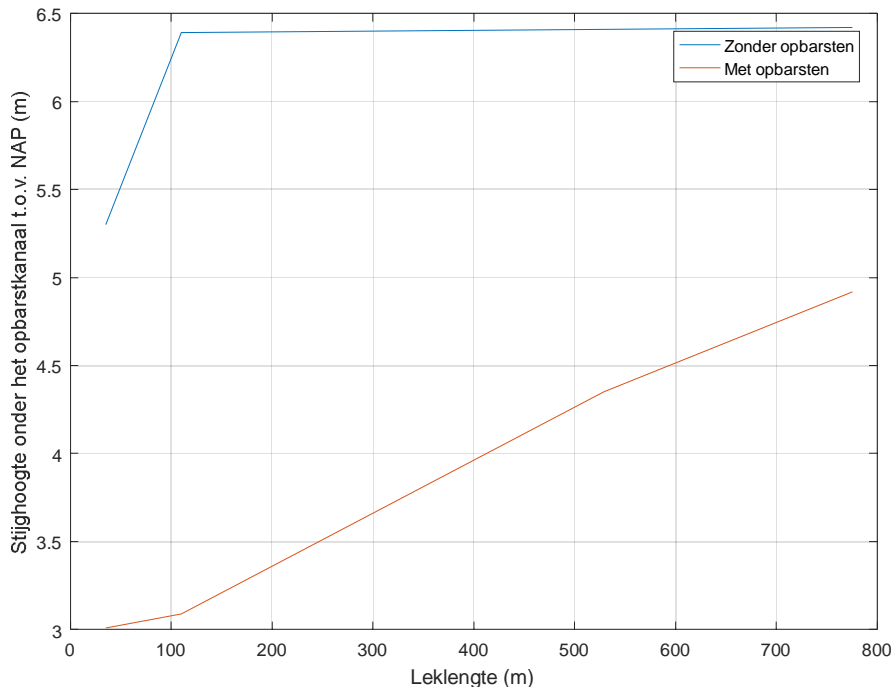
Tabel A.9 Debiet resultaten zandlaagscenario's

Scenario	Leklengte (m)	Debiet opbarstkanaal (m ² /s)	Debiet onder dijk (m ³ /s/m)	Debiet opbarstkanaal/ debiet onder dijk (-)
0	529	3.86 x 10 ⁻⁴	7.41 x 10 ⁻⁴	0.46
1	110	2.52 x 10 ⁻⁵	3.56 x 10 ⁻⁵	0.71
2	775	5.49 x 10 ⁻⁴	1.34 x 10 ⁻³	0.41
3	35	2.65 x 10 ⁻⁶	3.69 x 10 ⁻⁶	0.72

Uit Tabel A.8 blijkt dat de invloed van het opbarstkanaal afhangt van de lek lengte, naarmate de lek lengte korter wordt, wordt de invloed van het opbarstkanaal groter. Bij een korte lek lengte is de doorlatendheid keer de dikte van de zandlaag relatief klein, bijvoorbeeld een tussenzandlaag van fijn zand. Het verlies in stijghoogte na opbarsten wordt groter tot dat de minimale stijghoogte is bereikt, ofwel een stijghoogte gelijk aan het maaiveld (NAP +3 m). Ter visualisatie is in Figuur A.16 de berekende stijghoogte ter plaatse van het opbarstkanaal uitgezet tegen de lek lengte.

Het berekende effect van de doorlatendheid van de perforatie op de stijghoogte onder de deklaag na opbarsten is aanzienlijk groter dan die van de mogelijke scenario's van de doorlatendheid van de zandlaag.

8 juli 2019, versie 1.0, definitief



Figuur A.16 Stijghoogte onder het opbarstkanaal tegen de leklengte

Wanneer de leklengte groter is dan de afstand tot de sloot, heeft de leklengte weinig invloed op de stijghoogte in het geval er geen opbarsten is opgetreden. Wanneer opbarsten wel is opgetreden is een lineaire afhankelijkheid te zien tussen de leklengte en de stijghoogte onder het opbarstkanaal.

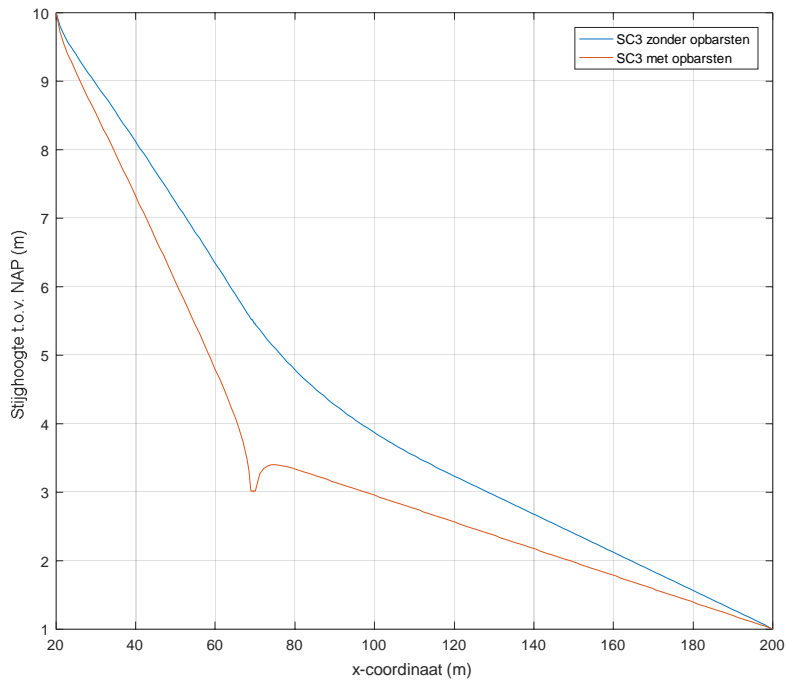
A.4 Invloed randvoorwaarden

In al de uitgevoerde berekeningen is de afstand van de binnenteen van de dijk tot het eind van de geometrie kleiner dan 3 maal de leklengte. Het eind van de geometrie bevindt zich dus in elke uitgevoerde berekening nog binnen de invloedssfeer van de dijk. Om na te gaan wat het effect van de polderrandvoorwaarde (RV 4) is op het stromingsprofiel na opbarsten, zijn er berekeningen gemaakt waarbij het eind van de geometrie op een afstand groter dan 3 maal de leklengte van de binnenteen van de dijk ligt. Voor de berekeningen is zandlaagscenario 3 gebruikt (leklengte = 35 m). Verder ligt het eind van de geometrie op $x=200$ (een afstand van 132 m tot de binnenteen van de dijk.)

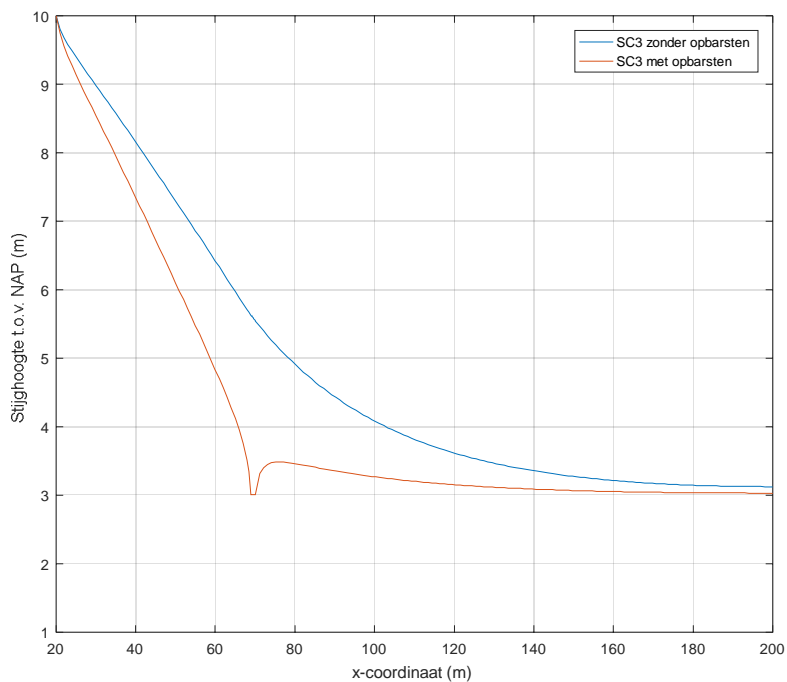
Er is een berekening gemaakt waarbij het polderpeil is opgegeven als een stijghoogterandvoorwaarde met eens stijghoogte van 1 m + NAP. Ook is er een berekening gemaakt waarbij de polderrand is gemodelleerd als een no-flow randvoorwaarde.

In Figuur A.17 en Figuur A.18 is het stijghoogteverloop ter hoogte van de onderkant van de deklaag weergegeven voor zandlaagscenario 3 met een verlengde geometrie, waarbij geen opbarsten is opgetreden en waarbij de deklaag wel is opgebarsten. In Figuur A.17 is RV4 een stijghoogterandvoorwaarde en in Figuur A.18 is RV4 een no-flow randvoorwaarde

8 juli 2019, versie 1.0, definitief



Figuur A.17 Stijghoogte tegen x-coördinaat met en zonder opbarstkanaal zandlaagscenario 3 met verlengde geometrie en een stijghoogte polderrandvoorwaarde



Figuur A.18 Stijghoogte tegen x-coördinaat met en zonder opbarstkanaal zandlaagscenario 3 met verlengde geometrie en een no-flow polderrandvoorwaarde

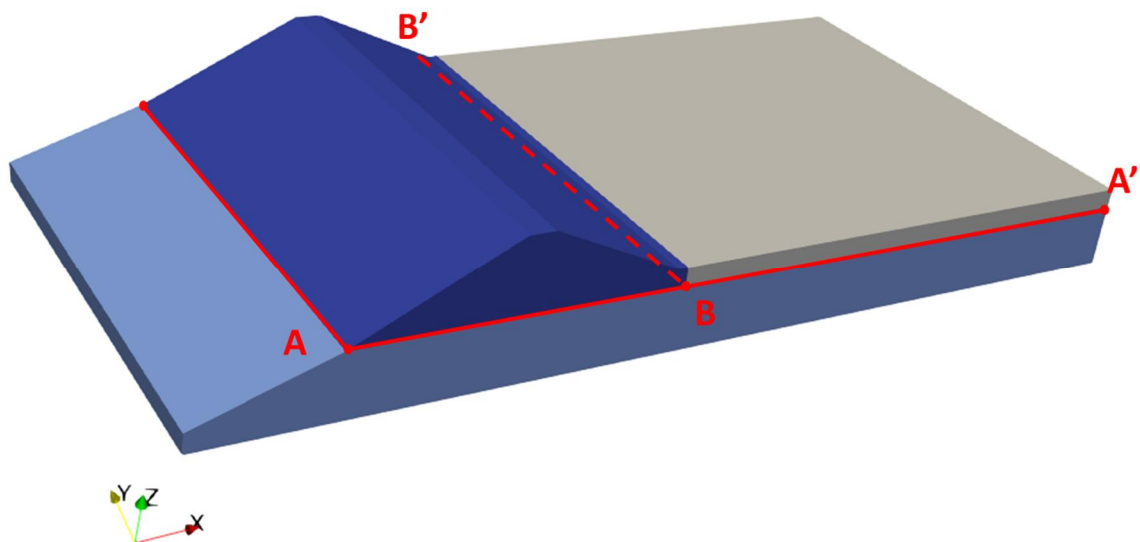
In Figuur A.17 is te zien dat het stijghoogteprofiel waarbij opbarsten is opgetreden tussen $x=80$ en $x=200$ lineair afneemt tot het achterlandpeil. Dus ook op een afstand van meer dan 3 maal de lek lengte vanaf de binnenteen is de invloed van het opbarstkanaal op de stijghoogte onder de deklaag merkbaar. In Figuur A.18 is te zien dat binnen de grenzen van de geometrie, de stijghoogte na opbarsten niet volledig geconvergeerd is naar het stijghoogteprofiel in het geval geen opbarsten is opgetreden. Het effect van de perforatie is dus merkbaar onder de gehele deklaag, zowel voor een stijghoogte-polderrandvoorwaarde als voor een no-flow-polderrandvoorwaarde.

A.5 3D-stroming

Er is één 3D-stromingsberekening gemaakt. Hierbij is de perforatie gemodelleerd als een gat met schoon water, de perforatiedoorlatendheid is bepaald met de Poiseuille vergelijking. Hieruit volgt een doorlatendheid in de orde van 100 m/s. Let op dat deze grote doorlatendheid enkel betekent dat de stroming door het gat weinig weerstand ondervindt, niet dat het water ook daadwerkelijk met een snelheid van 100 m/s door het gat zal stromen.

A.5.1 Resultaten

In Figuur A.19 is het 3D-model weergegeven. Exact onder de deklaag is een doorsnede gemaakt van het gehele oppervlak, welk is aangegeven met de rode belijning. Verder is doorsnede A-A' de doorsnede langs het opbarstkanaal in de x-richting, doorsnede B-B' is de doorsnede langs het opbarstkanaal in de y-richting.

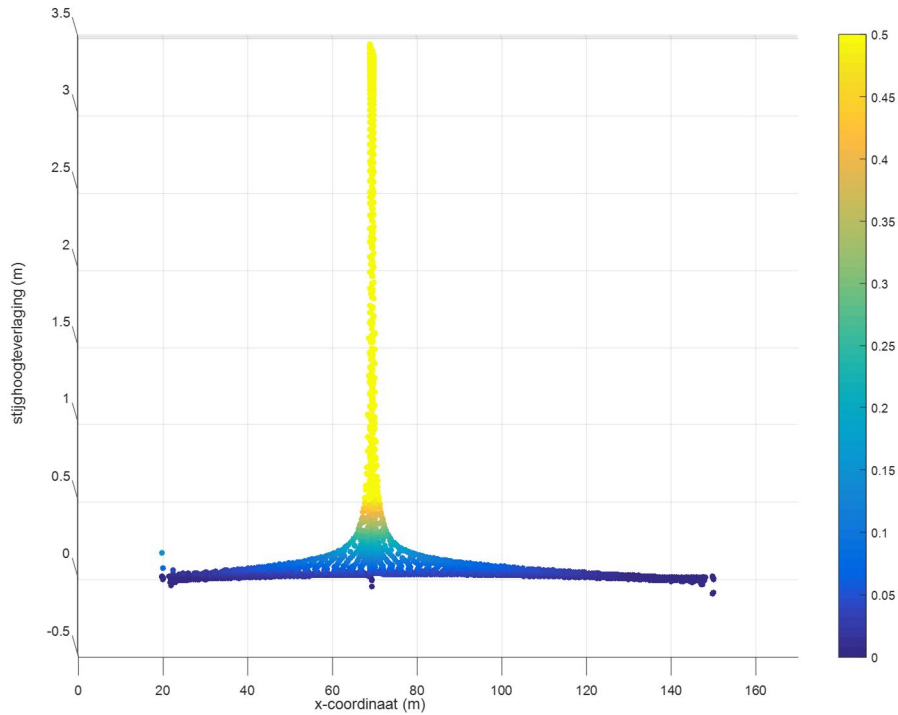


Figuur A.19 3D-model met aangegeven doorsnedes

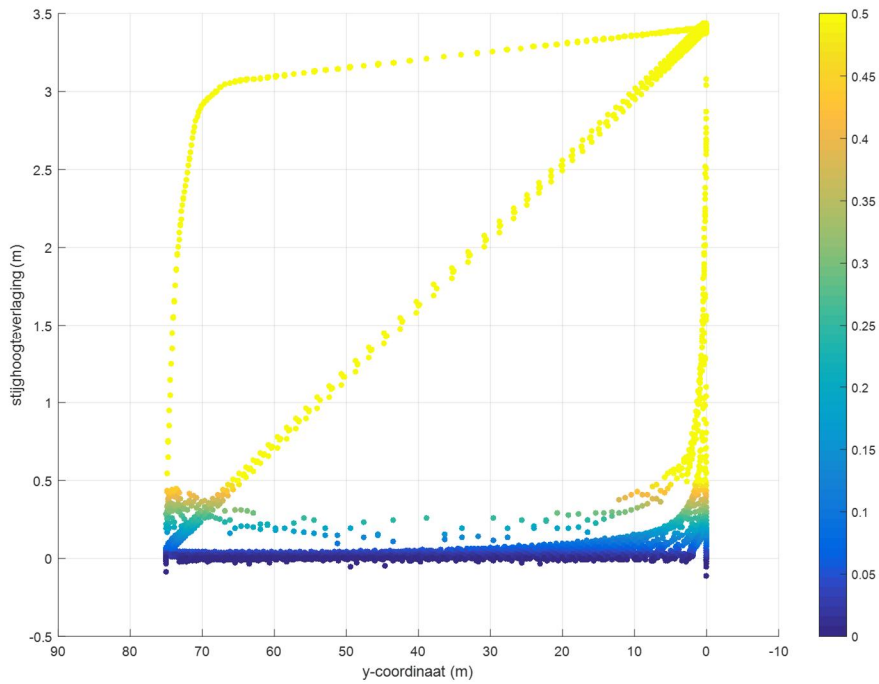
Het stijghoogteverlies als gevolg van een perforatie is bepaald door de berekende stijghoogte onder de deklaag af te trekken van het stijghoogteverloop in de basis case beschreven in paragraaf A.2.1.

In Figuur A.20 is het stijghoogteverlies uitgezet tegen de x-coördinaat. In Figuur A.21 is het stijghoogteverlies uitgezet tegen de y-coördinaat. In Figuur A.22 is op de x- en y-coördinaten van de doorsnede het stijghoogteverlies weergegeven aan de hand van een kleurenschaal, waar de limieten van de kleurenschaal een stijghoogte verlies van 0 m tot 0.5 m zijn.

8 juli 2019, versie 1.0, definitief

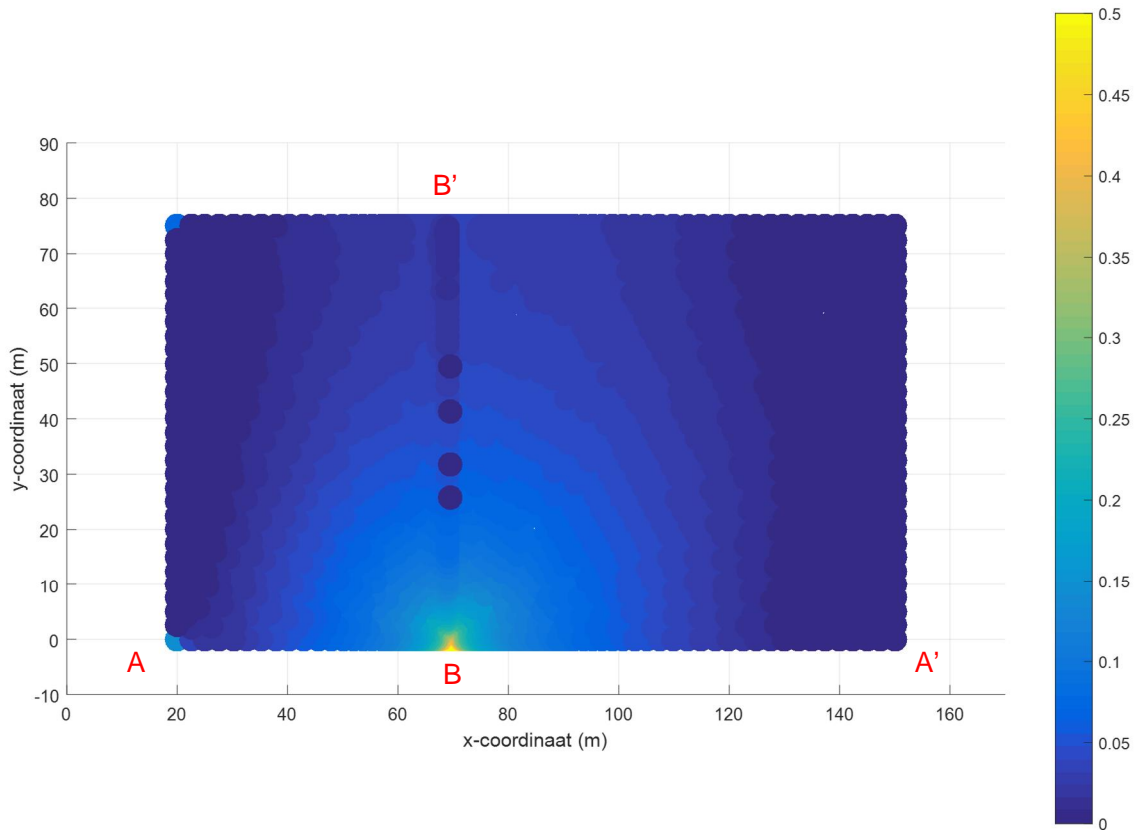


Figuur A.20 Stijghoogteverlies tegen de x-coördinaat (A-A')



Figuur A.21 Stijghoogteverlies tegen de y-coördinaat (y=0 is symmetrielyn hart van de geometrie; B'-B)

8 juli 2019, versie 1.0, definitief

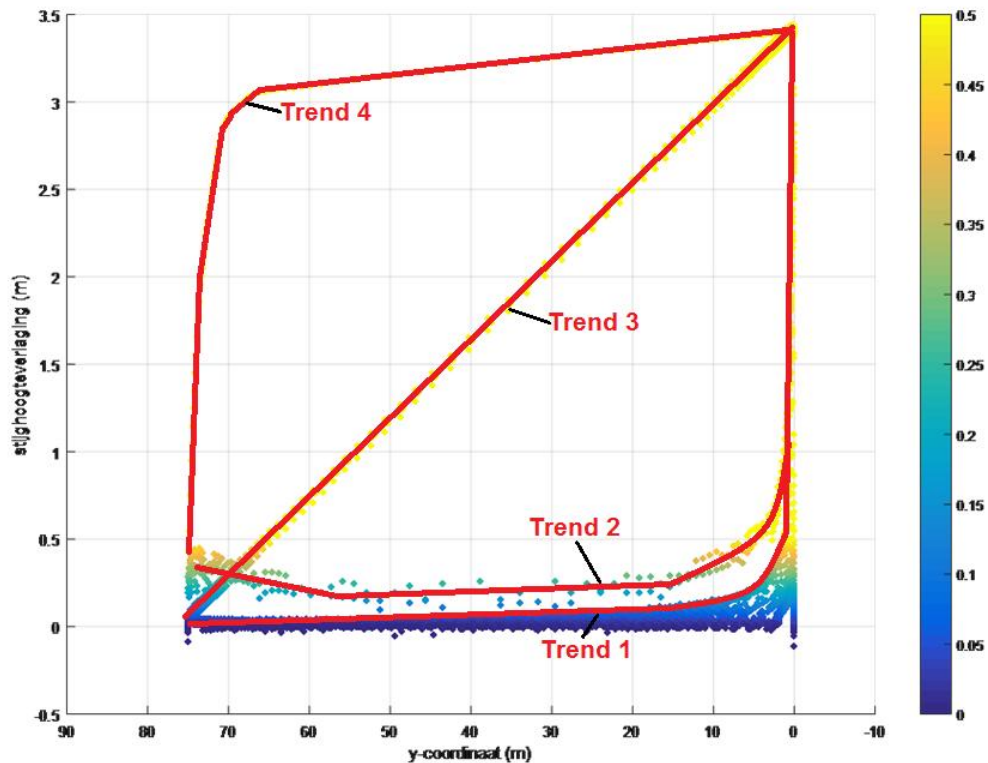


Figuur A.22 Stijgtoegterlies op de x- en y-coördinaten

Uit Figuur A.20 blijkt dat ter plaatsen van het opbarstkanaal een stijgtoegterverlaging optreedt van 3.5 m (een stijgtoegter gelijk aan het maaiveld). Echter binnen 10 meter in de x-richting is de stijgtoegterverlaging in doorsnede A-A' nog maar 0.2 m.

In Figuur A.21 zijn 4 trends te zien in het stijgtoegterverloop. In Figuur A.23 zijn de trends geplotted op het zijaanzicht. Alleen trend 1 wordt als realistisch beschouwd. De overige trends zijn uitsluitend aanwezig in doorsnede B-B', deze trends zijn waarschijnlijk het gevolg van numerieke fouten. Het gebruikte mesh in de y-richting ter plaatse van het opbarstkanaal is van slechte kwaliteit, de overgang van de grootte van de elementen is erg abrupt. Het rekenen met een goed mesh op de gebruikte schaal is rekenkundig echter erg duur en is daarom niet gedaan.

In Figuur A.22 is te zien dat het stijgtoegterverlies rond het opbarstkanaal in de x- en y-richting op een vergelijkbare manier afneemt. Op een grotere afstand van het opbarstkanaal, groter dan 30 meter, is te zien dat het stijgtoegter verlies sneller afneemt in de x-richting vergeleken met de y-richting. Dit komt door de opgegeven rivier en polder stijgtoegter randvoorwaarden.



Figuur A.23 Trends in stijghoogteverlies tegen de y-coördinaat

A.5.2 Turbulente stroming

Na toepassen van één lineariseringsstap van de perforatiedoorlatendheid volgt een doorlatendheid van 1×10^4 m/s, naar verwachting maakt dit minimaal verschil op de uitstroom. Met een perforatiedoorlatendheid van 100 m/s wordt in de perforatie al een stijghoogte berekend die gelijk is aan het maaiveldniveau, dit wijst erop dat de uitstroom vooral gelimiteerd wordt door de watertoevoer en niet door de doorlatendheid van de perforatie.

A.5.3 Vergelijking met 2D-stromingsberekeningen

In de 2D-berekeningen zijn er 2 stijghoogteafnameschalen waarneembaar, waarbij de eerste schaal direct onder het opbarstkanaal is en de tweede schaal over de gehele lengte van de geometrie. In de 3D-berekening is de stijghoogteafname onder het opbarstkanaal ook duidelijk aanwezig, echter het stijghoogteverlies dempt snel uit vergeleken met de 2D-berekening naarmate de afstand met het opbarstkanaal groter wordt. Ter vergelijking, op een afstand van 30 m van het opbarstkanaal is in scenario 0 (open spleet) uit hoofdstuk A.2 een stijghoogteafname waarneembaar van 2 m. In de 3D-berekening (open gat van 3x6 cm) is deze afname in de orde van 0.1 m. In scenario 0 stroomt 70% van het water wat onder de dijk door het zandpakket stroomt, weg uit de spleet. In het 3D-model zal dit percentage veel lager zijn, het effect van het opbarstkanaal is daarom veel minder merkbaar op grotere afstand van het kanaal.

A.6 Conclusies

In D-Geo Flow zijn 2D-berekeningen gedaan waarin een opening in de deklaag is gemodelleerd. Er is een variatiestudie gedaan waarin is gevarieerd in de doorlatendheid in deze opening en waarin is gevarieerd in de leklengte van het achterland. Verder is er een 3D-berekening gedaan om na te gaan wat het 3D-effect is van een opening in de deklaag. Zowel in de 2D-berekeningen als in de 3D-berekening is nagegaan of het meenemen van turbulente stroming invloed heeft op het uitstroomdebiet.

Uit de resultaten volgend uit de 2D-berekeningen blijkt dat een enkele opening in de deklaag, met een diameter van 3 cm, ervoor kan zorgen dat de stijghoogte zakt naar een niveau onder de kritieke stijghoogte waarbij opdrijven zal optreden. Echter, een zandsuspensie in de opening zal de doorlatendheid verlagen. Wanneer de opening niet groot genoeg is of wanneer de zandsuspensie een te grote dichtheid heeft, zal de uitstroom door de opening niet groot genoeg zijn om de stijghoogte onder de deklaag significant te verlagen.

Uit de 2D-berekeningen volgt dat bij een opening in de deklaag het stijghoogteverloop over het gehele profiel afneemt. Uit de 3D-berekening blijkt dat dit niet een realistische aanname is in het geval de opening een gat is en geen spleet. Bij grote doorlatendheden van de opening wordt de uitstroom grotendeels bepaald door de watertoestroom en minder door de doorlatendheid in de perforatie. De watertoestroom naar een spleet is veel groter dan de toestroom naar een gat, ondanks de doorlatendheid per strekkende meter gelijk is.

Uit de resultaten is gebleken dat het potentiaalverlies onder de deklaag ongeveer lineair afhankelijk is van de leklengte. Hoe groter de leklengte, hoe lager het potentiaalverlies.

Uit de 3D-berekening volgt dat de stijghoogte ter plaatsen van de perforatie kan afnemen tot het maaiveldniveau. Echter deze afname neemt snel af naarmate de afstand tot de perforatie toeneemt. Eén gat is naar verwachting niet genoeg om opdrijven of verder opbarsten te voorkomen op een grotere schaal. Echter naarmate het aantal gaten langs de dijk toeneemt, zal het opbarstrisico significant afnemen.

Het meenemen van turbulente stroming heeft weinig invloed op het resultaat. Turbulente stroming heeft invloed op de representatieve doorlatendheid in de perforatie, echter wanneer turbulente stroming voorkomt is de stroomsnelheid al zo hoog dat de uitstroom door de perforatie vooral bepaald wordt door de toestroom van water en minder door de doorlatendheid in de perforatie.

A.7 Literatuur

- [A1] Technische adviescommissie voor de waterkeringen. Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies . 2001.
- [A2] Deltares. D-Geo Flow D-Geo Flow in Delta Shell User Manual. Delft : Deltares, 2018.
- [A3] Ribo, R, et al., et al. GiD reference manual . Barcelona : CIMNE, 1998.
- [A4] Technische adviescommissie voor de waterkeringen. Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, deel 2 - benedenrivierengebied. 's-Gravenhage : Uitgeverij Waltman, 1989.
- [A5] Hoven, A. van. POVM Opbarsten Literatuur. Delft : Deltares, 2016.

B Database deklaagdikte bij wellen

Integraal opgenomen memo van Ane Wiersma, Deltares, betreffende een studie naar de deklaagdikte bij wellen die zijn opgenomen in een database.

B.1 Inleiding

Bij macrostabiliteit wordt de dikte van 4 m gehanteerd als scheidslijn voor opbarsten en het maken van een schuifsterkte=0 som. Dus dunner dan 4 m zal opbarsten en dan schuifsterkte in deklaag is 0, dikker dan 4 m geen opbarsten en reguliere schuifsterkte. De onderbouwing van deze 4 m is echter mager, expert judgement en dimensiestudie (op het oog). Het is ook merkwaardig om bij mechanisme piping geen kritische laagdikte te hebben en bij macrostabiliteit wel. Om deze reden is binnen de POV Opbarsten een project opgestart met als doel om de kritische deklaagdikte van 4 m te valideren.

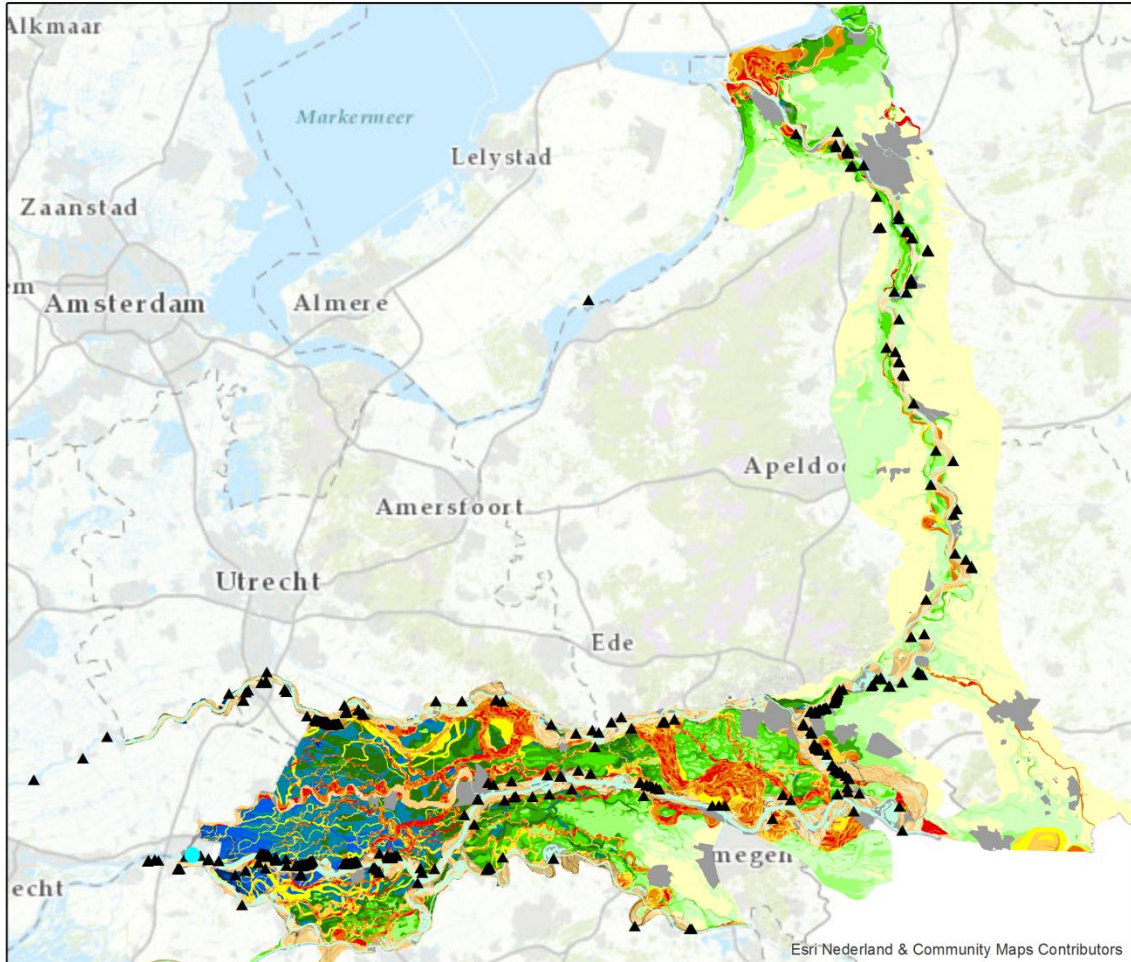
B.2 Analyse

Een onderzoekslijn binnen dit project om te onderzoeken wat de deklaagdiktes zijn bij zandmeevoerende wellen. Dit zijn immers locaties waar de deklaag is opgebarsten. In 2016 is een GIS database opgesteld voor Rijkswaterstaat waarin 494 zandmeevoerende wellen zijn geïdentificeerd. Deze database bestaat alleen uit locaties, er is geen informatie beschikbaar over de deklaagdiktes. Om toch in te schatten wat de bijbehorende deklaag is zijn twee bronnen gebruikt:

- De zanddieptekaart (Cohen e.a., 2009; Figuur B.1):
 - Dit zijn GIS-bestanden van Zanddieptekaarten van het Rivierengebied en het IJsseldal in de provincies Gelderland en Overijssel, samengesteld op basis van interpretaties uit boringen en het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN)
- Beschikbare boringen uit de DINO-database van TNO/GDN en de Universiteit Utrecht:
 - In deze boringen is dikte van de automatisch bepaald door middel van een Python script. De boringen bedekken Zuid Holland en het Gelderse Rivierenland. Langs de IJssel zijn geen boringen aanwezig die aan de vereisten voldoen.

De volgende analyses zijn uitgevoerd:

1. Snijden van de locaties met 289 zandmeevoerende wellen met de zanddiepte kaart. Dit geeft per zandmeevoerende wel de geïnterpreteerde diepte van het hoogste zand op die plek.
2. Het koppelen van de locatie van de zandmeevoerende wellen aan de deklaagdikte van de meest dichtbij zijnde boring binnen 100 m.
3. Het koppelen van de locatie van de zandmeevoerende wellen aan de deklaagdikte van de meest dichtbij zijnde boring binnen 500 m.



Legenda

▲ zandmeevoerende wellen

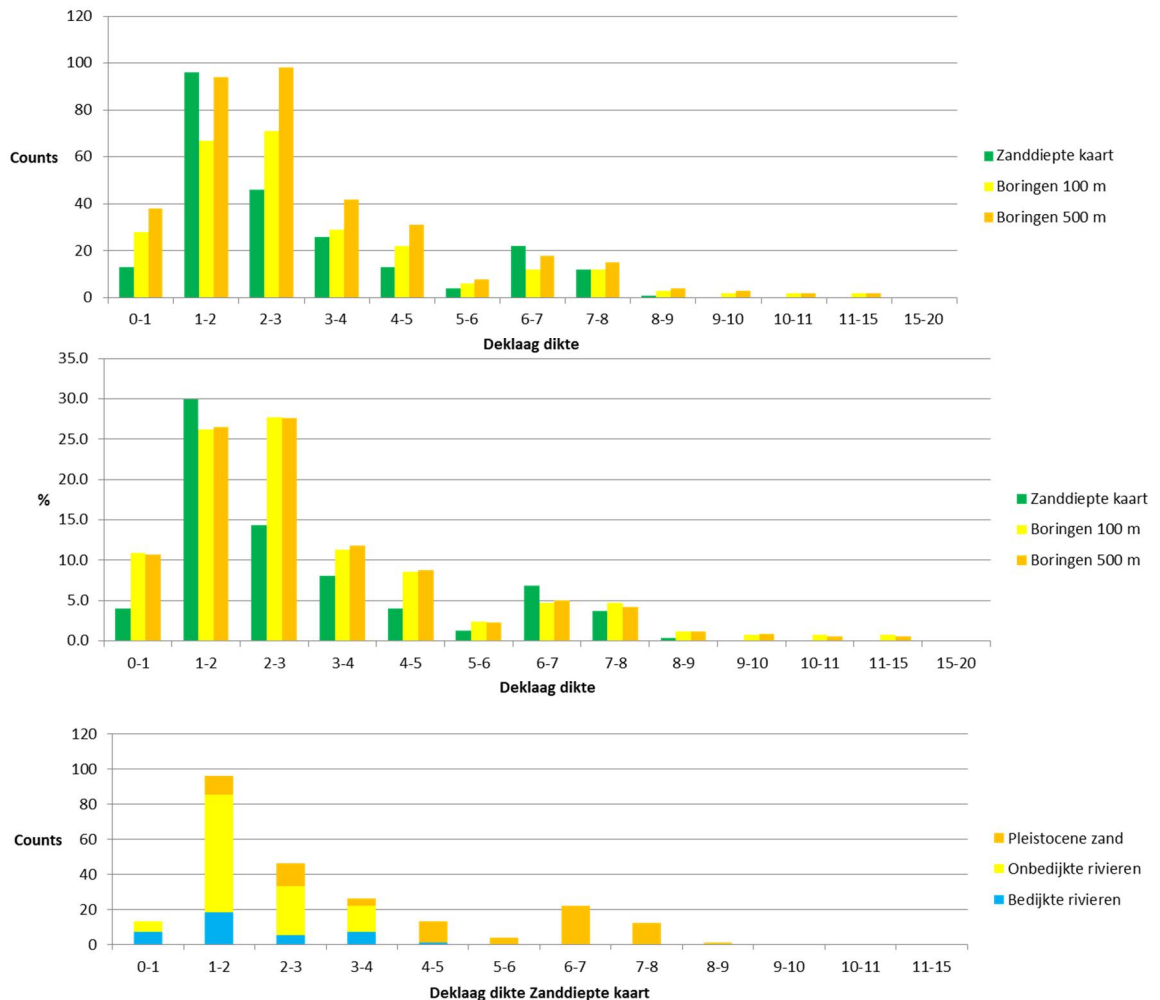
Zandattentiediepte beneden maaiveld

- | | |
|--|---|
| 1: Zand van bedijkte rivieren, binnen 1,0 m-mv | 20: Pleistoceen zand 0 - 1,0 m-mv |
| 2: Zand van bedijkte rivieren, top tussen 1,0 - 2,0 m-mv | 21: Pleistoceen zand 1,0 - 2,0 m-mv |
| 3: Zand van bedijkte rivieren, top tussen 2,0 - 3,0 m-mv | 22: Pleistoceen zand 2,0 - 3,0 m-mv |
| 4: Zand van bedijkte rivieren, top tussen 3,0 - 4,0 m-mv | 23: Pleistoceen zand 3,0 - 4,0 m-mv |
| 5: Zand van bedijkte rivieren, top tussen 4,0 - 5,0 m-mv | 24: Pleistoceen zand 4,0 - 5,0 m-mv |
| 6: Zand van bedijkte rivieren, top tussen 5,0 - 6,0 m-mv | 25: Pleistoceen zand 5,0 - 6,0 m-mv |
| 7: Zand van bedijkte rivieren, top tussen 6,0-7,0 m-mv | 26: Pleistoceen zand 6,0 - 7,0 m-mv |
| 8: Zand van bedijkte rivieren, top tussen 7,0-8,0 m-mv | 27: Pleistoceen zand 7,0 - 8,0 m-mv |
| 9: Zand van bedijkte rivieren, top tussen 8,0-9,0 m-mv | 28: Pleistoceen zand 8,0 - 9,0 m-mv |
| 10: Zand van bedijkte rivieren, top tussen 9,0-10,0 m-mv | 29: Pleistoceen zand 9,0 - 10,0 m-mv |
| 13: Beddingzand onbedijkte rivieren, top binnen 1,0 m-mv | 30: Pleistoceen zand 10,0 - 11,0 m-mv |
| 14: Beddingzand onbedijkte rivieren, top tussen 1,0 - 1,5 m-mv | 32: Verstoord (bebouwd, zandwinning, vergraven) |
| 15: Beddingzand onbedijkte rivieren, top tussen 1,5 - 2,0 m-mv | 99: Water |
| 16: Beddingzand onbedijkte rivieren, top tussen 2,0 - 3,0 m-mv | |
| 17: Beddingzand onbedijkte rivieren, top dieper dan 3,0 m-mv | |

Figuur B.1 Zanddieptekaart van Cohen e.a. (2009) met daarop de locaties van zandmeevoerende wellen geprojecteerd.

Resultaten

Onderstaand Figuur B.2 tonen de resultaten van de analyses. Uit de analyses komt naar voren dat in totaal aan meer dan 10% van de locaties van zandmeevoerende wellen een deklaagdikte is gekoppeld die dikker is dan 4 meter. Vooral uit de analyse gebaseerd op de zandbanenkaart komen veel zandmeevoerende wellen naar voren bij een deklaagdikte tussen de 6 en 8 m. Bij alle locaties met een deklaagdikte van meer dan 4 meter vormt het Pleistocene zand de hoogste zandlaag. Opvallend is dat het bovenste zand dat aan veel zandmeevoerende wellen is toegekend regelmatig zand van bedijkte rivieren is. Dit geeft de onzekerheid van de methode weer, aangezien de zandmeevoerende wellen alleen binnendijs zijn geregistreerd, en zand van bedijkte rivieren per definitie buitendijs te vinden is. De oorzaak hiervoor is dat de zandbanenkaart op regionale schaal is gekarteerd en de huidige dijklijn niet helemaal overeenkomt met de begrenzing van bedijkte rivierafzettingen. Een voorbeeld hiervoor is gegeven in Figuur B.3.



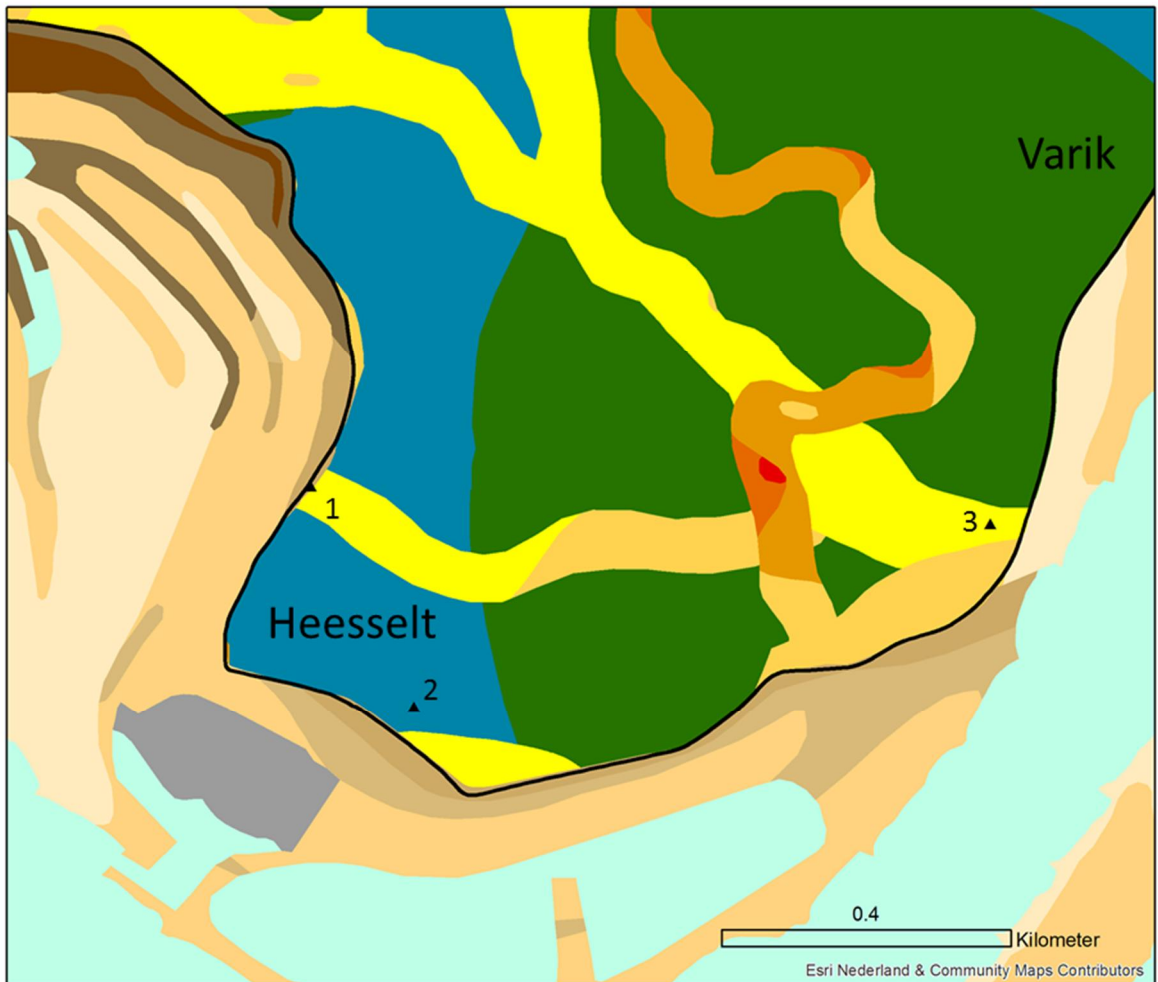
Figuur B.2 Analyse van de deklaagdikte bij zandmeevoerende wellen. De bovenste grafiek laat het aantal wellen zien (n = 289) per deklaagdikte. De middelste grafiek geeft het percentage en de onderste grafiek geeft aan wat per dikteklasse waaruit de bovenste zandlaag bestaat

8 juli 2019, versie 1.0, definitief

Om gevoel te krijgen voor de zandmeevoerende wellen die op een dikke deklaag lijken voor te komen worden enkele wellen uitgelicht. Het is opvallend dat de wellen vaak geconcentreerd zijn op locaties waar de deklaag ondiep is, zoals bij Heesselt, Tuil en Brakel (Figuur B.3, Figuur B.4 en Figuur B.5). Toch zijn er regelmatig wellen die buiten de gekarteerde ondieptes van zand plotten (zoals wel 2 bij Heesselt; Figuur B.3). Het kan zijn dat er wel ondiep zand zit op deze locaties, maar dat dit niet is gekarteerd door onvoldoende ondergrondinformatie.

Een groot deel van de zandmeevoerende wellen met een dikke deklaag bevindt zich rond Boveneind (Figuur B.6 en Figuur B.7). Deze wellen plotten vlak achter de dijk, op een locatie waar de Waal direct langs de dijk stroomt. Het intredepunt is dus direct buitendijks. Ook op deze locatie kan niet worden uitgesloten dat er wel een ondiep zandlichaam aanwezig is, maar die die niet is gekarteerd. Het is in ieder geval opvallend dat er zo veel observaties van zandmeevoerende wellen in een klein gebied zijn met zo'n dikke deklaag.

De boringen in de buurt (Figuur B.7) geven enkele keren een deklaagdikte dunner dan 4 meter in dit stuk met zandmeevoerende wellen. Ook zijn er boringen met een deklaagdikte dikker dan 4 meter. Dit geeft aan hoe veel variatie er is in de ondergrond, en hoe weinig goede ondergrondinformatie er aanwezig is.



Legenda

▲ zandmeevoerende wellen

— Dijkkringlijnen Waterschap Rivierenland

Figuur B.3 Drie wellen bij Heesselt geprojecteerd op de zanddieptekaart. Voor Legenda: zie Figuur B.1.

Zandmeevoerende wel 1 ligt binnendijs, waarschijnlijk boven een oude stroomgordel met een top dieper dan 3 meter (uit boringen blijkt ongeveer 4 meter). Omdat de bedijkte rivierafzettingen onder de dijk doorkomen in het GIS bestand, wordt de wel gekoppeld aan bedijkte rivierafzettingen.

Zandmeevoerende wel 2 bevindt zich in een komafzetting met op 6 a 7 meter diepte de bovenste zandlaag die bestaat uit Pleistoceen zand. Zandmeevoerende wel 3 ligt boven een oude stroomgordel op 3 a 4 meter diepte

8 juli 2019, versie 1.0, definitief



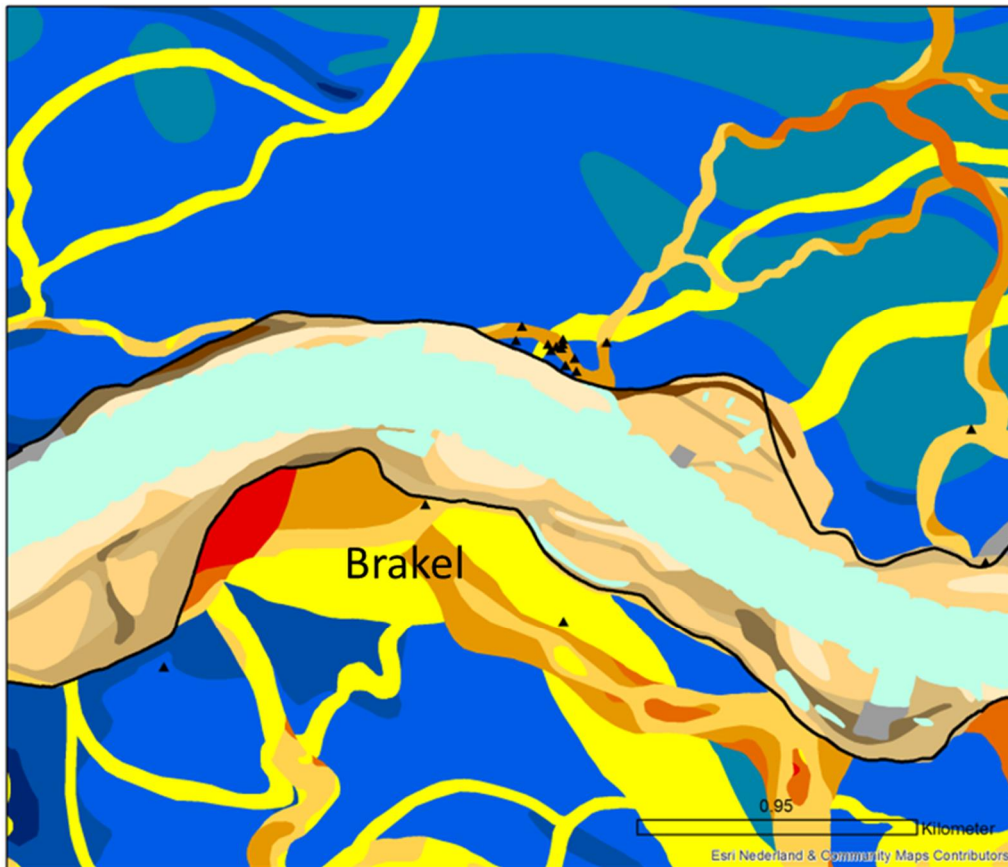
Legenda

▲ zandmeevoerende wellen

— Dijkkringlijnen Waterschap Rivierenland

Figuur B.4 Zandmeevoerende wellen bij Tuil, geconcentreerd waar de deklaag het dunst is

8 juli 2019, versie 1.0, definitief



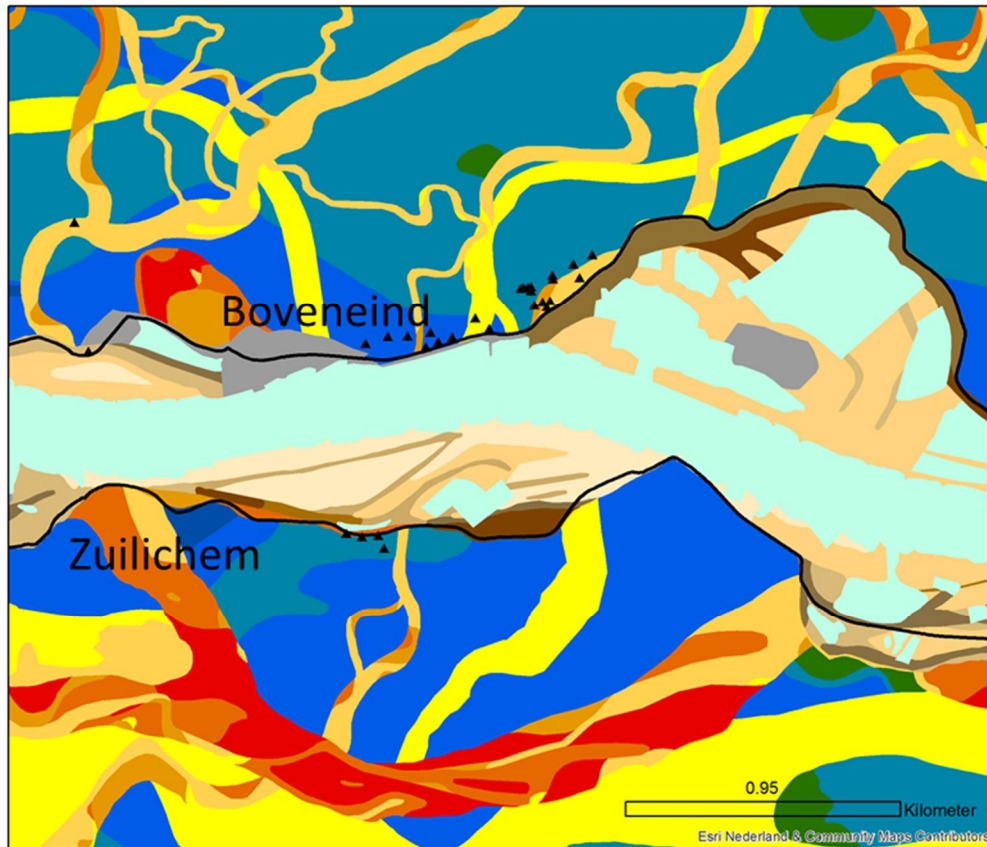
Legenda

▲ zandmeevoerende wellen

— Dijkkringlijnen Waterschap Rivierenland

Figuur B.5 Zandmeevoerende wellen langs de Waal ter hoogte van Brakel, waar voornamelijk waar de deklaag dun is door oude stroomgordels in de ondergrond

8 juli 2019, versie 1.0, definitief

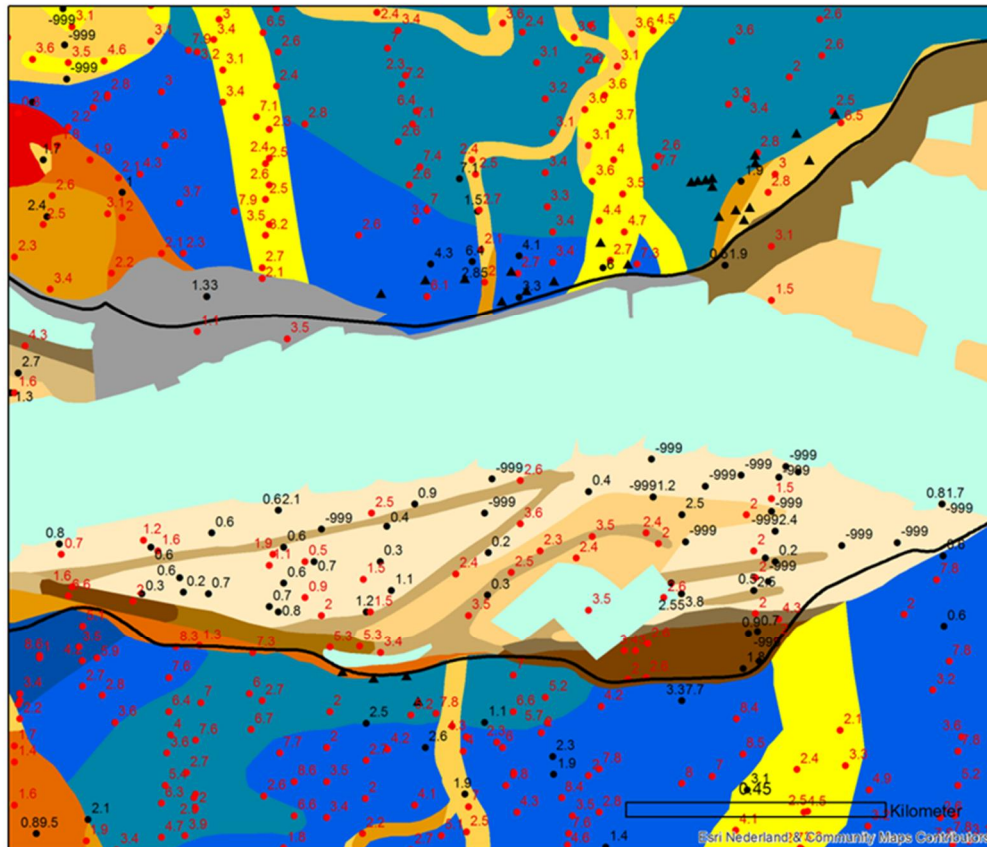


Legenda

▲ zandmeevoerende wellen

— Dijkkringlijnen Waterschap Rivierenland

Figuur B.6 Zandmeevoerende wellen rond Zuilichem en Boveneind. In dit traject zijn de helft van de zandmeevoerende wellen met een deklaag dikker dan 4 meter geconcentreerd



Legenda

- ▲ zandmeevoerende wellen
- Boringen zonder eerste zandlaag met einddiepte
- Dijklijn Waterschap Rivierland
- Boringen met diepte bovenste zandlaag

Figuur B.7 Zandmeevoerende wellen ter hoogte van Boveneind en Zuilichem met daarbij de boringen. Zwarte stippen geven locaties van boringen aan waarbij een zandlaag is aangetroffen, en de dikte van de deklaag. Rode punten en tekst geven boringen aan waar geen zand is aangetroffen en de einddiepte van de boring (dus de minimale deklaagdikte)

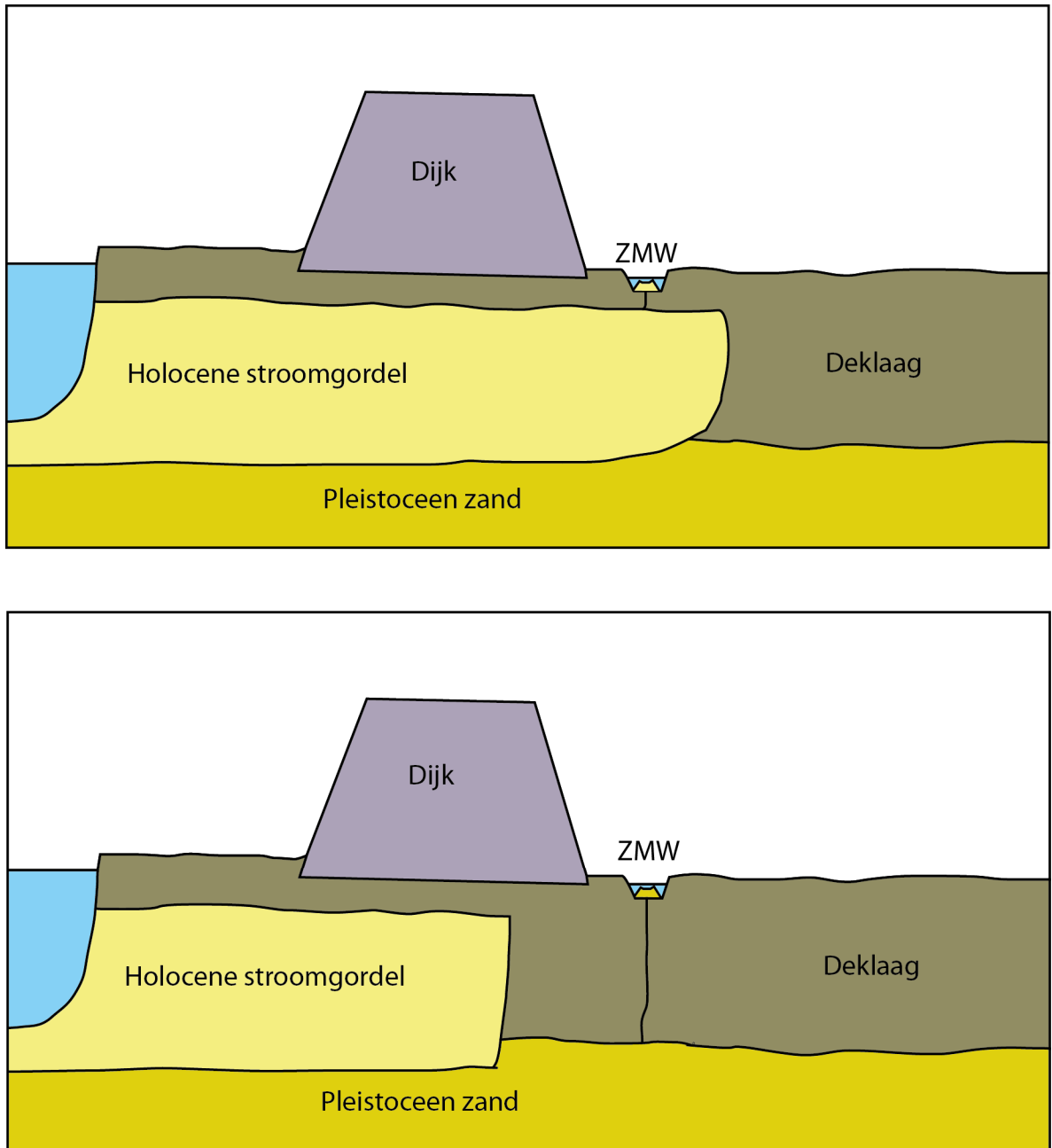
B.3 Discussie

De methoden laten vergelijkbare resultaten zien wat betreft aantallen zandmeevoerende wellen en deklaagdiktes. De zanddieptekaart is een interpretatie op basis van bijna dezelfde set boringen. Wat dat betreft wordt meer waarde gehecht aan de resultaten van de zanddieptekaart. Deze kaart is alleen niet overall aanwezig waar zandmeevoerende wellen voorkomen.

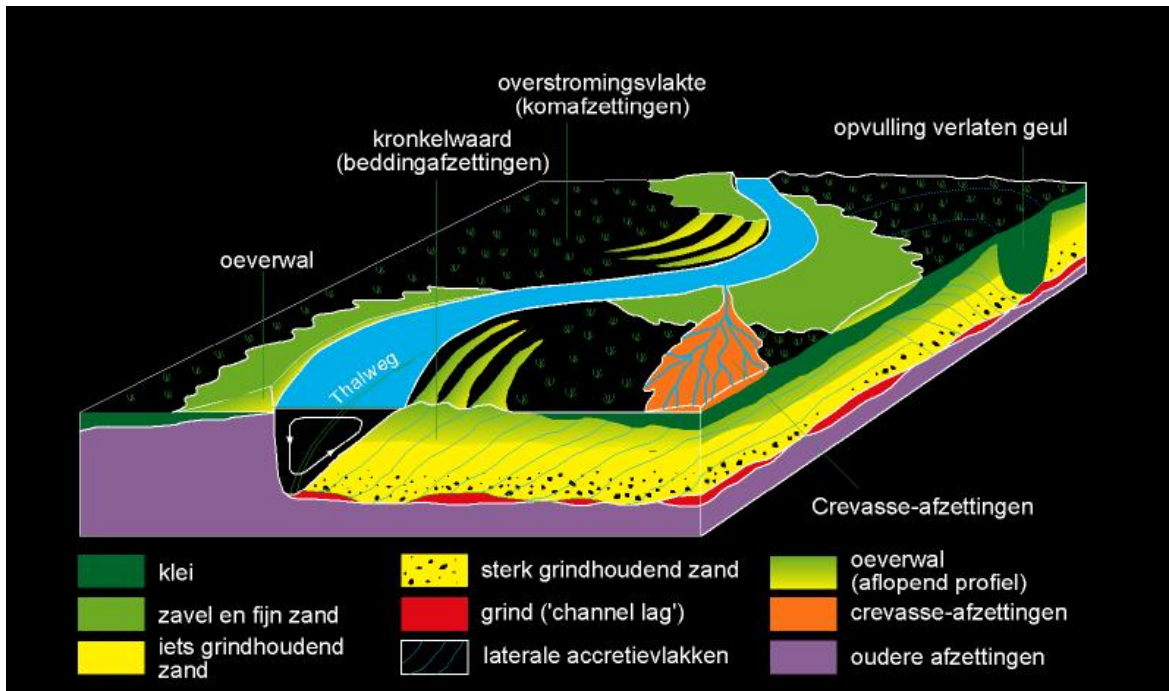
De beperking van deze analyses is dat alle informatie over de ondergrond een interpretatie is op basis van beschikbare data. Deze data is niet vlakdekkend. Om die reden kan moeilijk met zekerheid worden vastgesteld wat de deklaagdikte is op locaties met zandmeevoerende wellen. Het aantal zandmeevoerende wellen met een dikke deklaag wordt sterk gedomineerd door enkele clusters met veel wellen, die daarmee de statistieken zouden kunnen beïnvloeden. De dijken zijn in het verleden aangelegd op de oeverwallen van de huidige rivieren, waarbij het doel was de dijk op buiten het zandlichaam van de rivier te leggen. Dit was niet altijd mogelijk. Het kan daarom lokaal goed zijn dat een zandlichaam nog binnendijks uitsteekt van de dijk (Figuur B.8). Dit kan een deel van de zandmeevoerende wellen goed verklaren. Daarbij bestaan de oevers van de rivieren waarop de dijken zijn gebouwd uit zand en kleilagen, met

8 juli 2019, versie 1.0, definitief

lokaal zogenaamde crevasse afzettingen: dunne (<1m) zandlichamen (Figuur B.9). Ook vanuit deze “tussenzandlagen” kan zand worden getransporteerd naar boven.



Figuur B.8 Voorbeeld van een doorsnede onder een dijk door, waarbij in de bovenste figuur het zandlichaam van de rivier tot binnendijks reikt, terwijl in de onderste figuur het zandlichaam stopt onder de dijk. In de bovenste situatie komt de zandmeewerende wel (ZMW) uit het zandlichaam van de rivier, in de onderste situatie vanuit het Pleistocene zand



Figuur B.9 Blokdiagram met verschillende rivierafzettingen. Let op de Crevasse afzettingen die langs rivieren voor tussen zandlagen kunnen zorgen

B.4 Conclusie

Er is een sterke overeenkomst tussen de locatie van zandmeevoerende wellen en ondiepe zandbanen. Ook bij een deklaagdikte van meer dan 4 meter lijken nog steeds zandmeevoerende wellen aanwezig. De vraag is echter of dit in werkelijkheid zo is, en of dit niet het gevolg is van een zandlichaam dat toch net tot binnendijs van de dijk reikt. Bovendien wordt het grote aantal mogelijk veroorzaakt door een bias in de database waarin enkele clusters met zandmeevoerende wellen zijn geïdentificeerd. Deze trajecten gaan deels over gebieden met mogelijk een dikke deklaag. Het kunnen echter ook zandbanen zijn die, zoals hierboven beschreven, net binnendijs van de dijk uitsteken. Een andere mogelijkheid is dat het zand uit de zandmeevoerende wellen afkomstig is uit tussenzandlagen, zogenaamde "crevasse afzettingen".

Het is dus met deze analyse op basis van bestaande data niet met zekerheid te zeggen of deklagen dikker dan 4 meter niet opbarsten. Tien procent van de zandmeevoerende wellen kom immers voor bij deklagen dikker dan vier meter. Of de deklaag op deze locaties inderdaad zo dik is, is maar de vraag.

Grondonderzoek op de locaties met de zandmeevoerende wellen en analyse van het zand dat wordt meegevoerd kan uitsluitsel geven over de herkomst van het zand en de dikte en samenstelling van de deklaag.

B.5 Referentie

Cohen, K.M. (2009), Stouthamer, E., Hoek, W.Z., Berendsen H.J.A., Kempen, H.F.J., Zand in banen, Zanddiepte kaarten van het Rivierengebied en het IJsseldal in de provincies Gelderland en Overijssel, 3^{de} druk, Universiteit Utrecht, ISBN 978-90-73586-42-0