Optimalisering rekenregels ‘piping’ en regionale keringen: invloed maatgevende geohydrologische parameterwaarden

Eindrapportage 1 december 2014



Acacia Water

Samenvatting

In de verkenning naar de geldigheid van de nieuwe rekenregel voor piping (zoals ontwikkeld in het SBWprogramma) is geconcludeerd dat de nieuwe inzichten ook van toepassing zijn voor regionale keringen. Aanbevolen is de nieuwe rekenregel te vertalen en te optimaliseren voor regionale keringen, waarbij alle partiële veiligheidsfactoren binnen de beoordeling worden aangepast.

Deze studie gaat dieper in op de infiltratieweerstand van een boezembodem, in relatie tot de kD-waarde van het onderliggende zandpakket, om een inzicht te krijgen en het kwantificeren van enerzijds de gradiënt in de zandondergrond zelf en anderzijds de mogelijke toename van de stijghoogte daarin door bijvoorbeeld baggeren en/of lokaal opdrijven.

De bestaande kennis over de hydraulische waterbodemweerstand is gecategoriseerd op basis van gedocumenteerde studies. Daarnaast zijn meetmethoden op een rij gezet waarmee op een betrouwbare wijze de dikte, de samenstelling en daarvan afgeleid of direct de hydraulische weerstand van de waterbodem is vast te stellen.

Een analytische formule is afgeleid om op basis van de geohydrologische schematisatie het stijghoogteverloop in de watervoerende laag te berekenen en daarmee het toetsingscriterium voor piping met behulp van de formule van Sellmeijer aan te passen.

Met behulp van modelsimulaties zijn bandbreedtes onderzocht van verschillende factoren van invloed op de stijghoogte(gradiënt) in de watervoerende laag in relatie tot de hydraulische weerstand van de boezembodem. De 2D en 3D modelberekeningen zijn uitgevoerd op basis van FlexPDE, de ‘volgende generatie’ modelsoftware waarmee op zeer gedetailleerde schaal geïntegreerd verzadigde en onverzadigde stroming gesimuleerd kan worden.

Het onderzoek vormt een onderdeel van het zogenaamde Ontwikkelingsprogramma Regionale Keringen, waarin STOWA op verzoek van IPO en de UvW onder andere het toetsinstrumentarium voor de regionale keringen wil verbeteren.

Colofon

Documenttitel	.	Optimalisering rekenregels ‘piping’ en regionale keringen: invloed maatgevende geohydrologische parameterwaarden
Opdrachtgever	.	STOWA
Status	.	Eindrapportage
Datum	.	1 december 2014
Projectnummer	.	N20140544
Projectteam	.	Sieger Burger, Jaco van der Gaast, Koos Groen en Jouke Velstra

Disclaimer

Rapport: Aan dit rapport kunnen geen rechten worden ontleend. De auteurs zijn niet verantwoordelijk voor eventuele fouten of consequenties. Aanvullingen of verbeteringen zijn welkom via info@acaciawater.com

Inhoudsopgave

1 Inleiding 1

1.1 Doelstelling 1

1.2 Leeswijzer 1

2 Achtergrond en context 3

2.1 Mechanisme piping 3

2.2 Piping controle middels de Sellmeijer formule 4

2.3 Eisen dikte boezembodem in relatie tot de hydraulische weerstand 5

2.4 De praktijk 6

3 Literatuuronderzoek infiltratie weerstand boezemwateren 8

3.1 Inleiding 8

3.2 Definiëring intree- / uittreeweerstand: 8

3.3 Bestaande boezem- en kanaalbodems 9

3.4 Slib- en weerstandsvorming boezembodem 15

3.5 Conclusies 19

4 Meetmethoden hydraulische (infiltratie)weerstand 21

4.1 Inleiding 21

4.2 Meetmethoden ter bepaling van de infiltratieweerstand van bodemsliblaag en deklaag 21

4.3 Conclusies 24

5 Modelonderzoek weerstanden boezemkades 25

5.1 Inleiding 25

5.2 Modelinstrumentarium 25

5.3 Modelschematisatie 26

5.4 Variatie van weerstand boezembodem en kD-waarde watervoerende laag 26

5.5 Variatie van weerstand en breedte boezembodem en kD-waarde watervoerende laag 29

5.6 Variatie van de doorlatendheid, dikte & weerstand boezembodem en weerstand slootbodem bij twee kD-waarden 31

5.7 Variatie van weerstand boezembodem en weerstand sliblaag 34

5.8 Conclusies 35

6 Effect van een tijdelijke weerstandsverlaging door een gat met beperkte omvang 37

6.1 Inleiding 37

6.2 Model schematisatie 38

6.3 Gat met beperkte weerstand en de sloot bodem met beperkte weerstand – doorlatendheid 0,5m/d 39

6.4 Gat met weerstand en de sloot bodem met weerstand – doorlatendheid 0,1 m/dag 41

6.5 Invloed van verschillende afmetingen van een tijdelijk gat 42
6.6 Conclusies 44
7 Modelsimulaties veldproef piping boezem Rekerpolder 45
7.1 Inleiding 45
7.2 Uitvoering piping test 45
7.3 Analyse stijghoogtemetingen Rekerpolder 46
7.4 Geohydrologische modelsimulaties 49
7.5 Conclusies 56
8 Analytische oplossing stijghoogtegradiënt en aanpassing toepassing Sellmeijer 57
8.1 Inleiding 57
8.2 Spreidingslengte 57
8.3 Parallelle stroming naar een kanaal 58
8.4 Stroming in de zandondergrond onder een dijk 59
8.5 Vergelijking met modelberekeningen 64
8.6 Alternatief voor het criterium voor piping controle 66
9 Vergelijking van de gemeten stijghoogten bij verschillende boezemlocaties met de analytische formule 69
9.1 Inleiding 69
9.2 Analyse peilbuizen 69
9.3 Bepaling van het verhang 71
9.4 Bepaling boezemweerstand met behulp van formules 72
9.5 Conclusies 74
10 Conclusies en aanbevelingen 75
10.1 Conclusies 75
10.2 Aanbevelingen 79
11 Referenties 81

1 Inleiding

In de verkenning naar de geldigheid van de nieuwe rekenregel voor piping (zoals ontwikkeld in het SBW – programma) is geconcludeerd dat de nieuwe inzichten ook van toepassing zijn voor regionale keringen. Hierdoor wordt aanbevolen enerzijds de toepassing van de methode Bligh te verlaten (omdat die niet altijd voldoende veilig is) en anderzijds de nieuwe rekenregel te vertalen / optimaliseren voor regionale keringen, een integrale vertaling waarbij alle partiële veiligheidsfactoren binnen de beoordeling worden aangepast.

Bij verschillende veiligheidstoetsingen is geconstateerd dat de beoordeling van piping, met name voor boezemkaden, aandacht verdient. Het PvA BORK03-05 (STOWA, 2013) gaat hier op in en geeft een overzicht van onderwerpen waarop nader onderzoek naar piping zich kan richten.

1.1 Doelstelling

In de verkenning naar de geldigheid van de nieuwe rekenregel voor piping (zoals ontwikkeld in het SBWprogramma) is geconcludeerd dat de nieuwe inzichten ook van toepassing zijn voor regionale keringen. Aanbevolen is de nieuwe rekenregel te vertalen en te optimaliseren voor regionale keringen, waarbij alle partiële veiligheidsfactoren binnen de beoordeling worden aangepast.

Dit rapport gaat dieper in op de infiltratieweerstand van een boezembodem, in relatie tot de kD-waarde van het onderliggende zandpakket, om een inzicht te krijgen en het kwantificeren van enerzijds de gradiënt in de zandondergrond zelf en anderzijds de mogelijke toename van de stijghoogte daarin door bijvoorbeeld baggeren en/of lokaal opdrijven.

Het onderzoek vormt een onderdeel van het zgn. Ontwikkelingsprogramma Regionale Keringen, waarin STOWA op verzoek van IPO en de UvW o.a. het toetsinstrumentarium voor de regionale keringen wil verbeteren.

Een tweede doel van het onderzoek is dan ook om een analytische formule af te leiden om op basis van de geohydrologische schematisatie het stijghoogteverloop in de watervoerende laag te berekenen en daarmee te komen tot een aanpassing van het toetsingscriterium voor piping met behulp van de formule van Sellmeijer.

1.2 Leeswijzer

Hoofdstuk 2: Achtergrond en context. In dit hoofdstuk geeft kort de achtergrond omtrent piping en meer specifiek op de dikte-eis voor boezembodems in de Leidraad “Toetsen op veiligheid regionale waterkeringen” en de addendum en vervolgens het geheel in de context van de optredende praktijk te plaatsen.

Hoofdstuk 3: Literatuuronderzoek infiltratie weerstand boezemwateren. In dit hoofdstuk is de bestaande kennis over de hydraulische waterbodemweerstand gecategoriseerd. Het geeft een overzicht omtrent de hydraulische weerstandswaarde, de bandbreedte van de te hanteren weerstandswaarde, de wijze waarop een sliblaag dan wel een inspoelingslaag kan vormen waardoor de weerstandswaarde toeneemt en

eventuele verbanden zijn te leggen met (lokale) hydrologische dan wel geologische omstandigheden waarvan een indeling is te maken.

Hoofdstuk 4: Meetmethoden hydraulische (infiltratie)weerstand. Bij een toetsing van boezemkades is het van belang uit te gaan van een reële infiltratieweerstand. De infiltratieweerstand is afhankelijk van de dikte en samenstelling van de waterbodem en/of onderliggende slecht doorlatende laag. Deze zal veelal afhankelijk zijn van de lokale situatie. Dit hoofdstuk gaat in op de vraag of er een betrouwbare techniek bestaat voor dan wel ontwikkeld kan worden om de dikte, samenstelling en daarvan afgeleid of direct de hydraulische weerstand van de waterbodem vast te stellen. Omgekeerd kan de techniek inzetbaar zijn om aan te tonen of een waterbodem voldoet aan gestelde eisen van hydraulische weerstand (o.a. intredepunt en effectiviteit kwelweg, etc.).

Hoofdstuk 5: Modelonderzoek weerstanden boezemkades. Dit hoofdstuk onderzoekt de verschillende factoren van invloed op de stijghoogte(gradiënt) in de watervoerende laag in relatie tot de hydraulische weerstand van de boezembodem.

Hoofdstuk 6: Effect van een tijdelijke weerstandsverlaging door een gat met beperkte omvang. Opdrijving van een deel van de boezembodem wordt als een risico gezien voor het optreden van piping. Het effect hiervan op de stijghoogtegradiënt wordt veelal bepaald aan de hand van een 2D doorsnede schematisatie (of model). In dit hoofdstuk wordt een vergelijking gemaakt tussen een 2D en 3D schematisatie middels modelsimulaties. Dit om inzicht te krijgen in het uitstralingseffect van een gat met beperkte omvang, waarbij tevens wordt vastgesteld of 2D benadering valide is of dat in dergelijke gevallen een 3D benadering noodzakelijk is.

Hoofdstuk 7. Modelsimulaties van veldproef piping boezem Rekerpolder. De case Rekerpolder is uitgevoerd door Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK) om te bepalen hoe het grondwater reageert op een gat in de boezembodem. De resultaten zijn gebruikt als verificatie voor de verschillende onderwerpen besproken in dit rapport. Primair doel is echter om te onderzoeken of met een eenvoudige modelschematisatie kan worden volstaan voor het bepalen van de effecten van de bodemweerstand op het verloop van de stijghoogte in het watervoerend pakket..

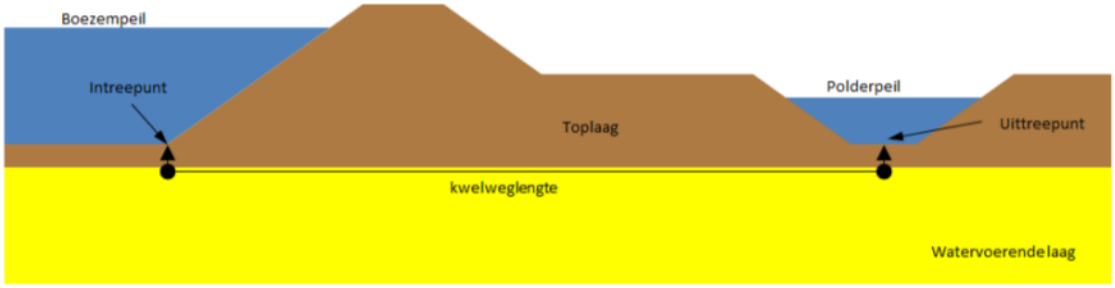
Hoofdstuk 8: Analytische oplossing stijghoogteverloop en aanpassing toepassing Sellmeijer. Op basis van literatuur en beschikbare analytische formules is een nieuwe formule voor boezemkades afgeleid om het verloop van het stijghoogteverloop in de watervoerende laag te berekenen en daarmee het toetsingscriterium voor piping met de formule van Sellmeijer aan te passen.

Hoofdstuk 9: Vergelijking van de gemeten stijghoogten bij verschillende boezemlocaties met de analytische formule. In hoofdstuk 8 is een analytische formule afgeleid voor de stijghoogtegradiënt, waarmee het toetsingscriterium voor piping met behulp van de formule van Sellmeijer kan worden aangepast. De afgeleide analytische formule is gebruikt om met behulp van stijghoogtemetingen in boezems in Friesland te bepalen of de bodemweerstand van de boezembodem en de polderbodem kan worden berekend.

2 Achtergrond en context

2.1 Mechanisme piping

Het optreden van piping is afhankelijk van:
1. de aanwezigheid van een intredepunt;
2. de aanwezigheid van een uittredepunt;
3. de verhouding tussen de aanwezige en benodigde kwelweglengte.



Figuur 1. Schematische weergave van de factoren die van belang zijn bij piping

Ten aanzien van punt 1 stelt de Leidraad (incl. Addendum) dat geen intredepunt aanwezig is indien een slecht doorlatende pakket onder de waterbodem aanwezig is met een minimale dikte van 1,5 m. Ten aanzien van deze laag geldt dat:

- een pakket als voldoende slecht doorlatend cq. voldoende hydraulische weerstand mag worden beschouwd indien het lutum- en zandgehalte respectievelijk meer dan 20% en minder is dan 35% bedragen.
- bij de bepaling van de dikte moet worden uitgegaan van de onderhoudsdiepte van het water, een eventueel aanwezige sliblaag ten gevolge van achterstallig baggeronderhoud mag niet worden meegenomen bij de bepaling van de dikte.
- moet worden aangetoond dat het betreffende pakket niet zal opdrijven, indien het pakket wel kan opdrijven moet het resterende pakket voldoen aan bovengenoemde eisen

Ten aanzien van punt 2 geldt dat de aanwezigheid van een uittredepunt samenhangt met het optreden van opbarsten / opdrijven van de deklaag in het achterland of de bodem van (eventueel) aanwezige teensloten. Bij de bepaling van het opbarsten is de stijghoogte in de (ondiepe) zandondergrond van belang. De gemeten stijghoogte dient daarbij te worden gecorrigeerd voor een eventuele afname van de hydraulische weerstand van de waterbodem of hydraulische kortsluiting.

Aanvullend geldt de verwachting (bij sommige experts) dat het op gang komen van het mechanisme enige tijd vergt, niet vanwege het na-ijlen van de waterspanningen (dat is evident) maar het daadwerkelijk in beweging komen van de zanddeeltjes zelf. Door ENW-T is dienaangaande schriftelijk aangegeven terughoudend te zijn met het afkeuren en verbeteren van dijken langs wateren met een kortdurende piekwaterstand (in beginsel is hierbij gedacht aan zeedijken). Hierbij is geopperd onderzoek te doen naar een reductie van de in rekening te brengen waterstand als optimalisatie van het verval van de kering.

Verkend kan worden in welke mate zo'n optimalisatie relevant is voor regionale keringen met een korte duur van de piek-waterstand.

Tenslotte is / wordt door enkele waterschappen nagedacht over alternatieven voor de conventionele verbetermaatregelen (pipingberm, verticaal kwelscherm), bijv. met filterconstructies / drains en waterdoorlatende maar gronddichte (verticale) geotextielen.

2.2 Piping controle middels de Sellmeijer formule

Voor de toetsing van dijken op piping wordt gebruik gemaakt van de Sellmeijer formule (TAW 1999, Sellmeijer 2006). Deze formule is als volgt:

$$\Delta H_c = \frac{G*R*S*F}{L}$$

Vergelijking 1

Waarin:

$$G = \frac{D}{L}^{\frac{0,28}{\frac{D}{L}^{2,8}-1}}$$

$$R = \frac{\gamma_p'}{\gamma_w} * \tan\vartheta$$

$$S = \eta \frac{d_{70}}{\sqrt[3]{\kappa L}}$$

$$F = 0,68 - 0,1ln(S)$$

$$\kappa = \frac{\upsilon}{g} k = 1,35 * 10^{-7} k$$

Het toetsingscriterium dat wordt gebruikt is als volgt:

$$(\Delta H - 0,3d) \leq \frac{1}{\gamma} \Delta H_c$$

Vergelijking 2

D	=	dikte watervoerende laag [m]	
ΔH_c	=	toegestaan peilverschil [m]	
ΔH	=	Werkelijk peilverschil [m]	
γ_p'	=	volume gewicht korrels [kN/m3]	17 [NORM]
γ_w	=	volume gewicht water [kN/m3]	10 [NORM]
ϑ	=	rolweerstandhoek van de zandkorrels [°]	41 [NORM]
η	=	sleepkrachtfactor (coëfficiënt van White) [-]	0,25 [NORM]
d_{70}	=	70-percentielwaarde van de korrelverdeling [m]	
κ	=	intrinsieke doorlatendheid [m2]	
L	=	minimale kwelweglengte [m]	
k	=	doorlatendheid zand in watervoerende laag [m/s]	
γ	=	veiligheidsfactor [-]	1,2 [NORM]
d	=	lengte verticale kwelweg / dikte weerstandsbiedende laag polder [m]	

Zoals te zien is wordt bij de toetsing het peilverschil tussen de boezem en de polder gebruikt en een verdiscontering van de weerstandsbiedende laag in de polder. Het drukverlies als gevolg van de bodemweerstand in de boezem wordt niet meegenomen.

2.3 Eisen dikte boezembodem in relatie tot de hydraulische weerstand

Vanuit de Leidraad “Toetsen op veiligheid regionale waterkeringen” en de addendum hierop worden een aantal eisen gesteld ten aanzien van de dikte van het weerstandsbiedende bodempakket van de boezem (markeringen door Acacia Water):

Addendum pagina 15 /16

> Indien aanwezige mineraal-arme veenlagen wel kunnen opdrijven dient de diepte van de waterbodem hiervoor te worden gecorrigeerd.
> Als beneden het laagste niveau dat uit deze beschouwing volgt een ***waterremmende laag aanwezig is van ten minste 2 m dik*** is en een gemiddeld volumiek gewicht van ten minste 12 kN/m3, dan kan met voldoende waarschijnlijkheid een vermindering van de hydraulische weerstand ten gevolge van baggerwerkzaamheden en opdrijven verwaarloosbaar worden geacht. In andere gevallen dient de stijghoogte in de watervoerende grondlaag te worden herberekend.

Addendum pagina 16

> Een afname van de weerstand ten gevolge van horizontale beweging kan met voldoende waarschijnlijkheid worden uitgesloten indien:
> a) horizontale beweging ter plaatse van de waterbodem of een beschoeiing kan worden uitgesloten, omdat verdroging en vervorming van de kade slechts in beperkte mate kan optreden; of:
> b) sprake is van voldoende weerstand tegen scheurvorming in de waterbodem tot aan het niveau van de bovenste watervoerende laag.
>
> Ad.b: de weerstand tegen scheurvorming is voldoende indien onder de waterbodem of onderkant van de beschoeiing:
> - de dikte van een waterremmende laag tenminste 5 meter bedraagt; of:
> - zich in de ***waterremmende laag een kleilaag bevindt met een minimale dikte van 2 meter.***

Addendum pagina 24:

> Ten aanzien van de dikte van het ***slecht doorlatende pakket geldt vooraleerst een minimumeis van tenminste 1,5 m***. Deze dikte is inclusief een extra toplaag van 0,5 m dikte (direct onder het onderhoudsprofiel), in verband met de nauwkeurigheid van baggerwerkzaamheden. Bij de bepaling van de dikte geldt als voorwaarde dat moet worden uitgegaan van de onderhoudsdiepte van de boezem of het kanaal (Leggerprofiel), een eventuele sliblaag ten gevolge van achterstallig baggeronderhoud mag niet worden meegenomen bij de bepaling van de dikte.
>
> Voorts moet worden aangetoond dat het betreffende pakket niet zal opdrijven en geen hydraulische kortsluiting kan ontstaan. Deze beoordeling kan worden gecombineerd met de beoordeling van de kans op hydraulische kortsluiting (de werkwijze is beschreven in paragraaf 3.4). Indien het pakket wel kan opdrijven of hydraulische kortsluiting kan ontstaan, dient het gevaar voor piping nader te worden beoordeeld volgens de stappen 1 t/m 5. Een slecht doorlatend pakket heeft uit oogpunt van de bepaling van de kwelweglengte voldoende hydraulische weerstand indien:
>
> - Het lutumgehalte meer dan 20% bedraagt;
> - Het zandgehalte minder is dan 35%.

2.4 De praktijk

In de praktijk zijn de bevindingen ten aanzien van piping weerbarstig, overwegend worden geen zandmeevoerende wellen waargenomen (bij streefpeil), terwijl wel gevaar voor piping wordt berekend. Vaak hangt dit samen met het verschil tussen de dagelijkse situatie en de schematisering voor de normsituatie, voor wat betreft:

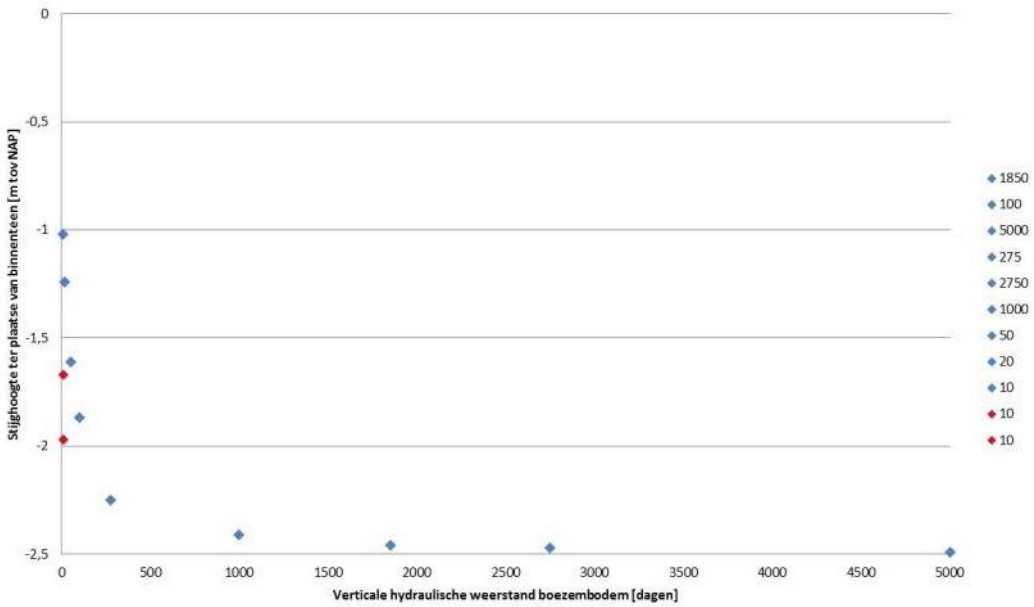
- de aanwezigheid van een intredepunt, speciaal voor wat betreft de consequenties ten aanzien van:
    - de aanwezige kwelweglengte in het voorland;
    - de stijghoogte in het zandondergrond;
- het ontstaan van een uittredepunt door opbarsten, vanwege de aangenomen hoge stijghoogte in de zandondergrond.

De geschematiseerde aanwezigheid van een intredepunt is daarbij veelal gebaseerd op het (toekomstig) baggeren van de waterbodem, en eventueel opdrijven van veenlagen daarna. Ten aanzien van de invloed van het baggeren op de stijghoogte zijn echter enkele interessante waarnemingen gedaan:

Waternet: uit een proef naar het effect van hydraulische kortsluiting op de stijghoogte in de zandondergrond onder een waterkering bleek een verwaarloosbare toename. In totaal zijn 5 aanvullende proeven gepland.

Rijnland: in een onderzoek tijdens baggerwerkzaamheden in een regionaal water (de Does) is geconstateerd dat het baggeren geen toename van de stijghoogte in de zandondergrond ter plaatse van de boezemkade veroorzaakt.

Hunze & Aa's: na het baggeren van een kanaal zijn zandmeevoerende wellen in een teensloot aangetroffen. Met beheersmaatregelen is het verdere pipingproces tegengegaan, deze situatie heeft ca. een half jaar geduurd.



Figuur 2. Toename stijghoogte zandondergrond door afname hydraulische weerstand boezembodem (bron: HHNK) bij lage kD-waarden (blauwe ruitjes) en bij hoge kD-waarden (rode ruitjes). Stijghoogte zandondergrond onder de binnenteen van de kade.

In een rekensessie heeft Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK) geconcludeerd dat baggeren pas effect heeft op de stijghoogte indien de resterende hydraulische weerstand zeer gering wordt (zie figuur 1). Het blijkt dat pas bij een afname van de weerstand tot minder dan 1000 dagen de stijghoogte in de zandondergrond toeneemt (de initiële stijghoogte bedraagt NAP -2,5 m, het toetspeil op de boezem

NAP +0,0 m), vooral indien de weerstand afneemt tot minder dan 250 dagen. Dit resultaat geldt bij een betrekkelijk lage kD-waarde van het watervoerende pakket. Bij een goed doorlatende ondergrond (rode ruitjes in Figuur 2) is de toename van de stijghoogte zelfs bij een vergaande afname van de weerstand beperkt, omdat de druk zich snel kan verspreiden in het watervoerende pakket. Overigens blijkt uit de berekeningen ook dat opdrijven van de bodem over een beperkte afmeting (breedte van <1 m) een verwaarloosbaar effect op de stijghoogte heeft.

Daarbij geldt aanvullend dat de afname van de weerstand en toename van de stijghoogte tijdelijk zijn, zodra de waterbodem weer verstopt raakt neemt de weerstand toe, en stijghoogte af. Vanwege de neerwaarts gerichte stroming van het water (infiltratie) is verstopping niet ondenkbaar. De casus bij Hunze & Aa's bewijst echter dat het toch maanden kan duren voor de weerstand weer in voldoende mate is hersteld. Dit zal sterk afhankelijk zijn van de lokale omstandigheden, speciaal de waterkwaliteit (gehalte fijne / slib deeltjes). Soms blijkt piping toch wel 'gewoon' te kunnen optreden, bij Noorderzijlvest (Eemskanaal) is tijdens het hoogwater in januari 2012 op verscheidene vakken piping waargenomen.

3 Literatuuronderzoek infiltratie weerstand boezemwateren

3.1 Inleiding

De boezem is geen onderdeel van een polder. De belangrijkste functie van de boezem is om het water vanuit omliggende polders af te voeren, dan wel water naar de polders aan te voeren. De boezem is vaak hoger gelegen dan het omliggende gebied, waardoor boezemkaden of dijken nodig zijn om de naastliggende lager gelegen delen te beschermen tegen overstroming. Als gevolg van de hoge ligging van veel boezems zal er vanuit veel boezems water infiltreren door slecht doorlatende lagen naar een onderliggende zandlaag. Vervolgens stroomt het water naar de lager gelegen polders ter weerszijden om daar op te kwellen in de drainagemiddelen of soms in de vorm van een wel. De zandlaag kan bestaan uit Holocene zanden met een beperkte verbreiding (lokale zandige geulafzettingen of rivierdonken) of dieper gelegen Pleistocene zanden, die een veel grotere verbreiding kennen. De infiltratieweerstand die het boezemwater ondervindt bestaat uit de weerstand van de sliblaag op de kanaalbodem en de weerstand van de natuurlijke Holocene slecht doorlatende deklaag dan wel een weerstand die gevormd wordt door inspoeling in de oorspronkelijke bodem.

Voor het onderzoek zijn de volgende situaties van belang:

- Infiltratieweerstand van openwater op zand
    - Met en zonder dichtslibbing
    - Met en zonder sliblaag
- Sliblaag op klei
- Sliblaag op veen

Onderzoek naar de weerstand van sliblaag en de invloed daarvan op de infiltratie heeft zich, gezien de relevantie, echter vooral afgespeeld in gebieden waar oppervlaktewater direct op een zandlaag rust. Vanuit de civieltechnische en cultuurtechnische invalshoek zijn met name watergangen op de zandgronden in Nederland onderzocht. In de waterleidingwereld ging de aandacht uit naar de rivieren langs de oeverinfiltratiewinningen en de infiltratiepanden van de duinwaterbedrijven. Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten op basis van literatuuronderzoek.

3.2 Definiëring intree- / uittreeweerstand:

Om tot een definiëring te komen is het goed om eerst terug te kijken. Dit begint met een voetnoot ontleed aan het proefschrift van Ernst uit 1962 (citaat overgenomen uit Massop en van der Gaast, 2006):

'Het is naar mijn mening beter de termen intreeweerstand en uittreeweerstand te gebruiken voor de weerstand van de aangroeiende bezinklaag op de bodem van open leidingen, respectievelijk bij leidingen, waaruit water wegzijgt en bij drainerende leidingen, en de totale weerstand in de omgeving van de open leiding aan te duiden door de radiale weerstand'"

Bij deze definitie van Ernst wordt in deze studie aangesloten, en in navolging van Jousma en Massop (1996) wordt de intree-/uittreeweestand gedefinieerd als:

'weerstand ondervonden door grondwater bij intreden / uittreden van een open of gesloten leiding ten gevolge van een weerstandsbiedende (grens)laag'

Intreeweerstanden worden dus in zandgebieden voornamelijk veroorzaakt door afzetting van materiaal op de oorspronkelijke bodem van de waterloop of door indringing van materiaal in de ondergrond (verstopping). In kleigebieden heeft de weerstand vooral betrekking op een grenslaag bestaande uit hetzelfde materiaal (Massop en van der Gaast, 2006).

In de drainageformule van Ernst wordt de intreeweerstand als afzonderlijke term in de volgende vorm toegevoegd:

$$c_i = \frac{L * c_b}{B_{wp}} \qquad met \qquad c_b = \frac{d}{k_v}$$

Vergelijking 3

Hierin is:

	c_i	= Intreeweestand (dagen)
	L	= sloot afstand (m)
	C	= Slootbodemweerstand (dagen)
	B_{wp}	= natte omtrek (m)
	d	= dikte bezinklaag (m)
	k_v	= doorlaatfactor bezinklaag (m/d)"

In de beschouwing van de intreeweerstand wordt aangesloten bij de definiëring van Ernst 'weerstand ondervonden door grondwater bij intreden / uittreden van een open of gesloten leiding ten gevolge van een weerstandsbiedende (grens)laag'. Aangezien (nog) niet wordt gekeken naar de weerstand van het systeem, maar naar de weerstand van de afzettingslaag, wordt de volgende formule gehanteerd voor de intree en uittreeweerstand, namelijk de verhouding tussen de dikte van de sliblaag en de doorlaatfactor van deze sliblaag:

$$C = \frac{d_{slib}}{k_{slib}} + \frac{d_{dichtgeslibtzand}}{k_{dichtgeslibtzand}} + \frac{d_{klei}}{k_{klei}} + \frac{d_{veen}}{k_{veen}}$$

Vergelijking 4

Omdat de verschillende vakgebieden de termen intree- en uittreeweerstand voor zowel drainerende als infiltrerende omstandigheden gebruiken, wordt er in dit rapport gesproken van infiltratieweerstand, om de weerstand te beschrijven als het water uittreed uit de watergang de bodem in.

3.3 Bestaande boezem- en kanaalbodems

3.3.1 Doorlatendheid van boezem- en kanaalbodems

Doorlatendheid en weerstand zijn aan elkaar gerelateerd. Eerst wordt gekeken naar de doorlatendheid; als het proces van doorlatendheidsvermindering wordt begrepen, zijn deze waarden gemakkelijk om te rekenen naar weerstanden.

De invloed van fijne deeltjes is van groot belang op de doorlatendheid van het materiaal. Onderstaande tabel laat dat goed zien. Er is hierbij een test gedaan in een laboratorium, waarbij een mengsel zand is "vervuild" met slib.

Tabel 1: Richtwaarden voor de doorlatendheid als functie van het slibgehalte (Langendoen, 2004)

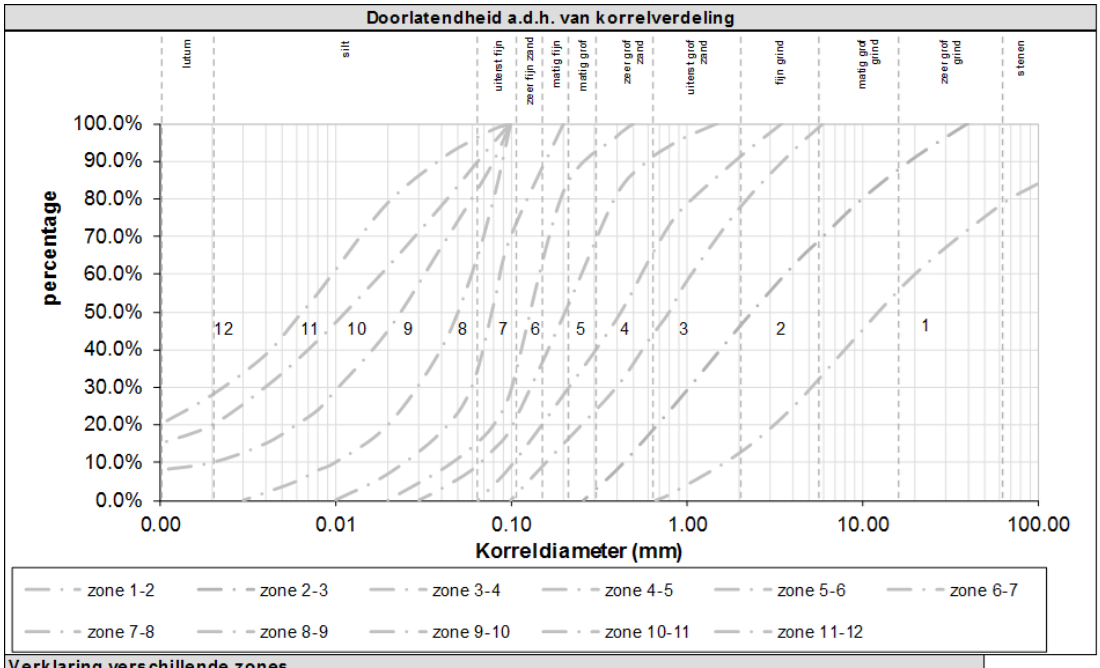
Percentage deeltjes kleiner dan 16 µm (Slib)	Doorlatendheid [m/dag]	
0	14	100 %
5	0,9	6,4 %
10	0,3	2,1 %
30	0,06	0,4 %

Dit wordt verder uitgewerkt in de Figuur 3, waarin aangegeven wordt hoe de doorlatendheid verloopt aan de hand van het korrelverdelingsdiagram. Ook hierin is te zien dat naarmate het gehalte fijne deeltjes toeneemt de doorlatendheid sterk terug loopt. Als niet alleen het slibgehalte, maar daarbinnen ook het lutum gehalte (deeltjes kleiner dan 2 µm) hoog op loopt kan de doorlatendheid zelfs tot veel kleinere waarden teruglopen dan in Tabel 1 is aangegeven.

Het is dan ook opmerkelijk dat in een publicatie van RIONED (Boogaard et al, 2006) beschreven staat dat uit diverse metingen in wadi's blijkt dat de bodemdoorlatendheid kan afnemen tot ca. 0,3 m/dag, ongeacht de waarde na aanleg. Aangezien gedurende elke regenbui nieuwe fijne deeltjes worden aangevoerd, zou verwacht mogen worden dat de doorlatendheid dan ook verder afneemt. Aangezien dit niet lijkt te gebeuren, spelen hier waarschijnlijk andere processen die een verdere daling van de doorlatendheid verhinderen.

Mogelijke verklaringen hiervoor zijn :

- ⇨ Het droogvallen van wadi´s
- ⇨ Het organisch materiaal wordt afgebroken door het bodemleven
- ⇨ Dit bodemleven houdt de bodem open (wortelgangen en wormgangen)
- ⇨ Het slib wordt goed verspreid over het hele pakket (bodemvorming), waardoor er over het gehele pakket gedeeltelijke dichtslibbing optreedt.



Verklaring verschillende zones

	doorlatendheid				doorlatendheid		
	[m/s]	[cm/d]	[m/d]		[m/s]	[cm/d]	[m/d]
zone 1:	3E-02	259200	2.6E+03	zone 7:	1E-05	86.4	8.6E-01
zone 2:	7E-03	60480	6.0E+02	zone 8:	1E-06	8.6	8.6E-02
zone 3:	1E-03	8640	8.6E+01	zone 9:	1E-07	0.9	8.6E-03
zone 4:	5E-04	4320	4.3E+01	zone 10:	1E-08	0.1	8.6E-04
zone 5:	1E-04	864	8.6E+00	zone 11:	1E-09	0.0	8.6E-05
zone 6:	5E-05	432	4.3E+00	zone 12:	1E-09	0.0	8.6E-05

Figuur 3: doorlatendheid aan de hand van het korrelverdelingsdiagram (Langendoen, 2004)

Iets vergelijkbaars blijkt uit Massop en van der Gaast (2006). In deze studie zijn diverse onderzoeken geanalyseerd. Uit de analyse blijkt dat rekening houdend met de afwijkende monsters de gemiddelde doorlatendheid van de slootbodem 0,3-0,4 m/d is. Het gaat hierbij weliswaar om een waterbeweging onder drainerende omstandigheden. Onder infiltrerende omstandigheden mag kan verwacht worden dat er lagere doorlatendheden voorkomen.

Opvallend is dat de waarden bij afzettingslagen in waterlopen vergelijkbaar zijn met doorlatendheden van 'afzettingslagen' in wadi's.

Een deel van de processen die in wadi's plaatsvinden, vinden ook plaats in watergangen; hier zijn echter ook andere aspecten van belang. Afzettingslagen van waterbodems zijn gevormd door (Stoppelenburg, 1999):

- *Erosieproducten*, vooral in nieuw aangelegde gebieden, waar begroeiing nog beperkt is
- *Lozingen*, vanuit RWZI's en industrie; deze zijn sterk verminderd de afgelopen decennia
- *Organisch materiaal / dode plantenresten*, dit verschilt sterk per locatie; hoeveel scheepvaart is er, hoeveel riet en andere watervegetatie groeit er, staan er bomen langs de watergang?
- *Minerale neerslagen*, dit speelt vooral bij kwel vanuit grondwater naar sloten, bijvoorbeeld ijzer neerslag
- *Fijnkorrelig materiaal*, is er meegevoerd slib of fijn zand beschikbaar uit de omgeving dat wordt afgezet?

Bepalende factoren bij de vorming van een sliblaag en het dichtslibben van de grenslaag:

1. Vorming van sliblaag
    a. Stroomsnelheid
    b. Beheersing waterlopen (stuwen zijn slibvangers)
    c. Droogvallen (oxidatie van organisch materiaal en krimpscheuren kunnen intreeweerstand (tijdelijk) verlagen)
    d. Scheepvaart
    e. Biochemische processen (eutrofe en oligotrofe sloten)
2. Dichtslibben van de grenslaag
    a. Stijghoogteverschillen (dichtslibbing vindt alleen plaats bij infiltratie vanuit de waterloop)
    b. Beheersing waterlopen (groot peilverschil over stuwen, waardoor in de omgeving van de stuw infiltratie met dichtslibbing kan ontstaan)
    c. Bodemopbouw (hoe groter de effectieve porositeit, hoe verder fijne deeltjes kunnen indringen)
    d. Droogvallen in taluds (reductie en oxidatie wisselt elkaar af, waardoor organisch materiaal kan worden afgebroken; mineralen kunnen worden omgezet)
3. Onderhoud van waterlopen
    a. Verplichte jaarlijkse opschoning (grote sloten en beken)
    b. Beperkt regelmatig onderhoud en zeer beperkt uitbaggeren (vaarten en kanalen)
    c. Grote variatie in onderhoudsfrequentie (kleine sloten)'

Jousma en Massop (1996) schrijven uitgebreid over de infiltratieweerstanden in waterlopen. Er worden ook twee belangrijke onderzoeken genoemd die ook voor deze studie van belang zijn: het onderzoek aan het Twentekanaal en aan de Zuid Willemsvaart. Hieronder volgt een deel uit hoofdstuk 6:

De spreiding van infiltratieweerstandswaarden neemt aanzienlijk toe naarmate de waterlopen groter worden. Voor tertiaire stelsels (globaal klassen 1 t/m 3) variëren de gevonden bodemweerstanden tussen 0,5 en 3 dagen met uitschieters naar 10 dagen. Voor grote kanalen en rivieren is de spreiding groter, globaal tussen 1 en 40 dagen, evenwel met lokale uitschieters naar 500 a 1000 dagen (zie bijvoorbeeld het

onderzoek aan het Twentekanaal, 1987-2). Voor deze variatie in infiltratieweerstanden van de waterbodem zijn een aantal oorzaken aan te wijzen:

- Bodemsamenstelling. Met name groter waterlopen (klasse 3 en groter) snijden veelal diep in de deklaag in. De deklaag bestaat op vele plaatsen uit fluviatiele of periglaciale sedimenten, die worden gekenmerkt door een sterke afwisseling van zandige en kleiige laagjes, zowel in de laterale als in de verticale zin. Dit geeft een natuurlijke variatie in textuurkenmerken van een waterbodem, die ook de verstopping mede beïnvloed. Naarmate de waterlopen van een hogere klasse zijn, neemt bovendien de kans op het doorsnijden van oude geulenpatronen met lagen van verschillend materiaal toe. De combinatie van waterloopklasse en opbouw van de deklaag zijn dan ook factoren die sterk bepalend zijn voor de heterogeniteit van de waterbodem.

  De door middel van lokale proeven bepaalde infiltratieweerstand weerspiegelt het effect van de bodemsamenstelling, in de eerste plaats wordt verstopping er door beïnvloed. In de tweede plaats zijn de infiltratieweerstand en de hydraulische weerstand van de waterbodem in het algemeen niet nauwkeurig van elkaar te scheiden.

- Vorming van een sliblaag. De vorming van de sliblaag op de bodem is afhankelijk van een groot aantal condities, die van plaats tot plaats sterk kunnen verschillen. Bij kleine waterlopen zijn dit met name de afzettingscondities en het onderhoud, die in het algemeen redelijk tijdsafhankelijk zijn. Bij grotere waterlopen worden de storende invloeden, zoals die door scheepvaart belangrijker. Dit komt tot uitdrukking in de grote variatie van lokale steekmonsters. Uit proeven in grote kanalen blijkt dat slib- of baggerlaagjes tot op enig diepte (0,5 tot meer dan 1m) in het profiel van de bodem kunnen voorkomen. De dikte van in het profiel voorkomende sliblagen heeft een grote invloed op de weerstandsverhouding

Zuid-Willemsvaart

Het onderzoek is uitgevoerd aan een kanaaltraject waar de ondergrond uit zand bestaat. De gestoken bodemmonsters geven een zeer gedetailleerd beeld van de bodemsamenstelling in 26 raaien van het kanaal op een onderlinge afstand van 200 m. De heterogeniteit van de bodem blijft aanzienlijk. De dikte en diepte van de slib houdende laagjes varieert sterk van plaats tot plaats. De gemiddelde bodemweerstand van het kanaal bepaald uit doorlatendheidsmetingen is slecht 0,7 d. De lokale variatie van de infiltratieweerstand is van 0,1 tot meer dan 100 dagen, met uitschieters tot ruim 500 dagen. De gemiddelde kanaalweerstand tussen kanaal en eerste watervoerend pakket, berekend uit dwarsprofielen, ligt tussen 0,5 en 1,3 dag/m. Bij een natte omtrek van ca. 30 m, betekend dit een hydraulische weerstand van de scheidende laag tussen kanaal en eerste watervoerend pakket van 15 – 39 dagen. In het rapport wordt gewezen op het verband tussen deze weerstand en in de ondergrond voorkomende leemlagen.

Een nadere beschouwing van de resultaten van het onderzoek aan de bodem van de Zuid Willemsvaart is weergegeven in Tabel 2. Te zien is dat de doorlatendheid van de bemonsterde toplaag (variërend tussen 0,1 en 1,3 m dikte) een doorlatendheid heeft die opnieuw het zwaartepunt heeft de 0,05 en de 0,5 m/dag.

Tabel 2: spreiding van de doorlatendheid van de sliblaag in de Zuid Willemsvaart

Waarde doorlatendheid ondergrens [m/dag]	Waarde doorlatendheid bovengrens [m/dag]	Aantal samples	Percentage
1,5	-	5	8 %
0,5	1,5	16	25%
0,05	0,5	22	35 %
0,005	0,05	17	27 %
-	0,005	3	5 %

Twentekanaal

De bodemweerstand van het Twentekanaal is onderzocht aan de hand van doorlatendheidsmetingen aan steekmonsters op 21 locaties van het kanaal met een tussenafstand van 500m. Per locatie werden 3 x 3 monster gestoken in lengte variëren van ca 0,30 tot 1,0 m.

Uit de doorlatendheidsproeven blijkt dat baggerlaagjes (in het kanaal afgezette laagjes van organisch materiaal) de belangrijkste weerstandsbiedende laag in de kanaalbodem vormen. Daarnaast zorgen in het proef voorkomende leemlagen voor een hogere weerstand. Uit het feit dat zelfs de langste monsters niet altijd de oorspronkelijke bodemlagen bereiken mag worden afgeleid dat de waterloopbodem, mede als gevolg van scheepvaart, tot op relatief grote diepte kan zijn verstoord. Baggerlaagjes komen lokaal tot op een diepte van 0,50 tot 0,70 m onder de bodem voor (bij de stuw is dit zelfs meer dan 1 m). De doorlatendheid van de baggerlaagjes varieert tussen 0,001 en 0,02 m/d, waardoor een grote variatie in de bodemweerstand ontstaat. De kanaalbodemweerstand varieert van 0,1 d tot 5 d, op plaatsen waar de bodem uit grof zand bestaat, met uitschieters tot 15 d. Waar meer dan 10 cm slib in de bodem aanwezig is, ligt de weerstand tussen 5 en 50 d, met uitschieters tot meer dan 100d.
Het onderzoek laat zien dat zelfs na middelen over 9 metingen een grote variatie overblijft: weerstanden tussen 0,5 en ca. 30d. Zelfs de trajectgemiddelden van de infiltratieweerstand variëren nog tussen 1 en 10 dagen. Het onderzoek toont aan hoe groot de variatie in bodemweerstanden is voor dit soort grote kanalen. Een nadere beschouwing van de resultaten van het onderzoek aan de bodem van het Twente Kanaal is weergegeven in Tabel 3. Te zien is dat de doorlatendheid van de bemonsterde toplaag (variërend tussen 0,1 en 1,3 m dikte) een doorlatendheid heeft die opnieuw een redelijk zwaartepunt heeft rond de 0,05 en de 0,5 m/dag. Opgemerkt wordt echter wel dat hier veel meer hoge waarden (boven de 1,5 m/dag) zijn gemeten.

Tabel 3: spreiding van de doorlatendheid van de sliblaag in het Twentekanaal

Waarde doorlatendheid ondergrens [m/dag]	Waarde doorlatendheid bovengrens [m/dag]	Aantal samples	Percentage
1,5	-	36	19 %
0,5	1,5	31	16 %
0,05	0,5	72	38 %
0,005	0,05	44	23 %
-	0,005	5	3 %

Fonck (1973) heeft de doorlatendheid van de bodem op verschillende afstanden rondom watergangen (waterspiegelbreedte van 2 tot 6 m) geanalyseerd. Uit deze analyse komt naar voren dat de sliblaag met de direct daarachter gelegen dichtgeslibde bodem een vrij lage doorlatendheid heeft (kleiner dan 0,1 m/dag), terwijl de dieper gelegen bodem eigenlijk niet is dichtgeslibd.

Tabel 4. Spreiding van de doorlatendheid van de sliblaag en de daarachter gelegen bodem in watergangen in Salland

	Pand I		Pand II		Pand III		Pand IV	
	Afstand vanaf slootbodem	k-waarde	Afstand vanaf slootbodem	k-waarde	Afstand vanaf slootbodem	k-waarde	Afstand vanaf slootbodem	k-waarde
Zone 1	1,4 – 3,0	0,04	1,1 – 3,1	0,04	2,0 – 3,8	0,03	2,6 – 5,4	0,22
Zone 2	3,0 – 8,3	4,3	3,1 – 8,0	2,7	3,8 – 7,8	5,1	5,4 – 9,5	10,6
Zone 3	8,3 – 23,8	4,2	8,0 – 24,0	3,0	7,8 – 24,3	5,7	9,5 – 25	9,4
Zone 4	> 23,8	3,8	> 24,0	3,0	> 24,3	6,7	> 25	10,5

Tabel 5. Spreiding van de doorlatendheid van de sliblaag en de daarachter gelegen bodem in watergangen in Salland

Pand	$K_{zone\ 1}$	$K_{zone\ 2}$	$K_{zone\ 3}$	$K_{zone\ 4}$
528	0.028	3.7	2.6	2.7
52	0.050	4.7	5.1	4.8
412.I	0.037	3.4	3.9	4.1
412.II	0.058	4.5	4.3	4.6
412.III	0.044	4.0	4.1	3.6
522	0.042	4.1	3.8	4.2
625	0.093	4.0	4.6	5.0
626	0.070	3.3	3.0	3.0

3.3.2 Weerstand van boezem en kanaalbodems

In de studies van Wit (1983) en Wit et al (1987) zijn bodemweerstanden bepaald voor het Twentekanaal en de Zuid Willemsvaart. Deze zijn berekend aan de hand van de in het lab bepaalde doorlatendheden en rekening houdend met de lengte van het steekmonster. De variatie in de bodemweerstand bij de bodemmonsters in het Twentekanaal is weergegeven in Tabel 6.

In het rapport over de zuid Willemsvaart zijn de weerstanden ook bepaald. Ook hierbij geldt dat de lengte van de steekmonsters varieert tussen 0,1 en 1,3 meter. De variatie in de bodemweerstand bij de bodemmonsters is weergegeven in Tabel 7.

Tabel 6: Spreiding van de bodemweerstand in het Twentekanaal

Waarde weerstand ondergrens [dag]	Waarde weerstand bovengrens [dag]	Aantal samples	Percentage
	100	6	3 %
100	10	48	25 %
10	1	69	37 %
1	0.1	57	30 %
0.1		6	5 %

Tabel 7. Spreiding van de bodemweerstand in de Zuid Willemsvaart

Waarde weerstand ondergrens [dag]	Waarde weerstand bovengrens [dag]	Aantal samples	Percentage
	100	5	8 %
100	10	15	25 %
10	1	21	36 %
1	0.1	18	31 %
0.1		0	0 %

Ten aanzien van het onderzoek in het Twentekanaal zijn de volgende aspecten van belang:

- De lengte van de steekmonsters verschild tussen 0,20 m 1,30 m
- De locatie waar de slib aanwezig is varieert de bovenste 10 cm tot op 70 tot 80 cm diepte
- De dikte van de sliblaag varieert tussen 0,10 m tot 1,10 m
- De bodemhoogte aan de noord, midden en zuidzijde varieert soms bijna 2 meter

3.3.3 Dikte-eis in relatie tot hydraulische weerstand in beschreven literatuur

Vanuit de leidraad worden eisen gesteld aan de dikte van de weerstandsbiedende laag op de boezembodem:

- De weerstandsbiedende laag dient tenminste 1,5 m dik te zijn
- Het lutumgehalte van deze laag dient meer dan 20% te bedragen
- Het zandgehalte van deze laag dient minder te zijn dan 35%.

Op basis van de eerdergenoemde literatuur kan worden aangegeven dat als al het materiaal inderdaad aan de genoemde eisen van lutum en zandgehaltes voldoet, de doorlatendheid minder zal zijn dan 0,01 m/dag. De onzekerheid hierbij is in hoeverre de homogeniteit van deze laag gegarandeerd kan worden.

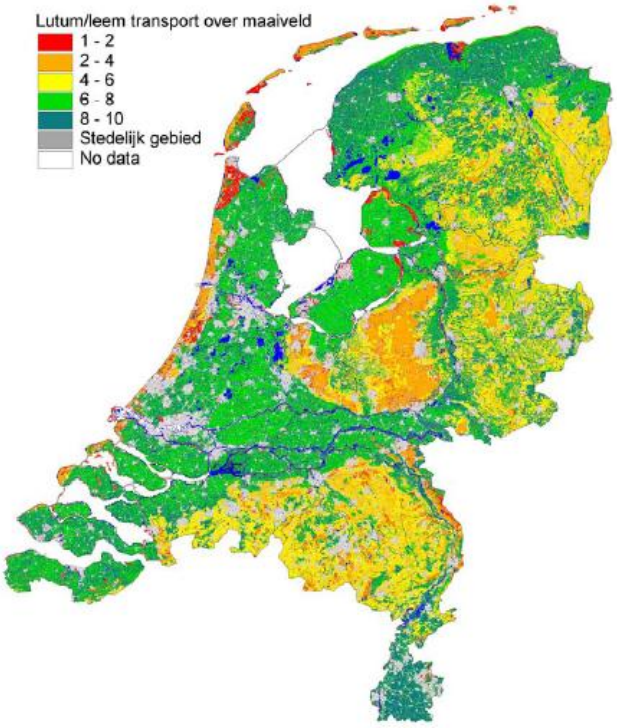
Indien de laag inderdaad een doorlatendheid heeft van 0,01 m/dag resulteert dit in een weerstand van 150 dagen. Zoals in de vorige paragraaf is aangegeven, is dit een weerstand die relatief hoog is. Zoals in de volgende hoofdstukken zal blijken, heeft deze weerstand een aanzienlijk effect op de stijghoogte. Echter een lagere weerstand heeft vanuit geohydrologisch oogpunt ook nog steeds invloed op de stijghoogte onder de boezem en dus op het risico op het ontstaan van piping.

3.4 Slib- en weerstandsvorming boezembodem

3.4.1 Boezembodem

De vorming van een weerstand op de bodem van een boezem of waterloop kan op verschillende wijze plaatsvinden. Hierbij kan onderscheid worden gemaakt in het dichtslibben van een grenslaag met fijn materiaal en de vorming een afzettings- of sliblaag. In beide gevallen neemt de weerstand van de boezembodem toe. Voor het dichtslibben van de grenslaag is inzijging vanuit de boezem of waterloop noodzakelijk. De mate en snelheid van dichtslibben zal afhankelijk zijn van de intensiteit van de wegzijging, de beschikbaarheid van fijn bodemmateriaal en de opbouw van de bodem. De afzettings- of sliblagen van waterbodems kunnen onder invloed van de volgende factoren worden gevormd:

- Erosieproducten;
- Lozingen;
- Dode plantenresten;
- Minerale neerslagen;
- Fijnkorrelig materiaal.



Figuur 4: Kans op aanvoer van fijn materiaal via maaiveld (naar: Massop en van der Gaast, 2006)

Voor de vorming van een afzettings- of sliblaag zijn tevens de volgende factoren bepalend:

a) Stroomsnelheid (bepalend voor erosie en sedimentatie);
b) Beheersing waterlopen (stuwen zijn slibvangers);
c) Droogvallen (oxidatie van organisch materiaal en krimpscheuren kunnen de weerstand van een bodem van een waterloop (tijdelijk) verlagen);
d) Scheepvaart (opwoelen van de bodem);
e) Biochemische processen (eutrofe en oligotrofe omstandigheden).

Met name grotere waterlopen snijden vaak diep in de deklaag in. De deklaag kan bijvoorbeeld bestaan uit fluviatiele of periglaciale sedimenten, die worden gekenmerkt door een sterke afwisseling van zandige en kleiige laagjes, zowel in laterale als in verticale zin. Dit geeft een natuurlijke variatie in textuurkenmerken van een waterbodem, die ook de verstopping mede beïnvloed. Naarmate de waterlopen van een hogere klasse zijn en ze dus groter en dieper zijn, neemt bovendien de kans op het doorsnijden van oude

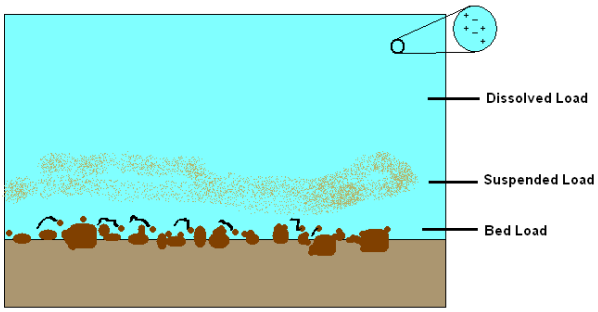
geulenpatronen met lagen van verschillend materiaal toe. Indien er sprake is van mariene sedimenten kan ruimtelijke variatie relatief gering zijn. De combinatie van waterloopklasse en opbouw van de deklaag zijn dan ook factoren die sterk bepalend zijn voor de heterogeniteit van de waterbodem.

De vorming van de sliblaag op de bodem is afhankelijk van een groot aantal condities, die van plaats tot plaats sterk kunnen verschillen. Bij kleine waterlopen zijn dit met name de afzettingscondities en het onderhoud, die in het algemeen redelijk tijdsafhankelijk zijn. Bij grotere waterlopen worden de storende invloeden, zoals die door scheepvaart belangrijker. Uit proeven in grote kanalen blijkt dat slib- of baggerlaagjes tot op enige diepte (0,5 tot meer dan 1m) in het profiel van de bodem kunnen voorkomen. De dikte van in het profiel voorkomende sliblagen heeft een grote invloed op de weerstand van de boezem- of kanaalbodem.

Uit de beschikbare literatuur blijkt tevens dat de via monstername bepaalde bodemweerstand het effect weerspiegelen van de bodemsamenstelling. Het dichtslibben van de grenslaag (verstopping) wordt er door beïnvloed. Tevens dient te worden opgemerkt dat de uittreeweerstand van de dichtgeslibde bodem en de hydraulische weerstand van de waterbodem in het algemeen niet nauwkeurig van elkaar te scheiden zijn.

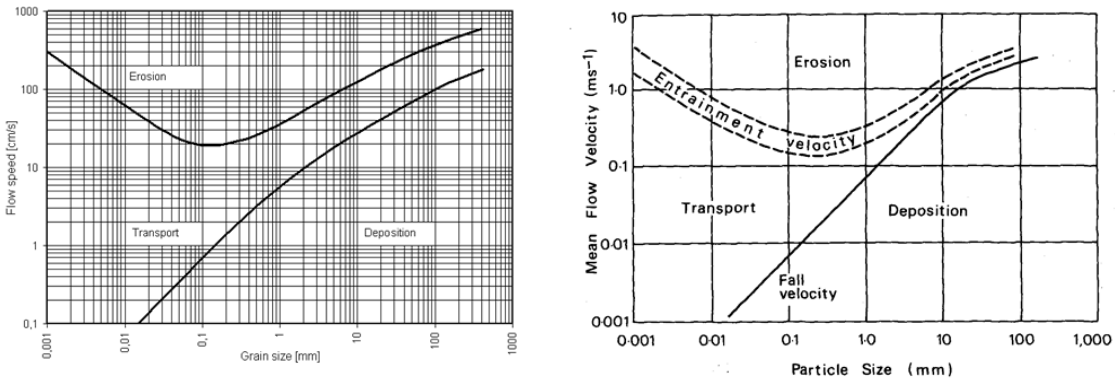
3.4.2 Sedimenttransport

Sedimenttransport vindt plaats onder invloed van stroming van water in een boezem of kanaal. Afhankelijk van de stroomsnelheid en de korrelgrootte van het materiaal vindt het transport plaats in de vorm van opgelost materiaal (Dissolved Load Figuur 5), materiaal in suspensie (Suspended Load) en salterend, rollend of schuivend materiaal (Bed Load).



Figuur 5: Schematische weergave van de verschillende type van sedimentlast.

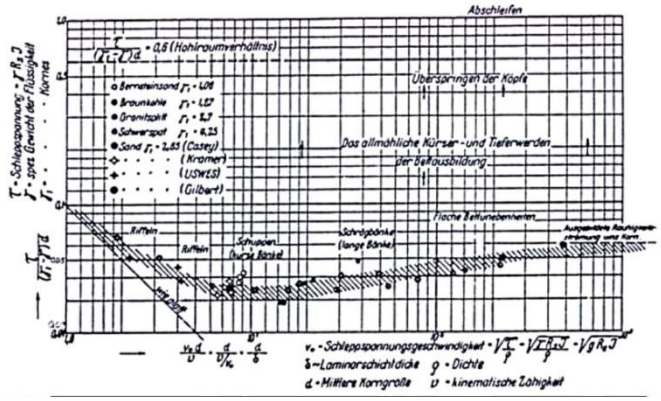
De Hjulstrom curve (1935) geeft de relatie weer tussen de gemiddelde stroomsnelheid van water en de situatie waarin korrels of deeltjes zich, gegeven een bepaalde deeltjesgrootte, bevinden (Figuur 6). Het gaat hierbij om de grenzen tussen erosie, transport en depositie. Bij een toename van de stroomsnelheid neemt gemiddeld genomen ook de deeltjesgrootte toe die kan worden verplaatst. Uit de curve komt naar voren dat zandkorrels gemakkelijker worden geërodeerd en getransporteerd dan de kleinere silt en kleideeltjes of grotere zandkorrels. De hogere stroomsnelheden die nodig zijn om silt en klei te eroderen zijn het gevolg van de cohesieve eigenschappen van het materiaal.



Figuur 6: De Hjulstrom curve

Uit de figuur blijkt tevens dat het verschil tussen de stroomsnelheid waarbij erosie plaatsvind en de stroomsnelheid waarbij depositie plaatsvind bij fijn materiaal groot is en kleiner wordt naarmate het materiaal grover wordt. Het fijne materiaal, silt en kleideeltjes, worden alleen afgezet bij lage stroomsnelheden en blijven dus langer in suspensie.

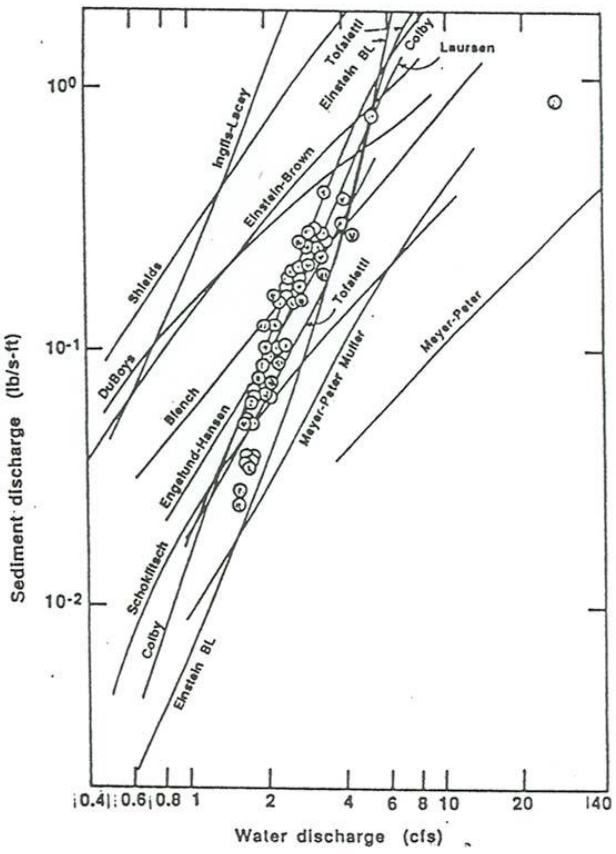
Ook Shields (1936) heeft onderzoek verricht naar de stabiliteit van de bodem bestaande uit loskorrelig materiaal (Figuur 7). Hierbij heeft Shields het begin van bewegen uitgedrukt in een kritieke dimensie loze Shieldsparameter (τ*). Het begin van bewegen van deeltjes bleek niet alleen af te hangen van de stabiliteit van het bodemmateriaal maar ook van de stromingscondities nabij het bodemmateriaal (Reynoldsgetal).



Figuur 7: De Shields curve

In de jaren daarna zijn een groot aantal zandtransportformules ontwikkeld. Ter illustratie is in Figuur 8 een vergelijking weergegeven tussen gemeten sedimenttransport en een aantal rekenresultaten van sedimenttransport formules. Uit de figuur komt naar voren dat er tussen de rekenresultaten grote verschillen kunnen zitten en dat de verschillen met de meetgegevens aanzienlijk kunnen zijn. Hierbij dient te worden opgemerkt dat een aantal van de gebruikte formules zijn opgezet voor situaties die niet gelden voor het geïllustreerde voorbeeld. Het is daarom bij het gebruik van transportformules van belang rekening te houden met de situatie waarvoor de formule is opgezet.

Bij de vorming van een weerstandsbiedende laag is naast het aanbod van materiaal de valsnelheid van korrels van belang.



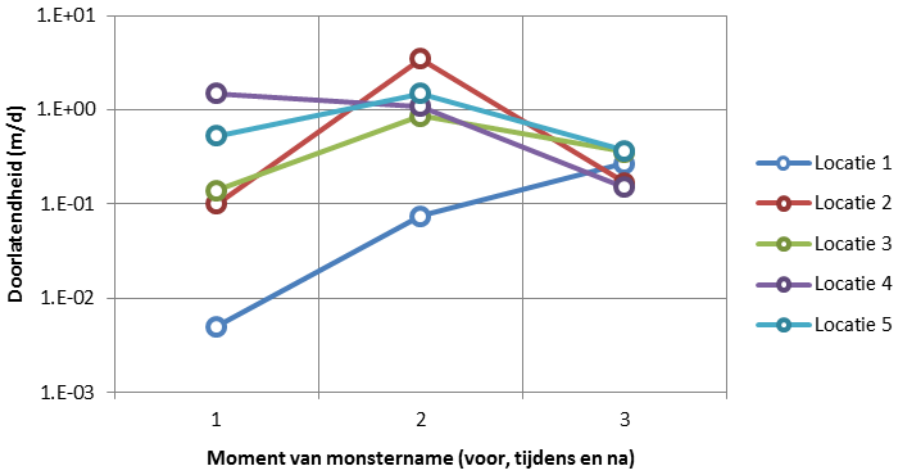
Figuur 8: Sedimenttransport uitgezet tegen de afvoer voor een rivier in Wyoming (USA) gebruikmakend van meetgegevens (datapunten) en berekeningen gebaseerd op meerdere sedimenttransport formules (doorgetrokken lijnen).

3.4.3 Vorming van een weerstandsbiedende laag

De valsnelheid van korrels is afhankelijk van de afmeting, vorm en dichtheid van sediment korrels en de viscositeit van de vloeistof. Naast het voorgaande wordt de valsnelheid ook bepaald door de vloeistofdiepte, het aantal sedimentkorrels en de mate van turbulentie in de vloeistof. De valsnelheid of depositiesnelheid van sediment korrels is een prominent aspect bij sedimenttransport. Het concept is eenduidig en goed te modelleren, mits een adequate beschrijving van de valsnelheid wordt gebruikt (van Ieperen, 1987).

Uit de beschikbare literatuur blijkt dat het modelleren van sedimenttransport goed mogelijk is. Er zijn veel verschillende formules beschikbaar. Voor de modellering zijn echter gedetailleerde invoergegevens gewenst. Het gaat hierbij naast de beschikbaarheid van sediment om bijvoorbeeld de korrelgrootte en stroomsnelheden. Hierbij dient tevens te worden opgemerkt dat de stroomsnelheid in hoge mate tijdsafhankelijk is.

Uit literatuuronderzoek blijkt dat de dichtslibbing bij ontgraving snel kan plaatsvinden, mits er voldoende slib aanwezig is, en dit slib op een of andere manier makkelijk in beweging kan komen (door scheepvaart of sterke stroming). Dit blijkt uit metingen die zijn uitgevoerd in een periode met baggerwerkzaamheden in het Twentekanaal (Figuur 3, Massop en Wijnsma, 1988). In een periode rond baggerwerkzaamheden zijn op een 5-tal locaties in de bodem van het Twentekanaal bodemmonsters genomen. Vervolgens zijn deze monsters in het laboratorium bemeten om de doorlatendheid van deze monsters bepaald. Uit de metingen blijkt dat de weerstandswaarden na 17 dagen voor het merendeel van de locaties vergelijkbaar is met de weerstand van voor de baggerwerkzaamheden.



Figuur 9. Verloop van de doorlatendheid van de bodem vooraf (moment 1), tijdens (moment 2) en na (moment3) het weggraven van een waterbodem.

Hoewel sediment transport goed te berekenen is, zijn vaak niet alle benodigde invoerparameters die voor de berekening nodig zijn beschikbaar. Voor een meer praktische vraag hoe snel een sliblaag met weerstand wordt gevormd is ook een meer kwalitatieve benadering mogelijk. Voor een kwalitatieve benadering is het in eerste instantie van belang inzicht te hebben in de parameters die bepalend zijn voor de vorming van een sliblaag. Hierbij gaat het om de volgende parameters:

- Het aanbod van slibdeeltjes. Hiervoor kan gebruik worden gemaakt van de kansenkaart op aanvoer van fijn maritaal via maaiveld (Massop en van der Gaast, 2006. Daarnaast kunnen deze gegevens worden aangevuld met bijvoorbeeld doorzichtmetingen die waterschappen mogelijk al uitvoeren in het kader van de Kader Richtlijn Water.
- De stroomsnelheid in de Boezem. Voor deze informatie kan gebruik worden gemaakt van meetgegevens en oppervlaktewatermodellen van de waterschappen.
- De mate van scheepvaart die voor opwoeling van fijne deeltjes kan zorgen. Deze gegevens kunnen bij de waterschappen worden geïnventariseerd.
- Het stijghoogteverschil tussen de watergang en de omgeving. Deze gegevens kunnen worden ontleend aan stijghoogtekaarten gecombineerd met oppervlaktewaterpeilen.

Op basis van deze parameters zou het mogelijk moeten zijn om een inschatting te maken van de tijdsduur waarin een weerstand van de boezembodem is opgebouwd.

3.5 Conclusies

Op basis van de literatuur kan er vrijwel altijd van worden uitgaan dat er enige weerstand aanwezig is. In grote lijnen kunnen we concluderen dat - als orde grootte - de infiltratieweerstanden van de bodemsliblaag variëren van 0,1 tot 1000 dagen. Uit de studies van de Zuid Willemsvaart en het Twentekanaal blijkt dit te gelden voor 95% van de gevallen.

Voor de bepaling van sedimenttransport zijn meerdere formules en modellen beschikbaar. Deze modellen vergen echter een gedetailleerde invoer die vaak niet beschikbaar is. Belangrijke aspecten zijn de beschikbaarheid van sediment, de korrelgrootteverdeling en de stroomsnelheid. Indien de genoemde aspecten op de gewenste schaal beschikbaar zijn of kunnen komen is het aan te bevelen de bruikbaarheid van de beschikbare sedimenttransport formules voor de Nederlandse omstandigheden in boezems en kanalen nader te onderzoeken. Daarnaast kan gedacht worden aan het uitvoeren van metingen rond baggerwerkzaamheden om meer inzicht te krijgen in de snelheid waarmee een weerstand ter plaatse van de boezembodem wordt gevormd.

Vaak zijn niet alle benodigde invoerparameters voor formules die het sedimenttransport berekenen beschikbaar. Voor de vraag hoe snel een sliblaag met weerstand wordt gevormd is ook een meer

kwalitatieve benadering mogelijk. Voor een kwalitatieve benadering is het in eerste instantie van belang inzicht te hebben in de parameters die bepalend zijn voor de vorming van een sliblaag. Uit deze studie is gebleken dat een aantal parameters van groot belang zijn voor de vorming van een sliblaag op de bodem van de watergang na baggerwerkzaamheden:

- Het aanbod van slibdeeltjes. Hiervoor kan gebruik worden gemaakt van de kansenkaart op aanvoer van fijn maritaal via maaiveld (Massop en van der Gaast, 2006. Daarnaast kunnen deze gegevens worden aangevuld met bijvoorbeeld doorzichtmetingen die waterschappen mogelijk al uitvoeren in het kader van de Kader Richtlijn Water.
- De stroomsnelheid in de Boezem. Voor deze informatie kan gebruik worden gemaakt van meetgegevens en oppervlaktewatermodellen van de waterschappen.
- De mate van scheepvaart die voor opwoeling van fijne deeltjes kan zorgen. Deze gegevens kunnen bij de waterschappen worden geïnventariseerd.
- Het stijghoogteverschil tussen de watergang en de omgeving. Deze gegevens kunnen worden ontleend aan stijghoogtekaarten gecombineerd met oppervlaktewaterpeilen.

Gebruikmakend van deze parameters kan een methode worden ontwikkeld waarmee de snelheid van bodemvorming op een kwalitatieve manier kan worden ingeschat. Ingeschat kan worden of er al dan niet bodemvorming plaatsvindt. Aan de hand hiervan kan dan de mate en orde grootte van de snelheid van aanslibbing en de daarmee samenhangende weerstand worden bepaald. In het volgende hoofdstuk wordt aangegeven hoe deze bodemvorming kan worden bepaald en gemonitord.

4 Meetmethoden hydraulische (infiltratie)weerstand

4.1 Inleiding

Voor boezemwateren in Laag-Nederland en gelegen op Holocene klei en veenlagen (deklaag) kunnen de infiltratieweerstanden van plaats tot plaats sterk verschillen. Ook kunnen ze door bagger- en graafwerkzaamheden in de tijd veranderen. Meer inzicht in de infiltratieweerstanden is dus van belang voor een goede inschatting van de risico's voor piping en dijkinstabiliteit. In dit hoofdstuk wordt een inventarisatie van de methoden beschreven die beschikbaar zijn om de infiltratieweerstand te bepalen.

4.2 Meetmethoden ter bepaling van de infiltratieweerstand van bodemsliblaag en deklaag

Om de infiltratieweestand van de bodemsliblaag en deklaag kwantitatief te bepalen zijn er vijf typen meetmethoden:

- laboratoriumproeven,
- in-situ metingen,
- waterbalansen,
- grondwaterstijghoogten in combinatie met modelberekeningen en
- geofysische meettechnieken.

4.2.1 Laboratoriummetingen

Op grondmonsters gestoken in de bodemsliblaag en deklaag op verschillende diepte kunnen in het laboratorium proeven worden uitgevoerd om de hydraulische doorlatendheid te bepalen. Deze methode is in het verleden vaak toegepast door het ICW om de hydraulische weerstand van de deklaag te bepalen (o.a. Wit, 1983 en Wit et al., 1987). De weerstand van een bepaalde bemonsterde laag kan dan worden berekend door de dikte van die laag te delen door de gemeten doorlatendheid. De totale weerstand van de laag bestaat dan uit de som van de weerstanden van de afzonderlijke lagen.

Probleem bij deze methode is dat de sliblaag niet consistent is: bovenin is het slib sterk gesuspendeerd; naar onderen is het slib meer gecompacteerd en neemt de dichtheid toe; in de toplaag van het natuurlijke sediment kan het slib zijn ingedrongen in de poriën. Het is moeilijk om representatieve monsters te verkrijgen. Het schaalniveau van de verkregen weerstand is dat van enkele meters.

4.2.2 In-situ metingen

Net als kwel kan worden gemeten met kwelvangers bestaande uit buizen met een grote diameter die zijn geplaatst in slootbodems, kan de infiltratie worden gemeten op vergelijkbare wijze. Eigenlijk is de methode vergelijkbaar met infiltrometers voor het bepalen van de infiltratiecapaciteit van bodems. Een buis met een diameter van ca. 0.50 m dient enkele meters diep in de bodem van een kanaal te worden geplaatst. Het waterpeil in de buis zal dan zakken door de infiltratie in de bodem. Door het verloop van het waterpeil

nauwkeurig te registreren en regelmatig aan te vullen, kan de infiltratie worden bepaald. Ter plaatse dient ook de grondwaterstijghoogte in filters op verschillende niveaus te worden geregistreerd.

Door toepassing van de wet Van Darcy kan de hydraulische doorlatendheid worden bepaald voor de secties tussen de filters en eindelijk de hydraulische weerstanden (zie laboratoriumproeven). Deze in-situ methode geeft een getrouwer beeld van de hydraulische weerstand dan die op basis van laboratoriumproeven.

De uitvoering kan stuiten op de praktische problemen. Dat geldt voor het plaatsen en handhaven van de infiltratiepijp in druk bevaren wateren. Verder kan de infiltratie vrij laag zijn bij hoge weerstanden van de ondergrond. Bij een lage infiltratiewaarde van bijvoorbeeld 1 mm/dag moet toch rekening worden gehouden met een meetperiode van 100 dagen om betrouwbare waarden te verkrijgen. Ook hier ligt het schaalniveau in de orde van enkele meters.

4.2.3 Waterbalansen

Uit waterbalansen en regionale grondwatermodellen van boezemwateren en polders kan ook de infiltratie worden berekend. Afhankelijk van de mate van detail geldt de verkregen waarde meestal alleen voor lange perioden en grote gebieden in tegenstelling tot de puntmetingen van de laboratoriumproeven en de in-situ metingen hierboven. Het schaalniveau is dat van trajecten van enkele kilometers. Het is hierdoor niet geschikt om lokale risico's van opbarsting dan wel 'piping' vast te stellen.

4.2.4 Grondwaterstijghoogte gecombineerd met modelberekeningen

De infiltratie vanuit het boezemwater en de kwel in de lager polder gaat gepaard met een afname van de grondwaterstijghoogten in de zandlaag in die richting. Die afname wordt bepaald door de dikte en doorlatendheid van de zandlaag, maar ook door de weerstand van de deklaag. Het verloop van de afname kan worden bepaald aan de hand van drie waarnemingen van de grondwaterstijghoogte.

De doorlatendheid en dikte van de zandlaag kan redelijk goed worden geschat (REGIS II.1 of GEOTOP). Door een 2D/3D numeriek model toe te passen als Plaxis, Hydrus en SVOffice (toegepast voor berekeningen in deze rapportage), kan de weerstand van de deklaag worden bepaald. Met behulp van het model wordt een inversie-techniek toegepast om de weerstanden te bepalen van de deklaag en de bodemsliblaag (infiltratieweerstand).

Deze methode geeft een beeld van de weerstanden met een aggregatie op een schaalniveau van tiental tot enkele honderden meters. Met het model kunnen ook opbarstrisico's worden berekend en maatregelen worden onderzocht. De peilbuizen kunnen worden gebruikt voor monitoring achteraf.

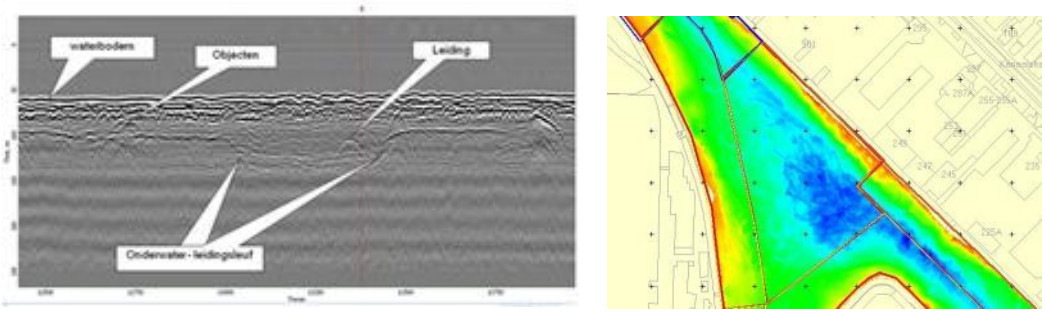
4.2.5 Geofysische meettechnieken

De bovengenoemde methoden hebben betrekking op veldonderzoek met schaalniveaus van meters tot honderden meters met uitzondering van de waterbalansen. Echter met waterbalansen alleen kunnen geen infiltratieweerstand worden bepaald. Gebiedsdekkend veldonderzoek naar infiltratieweerstanden van de bodemsliblaag en de deklaag volgens de bestaande methoden is dus kostbaar en tijdrovend. De vraag is of dat overal nodig is. Zoals uit de beschouwing in hoofdstuk 3 kan worden afgeleid is het bepalen van de infiltratieweerstand van de bodemsliblaag alleen zinvol als de weerstand van de deklaag klein is of in ieder geval van gelijke ordegrootte als de weerstand van de bodemsliblaag.

Indicaties voor de ordegrootte van de hydraulische weerstanden zijn aard en diktes van bodemsliblaag en deklaag. Om deze te bepalen kan gebruik worden gebruikt van geofysische technieken, die snel en gebiedsdekkend kunnen worden toegepast vanaf vaartuigen. Er zijn verschillende geofysische technieken, die patronen van bepaalde fysische kenmerken in kaart kunnen brengen.

Meten onderscheid bodemsliblaag en ondergrond

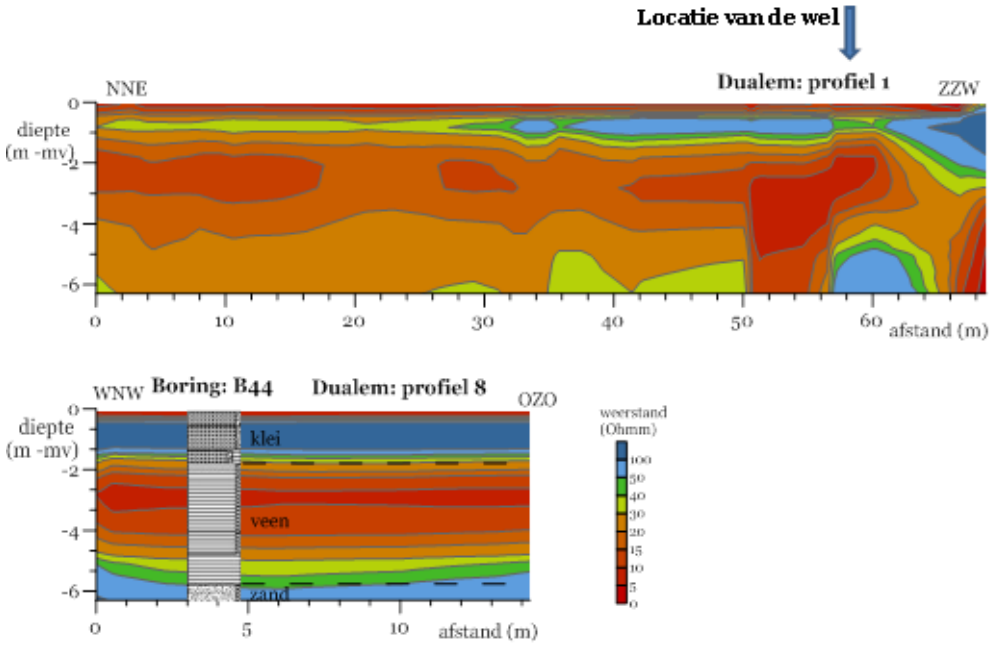
Het onderscheid tussen bodemsliblaag en ondergrond kan worden gedetecteerd op basis van het verschil in seismische voortplantingssnelheid, dichtheid, porositeit of watergehalte, kenmerken die aan elkaar gerelateerd zijn. Dit grensvlak kan daarom goed met seismisch-akoestische meettechnieken als echolood worden onderscheiden of met georadar. Met gammastraling kan een indicatie van de dichtheid worden verkregen. Deze meetmethoden worden nu al toegepast om bodemsliblagen te karteren ten behoeve baggerwerkzaamheden. Er zijn verschillende gespecialiseerde bedrijven, die deze metingen uitvoeren (DEEP, Van der Zwaan, 'Groundtracer systems and support'). Met behulp van vaartuigen wordt al varend gemeten en wordt een gebiedsdekkend of lijndekkend beeld verkregen van de diepte en dikte van het bodemslib.



Figuur 10. Links: Georadar meting van waterbodem (Groundtracer systems and support BV). Rechts: Kartering van waterbodem met akoestische multibeam methode (Van der Zwaan BV).

Onderscheid deklaag (onder sliblaag) en onderliggende zandlaag

Het onderscheid tussen de deklaag en de onderliggende zandlaag zou in principe ook met de bovengenoemde akoestische en georadartechnieken kunnen worden gedetecteerd. Echter de doordringingsdiepte is in de orde van enkele meters, terwijl de Holocene deklaag wel 5 tot 20 m dik kan zijn.



Figuur 11. Geofysisch onderzoeksresultaat in gebied van Rivierenland. Boven een structuur gerelateerd aan een wel bij een rivierdijk. Onder een voorbeeld van lithologie die te onderscheiden is met geofysica. (Acacia Water, 2014).

Tussen de deklaag, meestal bestaande uit veen en klei, en de onderliggend zandlaag is een goed contrast in de elektrische weerstand. Zand heeft over het algemeen een elektrische weerstand die 3 tot 5 maal zo hoog is als klei en veen. Dit weerstandcontrast kan worden bepaald met elektromagnetische (inductie) en

geoelektrische (direct current) meettechnieken. Deze metingen geven een tweedimensionaal (of 3D) beeld van de ondergrond. Deze metingen kunnen ook varend worden uitgevoerd met behulp van drijvende electromagnetische spoelen of electroden.

Op basis van de diktes, verkregen uit bovengenoemde geofysische metingen, en karakteristieke doorlatendheden van het bodemslib en de deklaag (uit de literatuur, REGIS II.1 en GEOTOP) kan de hydraulische weerstanden worden bepaald.

4.3 Conclusies

De weerstand van de slibbodem kan worden bepaald door monstername gevolgd door laboratoriumproeven of door in situ metingen (infiltrometers). Echter, vanwege de heterogeniteit van de sliblaag en het geringe invloedgebied van deze methoden zijn de verkregen waarden slechts representatief voor heel kleine zones (ordegrootte enkele meters). Voor lijn- of gebiedsdekkend onderzoek is deze methode erg kostbaar.

De hydraulische weerstanden van de sliblaag en van de deklaag kan het meest betrouwbaar worden bepaald door invers modelleren aan de hand van waarnemingen van grondwaterstijghoogten in 3 peilbuizen bij een boezemkade. Afhankelijk van de complexiteit van de situatie, kan voor de berekening gebruik worden gemaakt van een analytisch rekenmethode (in ontwikkeling) of een numerieke rekenmodel zoals Plaxis, Hydrus of SVOffice (toegepast voor berekeningen in deze rapportage). Een dergelijke berekening heeft een invloedsgebied van een tiental tot enkele honderden meters. Voordeel is dat de waarnemingsputten die het oplevert, gebruikt kunnen worden voor het monitoren van bepaalde kritische tracés. Nadeel is dat het erg kostbaar is voor alle dijktracés. Toepassing is zinvol voor een aantal karakteristieke dijktracés en deze te combineren met minder kostbare methoden.

De dikte en dichtheid van een sliblaag kan met akoestische geofysische technieken worden bepaald. Dergelijke metingen worden nu al uitgevoerd voor waterbodemonderzoek. Het belang is echter de totale dikte en weerstand van zowel de sliblaag als de Holocene deklaag. De dikte van de Holocene deklaag kan met geoelectrische of electromagnetische geofysische methoden worden bepaald mits het grondwater geen hoog zoutgehalte heeft. Door beide methoden te combineren kan de totale dikte worden bepaald als ook het onderscheid tussen de sliblaag en Holocene deklaag. Deze metingen kunnen snel en continu worden uitgevoerd via een lijn met sensoren die die door een meetschip wordt voortgetrokken. Deze methode geven dan lijndekkende informatie. Ter verificatie dienen op enkele locaties wel prikstokmetingen (tot ca. 3m á 4m) of CPT sonderingen te worden verricht. De methoden leveren niet direct de hydraulische weerstanden van slib- en deklaag. Wel kunnen op basis van de diktes de weerstanden worden geschat. Dit is een kosteneffectieve methode om lange trajecten te meten.

Sommige methoden zijn kwantitatief, maar lokaal en duur, terwijl andere methoden meer kwalitatief, maar wel snel uitvoerbaar en lijndekkend zijn. Om die reden lijkt de volgende stapsgewijze meetstrategie zinvol:

1. Oriënterend onderzoek op basis bestaande hydrologische, topografische en geologische gegevens om prioriteitsgebieden te selecteren.
2. Lijndekkend onderzoek met geofysische meettechnieken binnen deze prioriteitsgebieden
3. Selectie van tracés voor nader detailonderzoek
4. Detailonderzoek met grondwaterstijghoogte metingen en modelberekeningen

5 Modelonderzoek weerstanden boezemkades

5.1 Inleiding

Zoals in de vorige hoofdstukken is aangegeven, is het de piping problematiek in zekere zin een weerstanden probleem. Elk onderdeel die het waterdeeltje vanuit de boezem naar de poldersloot tegenkomt heeft een bepaalde weerstand. Om inzicht te krijgen in de invloed van de factoren die de weerstand tegen grondwaterstroming vergroten of verkleinen en hierdoor van invloed zijn op de waterdruk in het watervoerend pakket is een uitgebreide rekensessie uitgevoerd met een verzadigd-onverzadigde modelinstrumentarium. Met het model zijn stationaire berekeningen uitgevoerd om de gevoeligheid van verschillende parameters inzichtelijk te maken. Hierbij zijn verschillende berekeningen uitgevoerd:

- Variatie van de weerstand van de boezem en de kD-waarde van de watervoerende laag
- Variatie van de weerstand van de boezem en de weerstand van de sloot bodem
- Variatie van de breedte van de boezem (infiltrerend oppervlak) en de weerstand van de bodem, sloot met een beperkte variatie van de kD-waarde van de watervoerende laag
- Variatie van de dikte en de doorlatendheid van de boezembodem en de weerstand van de polder met een beperkte variatie van de kD-waarde van de watervoerende laag

5.2 Modelinstrumentarium

Er is gebruik gemaakt van grondwatermodelleringssoftware SVOffice op basis van FlexPDE. FlexPDE is de ‘volgende generatie’ modelsoftware waarmee op zeer gedetailleerde schaal geïntegreerd verzadigde en onverzadigde dichtheidsafhankelijke stroming desgewenst met stoftransport gesimuleerd kan worden.

FlexPDE werkt op basis van partiële differentiaal vergelijkingen met de mogelijkheid tot onder andere

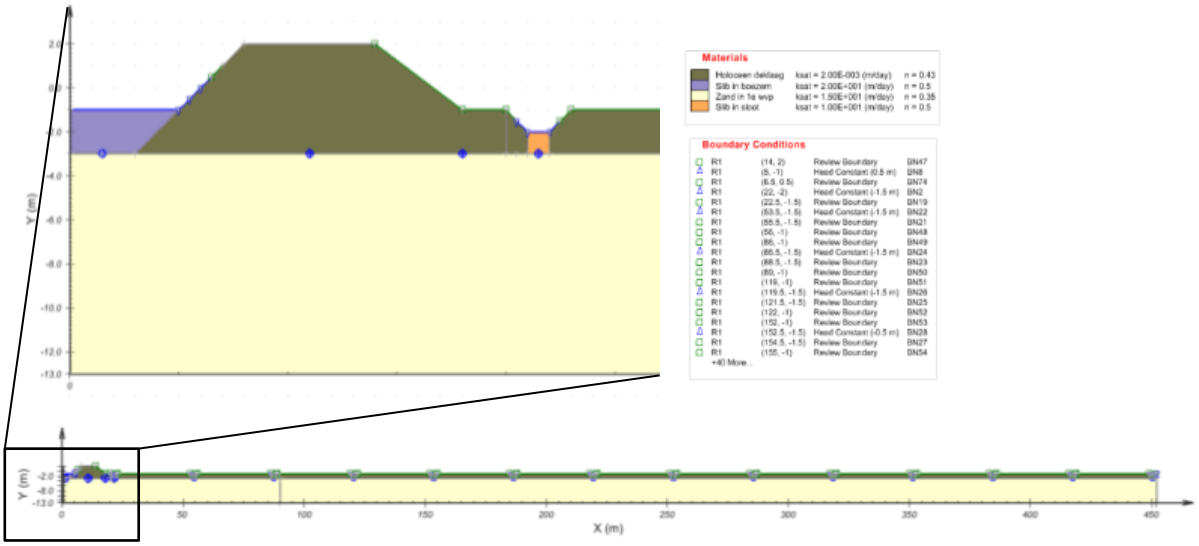
- Vertaling naar eindige elementen, schaal van cm tot m en km
- per rekenstap dynamische eindige elementen grids
- Integrale oplossing van stroming van water in de verzadigde en onverzadigde zone op basis van de Richards-vergelijking met stoftransport en dichtheidsstroming
- In 2D en 3D

Dit programma is met name ontwikkeld om waterstroming door dijken en dammen te bestuderen. Er zijn modules te koppelen waarmee tevens volledig geïntegreerd met de waterstroming de stabiliteit, deformatie, warmte- en gastransport door de bodem kan worden berekend.

Binnen SVOffice kunnen zowel 2D als 3D modellen worden gemaakt.

5.3 Modelschematisatie

De modelschematisatie laat zich beschrijven tot een boezem met boezemkade met een daarachter gelegen polder. De ontwatering van de polder vindt plaats via watergangen. De bodemopbouw is betreft een dikke zandlaag met daarop gelegen een deklaag.



Figuur 12. Modelschematisatie basisberekening

Zowel de boezem als de eerste sloot in de polder kunnen contact maken met het eerste watervoerend pakket. Er is een sliblaag in deze beide watergangen aanwezig. De modelschematisatie is weergegeven in Figuur 12.

Zowel in de boezem als in de polders is gekozen voor een vaste waterstand in de watergangen. Verder zijn alle randen (de beide zijkanten en de onderkant) van het model dicht ('no flow boundary').

Van alle berekeningen is gekeken naar de waterdruk op 4 locaties (de blauwe punten in Figuur 12):

- Direct onder de sliblaag van de boezem (1,5 m vanaf de modelrand)
- Midden onder de boezemkade (11 m vanaf de modelrand)
- Onder de teen van de boezemkade (18 m vanaf de modelrand)
- Onder de sloot (21,5 m vanaf de modelrand)

5.4 Variatie van weerstand boezembodem en kD-waarde watervoerende laag

5.4.1 Parameters en parametervariatie

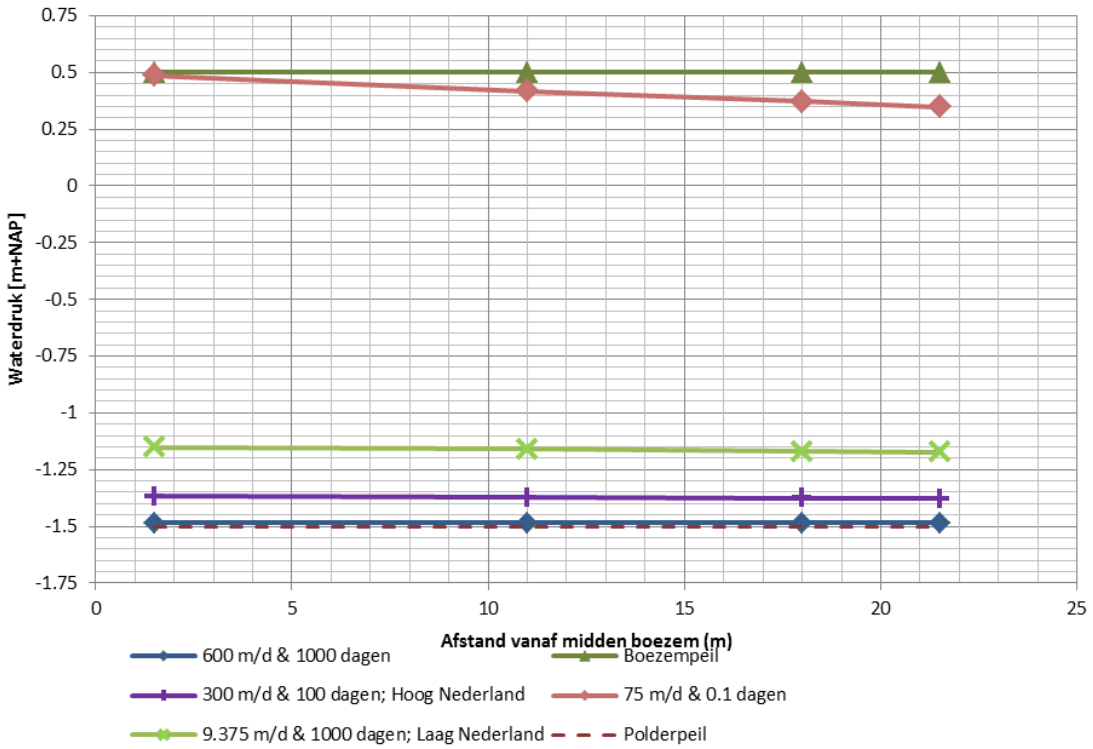
De parameters van het model zijn als volgt gekozen:

- Een waterstandsverschil van 2 m.
- De kD-waarde watervoerend pakket varieert van 5 tot 600 m/dag
- De c-waarde van de holocene deklaag in de polder is 1000 dagen
- De c-waarde van de bodem in de boezem (combinatie van de sliblaag en de resterende deklaag) varieert van 0,1 tot 1000 dagen, aangezien dit het gebied is waar de grootste stijghoogte variatie is te verwachten, zoals is gebleken uit de verkennende berekeningen van van Hemert (2013). Maar ook de literatuur studie (hoofdstuk 2) heeft laten zien dat de weerstand bij slibbodems varieert tussen de 0,1 en de 1000 dagen.

- De c-waarde van de sliblaag in de eerste sloot in de polder is op 1000 dagen gehouden (om de invloed van de sloot uit te sluiten)

5.4.2 Resultaten

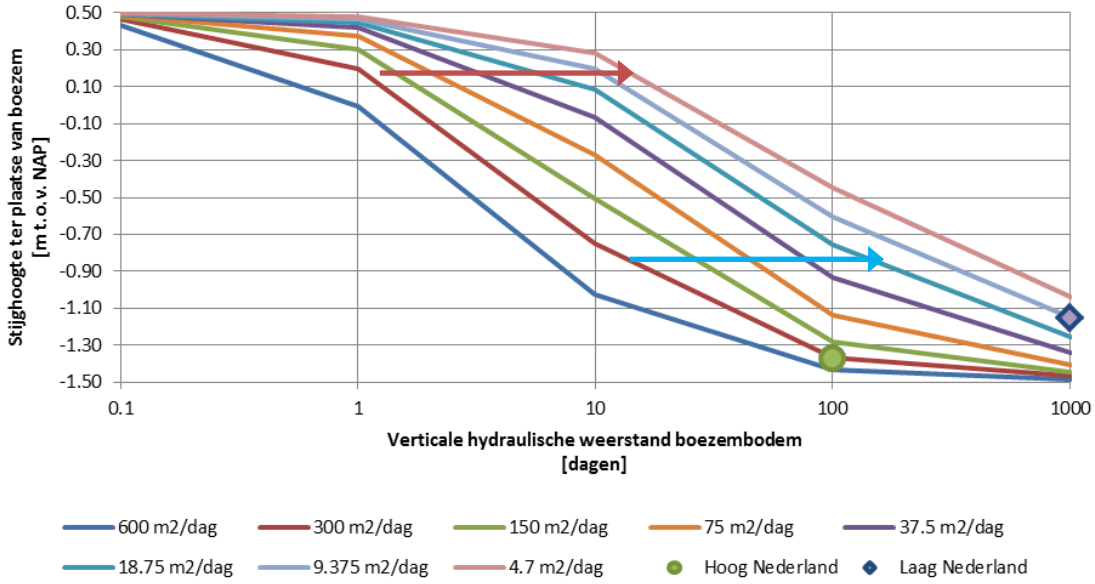
Bij deze berekeningen zijn de kD-waarde en de C-waarde van de boezembodem gevarieerd. Allereerst is in Figuur 13 de bandbreedte van de resultaten weergegeven; met de parametervariatie zijn 40 sets van resultaten berekend, in de figuur zijn de maximum en de minimum waterdruk variatie weergegeven, met daarbij 2 sets die representatief zijn voor hoog en laag Nederland. Deze 2 situaties zullen ook in de grafieken hierna terug komen.



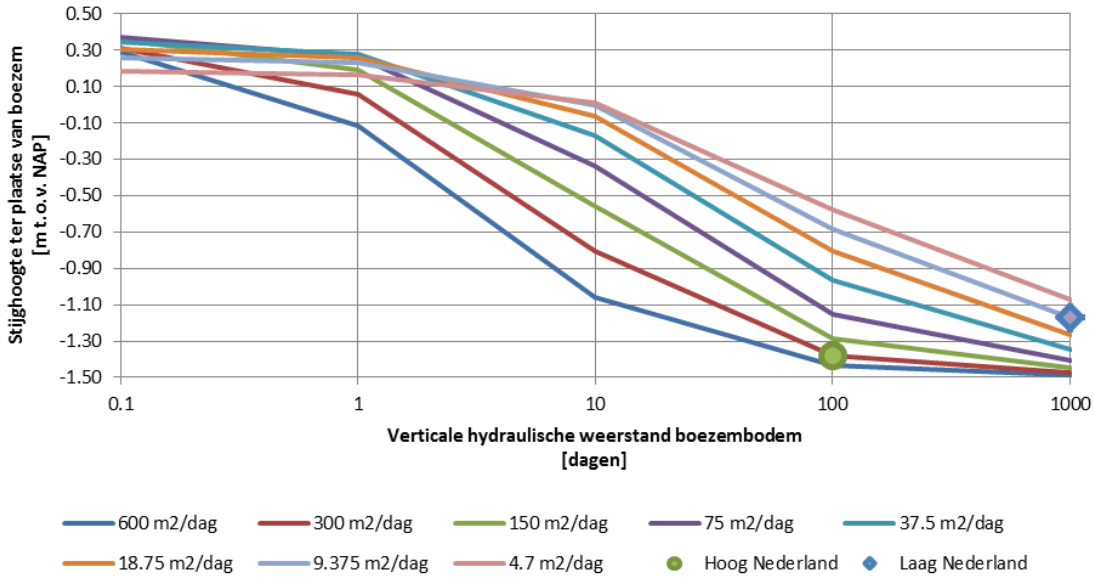
Figuur 13. Bandbreedte van de waterdruk variatie in het watervoerend pakket bij verschillende kD-waarden van het watervoerend pakket en C-waarden van de boezembodem, aangevuld met 2 representatieve resultaten voor hoog en laag Nederland. Het polderpeil en de laagste waarde (600 m/d & 1000 dagen) liggen nagenoeg over elkaar

In Figuur 2 is de relatie tussen de grondwaterstijghoogte en de verticale weerstand van de boezembodem weergegeven, zoals berekend door STOWA. Hierin is te zien dat de invloed van de boezem op de stijghoogte in het watervoerend pakket groter wordt naarmate de weerstand kleiner wordt. Ook in Figuur 14 is deze relatie weergegeven. In de figuur is de weerstand van de boezembodem tegen de stijghoogte in het watervoerend pakket direct onder de boezembodem bij verschillende kD-waarden van het watervoerend pakket weergegeven. Uit de figuur blijkt dat bij C-waarde van 10 dagen of meer en een kD-waarde van meer dan 150 m2/dag het stijghoogte verschil ten opzichte van de polder al is gehalveerd. Bij een kD-waarde van 40 m2/dag of minder en een C-waarde van 10 dagen of minder is het stijghoogteverschil ten opzichte van de polder slechts met minder dan 25% afgenomen.

Daarnaast kan uit deze grafiek worden afgeleid dat een vergroting van de weerstand van 1 naar 10 dagen resulteert in dezelfde stijghoogte als de kD-waarde met ongeveer een factor 20 tot 30 wordt verkleind (zie de rode pijl in Figuur 14 Als de weerstand wordt vergroot van 10 naar 100 dagen wordt dezelfde stijghoogte berekend bij een kD-waarde die een factor 10 tot 20 is verkleind (zie de blauwe pijl in Figuur 14).



Figuur 14. Invloed afname hydraulische weerstand boezemkaden direct onder de sliblaag van de boezem. Stijghoogte zandondergrond onder bodem boezem bij verschillende kD-waarden

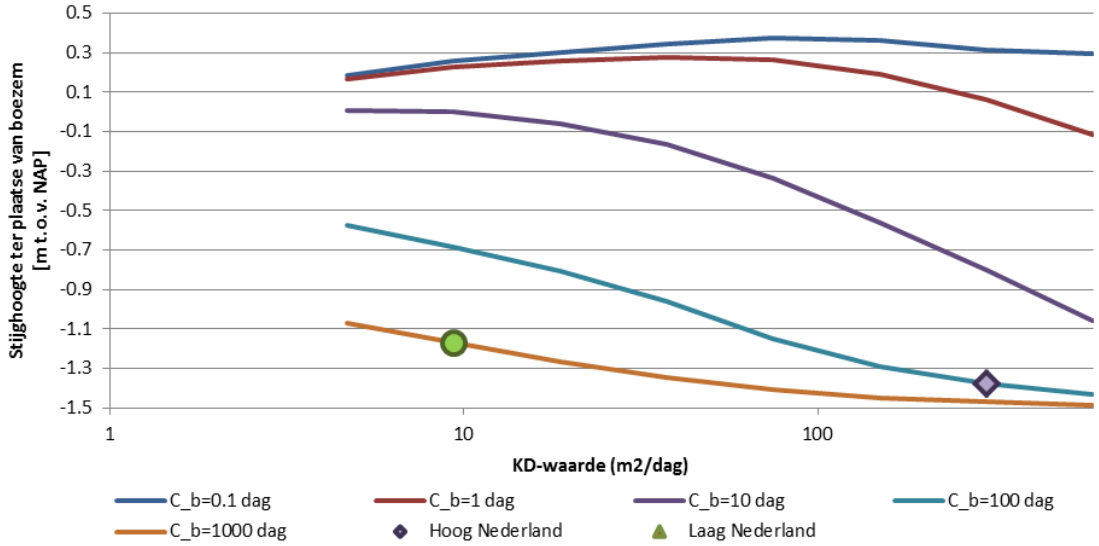


Figuur 15. Invloed afname hydraulische weerstand boezemkaden onder teen van de boezemkade. Stijghoogte zandondergrond onder teen boezemkade bij verschillende kD-waarden

Daarnaast is gekeken naar de druk onder de teen van de boezemkade (Figuur 15 en Figuur 16). Indien de resultaten in Figuur 15 worden vergeleken met Figuur 14 kan worden opgemerkt dat er een zeer beperkte verandering is van de stijghoogte in het watervoerend pakket bij een weerstand van 100 dagen of meer, hierbij is de invloed van de polder groter dan de invloed van de boezem. Alleen bij een lage kD-waarde, wat betekent dat het watervoerend pakket een relatief hoge weerstand heeft, treedt er een vermindering van de stijghoogte op bij grotere afstand tot de boezem.

De invloed van deze kD-waarde en de hiermee samenhangende weerstand tegen horizontale stroming in het watervoerende pakket komt ook tot uiting in Figuur 16: bij een lage weerstand van de boezembodem neemt de stijghoogte toe bij toenemende kD-waarde / afnemende weerstand van het watervoerend pakket. Naarmate de weerstand van de boezembodem toeneemt wordt de invloed van de polder groter als de kD-

waarde van de watervoerende laag toeneemt / de weerstand van de watervoerende laag afneemt. Bij een hoge waarde van de boezembodem is de interactie tussen de boezem en de watervoerende laag zeer beperkt en is de stijghoogte bijna gelijk aan het polderpeil.



Figuur 16. Invloed afname kD-waarde van het watervoerend pakket bij verschillende C-waarden van de sliblaag in de boezem op de waterdruk onder de teen van de boezemkade in het watervoerend pakket

Voor de overige rekenresultaten wordt verwezen naar bijlage 1. Tevens blijkt uit de rekenresultaten dat de grootste variatie in stijghoogten optreedt bij een kD-waarden tussen de 75 en 150 m2/dag. De focus bij de volgende berekeningen zal dan ook liggen op deze orde grootte voor de kD-waarde van de watervoerende laag.

5.5 Variatie van weerstand en breedte boezembodem en kD-waarde watervoerende laag

5.5.1 Parameters en parameter variatie

Naast de weerstand van de boezembodem is ook het infiltrerend oppervlak van de boezembodem van belang. Indien als de weerstand heel klein is, maar het oppervlak is ook heel klein zal er een beperkte hoeveelheid water infiltreren. Hoe groter het oppervlak bij gelijkblijvende weerstand, hoe meer water kan infiltreren. Echter, als de boezembodem niet meer de maatgevende factor is voor de hoeveelheid water die wordt afgevoerd, wordt de watervoerende laag of de weerstand van het achterland maatgevend. Het effect van een grotere infiltratie bij toename van de boezembreedte zal in de praktijk dus tot een bepaald maximum relevant zijn. Om het effect van de boezembreedte inzichtelijk te maken is er voor de boezembreedte een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd.

Bij de berekeningen zijn 8 verschillende boezembreedten gebuikt, variërend van 10 m breedte tot 2 km breedte. Deze grote breedte komt voor in bijvoorbeeld het merengebied in zuidwest Friesland; de meren hebben het boezempeil en over de hele bodem kan water infiltreren. Hierbij is de kD-waarde gevarieerd (75 en 150 m2/dag) en is voor de C-waarde van de sloot en de boezembodem een waarde van 1, 10 en 100 dagen aangehouden.

5.5.2 Resultaten

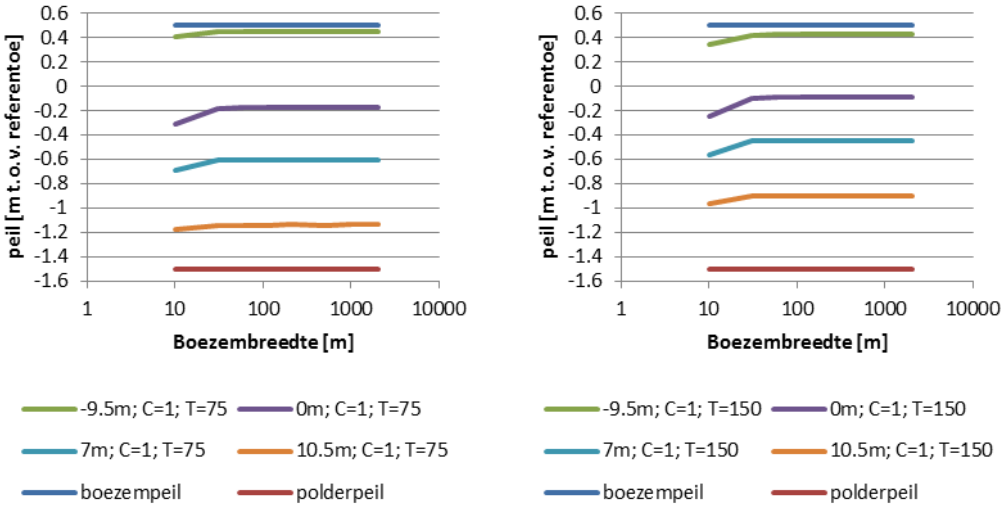
De invloed van de breedte van de boezem bij verschillende waardes van de weerstand van de boezem en de sloot bodem zijn weergegeven in Figuur 17, Figuur 18 en Figuur 19. Hierin is de berekende stijghoogte tegen de boezembreedte uitgezet. De verschillende lijnen in de grafiek zijn de verschillende locaties waar

de stijghoogte is berekend. Hoe dichter de lijnen bij elkaar liggen, hoe kleiner het verhang van het grondwater, hoe verder uit elkaar hoe groter het verhang is. De linker grafiek heeft een kD-waarde van 75 m2/dag, de rechter grafiek heeft een kD-waarde van 150 m2/dag.

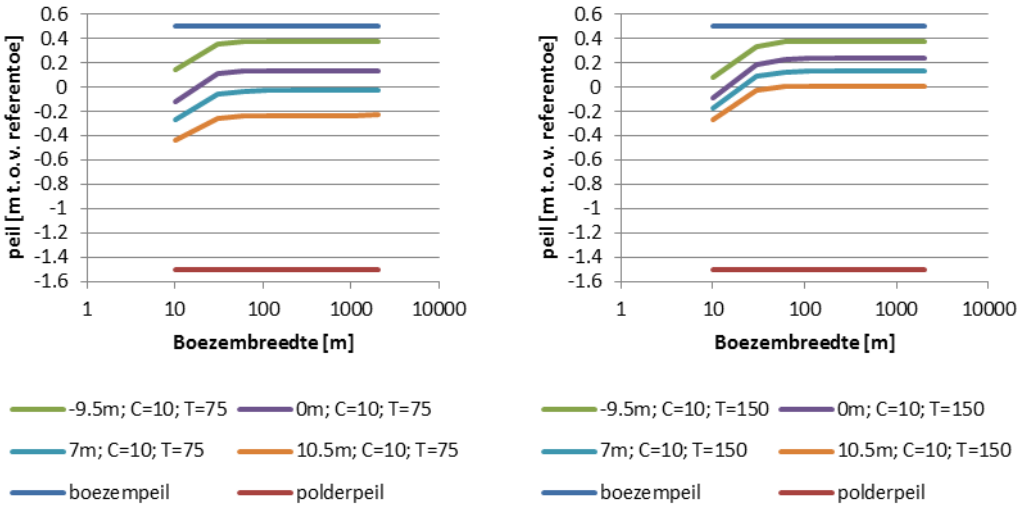
Te zien is dat bij een lage weerstand van boezembodem en sloot bodem een groot verhang optreedt: zowel sloot als boezem hebben een grote invloed op de waterstand in het watervoerend pakket. Tegelijk is te zien dat hoe breder de boezem, hoe groter het infiltrerend oppervlak is, waardoor het grondwater in hogere mate wordt beïnvloed door de boezem en de berekende stijghoogte dus ook hoger is.

Daarnaast is te zien dat bij een toename van de boezembreedte van 0 tot 100 m de grootste variatie in de stijghoogte optreedt, tussen 100 en 200 m neemt de stijghoogte nog iets toe, daarboven treedt eigenlijk geen verdere verhoging van de stijghoogte meer op. Dit komt omdat de watervoerende laag gegeven het verhang niet meer water kan transporteren.

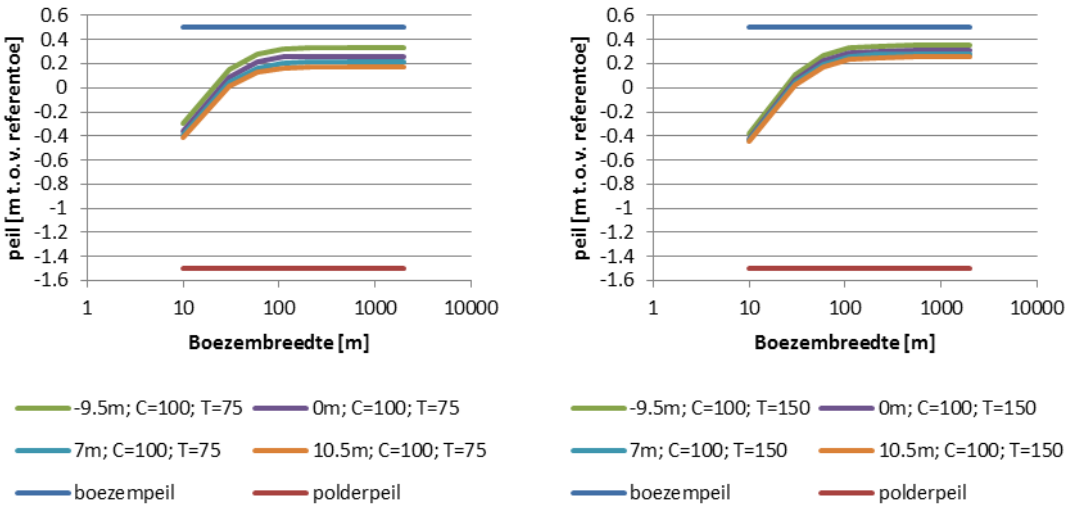
Tenslotte is te zien dat een hogere kD-waarde, en dus een lagere weerstand van de watervoerende laag in een lager verhang resulteert: als de weerstand afneemt, kan het water beter worden afgevoerd, waardoor het verhang van de stijghoogte afneemt.



Figuur 17. Invloed van de breedte van de boezem op verschillende locaties ten opzichte van het hart van de boezemkade op het peil in de watervoerende laag bij een waarde van C=1 dag voor de boezem en sloot bodem



Figuur 18. Invloed van de breedte van de boezem op verschillende locaties ten opzichte van het hart van de boezemkade op het peil in de watervoerende laag bij een waarde van C=10 dag voor de boezem en sloot bodem



Figuur 19. Invloed van de breedte van de boezem op verschillende locaties ten opzichte van het hart van de boezemkade op het peil in de watervoerende laag bij een waarde van C=100 dagen voor de boezem en sloot bodem

5.6 Variatie van de doorlatendheid, dikte & weerstand boezembodem en weerstand slootbodem bij twee kD-waarden

5.6.1 Parameters en parameter variatie

Vanuit de Leidraad “Toetsen op veiligheid regionale waterkeringen” en de addendum hierop worden eisen gesteld aan de dikte van de weerstandsbiedende laag onder de boezem. Om inzicht te geven in het effect wat verschillende diktes hebben op de onderliggende stijghoogte is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarbij de dikte van deze weerstandsbiedende laag is gevarieerd. Vanuit de leidraad dient deze 1,5 m of 2 m te zijn (afhankelijk van de situatie). Mogelijk zou deze echter vanuit geohydrologisch oogpunt ook dunner kunnen zijn.

In de leidraad worden aan deze laag bepaalde eisen gesteld van het lutum en zand gehalte. Op basis van het literatuur onderzoek van hoofdstuk 3 kan worden aangegeven dat als al het materiaal inderdaad aan deze genoemde eisen voldoet, de doorlatendheid minder zal zijn dan 0,01 m/dag. Bij deze doorlatendheid betreft het een homogene laag van 1,5 m wat resulteert in een weerstand van 150 dagen. Veelal is de bodem echter inhomogeen waardoor dit in de praktijk anders kan zijn.

De eerdere berekeningen hebben al aangegeven dat een weerstand van 150 dagen van grote invloed is op de stijghoogte. Een laag met een grotere doorlatendheid of kleinere dikte heeft echter een lagere weerstand. Om te bepalen wat de invloed is van een dunnere laag en / of een hogere doorlatendheid is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd.

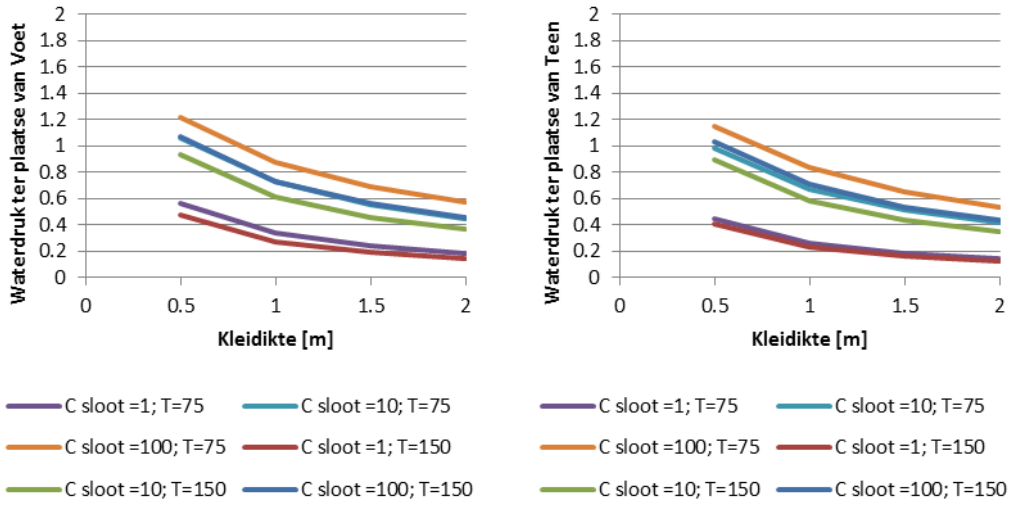
Voor de berekeningen is uitgegaan van een vergelijkbare schematisatie als in de vorige hoofdstukken, op een aantal punten is deze echter anders. De boezembreedte is aangehouden op een breedte van 30m, met een deklaagweerstand van het achterland van 1000 dagen en een sloot waarin de weerstand is gevarieerd van 1, 10 en 100 dagen. Voor de doorlatendheid van de boezembodem is 0,01 m/d, 0,1 m/d en 1 m/d aangehouden. Verder zijn de berekeningen uitgevoerd met een kD-waarde van 75 en 150 dagen.

5.6.2 Resultaten

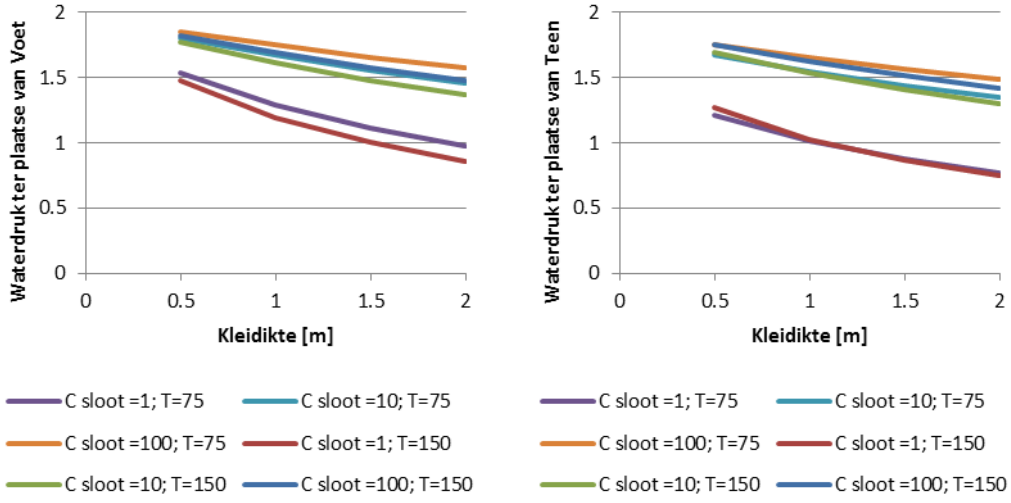
De resultaten zijn weergegeven in de onderstaande Figuur 20, Figuur 21 en Figuur 22. In Figuur 20 zijn de waterdrukken weergegeven bij verschillende C-waarden van de sloot met een k- waarde van de boezem bodem van 0,01 m/dag. Dit is de minimale k-waarde van klei.

In de andere 2 figuren zijn de resultaten weergegeven bij een berekening van 0,1 en 1 m/dag. Deze zijn respectievelijk weergegeven in Figuur 21 en Figuur 22. Opgemerkt wordt hierbij dat het voorkomen van een doorlatendheid van 1 m/dag bij een homogene bodem die voldoet aan de lutum en zand gehalte eisen redelijk onwaarschijnlijk is. Vanuit het oogpunt van inhomogeniteit is deze ook weergegeven.

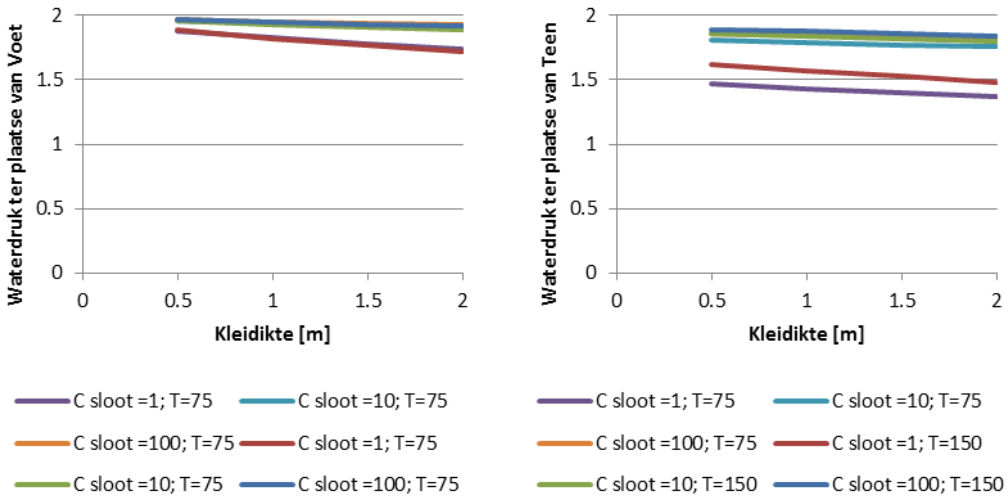
Te zien is dat een vermindering van de dikte van de weerstandsbiedende laag in de boezem van 2 naar 1,5 m een beperkte druktoename oplevert van ongeveer 1 tot 6% van het totale drukverschil van 2 m tussen de boezem en de polder. Deze druktoename geldt zowel bij de teen als bij de voet van de boezemkade.
Een reductie van 2 naar 1 m weerstandsbiedende laag in de boezem levert een druktoename op van 5 tot 15% bij zowel de voet als de teen van de boezemkade.



Figuur 20. Waterdruk ter plaatse van voet (links) en teen (rechts) bij een k-waarde van de boezembodem van 0,01 m/d, wat overeen komt met een C-waarde van de boezem van 100 dagen

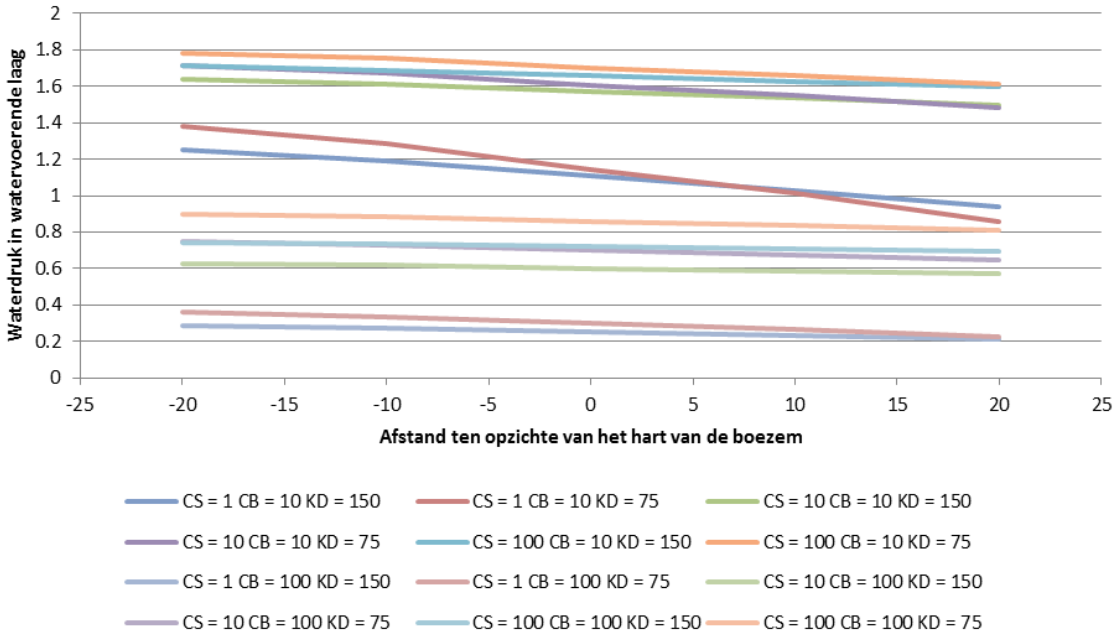


Figuur 21. Waterdruk ter plaatse van voet (links) en teen (rechts) bij een k-waarde van de boezembodem van 0,1 m/d, wat overeen komt met een C-waarde van de boezem van 10 dagen



Figuur 22. Waterdruk ter plaatse van voet (links) en teen (rechts) bij een k-waarde van de boezembodem van 1 m/d. wat overeen komt met een C-waarde van de boezem van 1 dag

Indien de laag wordt beperkt tot 1 m dikte is een goede classificatie van deze laag van groot belang. Figuur 23 laat de verschillende waterdruk verlopen zien bij een kleidikte van 1 m en een variërende kD-waarden (75 en 150 m2/d), doorlatendheid van de slootbodem (0,01;0,1 en 1 m/d) en de boezembodem (0,01 en 0,1 m/d). De bandbreedte van de voorkomende stijghoogtevariatie is vele malen groter dan de toename van de druk bij aanscherping van de eis.



Figuur 23. Waterdruk onder de boezemkade bij verschillende weerstanden van de sloot (CS) en boezembodem (CB),en verschillende waarden voor de kD-waarde(KD) bij een dikte van de kleilaag in de boezem van 1 m

5.7 Variatie van weerstand boezembodem en weerstand sliblaag

5.7.1 Parameters en parametervariatie

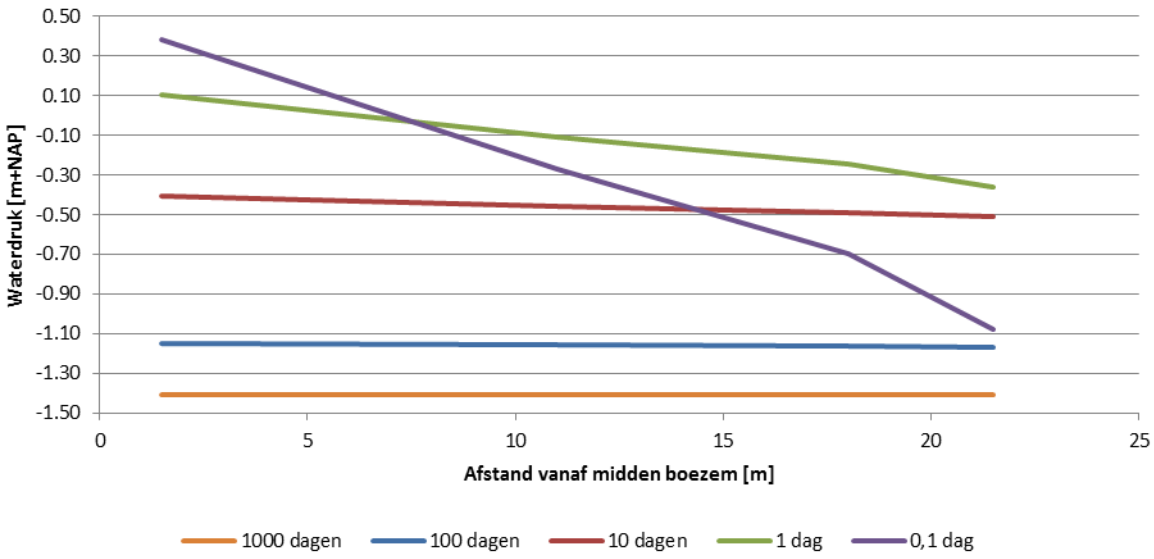
Zoals bij eerdere berekeningen is aangetoond, heeft een weerstandsvariatie van de boezembodem en de kD-waarde van de watervoerende laag veel invloed op de stijghoogte (paragraaf 5.5). De grootste bandbreedte van de stijghoogte treedt op bij een lagere kD-waarde (75 m2/dag). Een lagere weerstand van de sloot maakt dat de afvoer van water kan worden vergroot en heeft daarmee ook een sterke invloed op de stijghoogte. De invloed van verschillende waarden voor deze twee weerstanden worden nader onderzocht in deze paragraaf. Hiertoe is hetzelfde gebruikt als voor de berekeningen in paragraaf 5.4. De kD-waarde die is gebruikt is 75 m2/dag. De C-waarde van de boezembodem en de slootbodem zijn gevarieerd tussen 0,1 en 1000 dagen.

5.7.2 Resultaten

De variatie van de weerstanden laat zien dat een grotere weerstand in de boezem met een kleinere weerstand in de sloot tot een stijghoogte leidt die dichter bij het sloot peil ligt. Een kleinere weerstand in de boezem met een grotere weerstand in de sloot leidt tot een stijghoogte die dichter bij het boezempeil ligt. Verder blijkt uit de berekeningen dat bij een verschil in weerstand van zowel de slootbodem als de boezem bodem van 100 of 1000 dagen niet heel verandering in stijghoogte oplevert. Een verdere verlaging van weerstand van de slootbodem en/of de boezembodem heeft tot gevolg dat het verhang van de stijghoogte verder toeneemt.

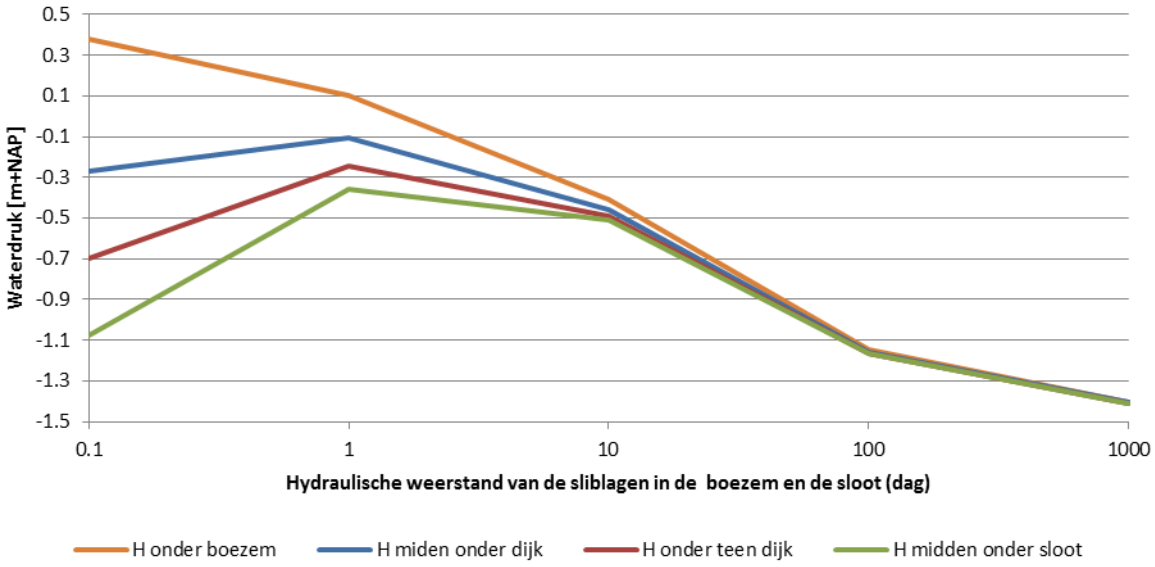
Een uitgebreide reeks grafieken is weergegeven in bijlage 2. Hierin is zijn steeds sets van twee grafieken weergegeven, de linker grafiek geeft de invloed van variatie van de boezembodemweerstand bij gelijkblijvende slootbodem weerstand weer. De rechter grafiek geeft de invloed van de variatie van de slootbodemweerstand bij gelijkblijvende boezembodemweerstand weer. In deze paragraaf worden de belangrijkste resultaten besproken.

Figuur 24 geeft de resultaten weer voor de situaties waarbij de C-waarden van boezembodem en slootbodem gelijk zijn gehouden; hierin is duidelijk te zien dat bij een toename van de weerstand het peil van de boezem een steeds grotere invloed krijgt, totdat de weerstand zo klein is (1 dag of kleiner) dat er een kanteling plaats vindt: zowel de sloot als de boezem hebben een grote invloed, wat maakt dat er een groot verhang optreedt in het drukverloop in het watervoerend pakket.



Figuur 24. Invloed toename C-waarde van de bodemweerstand van de boezem en sloot op de waterdruk in het watervoerend pakket. Bodemweerstand van sloot en boezem zijn gelijk.

In Figuur 25 zijn deze gegevens opnieuw weergegeven, maar nu is de hydraulische weerstand tegen de waterdruk uitgezet. Hierbij is de bandbreedte en de invloed van beide peilen goed te zien. Bij een lage weerstand (0,1 dag) is er een heel stijl verhang: vanuit de boezem kan veel water infiltreren, en de sloot heeft een sterke drainerende functie. Bij een beperkte toename (naar 1 dag), neemt het verhang af, maar is de invloed van de boezem groter dan van de sloot. Bij een verdere toename van de weerstand (naar 10 dagen en meer) neemt de variatie in de waterdruk af en ook de invloed van de boezem neemt af.



Figuur 25. Invloed toename C-waarde van de bodemweerstand van de boezem en sloot op de waterdruk in het watervoerend pakket. Bodemweerstand van sloot en boezem zijn gelijk.

5.8 Conclusies

Met behulp van modelsimulaties is voor een aantal karakteristieke situaties en verschillende bandbreedtes van parameterwaarden de effecten op enerzijds de gradiënt in de zandondergrond zelf en anderzijds de mogelijke toename van de stijghoogte door een afname van de infiltratieweerstand in de boezem gekwantificeerd.

De modelberekeningen laten zien dat een bodemweerstand (sliblaag en een combinatie van een sliblaag met Holocene deklaag) in de boezem bepalend is voor de waterdruk onder de boezem. Een weerstand van 10 dagen geeft, afhankelijk van de kD-waarde van het watervoerend pakket, al een reductie van 25% tot 75% van de stijghoogte in het watervoerend pakket onder de teen van de boezemkade. Bij een weerstand van 1 dag resulteert dit in een reductie van de stijghoogte in het watervoerend pakket van 5% tot 25%. Verder heeft een grotere de kD-waarde van het watervoerend pakket tot gevolg dat het verhang van het grondwater afneemt, aangezien de weerstand van de watervoerende laag afneemt en het water dus sneller kan worden afgevoerd. Bij een lage bodemweerstand in de boezem en een grotere kD-waarde zal de druk onder de sloot in de polder dus hoger zijn dan bij een hoge bodemweerstand in de boezem.

De breedte van de boezem heeft grote invloed op de onderliggende stijghoogte: hoe breder de boezem hoe meer water kan infiltreren, waardoor de onderliggende stijghoogte bij grotere boezembreedtes hoger is dan bij kleinere boezembreedtes. De grootste toename in de stijghoogte treedt op bij een toename van de breedte tot 100 m. Bij een verdere toename tot 200 m neemt de stijghoogte nog steeds toe, maar minder sterk. Bij een nog verdere toename van de breedte neemt de stijghoogte niet meer noemenswaardig toe, aangezien de onderliggende laag niet genoeg capaciteit heeft om dit water af te voeren.

Een vermindering van de dikte van de weerstandsbiedende laag in de boezem van 2 naar 1,5 of 1,0 m heeft een stijging van de stijghoogte tot gevolg. Echter, dit is sterk afhankelijk van de doorlatendheid of de weerstand van deze laag. Als de laag bestaat uit klei met een beperkte doorlatendheid (k=0,01 m/d) is de invloed beperkt. De druktoename is 1 tot 6% van het totale drukverschil tussen de boezem en de polder bij een vermindering van 2 naar 1,5 m dikte, en 5 tot 15% bij een vermindering van 2 naar 1 m.

Ter plaatse van de sloot (op enige afstand van de boezem) maakt een beperkte weerstand van de slootbodem en boezem (kleiner dan 10 dagen) dat de boezem een groter effect heeft op de stijghoogte in het watervoerend pakket. Bij verdere toename (groter dan 10 dagen) van de bodemweerstand in de sloot en de boezem neemt de invloed van de sloot op de stijghoogte in het watervoerend pakket weer toe.

6 Effect van een tijdelijke weerstandsverlaging door een gat met beperkte omvang

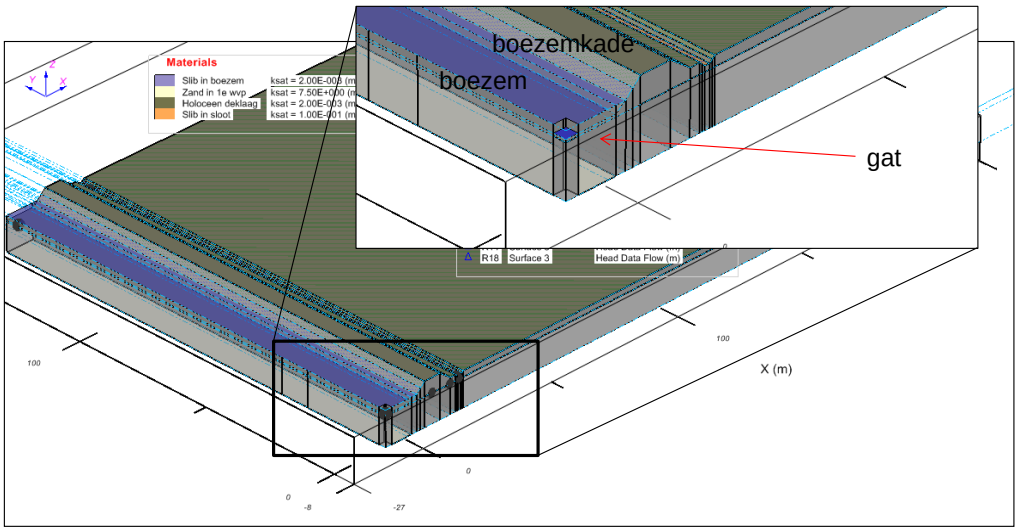
6.1 Inleiding

Opdrijving van een deel van de boezembodem wordt als een risico gezien voor het optreden van piping. Het effect hiervan op de stijghoogtegradiënt wordt veelal bepaald aan de hand van een 2D doorsnede schematisatie (of model). In dit hoofdstuk wordt een vergelijking gemaakt tussen een 2D en 3D schematisatie middels modelsimulaties. Dit om inzicht te krijgen in het uitstralingseffect van een gat met beperkte omvang, waarbij tevens wordt vastgesteld of 2D benadering valide is of dat in dergelijke gevallen een 3D benadering noodzakelijk is. In andere woorden, geeft een 2D benadering een overschatting van de aanwezigheid van een gat?

Hierbij zijn een drietal sets berekeningen gemaakt:

- De invloed van een gat van 5 bij 5 m met een weerstand van de bodem in het gat van 1 dag
- De invloed van een gat van 5 bij 5 m met een weerstand van de bodem in het gat van 5 dagen
- De invloed van de grootte van een gat met een weerstand van de bodem in het gat van 5 dagen op het grondwater

De situatie is genomen voor een gat in de boezembodem met een afmeting van 5 m bij 5 m. In de 3D schematisatie is dit een gat van 5 bij 5 m. In de 2D schematisatie is het gat 5 m breed en in principe oneindig lang. Het gat is gedurende 1 dag aanwezig, waarbij het uitgangspunt is dat na één dag het gat is dichtgeslibd.



Figuur 26. 3D modelschematisatie

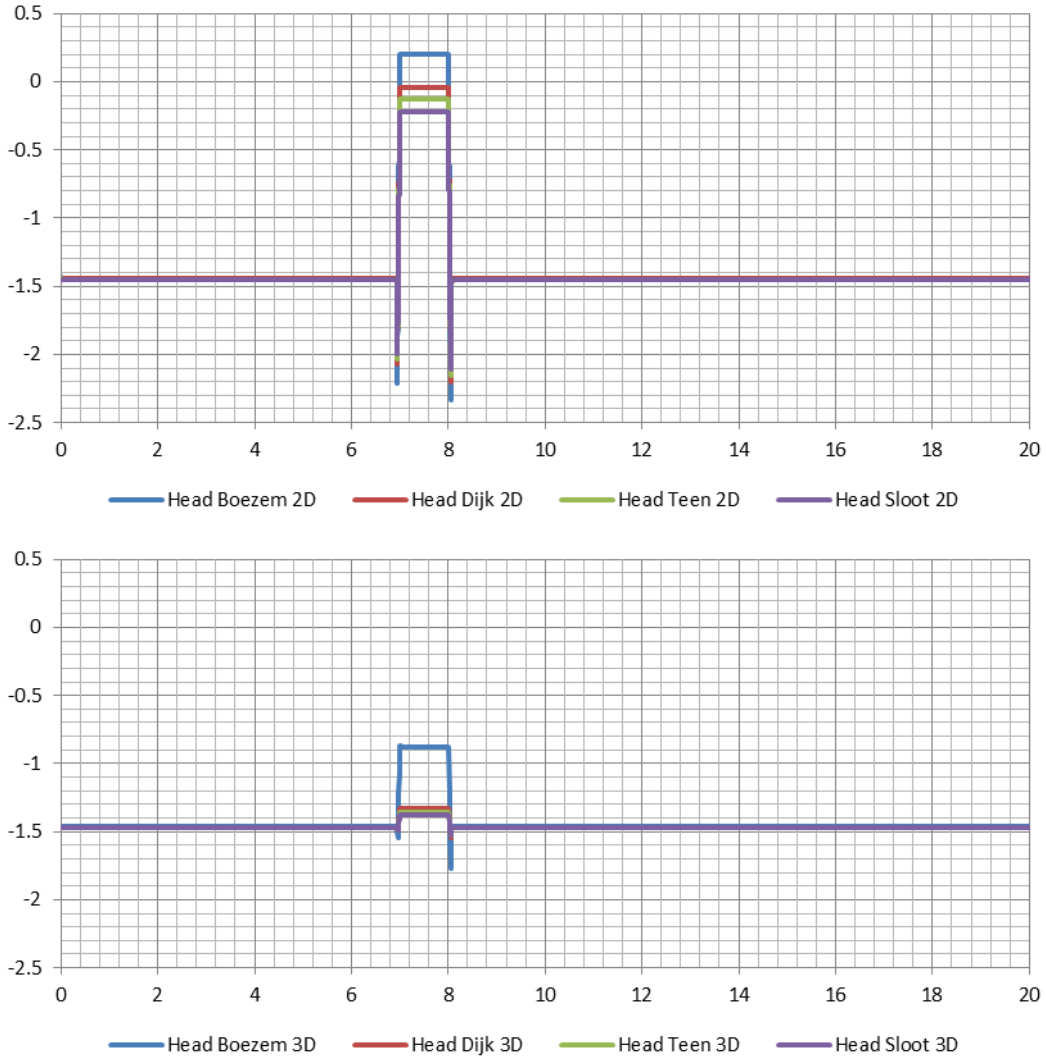
6.2 Model schematisatie

Voor deze berekening is teruggegrepen op de modelsimulatie uit hoofdstuk 5, het model zoals beschreven in paragraaf 5.3 is opnieuw gebruikt. Hierbij is gekozen voor het model zoals ook gebruikt in in paragraaf 5.7 met een kD-waarde van het watervoerend pakket van 75 m2/dag, een weerstand van de deklaag en de boezem van 1000 dagen en een peilverschil van 2 m.

Het grootste risico op piping treedt op bij een groot verhang van de stijghoogte in het watervoerend pakket. Daarom is er gekozen voor een beperkte weerstand in de sloot en de resterende laag na opbarsten. Gerekend is met een weerstand van 5 dagen en 1 dag in het gat in de boezem met daarbij een weerstand in de sloot van respectievelijk 10 en 2 dagen. Voor de grafieken met de waterdrukken zijn dezelfde 4 punten genomen als in hoofdstuk 5, namelijk:

- Direct onder het gat,
- in het midden van de dijk / kade,
- in de teen aan de achterkant van de kade,
- onder de sloot in het midden.

Bij de derde berekening is het aantal punten verder uitgebreid om het uitstralingseffect te bepalen. Hierbij zijn ook punten toegevoegd op 50, 100 en 150 m afstand van het gat (haaks op de boezem)

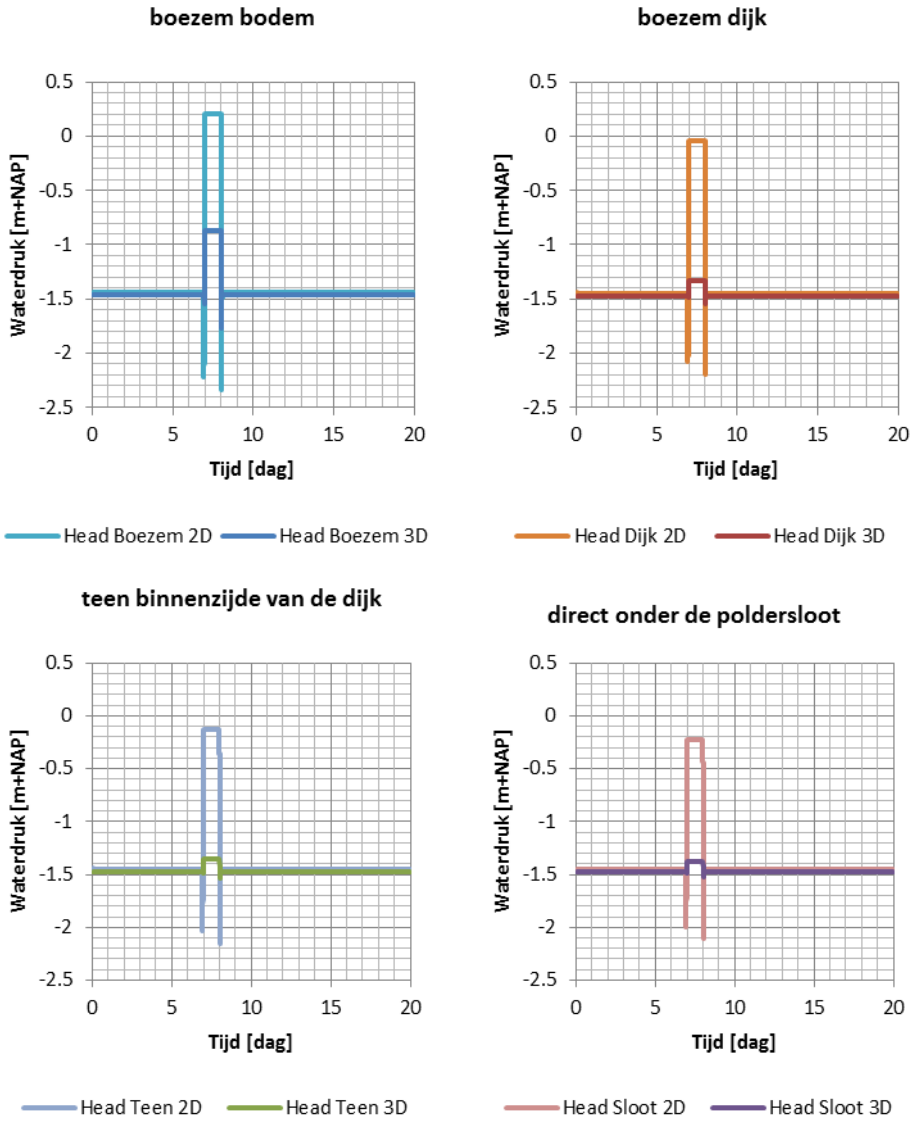


Figuur 27. Gemodelleerde invloed van een gat dat geopend is gedurende 1 dag zowel in een 2D (boven) als en 3D modellering (onder)

6.3 Gat met beperkte weerstand en de sloot bodem met beperkte weerstand – doorlatendheid 0,5m/d

Als eerste is er een berekening in 2D en 3D uitgevoerd, waarbij het gat gedurende 1 dag open is, en hierbij op de bodem van het gat een resterend laagje aanwezig is met een doorlatendheid van 0,5 m/dag. Ook het materiaal in de sloot bodem heeft deze doorlatendheid.

Figuur 27 geeft de stijghoogteverandering weer op de 4 verschillende locaties (onder het gat, onder de kade, onder de teen en onder de sloot) zowel in de 2D (boven) als de 3D berekening (onder). Te zien is het grote verschil tussen een 2D berekening en een 3D berekening, direct onder het gat. De weerstand van 1 dag resulteert bij een 2D gat (dus oneindig lang) in een waterstandsdruk verhoging onder het gat van 164 cm, wat overeen komt met 82% verhoging. Bij een 3D berekening is de drukverhoging slechts 59 cm, oftewel 30 % drukverhoging.



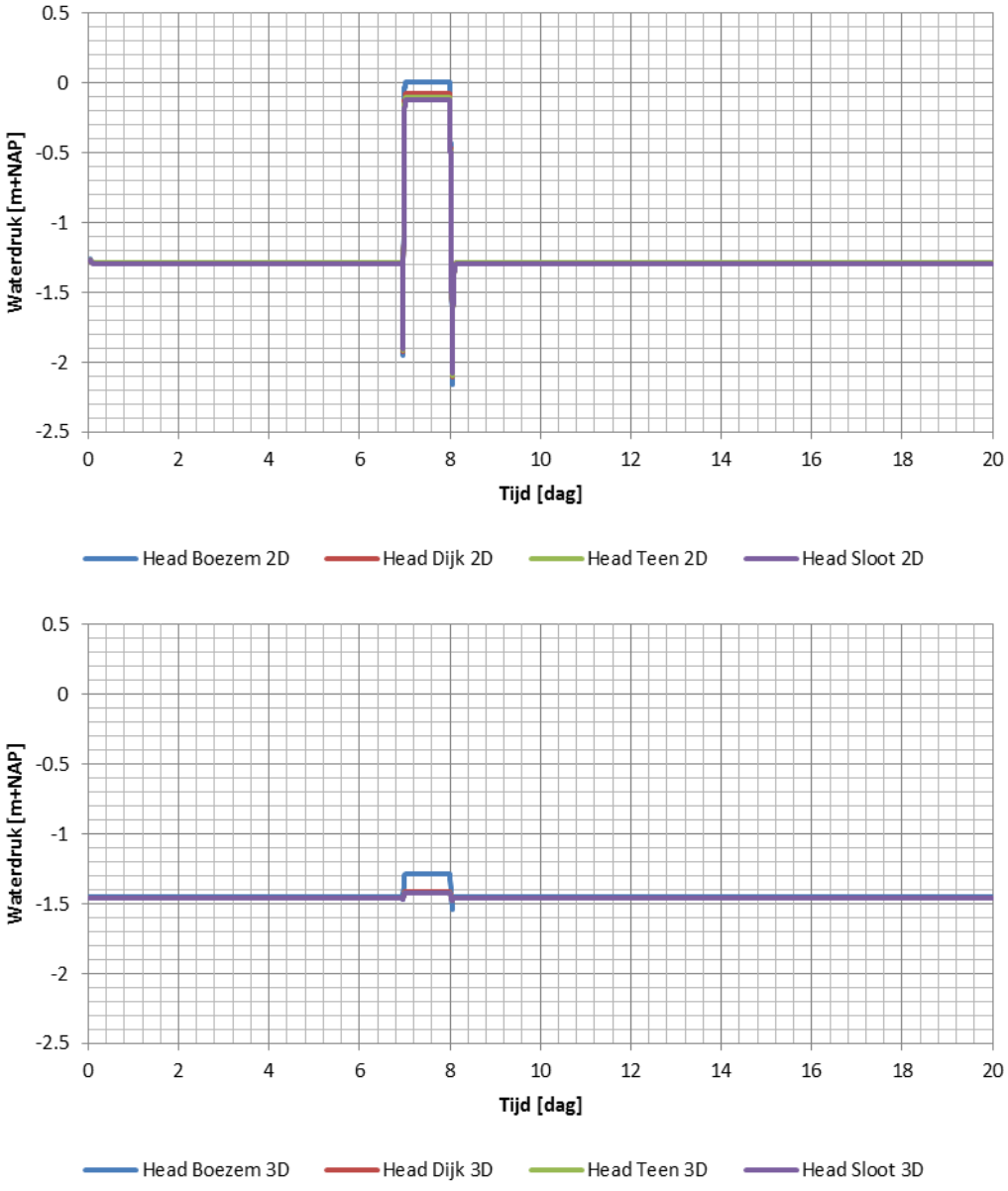
Figuur 28. Gemodelleerde invloed van een gat dat geopend is gedurende 1 dag in 2D en 3D op de verschillende locaties

In Figuur 28 is de invloed van het gat op de 4 verschillende observatie locaties weergegeven zowel van de 2D als van de 3D berekening. Met deze gegevens is het verschil tussen de maximale druk als gevolg van het gat en de druk zonder gat is berekend als percentage ten opzichte van het totale drukverschil tussen de

boezem en de polder. Dit is weergegeven in Tabel 8. Te zien is dat de invloed van het boezempeil op de onderliggende watervoerende laag bij een 3D berekening beperkt is. Maar ook de reikwijdte van het 3D-gat is beperkt. Dit wordt mede veroorzaakt doordat het gat bij de 3D berekening relatief klein is ten opzichte van de hele boezembodem en dat dus de hoeveelheid water die weglekt ook beperkt is ten opzichte van het gehele volume in de watervoerende laag.

Tabel 8. Verhoging van de waterdruk rondom het gat ten opzichte van het totale waterdrukverschil bij een 2D en een 3D berekening

Locatie	2D	3D	Verschil
Head boezem	82 %	30 %	52 %
Head Dijk	70 %	7 %	63 %
Head Teen	66 %	6 %	60 %
Head Sloot	61%	5 %	56 %

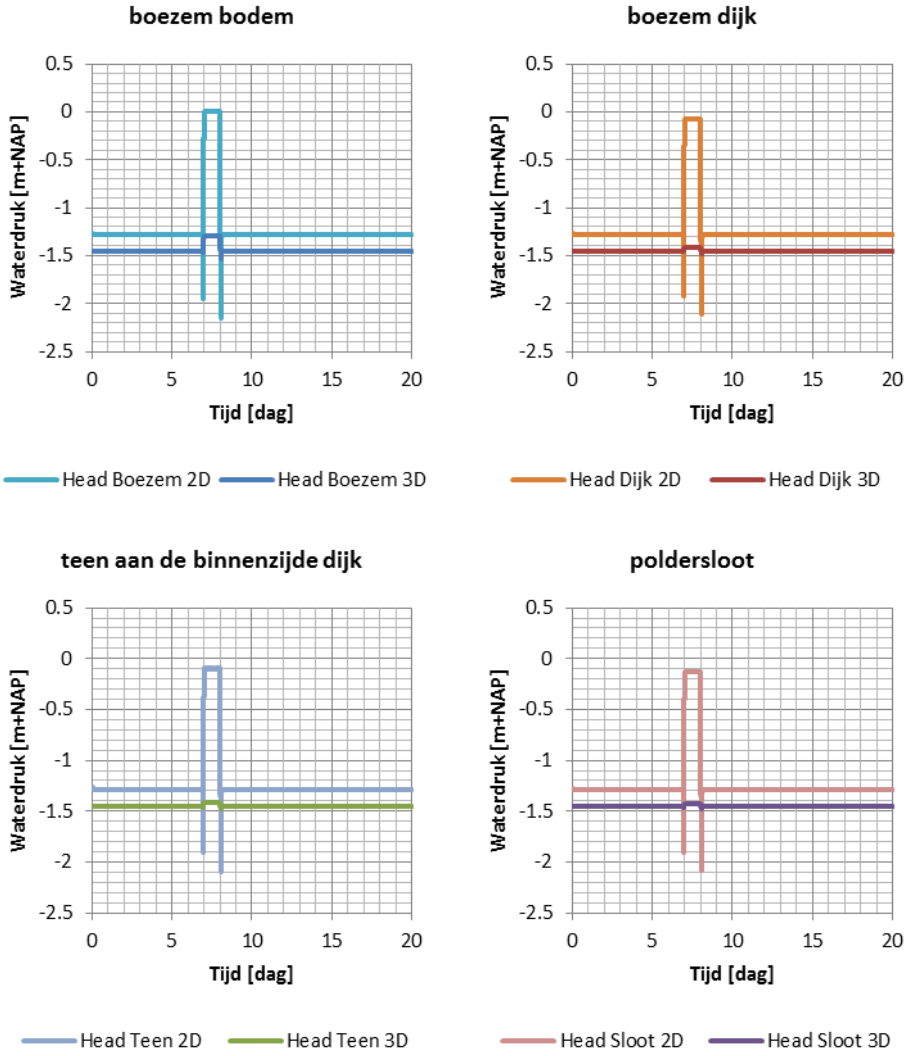


Figuur 29. Gemodelleerde invloed van een gat dat geopend is gedurende 1 dag in 2D (boven) en 3D (onder)

6.4 Gat met weerstand en de sloot bodem met weerstand – doorlatendheid 0,1 m/dag

Als tweede berekening is een lagere doorlatendheid gehanteerd van 0,1 m/dag voor de sloot bodem en de resterende laag in de bodem van het gat. Figuur 29 geeft de stijghoogteverandering weer op de 4 verschillende locaties zowel in de 2D als de 3D berekening. Te zien is dat het verschil tussen de 2D berekening en de 3D berekening redelijk vergelijkbaar is met de eerste berekening. Bij de 3D berekening treedt direct onder het gat een drukverhoging op van 16 cm ten opzichte van een peilverschil van 2 m, in de 2D berekening is dit een verhoging van 1,29 m.

In Figuur 30 is de stijghoogte per locatie bij deze 2 berekeningen weergegeven. Een opvallend verschil wat hierbij optreedt, is dat als gevolg van de grotere weerstand in de sloot het boezempeil een grotere invloed lijkt te hebben op het boezempeil bij de 2D berekening, ten opzichte van de 3D berekening: de *initiële* stijghoogte bij de 2D berekening is 17 cm hoger dan bij de 3D berekening.



Figuur 30. Gemodelleerde invloed van een gat dat geopend is gedurende 1 dag in 2D en 3D op de verschillende locaties

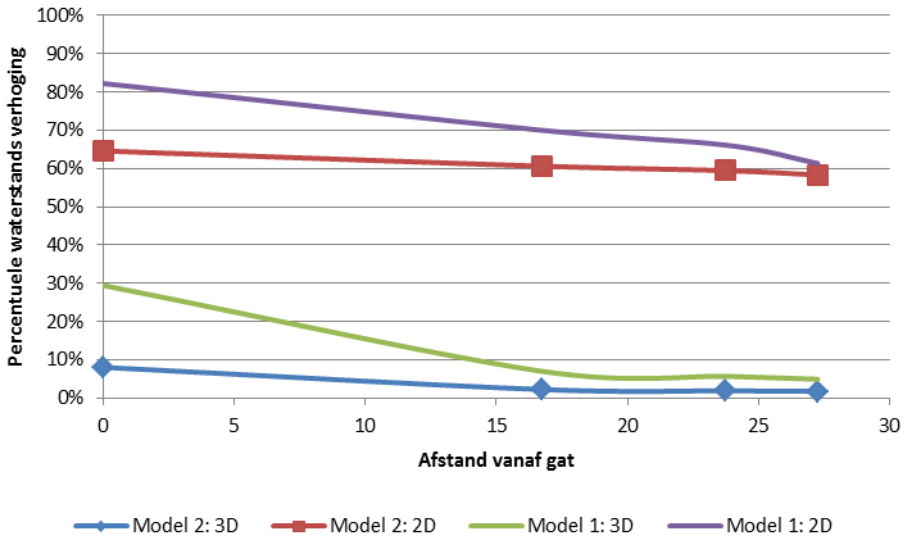
Ook bij deze berekening is het verschil bepaald tussen de maximale peilstijging bij de 2D en de 3D berekening. Deze resultaten zijn weergegeven in Tabel 8. Te zien is dat ook bij een hogere weerstand van de sloot- en de boezembodem de 2D situatie een overschatting van de berekende waterdruk geeft van bijna 60 % en dat het invloedsgebied ook veel kleiner is.

Tabel 9. Verhoging van de waterdruk rondom het gat ten opzichte van het totale waterdrukverschil bij een 2D en een 3D berekening

Locatie	2D	3D	Verschil
Head boezem	65 %	8,1 %	56,9 %
Head Dijk	61 %	2,2 %	58,8 %
Head Teen	60 %	1,9 %	58,1%
Head Sloot	58%	1,8 %	56,2 %

De invloed van de verlaging van de doorlatendheid, cq de verhoging van de weerstand van het bodemmateriaal in het gat, is duidelijk te zien in Figuur 31. Beide berekeningen laten zien dat de 2D berekening de invloed van het gat fors overschat. De weerstand verhoging in het gat van 1 naar 5 dagen resulteert in de 2D berekening in een verminderde invloed van het gat op de stijghoogte onder het gat van 17%. Bij de 3D berekening is dit 22%.

Het verschil tussen de 2D en de 3D berekening is echter veel groter, bij beide berekeningen is het verschil ongeveer 50 à 60%.



Figuur 31. Gesimuleerde invloed van een gat dat geopend is gedurende 1 dag in 2D en 3D. Procentuele verhoging van het peil in het watervoerend pakket als gevolg van het gat.

6.5 Invloed van verschillende afmetingen van een tijdelijk gat

6.5.1 Berekeningen

In de voorgaande 2 berekeningen is bepaald wat het verschil is tussen de 2D en 3D berekeningen van een tijdelijk gat in de boezembodem. Hieruit is gebleken dat een berekening van de invloed van een gat van beperkte grootte met een 2D model inderdaad lijdt tot een sterke overschatting van de 3D situatie. Als vervolgstap hierop is daarom een berekening gemaakt, waarbij het gat steeds groter is gemaakt, om te bepalen hoe groot het gat moet zijn, zodat de 2D en 3D situatie orde grootte vergelijkbare resultaten opleveren.

Om inzichtelijk te maken wat de invloed is van de grootte van een gat dat ontstaat in de bodem van de boezem, zijn verschillende groottes van gaten doorgerekend in 2D en 3D. Voor elke berekening van een gat met het 2D model zijn 2 berekeningen met het 3D model uitgerekend, waarbij de lengte van het gat steeds groter is geworden. De grootte van het gat varieerde tussen de 25 en 800 m2. Deze laatste berekening is al groter dan normaal voorkomt. Om te kijken hoe groot het verschil is tussen 2D en 3D is ook deze redelijk onwerkelijk grote waarde meegenomen in de berekeningen.

Bij deze berekeningen zijn alle berekeningen in 2-voud uitgerekend, met een kD-waarde van 75 m2/dag en van 150 m2/dag. De verschillende berekeningen in 2D en aan gerelateerde 3D berekeningen zijn weergegeven in Tabel 10.

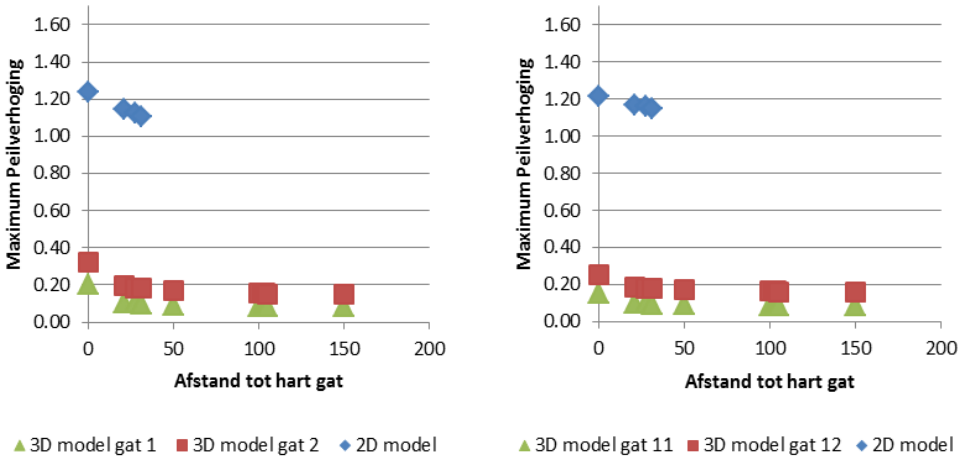
Tabel 10. Eigenschappen van de verschillende 2D en 3D modellen die met elkaar zijn vergeleken

2D model	2D breedte	3D model	3D breedte	3D lengte	Oppervlakte gat	kD-waarde
1	5	1	5	5	25	75
1	5	2	5	10	50	75
2	10	3	10	10	100	75
2	10	4	10	20	200	75
3	20	5	20	20	400	75
3	20	6	20	40	800	75
11	5	11	5	5	25	150
11	5	12	5	10	50	150
12	10	13	10	10	100	150
12	10	14	10	20	200	150
13	20	15	20	20	400	150
13	20	16	20	40	800	150

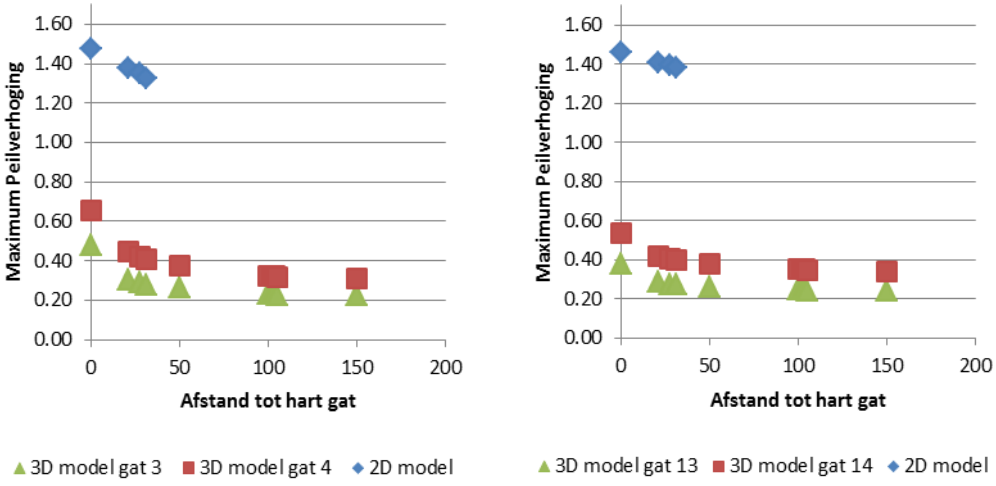
6.5.2 Resultaten

Van alle modellen zijn een aantal punten geëxporteerd op verschillende afstanden van het gat tussen de boezem en de sloot. Deze punten liggen op 0 tot 150 m van het gat.

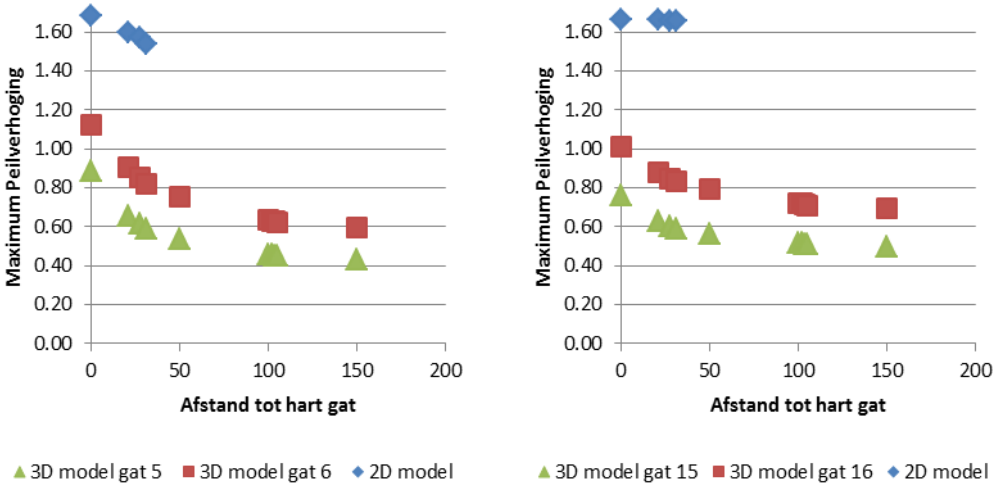
In Figuur 32 zijn de resultaten weergegeven bij een gat van 5 m breed (alleen 2D) en 5 of 10 m lang (in 3D). Zoals bij de vorige berekeningen was aangegeven treedt er een groot verschil op tussen de 2D en 3D berekening. In de rechter grafiek is het verhang in het grondwater zowel in de2D als in de 3D situatie minder dan in de linker grafiek; dit wordt veroorzaakt door de hogere kD-waarde, en dus de lagere weerstand van de watervoerende laag: het water kan sneller worden afgevoerd, waardoor in 2D de maximum grondwaterstijging bijna gelijk is, maar de invloedzone groter is, in de 3D situatie is de maximum grondwaterstijging minder, omdat de wateraanvoer hier de beperkende factor is.



Figuur 32. Gesimuleerde invloed van een gat dat geopend is gedurende 1 dag in 2D en 3D. Links bij een kD-waarde van 75 m2/dag, rechts bij een kD-waarde van 150 m2/dag



Figuur 33. Gesimuleerde invloed van een gat dat geopend is gedurende 1 dag in 2D en 3D. Procentuele verhoging van het peil in het watervoerend pakket als gevolg van het gat.



Figuur 34. Gesimuleerde invloed van een gat dat geopend is gedurende 1 dag in 2D en 3D. Procentuele verhoging van het peil in het watervoerend pakket als gevolg van het gat.

In Figuur 33 en Figuur 34 zijn de resultaten weergegeven van een gat van 10 en 20 m breed (in 2D) en 10, 20 of 40 m lang (in 3D). De in Figuur 32 optredende effecten treden ook hier op: het verhang bij een grotere kD-waarde is lager en de maximum peilstijging in de 3D situatie bij een hogere kD-waarde is minder.

Opvallend is dat zelfs bij een gat van 800 m2 er nog steeds een wezenlijk verschil optreedt tussen de 2D en 3D berekening van 25 tot 30% onder het gat.

6.6 Conclusies

Het opdrijven van een deel van de boezembodem is een 3D probleem. Als dit wordt benaderd als een 2D probleem, vindt er een grote overschatting van de invloed van het ontstane gat plaats. De vergelijking tussen de 2D en 3D berekeningen laten zien dat een 2D berekening van een 3D situatie een zeer grote overschatting van de invloed van de 3D situatie geeft: bij een beperkt gat van 25 m2 is een verschil tussen de stijghoogten in 2D en 3D van 50 tot 60%. Zelfs een zeer groot tijdelijk gat van 800 m2 is het verschil tussen de stijghoogten onder het gat 25 tot 30%. Geconcludeerd kan worden dat de invloed van een gat met beperkte omvang vrijwel geen risico zal vormen.

7 Modelsimulaties veldproef piping boezem Rekerpolder

7.1 Inleiding

De case Rekerpolder is uitgevoerd door Hoogheemraadschap Hollands Noorder Kwartier (HHNK) om te bepalen hoe het grondwater reageert op een gat in de boezembodem. De resultaten zijn gebruikt als verificatie voor de verschillende onderwerpen besproken in dit rapport. Primair doel is echter om te onderzoeken of met een eenvoudige modelschematisatie kan worden volstaan voor het bepalen van de effecten van de bodemweerstand op het verloop van de stijghoogte in het watervoerend pakket.

7.2 Uitvoering piping test

HHNK heeft in 2012 een veldproef piping uitgevoerd in de Rekerpolder ten noordwesten van Alkmaar. In Figuur 35 is de locatie weergegeven. Hierbij is een stuk boezem en poldersloot afgedamd, waarna het waterpeil in de poldersloot is verlaagd en in de boezem is verhoogd. Tenslotte is er een gat in de boezembodem gegraven om te bepalen of er piping op zou treden. De gegevens van deze proef gebruikt om het systeem te simuleren met een geohydrologisch model (SVOffice). Doel hiervan is om de in hoofdstuk 5 en 5 berekende resultaten te toetsen aan metingen van de veldproef.

In dit hoofdstuk worden de uitgevoerde activiteiten beschreven. Allereerst wordt de meetdata nader bekeken, waardoor een schifting in de peilbuizen kan worden gemaakt. Vervolgens wordt de modellering nader toegelicht en worden de modelresultaten besproken.



Figuur 35. Locatie van de proeflocatie in de Rekerpolder

7.3 Analyse stijghoogtemetingen Rekerpolder

7.3.1 Geplaatste peilbuizen

Om de invloed van de peilverlaging in de poldersloot, de peilopzet in de boezem en de uitgraving van een stuk van de boezem bodem te kunnen terug zien is er een raai van 10 peilbuizen geplaatst (peilbuizen A tot en met J). Peilbuizen A tot en met F zijn geplaatst aan de zuidzijde van de boezem, peilbuizen G tot en met J zijn geplaatst aan de noordzijde van de boezem. De totale lengte van de raai is ongeveer 40 m lang. Van zuid naar noord zijn de volgende peilbuizen geplaatst (zie ook Figuur 36):

- Peilbuis A in de insteek van de poldersloot
- Peilbuis B bovenaan de poldersloot
- Peilbuis C midden in de boezemkade
- Peilbuis D op het hoogste punt van de boezemkade
- Peilbuis E bovenaan de boezem,
- Peilbuis F vlak boven normaal boezempeil aan de zuidzijde
- Peilbuis G vlak boven normaal boezempeil aan de noordzijde
- Peilbuis H op het hoogste punt van de boezemkade
- Peilbuis I halverwege de bovenkant en teen van de boezemkade
- Peilbuis J in de teen van de boezemkade

De metingen laten zien dat de peilbuizen A tot en met E soortgelijke reactie hebben en dat de peilbuizen H tot en met J een soortgelijke reactie hebben. Peilbuizen F en G hebben hun eigen reactiepatroon.



Figuur 36. Locatie van de 10 verschillende peilbuizen

7.3.2 Beschrijving test

Voor de uitvoering van de test zijn 3 verschillende maatregelen genomen:

- Verlagen van het peil in de poldersloot
    - Start van polderpeil op -1,60 m + NAP
    - 7-2-2012 13:00 ongeveer 20 cm
    - 8-5-2012 11:30 ongeveer 50 cm
    - 9-5-2012 9:00 ongeveer 10 cm
    - 10-5-2012 8:00 ongeveer 10 cm
    - 11-5-2012 8:10 terug naar polderpeil van -1,60 m + NAP
- Verhogen van het peil in de boezem
    - 8-5-2012 20:20 opzet van het peil van -0,5 naar -0,25 m + NAP

- 9-5-2012 6:00 opzet van het peil van -0,25 naar +0,25 m + NAP
- 11-5-2012 9:00 verlaging van het peil naar -0,5 m + NAP

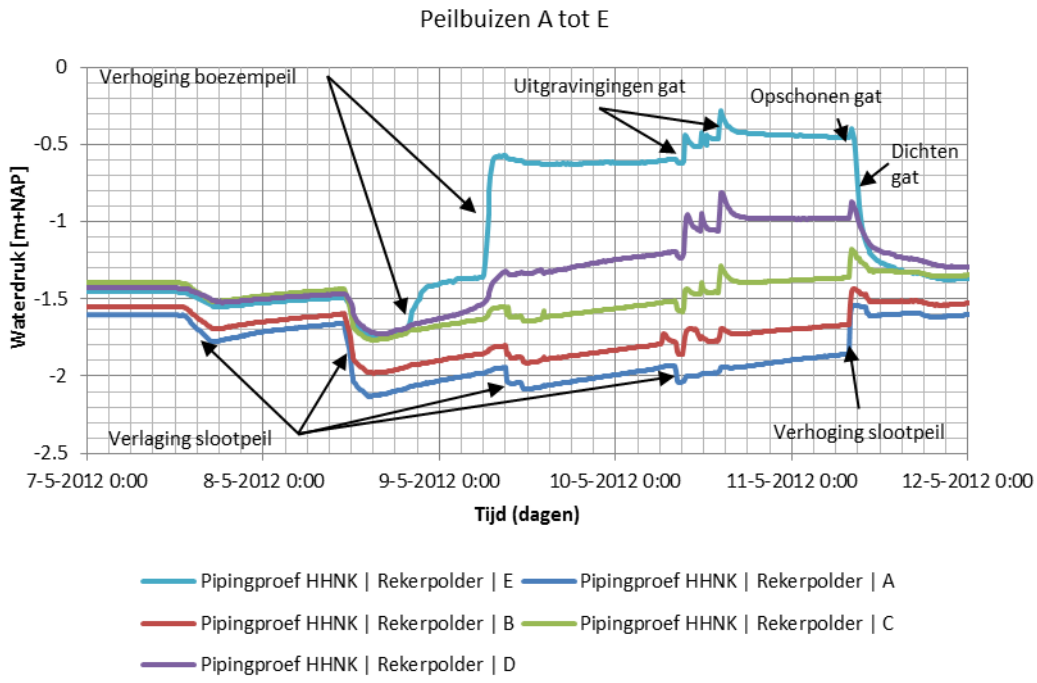
- Uitgraven van de bodem van de boezem
  - 10-5-2012 9:30 eerste gat gegraven
  - 10-5-2012 11:40 tweede gat gegraven
  - 10-5-2012 12:40 derde gat gegraven
  - 10-5-2012 14:20 opschonen van het gat
  - 10-5-2012 17:20 dichten van het gat

Ten aanzien van de verlagingen in de poldersloot moet gezegd worden dat er nogal wat onduidelijkheid bestaat over de exacte verlagingen. De rapportages bevatten een logboek (hoofdstuk 6 uit rapportage), een kleine grafiek (einde van hoofdstuk 6 uit rapportage) en een bijlage met het stijghoogte verloop. Deze 3 bronnen komen niet geheel met elkaar overeen. Deze 3 bronnen zijn daarom vergeleken met de reactie van de peilbuizen A en B. Op basis hiervan zijn deze waterstandsverlagingen bepaald.

De 3 bovengenoemde maatregelen (verhogen, verlagen en uitgraven) hebben elk hun eigen impact op de stijghoogte in de verschillende peilbuizen. In de volgende paragrafen worden de maatregelen vergeleken met de reactie van de stijghoogte in de peilbuizen.

7.3.3 Peilbuizen A tot en met E

Peilbuizen A tot en met E staan aan de zuidzijde van de boezem. Het verloop van de stijghoogten in deze peilbuizen is weergegeven in Figuur 37. Te zien is dat de peilbuizen allemaal redelijk gelijk reageren op de verschillende maatregelen: de verlagingen zijn duidelijk terug te zien, de 4 graafacties zijn duidelijk zichtbaar, alleen de peilopzet is minder goed zichtbaar in de peilbuizen A en B, maar deze staan ook veel dichter bij de sloot dan bij de boezem. De initiële stijghoogte in peilbuis C is hoger dan verwacht, namelijk hoger dan die van peilbuizen D en E, terwijl peilbuis C verder van de boezem afstaat dan peilbuizen D en E, heeft peilbuis C een hogere stijghoogte dan beide andere peilbuizen.



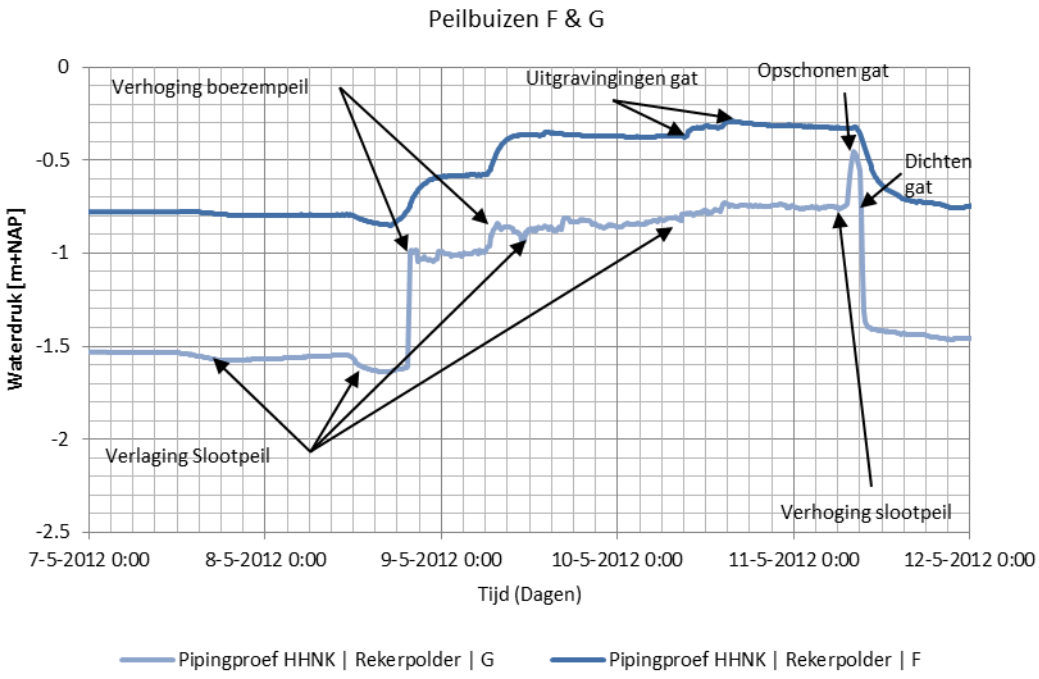
Figuur 37. Reactie van de peilbuizen A tot en met E op de verschillende maatregelen.

De reactie van peilbuis E op de 2e peilopzet is echter minder logisch: bij een peilopzet van 50 cm in de boezem reageert peilbuis E met een verhoging van de stijghoogte van 0,78 m verhoging. Een verdere bestudering van de plaatsing van de peilbuizen gaf aan dat bij deze verhoging de peilbuis in het water

kwam te staan. Waarschijnlijk was de bentoniet afdichting in het boorgat rondom de peilbuis niet voldoende uitgezet, waardoor er een tijdelijke kortsluiting mogelijk was. De reactie van de peilbuis bij de ontgraving toont aan dat deze kortsluiting van tijdelijke duur was: de ontgravingen geven bij alle 5 de peilbuizen wel een normale reactie. Vanwege deze tijdelijke kortsluiting wordt peilbuis E niet meegenomen in de kalibratie van het model.

7.3.4 Peilbuizen F en G

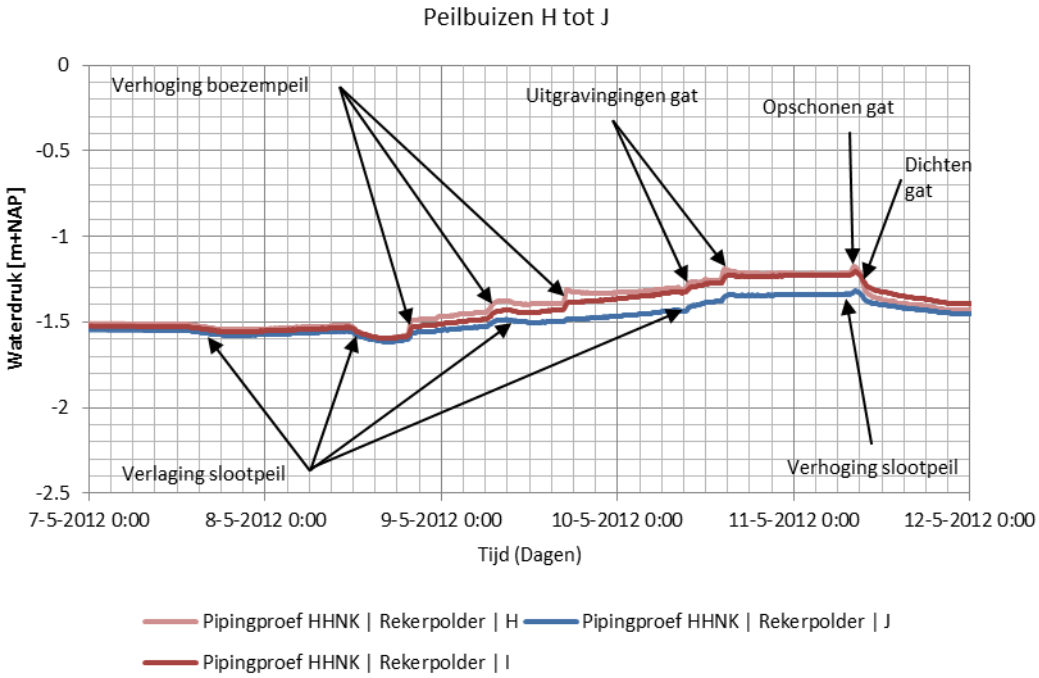
Peilbuizen F en G staan 10 a 20 cm boven het oorspronkelijke boezempeil. Bij de peilopzet van 75 cm komen deze dus onder water te staan. Het verloop van de stijghoogte in deze peilbuizen is weergegeven in Figuur 38.
Tijdelijke kortsluiting treed op bij de eerste peilopzet in peilbuis G (stijging van 0,62 m bij een peilopzet van 0,25 m). De totale peilopzet zet echter niet door, en ook de 2e peilopzet is niet zo sterk terug te zien, wat erop duidt dat de benoniet afdichting is uitgezet, waardoor de kortsluiting is gestopt. De 3e peilopzet is maar beperkt terug te zien, wat duidt op een goede werking van het aangebrachte benoniet. De reactie van peilbuis G op de graafwerkzaamheden is echter niet logisch te verklaren: de 3 uitgravingen zijn bijna niet terug te zien. De opschoonactie in het aangebrachte gat levert echter wel een sterke reactie op. Ook varieert de waterstand erg veel.
Peilbuis F staat in een veenlaag wat mogelijk tot een andere reactie heeft geleid dan de naastgelegen peilbuizen A tot en met E. Peilbuis F reageert vertraagd en zeer gedempt: de grote peilverlaging in de sloot is zeer beperkt zichtbaar, evenals de ontgravingen. De opschoning is in het geheel niet zichtbaar.
Beide peilbuizen worden vanwege hun reactie niet meegenomen in de kalibratie van het model.



Figuur 38. Reactie van de peilbuizen F en G op de verschillende maatregelen

7.3.5 Peilbuizen H tot en met J

Peilbuizen H tot en met J staan aan de noordzijde van de boezem, waar geen poldersloot aanwezig is. Het verloop van de stijghoogtes in deze peilbuizen is weergegeven in Figuur 39. De reactie op alle maatregelen is duidelijk zichtbaar (meer dan peilbuis F), maar heeft een beperkte amplitude (30 cm bij een totale peilopzet van 0,75 m). Ook de ontgravingen, hoewel deze dichtbij plaatsvonden, geven een zeer beperkte reactie. Dit duidt erop dat de grondsamenstelling aan de noordzijde significant verschilt van de zuidzijde.



Figuur 39. Reactie van de peilbuizen H tot en met J op de verschillende maatregelen

Uit het logboek blijkt dat aan deze zijde 4 kwelplekken zijn opgetreden. Het maaiveld aan deze zijde is tussen de -1,1 en -1 m + NAP. De maximale stijghoogte in de zandlaag blijkt niet hoger te worden van -1,2 m + NAP. De kwel die optreedt lijkt daardoor dus niet te komen door piping via de aquifer maar door grondwaterstroming via de boezemkade.

7.4 Geohydrologische modelsimulaties

7.4.1 Modelinstrumentarium

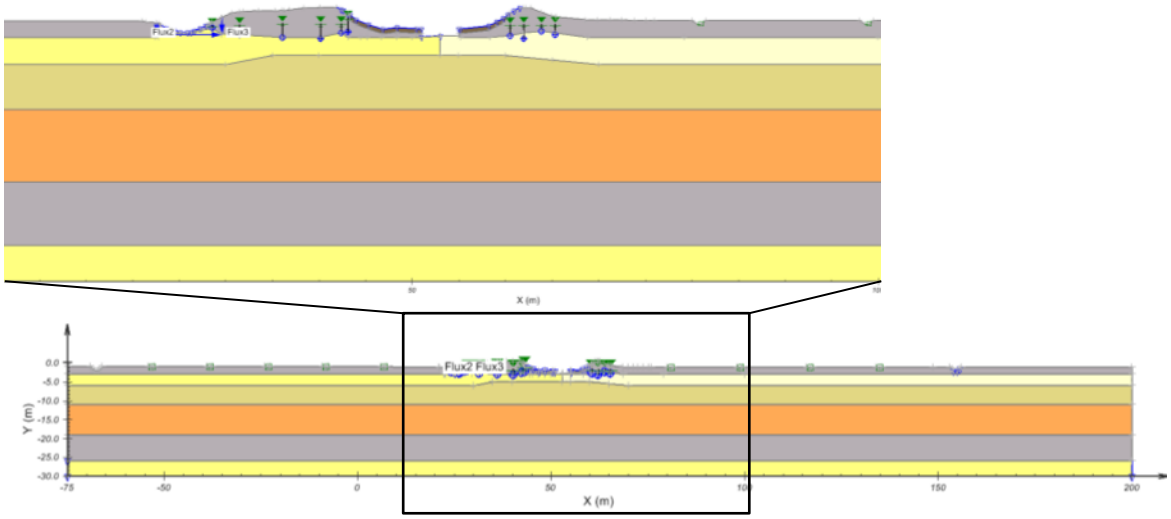
Om het grondwaterverloop gedurende de pipingtest inzichtelijk te maken is er een 2D grondwatermodel van het gebied gemaakt met het software pakket SVFlux op basis van FlexPDE. Dit programma is toegelicht in paragraaf 5.2. De modelschematisatie van het 2D model is vervolgens vertaald naar een 3D model, waarmee de ingreep voor een deel van het gebied in 3D is doorgerekend.

7.4.2 Model schematisatie 2D

Laagopbouw en bodemparameters

Ter voorbereiding op de uitvoering van de proef zijn verschillende veldmetingen uitgevoerd om inzicht te krijgen in de geohydrologie, bestaande uit boringen en sonderingen. Voor de modelsimulaties is daarnaast ook gebruik gemaakt van het Dinoloket. Op basis van deze gegevens is de volgende schematisatie gemaakt, zoals weergegeven in Figuur 40.

Uit de rapportage “pipingproef Rekerpolder en Heerhugowaardepolder” (HHNK, 2013) is een gedetailleerde maaiveldopbouw van de proeflocatie overgenomen. In de polder aan de zuidzijde is het maaiveld daarbij vastgelegd op -1 m + NAP, in de polder aan de noordzijde is het maaiveld vastgelegd op -1,1 m + NAP. De percelen aan beide zijden zijn begreppeld. Aan beide zijden van de boezem is conform de situatie ter plaatse een watergang op 90 m afstand gemodelleerd.



Figuur 40. Model schematisatie Rekerpolder

Op basis van de sonderingen en de REGIS II.1 gegevens is de laagopbouw als volgt geschematiseerd. De deklaag is 2 m dik. Daaronder bevindt zich een zand laag van 2 a 3 m dik. Onder deze laag bevindt zich een laag met zwak lemig zand. De afsluitende kleilaag is 7 m dik. Om de kweldruk te simuleren is hieronder nog een zandpakket opgenomen met een vaste stijghoogte.

Randvoorwaarden

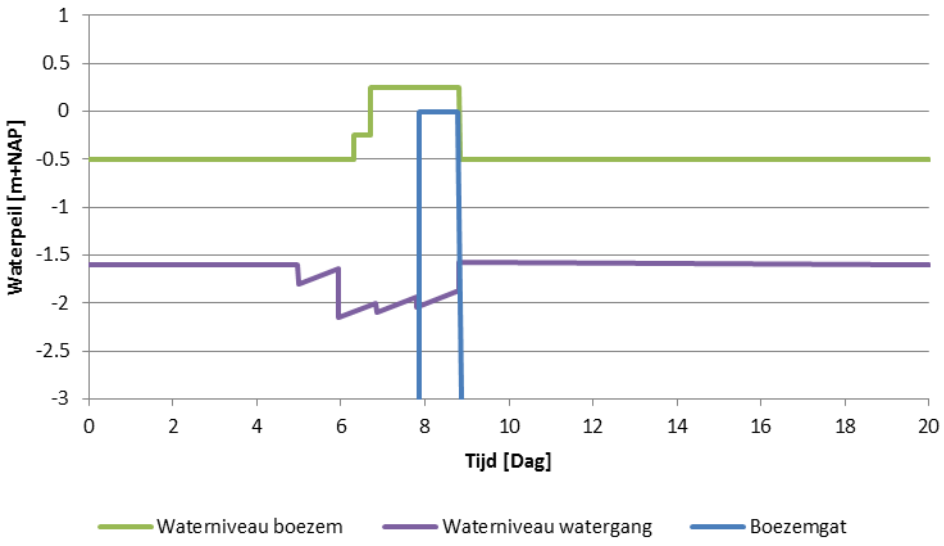
De randvoorwaarden binnen het model zijn als volgt:

- Het polderpeil in de beide sloten is -1,6 m + NAP
- Het peil in de boezem is -0,5 m + NAP
- De onderrandvoorwaarde(vaste stijghoogte) is gesteld op de gemiddelde stijghoogte van -1,25 m + NAP

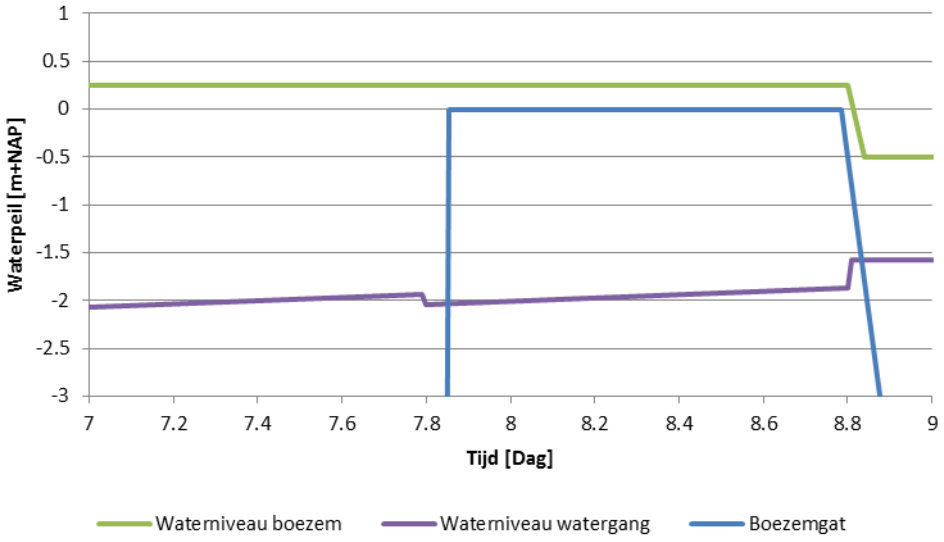
Schematisatie van ingreep bij de proef

In paragraaf 7.3.2 zijn de genoemde maatregelen beschreven zoals in de logboek in de rapportage is aangegeven. Hierbij zijn de verlagingen in de watergang aangegeven. Er is echter geen log van de waterstand ten opzichte van een referentiepeil in de watergang. De totale verlaging vanuit de 3 verschillende bronnen, die genoemd zijn in paragraaf 7.3.2 geeft een verlaging die groter is dan de totale diepte van de sloot. Tevens is te zien in het grondwaterverloop van peilbuis A dat er een kwel vanuit de boezem en de ondergrond optreedt, waardoor de stijghoogte en daarmee ook de waterstand in de watergang stijgt.

Aangezien de waterstandsgegevens niet bekend zijn is er een verdiscontering gemaakt van de stijghoogte in peilbuis A naar de waterstand in de watergang. De waterstandsverlaging is weergegeven in Figuur 41 en Figuur 42. Deze grafiek geeft ook de verhoging van de waterstand in de boezem weer. De variatie in directe verbinding met de onderliggende watervoerende laag als gevolg van heterogeniteit in de bodem en als gevolg van dichtslibbing is gemodelleerd door de maximale druk te leggen op 0,25 m beneden het niveau van de boezem, en door een dunne laag in het gat te plaatsen met een weerstand van 8 dagen.



Figuur 41. Schematisatie randvoorwaarden oppervlakte water

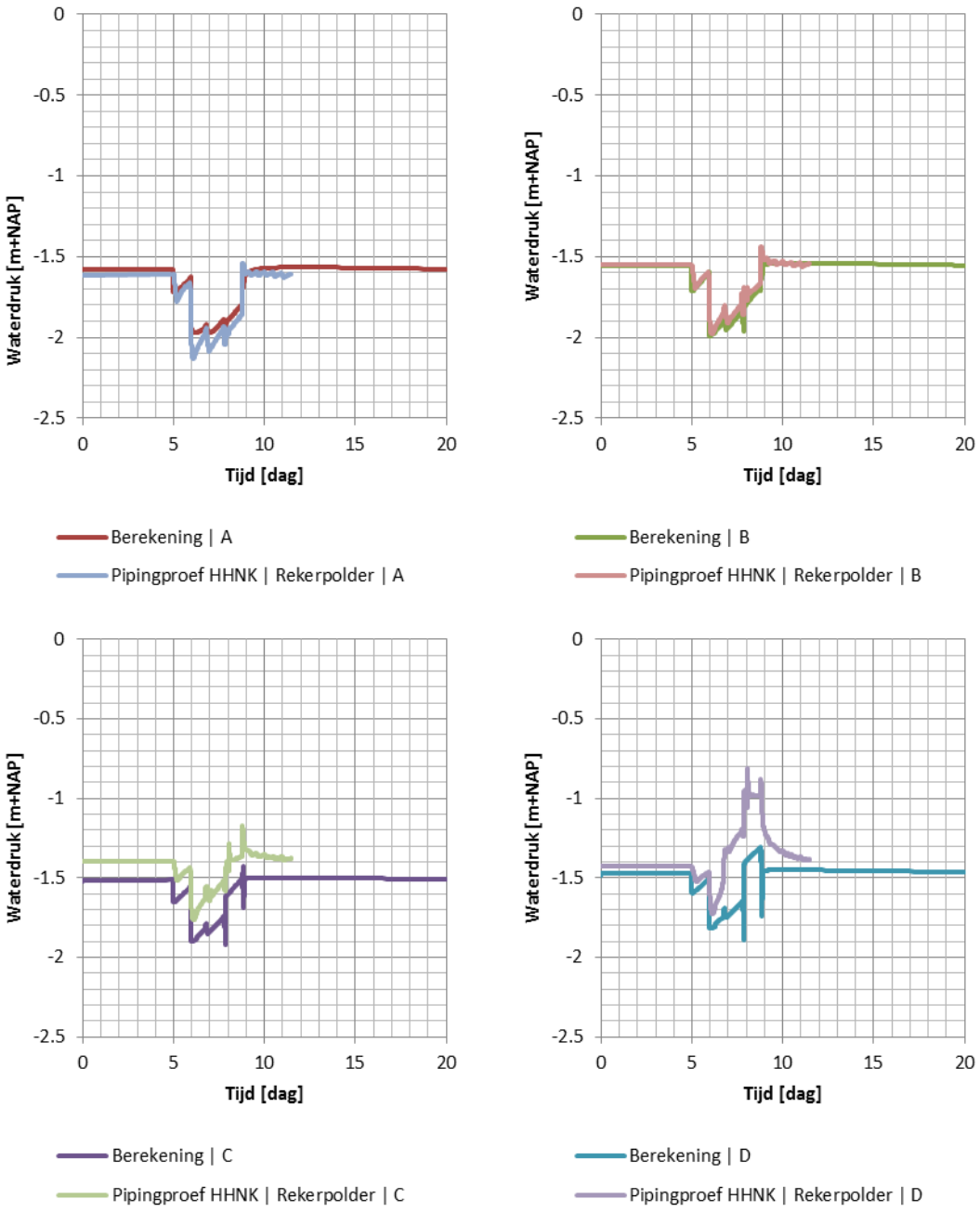


Figuur 42. Schematisatie randvoorwaarden oppervlakte water tussen tijdstap 7 en 9

7.4.3 Modelresultaten 2D

Zuidzijde

Zoals eerder aangegeven reageerde het grondwater aan de noord- en aan de zuidzijde van de proeflocatie verschillend. Deze worden daarom ook separaat besproken. De gemodelleerde en de berekende waterstanden zijn weergegeven in Figuur 43. Te zien is dat de reactie van het grondwater in de peilbuizen A en B zeer goed kan worden gesimuleerd. Ook de reactie van peilbuis C komt goed overeen met de metingen. De hier aanwezige hogere initiële stijghoogte als gevolg van lokale inhomogeniteiten is niet gesimuleerd en daardoor ook niet terug te zien in de resultaten. Alleen de sterke reactie van peilbuis D op de peilopzet is sterker dan uit de modelberekeningen naar voren komt. De stijging van het grondwaterpeil als gevolg van het graven van het gat komt wel goed overeen met de resultaten uit het model.

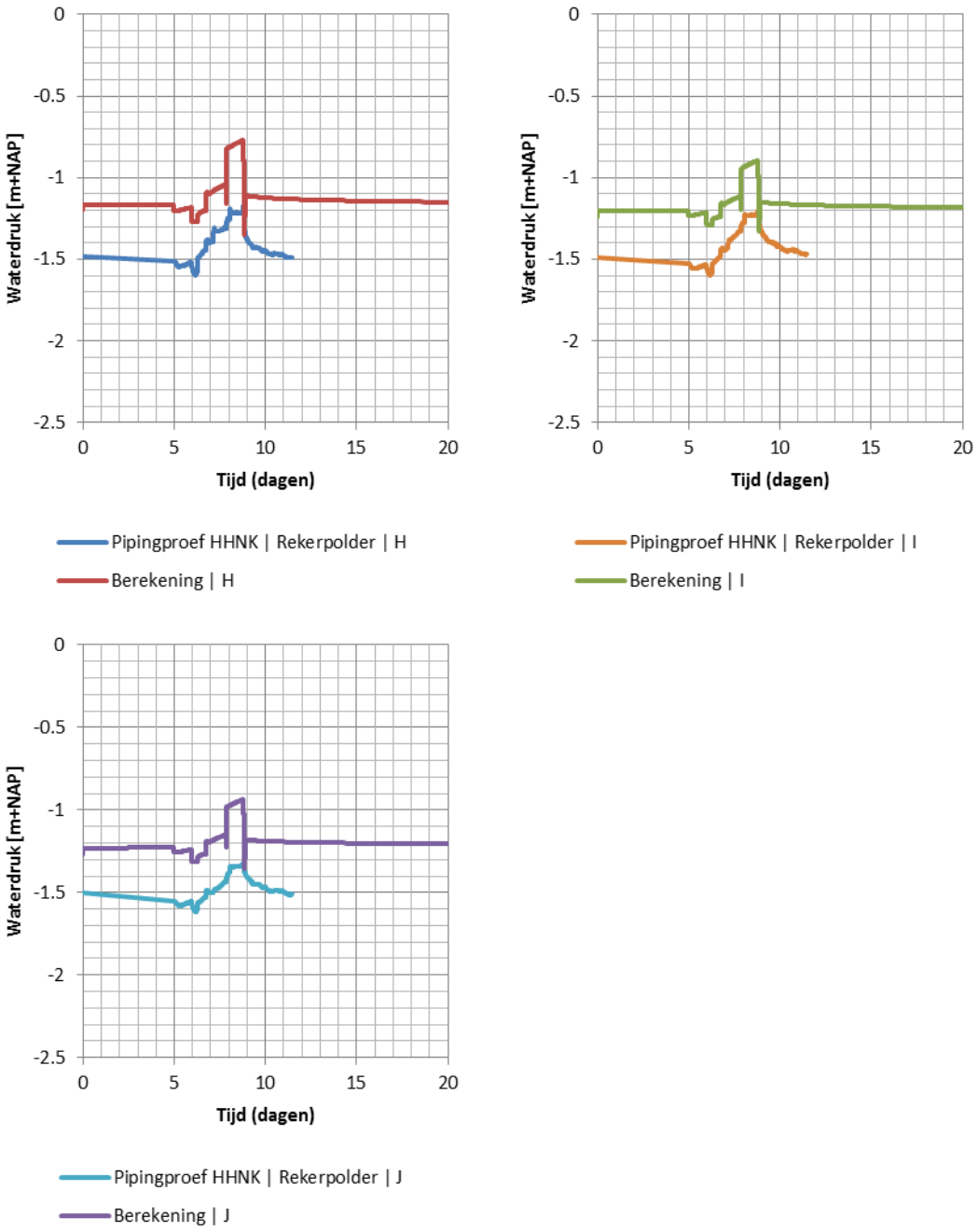


Figuur 43. Gemodelleerde en berekende waterstanden in de peilbuizen A, B, C en D

Noordzijde

De berekende waterstanden aan de noordzijde zijn weergegeven in Figuur 44. Te zien is dat de reactie van het grondwater op de peilopzet goed in de stijghoogteverandering terug te vinden is, terwijl dit aan de zuidzijde niet het geval was. Een vergelijkbare reactie was te zien in hoofdstuk 6, bij een kleine weerstand van de slootbodem (paragraaf 6.3 en zuidzijde) is er in de 2D berekening een gelijke stijghoogte.

Aan de noordzijde is er geen sloot, hierbij treedt in de 2D situatie een verschil op tussen de initiële stijghoogte in de 2D modellering en de 3D gemeten situatie. Daarnaast is de initiële stijghoogte te hoog. Dit komt mogelijk door de aanwezigheid van lokale zandbanen, die resulteren in een sterkere beïnvloeding van het grondwater door het polderpeil. Vanwege beperkte bodemonderzoek aan de noordzijde is hierover geen verdere uitspraak te doen.



Figuur 44. Gemodelleerde en berekende waterstanden in de peilbuizen H, I en J

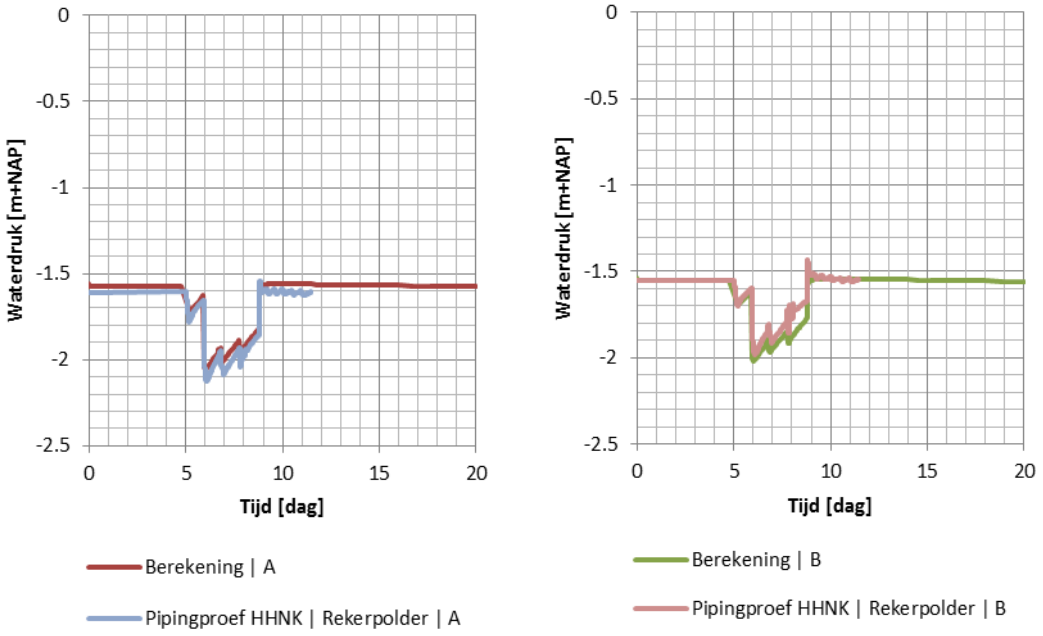
7.4.4 Modelresultaten 3D

Zoals in hoofdstuk 6 is aangegeven is de verwachting dat in een 2D benadering de effecten van een gat worden overschat ten opzichte van de werkelijke 3D situatie. Daarom is het 2D model ook omgewerkt naar een 3D model.

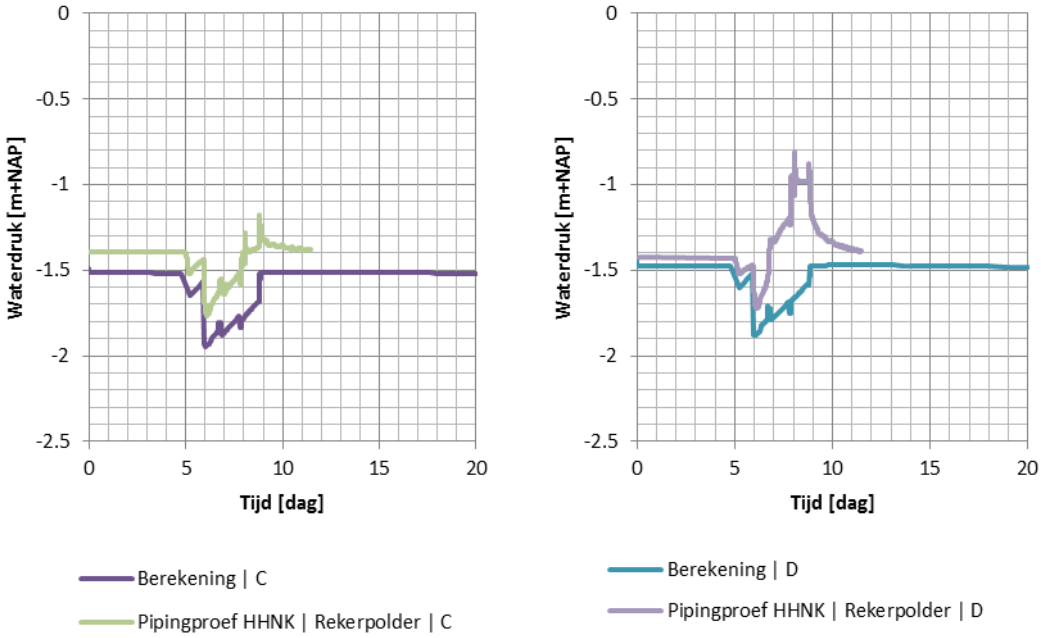
Bij het vertalen van de 2D schematisatie naar de 3D schematisatie is de situatie verder vereenvoudigd. Dit om het mogelijk te maken om het model in 3D door te rekenen. In het model is alleen het zuidelijke deel van het 2D model naar het 3D model omgezet en zijn daar 2 situaties berekend: een situatie waarbij de resterende laagje onderin het gat bestaand uit slib en een situatie waarbij het resterende laagje onderin het gat bestaat uit het zand van de watervoerende laag direct onder het gat. Dit resulteert in een resterende weerstand in het gat van respectievelijk 8 dagen en 0,02 dagen.

Weerstand gat in boezembodem van 8 dagen

Bij deze berekening is de bodemweerstand van 8 dagen aangehouden. Zoals te zien is Figuur 45 en Figuur 46, is bij de aanwezigheid van deze weerstand haast geen invloed van het gat te zien. De bodemweerstand in het gat is dus veel te hoog. Tegelijk is te zien dat de initiële stijghoogte behoorlijk goed is gemodelleerd.



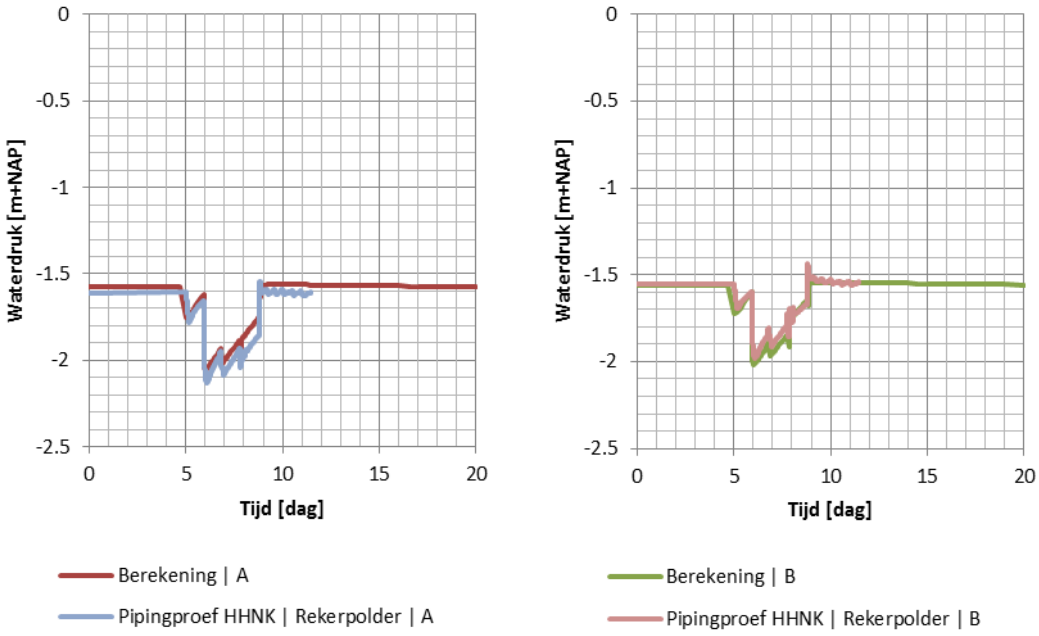
Figuur 45. Gemodelleerde en berekende waterstanden in de peilbuizen A en B bij een relatief hoge resterende weerstand in het gat



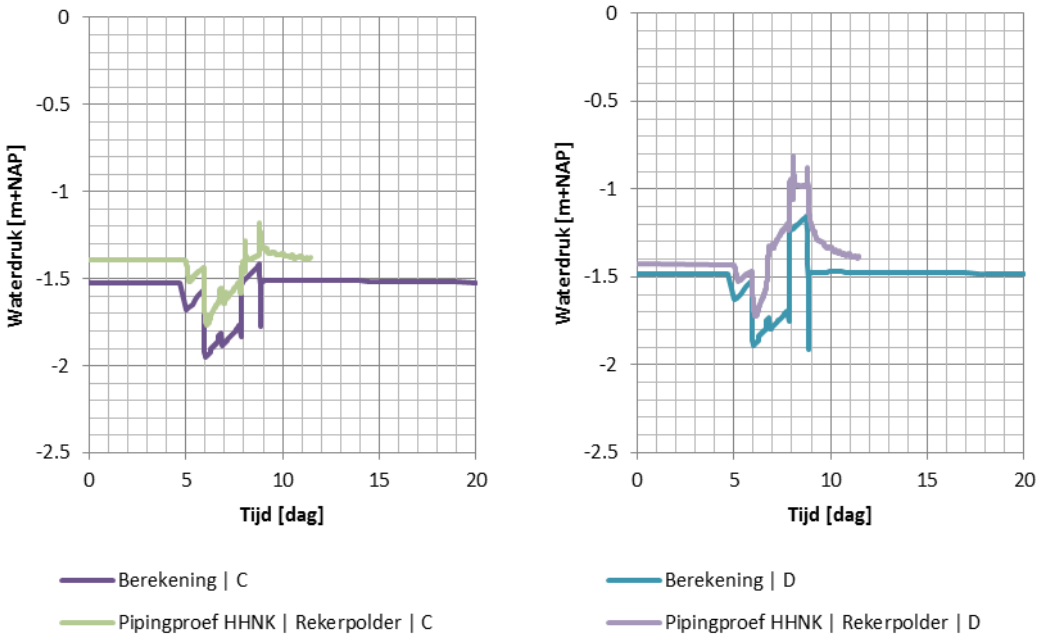
Figuur 46. Gemodelleerde en berekende waterstanden in de peilbuizen C en D bij een relatief hoge resterende weerstand in het gat

Weerstand gat in boezembodem van 0,02 dagen

In de tweede berekening is de doorlatendheid van het bodemmateriaal in het gat verhoogd naar de doorlatendheid van het materiaal van het watervoerende pakket, waardoor de weerstand afneemt tot 0,02 dagen. Als gevolg hiervan is de gemodelleerde reactie van het grondwater veel beter, zoals te zien is in de verschillende grafieken in Figuur 47 en Figuur 48. Het ontbreken van een weerstandsbiedende laag, wordt bevestigd door meerdere genomen bodem monsters van het ontgraven bodemmateriaal: 4 van de 12 monsters zijn geclassificeerd als zand.



Figuur 47. Gemodelleerde en berekende waterstanden in de peilbuizen A en B bij een lage resterende weerstand in het gat



Figuur 48. Gemodelleerde en berekende waterstanden in de peilbuizen C en D bij een lage resterende weerstand in het gat.

7.5 Conclusies

De case Rekerpolder was uitgevoerd om real time te bepalen hoe het grondwater reageert op een gat in de boezembodem. De resultaten zijn gebruikt als verificatie voor de verschillende onderwerpen besproken in dit rapport. Geconcludeerd mag worden dat de resultaten van de modelsimulaties geheel in lijn met de resultaten die eerder zijn gevonden in de literatuur (hoofdstuk 3), gevoeligheidsanalyses bodemweerstanden en kD-waarden (hoofdstuk 5) en modelsimulaties van een gat in de boezembodem (hoofdstuk 6).

Primair doel was echter om te onderzoeken of met een eenvoudige modelschematisatie kan worden volstaan voor het bepalen van de effecten van de bodemweerstand op het verloop van de stijghoogte in het watervoerend pakket. De hier uitgevoerde berekeningen laten zien dat met een eenvoudige modelschematisatie het goed mogelijk is de case Rekerpolder na te bootsen. Voor verdere uitwerking en toetsing kan een vereenvoudigde situatie dus een juiste benadering zijn.

Opgemerkt wordt tenslotte dat nadere analyse van de stijghoogte laat zien dat de opgetreden “piping” aan de noordzijde niet het gevolg lijkt te zijn van stroming via de watervoerende zandlaag, maar via de boezemkade zelf.

8 Analytische oplossing stijghoogtegradiënt en aanpassing toepassing Sellmeijer

8.1 Inleiding

Bij de controle op het mechanisme piping gaat het erom vast te stellen of bij het gegeven verwachte maximaal optredende verval over de waterkering de veiligheid tegen erosie van de zandlaag (of zandlagen) in de ondergrond voldoende gewaarborgd is. De weerstand tegen erosie is, naast de eigenschappen van de zandlaag voornamelijk afhankelijk van de kwelweglengte. Dit is de afstand tussen het intreepunt van de kwelstroming door de zandlaag en het uittreepunt. Het uittreepunt ligt vaak op natuurlijke wijze vast, bijvoorbeeld wanneer de bermsloot achter een dijk tot in de betreffende zandlaag reikt, of wanneer de zandlaag tot aan het maaiveld reikt. Het intreepunt is soms moeilijker vast te stellen.
Door Sellmeijer (Sellmeijer 1989) is in het kader van TAW (TAW 1999) onderzoek een mathematisch rekenmodel voor pipingcontrole ontwikkeld (zie hoofdstuk 2).

8.2 Spreidingslengte

Mazure (1936) vond in het onderzoek in de Wieringermeer dat er een reductie van de kwel optreedt bij toename van de afstand tot de toenmalige Zuiderzeedijk. "*Er bleek een reductiefactor op te treden, welke een functie was van de verhouding van den straal R van den dijk en een lengte λ, welke wordt bepaald door de eigenschappen van den ondergrond en de bovenlaag en gelijk is aan √kDc.*" De spreidingslengte λ is dus een maat voor de invloedsafstand van peilverschillen en kan gebruikt worden om de invloed van een peilverschil op de grondwaterstroming te bepalen. De spreidingslengte kan ook gebruikt worden als maat voor de herkomst van onttrokken of aangevoerd water (Mazure, 1936; Kruseman en De Ridder, 1970; TNO, 1964). De spreidingslengte (λ) is gedefinieerd als de wortel uit het quotiënt van het doorlaatvermogen van een watervoerende laag en de som van de lekvermogens van begrenzende slecht doorlatende lagen (CHO, 1986):

$$\lambda = \sqrt{kDc}$$

Vergelijking 5

Bij veel hydrologische vraagstukken is men echter naast kwelveranderingen ook geïnteresseerd in veranderingen in de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket en de freatische grondwaterstand als gevolg van peilverschillen al dan niet veroorzaakt door hydrologische ingrepen.

Edelman (1947) heeft formules afgeleid om de toestroming naar kanalen te berekenen in de Amsterdamse Waterleidingduinen. Aan deze analytische oplossingen zijn later oplossingen toegevoegd voor een groot aantal andere situaties (Edelman, 1972).

8.3 Parallelle stroming naar een kanaal

Voor de invloed van een kanaal geldt de formule van Mazure (Mazure 1936). De invloed van een kanaal op de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket en de intensiteit van de grondwaterstroming kunnen respectievelijk met behulp van de volgende formules berekend worden (Edelman, 1972):

$$\varphi_x = \varphi_p - (\varphi_p - \varphi_k) e^{-x/\lambda}$$

Vergelijking 6

$$q_x = q_0 e^{-x/\lambda}$$

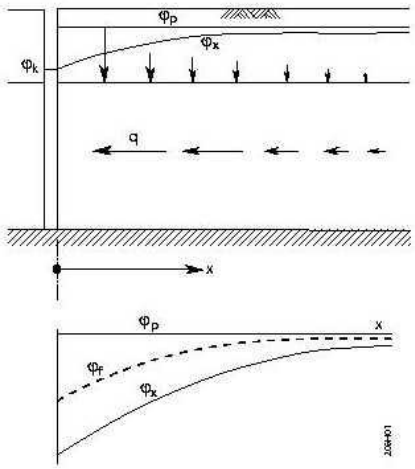
Vergelijking 7

met:

$$q_0 = \beta (\varphi_p - \varphi_k)$$

$$\lambda = \sqrt{kDc}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{kD}{c}}$$



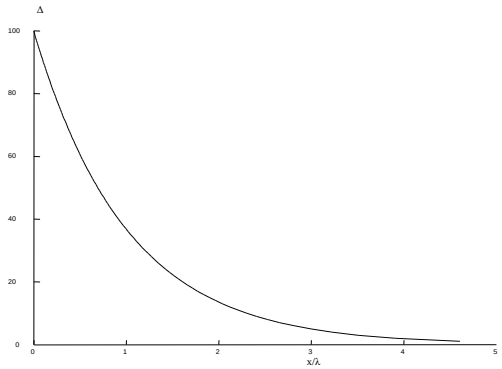
Figuur 49. Situatieschets voor de stroming naar een kanaal.

Op de rand van het kanaal is het peilverschil tussen het polderpeil en de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket ($\varphi_p - \varphi_o$) en het debiet (q_o) maximaal. Aan de hand van Vergelijking 6 en Vergelijking 7 kan geconcludeerd worden dat de ratio tussen het debiet op een afstand x vanaf het kanaal en het debiet bij het kanaal gelijk is aan de ratio tussen het stijghoogteverschil op een afstand x tot een kanaal en het stijghoogteverschil tussen polderpeil en het kanaal, ter hoogte van het kanaal. Herschrijven van Vergelijking 6 en Vergelijking 7 leidt namelijk tot de volgende formule:

$$\Delta = \frac{q_x}{q_0} = \frac{(\varphi_p - \varphi_x)}{(\varphi_p - \varphi_k)} = e^{-x/\lambda}$$

Vergelijking 8

De afname van zowel het debiet als het stijghoogteverschil is logaritmische met de afstand tot het kanaal volgens $e^{-x/\lambda}$ (TNO, 1964; Edelman, 1972; Verruijt, 1974). In figuur 2 is deze afname van het debiet bij toename van de afstand (x) weergegeven. Aan de hand van figuur 2 kan geconcludeerd worden dat het effect van peilverschillen in de theorie oneindig ver door gaat. Praktisch gezien blijkt echter dat op een afstand groter dan driemaal de spreidingslengte (3λ) nog maar een beïnvloeding van 5% plaatsvindt.



Figuur 50. Grafische weergave van Vergelijking 8

Op elke afstand vanaf het kanaal is ook de ratio tussen $(\varphi_p - \varphi_x)$ en q_x gelijk. Het polderpeil (φ_p) is immers een constante. Hierdoor moet de verhouding tussen de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket (φ_x) en het debiet (q_x) op elke afstand gelijk zijn. Aan de hand van Vergelijking 7 kan geconcludeerd worden dat deze ratio gelijk is aan β (Edelman, 1972). Om de invloed van een kanaalpeil op de stijghoogte in het watervoerend pakket te kunnen bepalen kan Vergelijking 5als volgt herschreven worden:

$$x = -\lambda \ln\left(\frac{(\varphi_p - \varphi_x)}{(\varphi_p - \varphi_k)}\right)$$

Vergelijking 9

Met Vergelijking 9 kan de afstand tot een kanaal berekend worden voor elke stijghoogteverschil in het eerste watervoerend pakket ten opzichte van het kanaalpeil.

Bij de voorgaande formules wordt er van uitgegaan dat er sprake is van een tweelagen systeem bestaande uit een afdekkend pakket gelegen op een watervoerend pakket en het kanaal of de boezem volledig insnijdt tot de hydrologische basis en derhalve direct in contact staat met de zandondergrond. In de praktijk blijkt echter dat veel boezems als gevolg van een sliblaag en/of een afdekkend pakket niet in direct contact staan met de zandondergrond. Voor deze situatie kan gebruik worden gemaakt van formules die gelden voor gebieden met een lijnvormige scheiding tussen verschillende polderpeilen, waarvoor hetzelfde principe opgaat. Het enige verschil tussen de berekening bij een kanaal en de berekeningen voor gebieden met een verschillend peil bestaat uit de halvering van het peilverschil. Hierbij wordt er echter wel van uitgegaan dat aan beide zijden van de rechte grens de geohydrologische situatie identiek is. Hierdoor wordt aangenomen dat zowel de weerstand van het afdekkende pakket als het doorlaatvermogen van het watervoerende pakket in het gehele gebied gelijk is. Een kanaal of boezem doorsnijdt vaak een gedeelte van het afdekkende pakket of er kan een sliblaag op de boezembodem aanwezig zijn waardoor de weerstand van het afdekkende pakket niet gelijk hoeft te zijn ter plaatse van het voorland en het achterland.

8.4 Stroming in de zandondergrond onder een dijk

In de leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken (1985) zijn voor een aantal situaties analytische oplossingen voor stationaire stroming in de zandondergrond onder een dijk opgenomen. In een situatie

met een slecht doorlatend afdekkend pakket in het voor en achterland, onder de aanname dat de stroming in het zandpakket overwegend horizontaal is kan gebruik worden gemaakt van een stigmatisatie waarbij het voorland, de dijk en het achterland apart in beschouwing worden genomen (Figuur 51). Voor de stromingsweerstand gelden in deze situatie de volgende formules:

De stijghoogte van het grondwater in het watervoerend pakket ter plaatse van de buitenteen van de dijk is:

$$W_1 = \frac{\lambda_1}{kD}\tanh\frac{L_1}{\lambda_1} \qquad W_2 = L_2 / kD \qquad W_3 = \frac{\lambda_3}{kD}\tanh\frac{L_3}{\lambda_3}$$

Vergelijking 10

De stijghoogte van het grondwater in het watervoerend pakket ter plaatse van de binnenteen van de dijk is:

$$\varphi_2 = \varphi_3 + ((\varphi_0 - \varphi_3) \frac{W_3}{\sum W}$$

Vergelijking 11

Het stijghoogteverloop onder de afdekkende laag kan worden berekend met:

Boezem (voorland) $$\varphi_x = \varphi_0 - (\varphi_0 - \varphi_1) \frac{\sinh\frac{a + L_1 + x}{\lambda_1}}{\sinh\frac{L_1}{\lambda_1}}$$

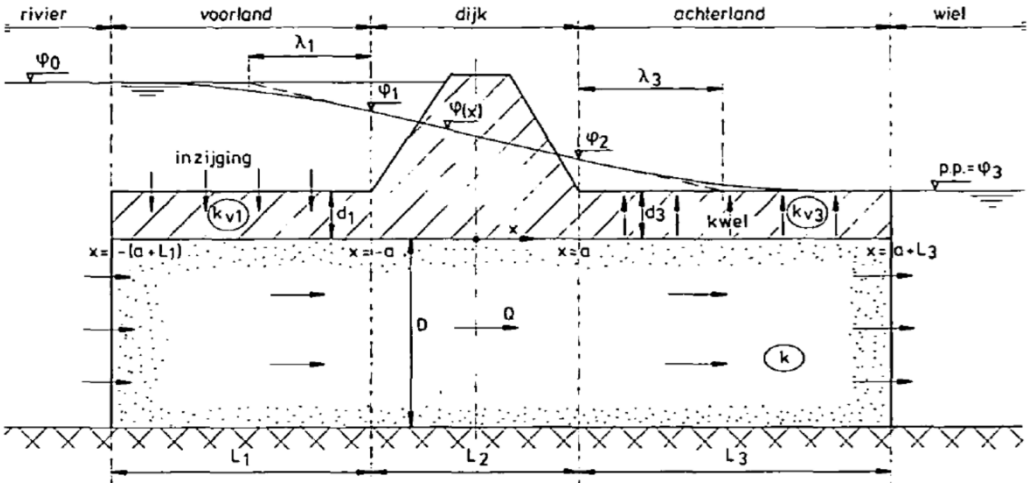
Vergelijking 12

Kade (dijk) $$\varphi_x = \frac{(\varphi_1 + \varphi_2)}{2} - \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{2}\frac{x}{a}$$

Vergelijking 13

Polder (achterland) $$\varphi_x = \varphi_3 - (\varphi_2 - \varphi_3) \frac{\sinh\frac{a + L_3 - x}{\lambda_3}}{\sinh\frac{L_3}{\lambda_3}}$$

Vergelijking 14



Figuur 51. Situatieschets voor stationaire stroming onder een dijk

Indien er sprake is van een uitgestrekt voorland of achterland kan de formule worden vereenvoudigd doordat bij grote waarden van L/λ (> 1.8) tanh L/λ nadert naar 1. In deze situatie vindt er geen instroming vanuit de boezem direct in het zandpakket plaats maar gaat de instroming verticaal via de deklaag dan wel boezembodem met een weerstand en gelden bij benadering de volgende formules:

$$W_1 \approx \frac{\lambda_1}{kD} \qquad W_2 = L_2 / kD \qquad W_3 \approx \frac{\lambda_3}{kD}$$

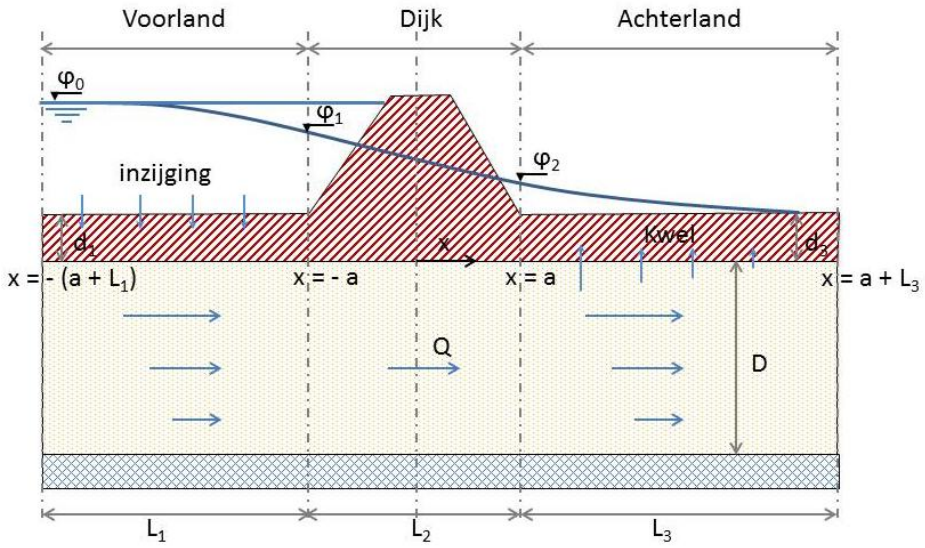
Vergelijking 15

$$\varphi_1 = \varphi_3 + ((\varphi_0 - \varphi_3) \frac{L_2 + \lambda_3}{\lambda_1 + L_2 + \lambda_3}$$

Vergelijking 16

$$\varphi_2 = \varphi_3 + ((\varphi_0 - \varphi_3) \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + L_2 + \lambda_3}$$

Vergelijking 17



Figuur 52. Situatieschets bij stationaire stroming onder een dijk waarbij inzijging plaatsvindt via een boezembodem en kwel via een deklaag.

Het stijghoogteverloop in het watervoerende pakket kan in deze situatie berekend worden met:

Boezem (voorland) $$\varphi_x = \varphi_0 - (\varphi_0 - \varphi_1) e^{(a+x)/\lambda_1}$$

Vergelijking 18

Polder (achterland) $$\varphi_x = \varphi_3 + (\varphi_2 - \varphi_3) e^{(a+x)/\lambda_3}$$

Vergelijking 19

8.4.1 Correctiefactor voor het debiet

Bij het gebruik hydrologische modellen en analytische oplossingen wordt vaak gebruik gemaakt van randvoorwaarden die de geldigheid van modellen of analytische oplossingen beperken. In de voorgaande situatie wordt uitgegaan van een uitgestrekt voorland waarin water vanuit de boezem kan infiltreren. Het debiet (Q) kan worden berekend met de volgende formule:

$$Q = kD \frac{\varphi_0 - \varphi_3}{\lambda_1 + L_2 + \lambda_3}$$

Vergelijking 20

Dit debiet is gelijk aan het totale debiet dat inzijgt in het voorland en weer omhoog kwelt in het achterland. In deze situatie is er geen directe intree van water vanuit het kanaal of boezem in het watervoerende zandpakket en geen directe uittreding van water vanuit het zandpakket naar binnendijks gelegen open water (figuur 4). Dit is een veelvoorkomende situatie bij boezemkades.

In de praktijk hebben boezems een beperkte breedte. Dit heeft vaak tot gevolg dat de hoeveelheid water die inzijgt via de boezembodem beperkt is ten opzichte van de aanname in Vergelijking 17 t/m Vergelijking 20. Voor deze eventuele beperking van de hoeveelheid van de inzijging dient te worden gecorrigeerd. Uit Vergelijking 7 blijkt dat het debiet in het watervoerende pakket kan worden berekend op een afstand x tot de grens tussen een peilverschil. Door gebruikmakend van deze formule het debiet in het watervoerend pakket in het midden van de boezem te berekenen kan een correctiefactor voor het debiet worden bepaald.

Deze correctiefactor wordt gebruikt omdat er in werkelijkheid bij een geringe boezembreedte minder water door het pakket zal stromen hetgeen van invloed is op het berekende verloop van de stijghoogte in het watervoerende pakket. De correctiefactor (Q_{factor}) is gebaseerd op de verhouding tussen het debiet ter plaatse van het midden van de dijk (Q_0) en het debiet ter plaatse van het midden van de boezem ($Q_{-(a+L1)}$) en kan als volgt worden gedefinieerd:

$$Q_{factor} = \frac{Q_0 - Q_{-(a+L_1)}}{Q_0}$$

Vergelijking 21

Indien de boezembreedte relatief groot is en deze geen beperkende factor is voor de inzijging van water komt de Q_{factor} uit op 1. Ook bij het gebruik van grondwaterstromingsmodellen is de boezembreedte van belang voor de hoeveelheid water die vanuit van uit de boezem via de boezembodem infiltreert en dient met deze randvoorwaarde rekening te worden gehouden.

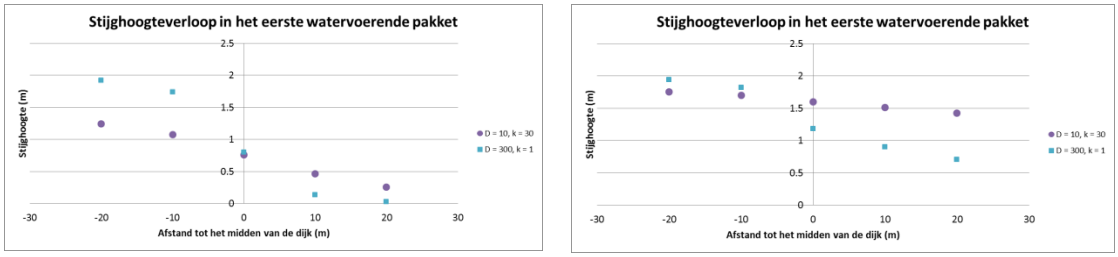
8.4.2 Doorlaatvermogen

Uit de formules komt naar voren dat de verhanglijn van de stijghoogte in het watervoerende pakket naast het debiet bepaald wordt door in serie geschakelde weerstanden tegen grondwaterstroming. Deze weerstanden worden bepaald door het doorlaatvermogen (kD-waarde), de weerstand van het afdekkende pakket (c-waarde) en afstanden (L). In de formules voor de berekening van het verloop van de stijghoogte in het watervoerende pakket wordt derhalve gebruik gemaakt van het doorlaatvermogen. Het doorlaatvermogen is een resultante van de vermenigvuldiging van de doorlatendheid (k) en de laagdikte (D).

Verschillende combinaties van een doorlatendheid en een laagdikte kunnen resulteren in hetzelfde doorlaatvermogen. Verschillen in doorlatendheid kunnen echter van invloed zijn op de weerstand en het hiermee samenhangende berekende stijghoogteverloop. Hierdoor hoeven rekenresultaten uitgaande van hetzelfde doorlaatvermogen maar met verschillende doorlatendheden niet eenduidig te zijn. Deze verschillen in modelresultaten kunnen voornamelijk worden verwacht indien de gehanteerde doorlatendheid en laagdikte voor het berekende stromingsprobleem niet in overeenstemming zijn met het stromingsprobleem, waardoor sprake is van een extra weerstand. Ook in deze situatie kan het rekenresultaat beïnvloed worden door een randvoorwaarde.

Bij de berekeningen die gebruikt zijn bij de vergelijking van de analytische oplossing met modelberekeningen is bijvoorbeeld gebruik gemaakt van een dikte van de zandondergrond van 10 meter en de doorlatendheid is gevarieerd van 1 m/dag naar 30 m/dag, hetgeen resulteert in een doorlaatvermogen van respectievelijk 10 m²/dag en 300 m²/dag. In plaats van het variëren van de doorlatendheid zou ook de dikte van de zandondergrond kunnen worden aangepast. Indien wordt uitgegaan van dezelfde doorlaatvermogens dan dient de laagdikte, uitgaande van een gelijkblijvende doorlatendheid van 1 m/dag, te worden gevarieerd van 10 meter naar 300 meter. Dergelijke verschillen resulteren bij de modelberekeningen in verschillen in het berekende stijghoogteverloop.

Ter illustratie zijn de resultaten van de modelberekeningen die zijn uitgevoerd met het grondwaterstromingsmodel weergegeven. Uit de rekenresultaten blijkt dat indien gebruik wordt gemaakt van een lagere doorlatendheid in combinatie met een grotere dikte het verhang in de zandondergrond toeneemt, hetgeen veroorzaakt wordt door een grotere weerstand tegen grondwaterstroming. Deze hogere weerstand tegen stroming is het gevolg van een beperking van het doorlaatvermogen doordat bij grote pakketdiepten de stroming niet altijd over de volledige pakketdiepte plaatsvindt. Hierdoor is het effectieve doorlaatvermogen kleiner. Het is wenselijk hier meer onderzoek naar te doen. Bij de vergelijking van modelberekeningen met analytische oplossingen is het van belang hiermee rekening te houden.



Figuur 53. Rekenresultaten van enkele vergelijkingen waarbij voor hetzelfde doorlaatvermogen de doorlatendheid en pakketdikte is gevarieerd.

8.5 Vergelijking met modelberekeningen

Met behulp van een grondwatermodel zijn berekeningen uitgevoerd om de berekening van het stijghoogteverloop in de zandondergrond met analytische formules te vergelijken met modelberekeningen. Er is gebruik gemaakt van grondwatermodelleringssoftware SVFlux op basis van FlexPDE. FlexPDE is de 'volgende generatie' modelsoftware waarmee op zeer gedetailleerde schaal geïntegreerd verzadigde en onverzadigde dichtheidsafhankelijke stroming desgewenst met stoftransport gesimuleerd kan worden.

Voor de vergelijking zijn 16 SVFlux modellen opgezet (tabel 11). Bij de modelopzet is gebruik gemaakt van een aantal extreme situaties om de geldigheid van de analytische oplossingen te kunnen toetsen. Hiervoor zijn de volgende variaties in parameterwaarden toegepast:

- Lengte van het voorland: 10 meter en 100 meter;
- Doorlatendheid van de deklaag en/of boezembodem in het voorland: 0,02 en 2 m/dag, resulterend bij een dikte van de deklaag van 2 meter in een deklaagweerstand en/of weerstand van de boezembodem in het voorland van 1 en 100 dagen;
- Doorlatendheid van de deklaag in het achterland: 0,02 en 2 m/dag, resulterend bij een dikte van de deklaag van 2 meter in een deklaagweerstand in het achterland van 1 en 100 dagen;
- Doorlatendheid van het watervoerende pakket: 1 en 30 m/dag, resulterend bij een pakketdikte van 10 meter in een doorlaatvermogen van 10 en 300 m²/dag.

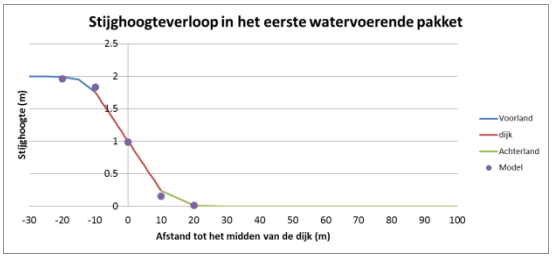
Tabel 11. Kalibratie berekeningen

Variabele	Waarde 1	Waarde 2
Lengte voorland	10	100
C voorland	1	100
C achterland	1	100
KD watervoerende laag	10	300

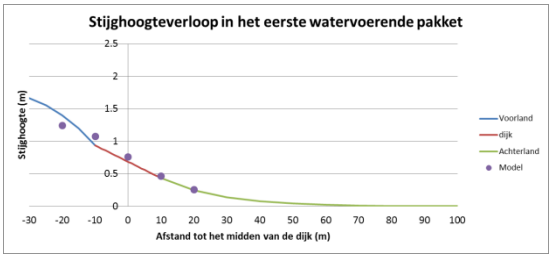
Zowel in de boezem als in de polders is gekozen voor een vaste waterstand in de watergangen. Het gehanteerde peilverschil tussen de boezem en de polder is 2 meter. Verder zijn alle randen (de beide zijkanten en de onderkant) van het model dicht ('no flow boundary').

Uit de vergelijking tussen de analytische berekening van het stijghoogteverloop in de zandondergrond onder een dijk en de modelberekeningen met een grondwaterstromingsmodel blijkt dat de verschillen in het merendeel van de doorgerekende situaties gering zijn. Voor enkele situaties met een hoog doorlaatvermogen (300 m²/dag) is enig verschil waarneembaar. Bij deze berekeningen is gebruik gemaakt van een pakketdikte van 10 meter en een doorlatendheid van het zandpakket van 30 m/dag. Deze hoge doorlatendheid zal in de praktijk in de zandondergrond onder een dijk niet vaak voorkomen.

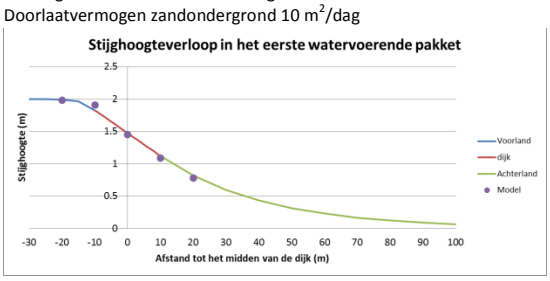
Tabel 12. Vergelijking stijghoogteverloop in de zandondergrond onder een dijk



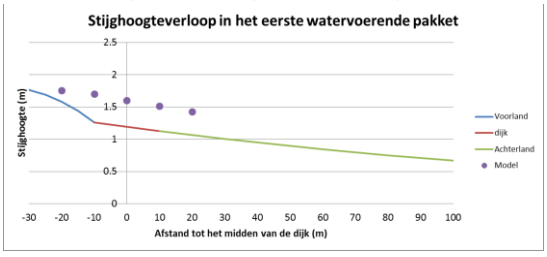
Lengte voorland 10 meter
Deklaagweerstand voorland 1 dag
Deklaagweerstand achterland 1 dag
Doorlaatvermogen zandondergrond 10 m^2/dag



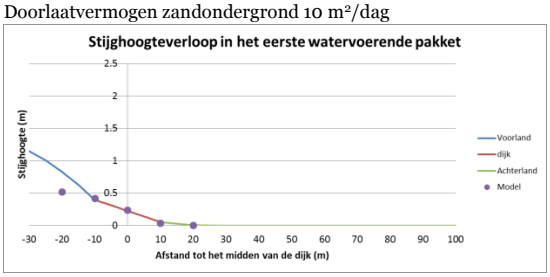
Lengte voorland 10 meter
Deklaagweerstand voorland 1 dag
Deklaagweerstand achterland 1 dag
Doorlaatvermogen zandondergrond 300 m^2/dag



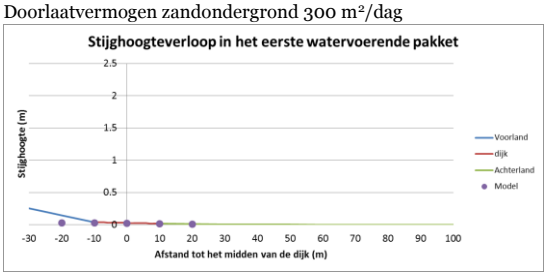
Lengte voorland 10 meter
Deklaagweerstand voorland 1 dag
Deklaagweerstand achterland 100 dagen
Doorlaatvermogen zandondergrond 10 m^2/dag



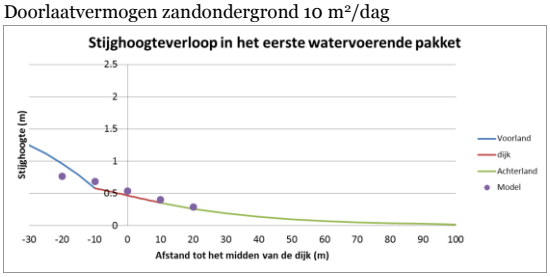
Lengte voorland 10 meter
Deklaagweerstand voorland 1 dag
Deklaagweerstand achterland 100 dagen
Doorlaatvermogen zandondergrond 300 m^2/dag



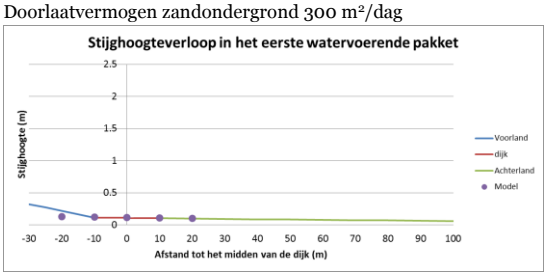
Lengte voorland 10 meter
Deklaagweerstand voorland 100 dagen
Deklaagweerstand achterland 1 dag
Doorlaatvermogen zandondergrond 10 m^2/dag



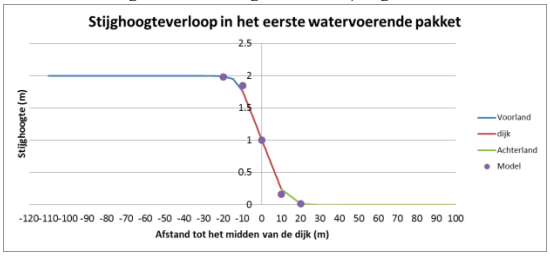
Lengte voorland 10 meter
Deklaagweerstand voorland 100 dagen
Deklaagweerstand achterland 1 dag
Doorlaatvermogen zandondergrond 300 m^2/dag



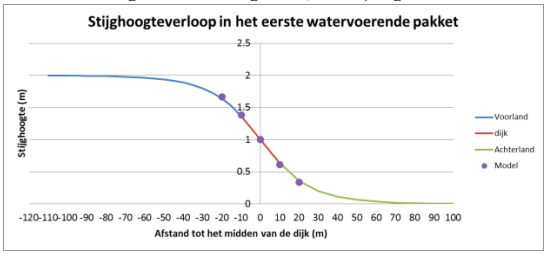
Lengte voorland 10 meter
Deklaagweerstand voorland 100 dagen
Deklaagweerstand achterland 100 dagen
Doorlaatvermogen zandondergrond 10 m^2/dag



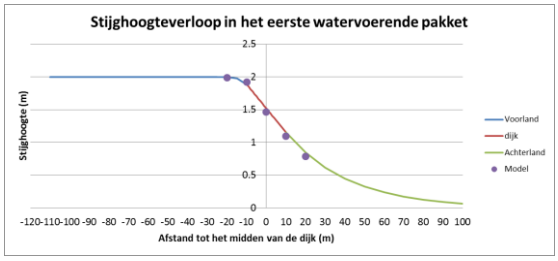
Lengte voorland 10 meter
Deklaagweerstand voorland 100 dagen
Deklaagweerstand achterland 100 dagen
Doorlaatvermogen zandondergrond 300 m^2/dag



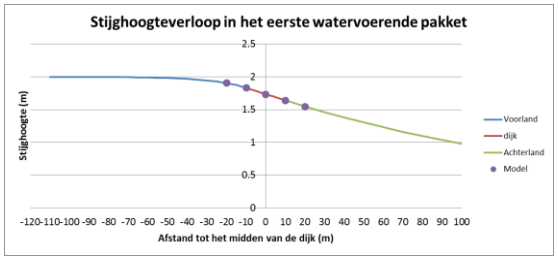
Lengte voorland 100 meter
Deklaagweerstand voorland 1 dag
Deklaagweerstand achterland 1 dag
Doorlaatvermogen zandondergrond 10 m^2/dag



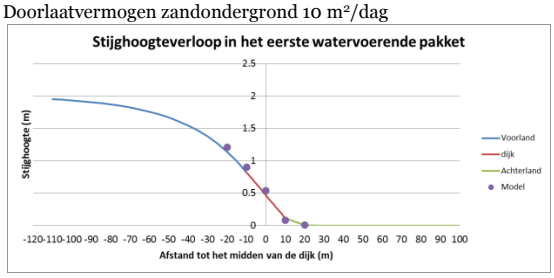
Lengte voorland 100 meter
Deklaagweerstand voorland 1 dag
Deklaagweerstand achterland 1 dag
Doorlaatvermogen zandondergrond 300 m^2/dag



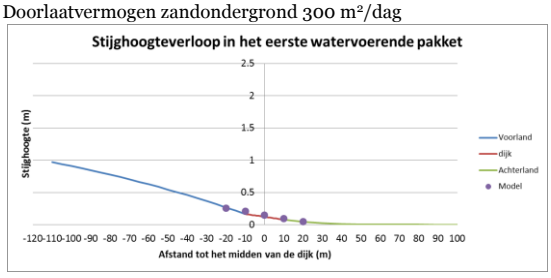
Lengte voorland 100 meter
Deklaagweerstand voorland 1 dag
Deklaagweerstand achterland 100 dagen
Doorlaatvermogen zandondergrond 10 m²/dag



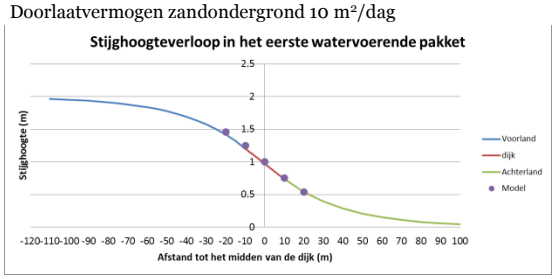
Lengte voorland 100 meter
Deklaagweerstand voorland 1 dag
Deklaagweerstand achterland 100 dagen
Doorlaatvermogen zandondergrond 300 m²/dag



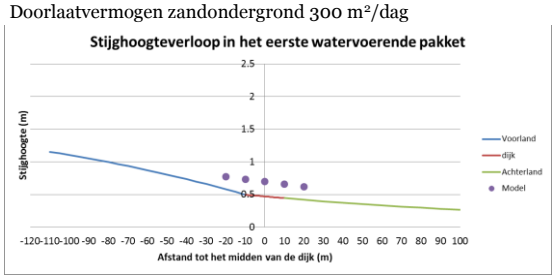
Lengte voorland 100 meter
Deklaagweerstand voorland 100 dagen
Deklaagweerstand achterland 1 dag
Doorlaatvermogen zandondergrond 10 m²/dag



Lengte voorland 100 meter
Deklaagweerstand voorland 100 dagen
Deklaagweerstand achterland 1 dag
Doorlaatvermogen zandondergrond 300 m²/dag



Lengte voorland 100 meter
Deklaagweerstand voorland 100 dagen
Deklaagweerstand achterland 100 dagen
Doorlaatvermogen zandondergrond 10 m²/dag



Lengte voorland 100 meter
Deklaagweerstand voorland 100 dagen
Deklaagweerstand achterland 100 dagen
Doorlaatvermogen zandondergrond 300 m²/dag

8.6 Alternatief voor het criterium voor piping controle

Uit de theoretische achtergrond en de bijbehorende analytische oplossingen komt naar voren dat het verloop van de grondwaterstand onder een dijk wordt bepaald door het aanbod van water vanuit de boezem en een aaneenschakeling van weerstanden. Het aanbod van water vanuit de boezem wordt bepaald door de boezembreedte en het stijghoogteverschil tussen boezempeil en de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket. De serie van weerstanden bestaat uit de weerstand van de boezembodem (het voorland), de weerstand tegen horizontale stroming in het watervoerende pakket en de weerstand van het afdekkende pakket in de polder (het achterland). Afhankelijk van de situatie kunnen hierbij weerstanden als gevolg van radiale stroming een rol spelen. Deze radiale weerstandscomponenten zijn naar verwachting over het algemeen gering. Ook de horizontale weerstand in het watervoerende pakket is over het algemeen gering maar kan bij een gering doorlaatvermogen en grotere afstanden een rol gaan spelen.

Om een eventuele correctiefactor voor piping te bepalen is het van belang deze af te stemmen op het mechanisme dat een rol speelt bij het ontstaan van piping. Kwelweglengte is één van de bepalende parameters bij het mechanisme piping en geeft de lengte van de weg die het kwelwater af moet leggen tussen het in- en uittredepunt. Het in- en uittredepunt wordt vaak gemakshalve genomen in de binnen- en buitenteen van een dijk. Dit is een conservatieve benadering omdat bijvoorbeeld als gevolg van een afdekkende kleilaag het intredepunt verder van de dijk kan liggen, en een sloot aan de achterlandzijde in een polder de afstand tussen het uittredepunt en de dijk eveneens kan vergroten. Indien wordt aangesloten bij de kwelweglengte voor het bepalen van de correctiefactor voor het stijghoogteverloop in het

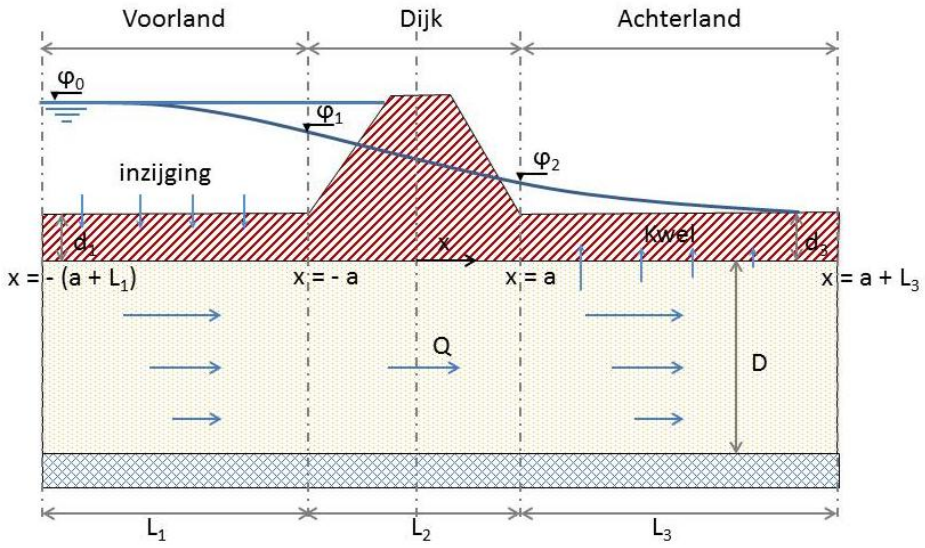
watervoerende pakket is het verschil tussen het boezempeil en de stijghoogte ter plaatse van het uittredepunt bepalend.

Momenteel wordt bij de berekening van de kans op piping nadat het kritische verval is berekend gebruik gemaakt van de volgende formule:

$$(\Delta H - 0.3d) \leq \frac{1}{\gamma}\Delta Hc$$

Vergelijking 22

In dit piping criterium is een reducerende werking van de deklaag verwerkt door te corrigeren voor de dikte van de deklaag gebruikmakend met een factor 0,3. Tevens wordt gebruik gemaakt van een veiligheidsfactor (γ) van 1,2. Uit dit onderzoek is naar voren gekomen dat de weerstand van de boezembodem en de weerstand van de deklaag in het achterland in hoge mate bepalend zijn voor het verloop van de stijghoogte in de zandondergrond. Het zou daarom beter zijn om in plaats van het corrigeren voor de dikte van de deklaag een correctie door te voeren op basis van het stijghoogteverval. Temeer een dikte van een deklaag niet direct een maat is voor de weerstand van de deklaag en deze weerstand een bepalende factor is.



Figuur 54. Situatieschets bij stationaire stroming onder een dijk waarbij inzijging plaatsvindt via een boezembodem en kwel via een deklaag.

In de huidige berekeningen voor piping controle middels de formule van Sellmeijer wordt geen boezembodemweerstand meegenomen. De modelsimulaties hebben laten zien dat dit leidt tot een overschatting van het risico op piping in deze situaties. De beoogde situaties waarvoor de modelberekeningen worden uitgevoerd zijn consistent van opbouw. Met de analytische formule kunnen de berekende modelresultaten worden nagerekend. Aanbevolen wordt om het verhang wat wordt gebruikt bij de piping controle te corrigeren gebruikmakend van de analytische oplossing. In de huidige situatie maakt wordt bij de piping controle gebruikt van boezempeil (φ_0) en polderpeil (φ_3).

$$(\Delta H - 0{,}3d) = \left((\varphi_0 - \varphi_3) - 0{,}3d\right) \leq \frac{1}{\gamma}\Delta H_c$$

Vergelijking 23

Op basis van de analytische formule wordt geadviseerd om de volgende aanpassing te doen van deze piping controle (zie ook figuur):

Gebruikmaken van de stijghoogtes bij de voet van de boezemkade en het polderpeil:

$$(\varphi_1 - \varphi_3) \leq \frac{1}{\gamma}\Delta H_c$$

Vergelijking 24

Met

$$\varphi_1 = \varphi_3 + ((\varphi_0 - \varphi_3) \frac{L_2 + \lambda_3}{\lambda_1 + L_2 + \lambda_3}$$

φ_3 = polderpeil

Hierbij is tevens het gebruik van een correctie voor de dikte van de deklaag achterwegen gelaten. Als vervolgstap hierop kan gebruik wordt gemaakt van het verhang in de watervoerende laag op basis van de stijghoogte bij de voet en de teen van de kade:

$$(\varphi_1 - \varphi_2) \leq \frac{1}{\gamma}\Delta H_c$$

Vergelijking 25

Met

$$\varphi_1 = \varphi_3 + ((\varphi_0 - \varphi_3) \frac{L_2 + \lambda_3}{\lambda_1 + L_2 + \lambda_3}$$

$$\varphi_2 = \varphi_3 + ((\varphi_0 - \varphi_3) \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + L_2 + \lambda_3}$$

9 Vergelijking van de gemeten stijghoogten bij verschillende boezemlocaties met de analytische formule

9.1 Inleiding

Om het risico op piping in de Friese wateren te onderzoeken zijn er op verschillende locaties binnen het beheergebied van Wetterskip Fryslan peilbuizen geplaatst om het verloop van de waterdruklijn tussen boezem en polder te bepalen. Hierbij zijn op een 23 tal locaties peilbuizen geplaatst (Tabel 13).

Tabel 13. Locaties van de peilbuizen die beschikbaar zijn voor analyse

No.	Locatie	No.	Locatie
Locatie 1.1:	Surwald	Locatie 1.13:	Ypecolsga
Locatie 1.2:	Surwald	Locatie 1.14:	Olde Ouwer
Locatie 1.3:	Surwald	Locatie 1.15:	Tjeukemeer
Locatie 1.4:	Nes	Locatie 2.1:	Ouddeel
Locatie 1.5:	Nijbeets	Locatie 2.2:	it Swin
Locatie 1.6:	Nijbeets	Locatie 2.3:	Hege Warren
Locatie 1.7:	Allingawier	Locatie 2.4:	Bolswarder Zeilvaart
Locatie 1.8:	Allingawier	Locatie 2.5:	De Wijmerts
Locatie 1.9:	Ferwoude	Locatie 2.6:	Nieuw Wijmerts
Locatie 1.10:	Ferwoude	Locatie 2.7:	de Tjonger
Locatie 1.11:	Terherne	Locatie 2.8:	ZO Fluessen
Locatie 1.12:	Broek		

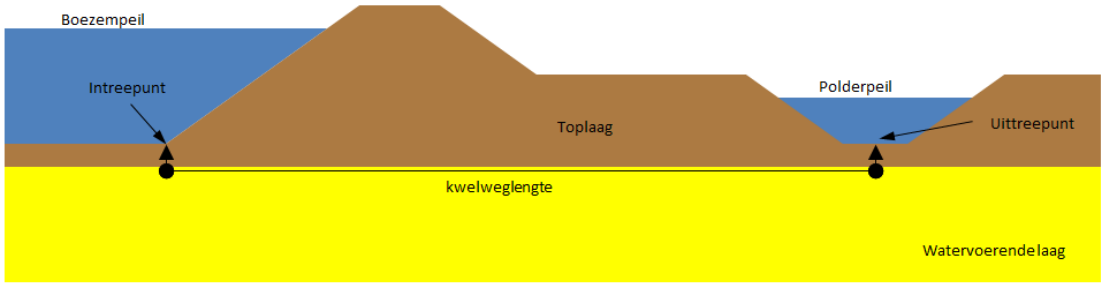
9.2 Analyse peilbuizen

9.2.1 Benodigde gegevens

Bij het proces van piping ontstaat er een kortsluiting tussen een waterlichaam met een hoog peil en een polder of poldersloot met een lager peil. Deze situatie doet zich vooral voor rondom boezems met een relatief hoog peil in combinatie met achtergelegen watergangen die in een afdekkend pakket insnijden. Als het proces lang genoeg speelt kan dit proces leiden tot instabiliteit van de boezemkade. Het optreden van piping is afhankelijk van:

1. de aanwezigheid van een intredepunt;
2. de aanwezigheid van een uittredepunt;
3. de verhouding tussen de aanwezige en benodigde kwelweglengte.

Omdat hoge stroomsnelheid nodig is voor het optreden van piping, kan dit alleen plaatsvinden in relatief grof materiaal, voornamelijk zand.



Figuur 55. Schematische weergave van het pipingproces met de 3benodigde processen: intreepunt, uittreepunt en kwelweglengte.

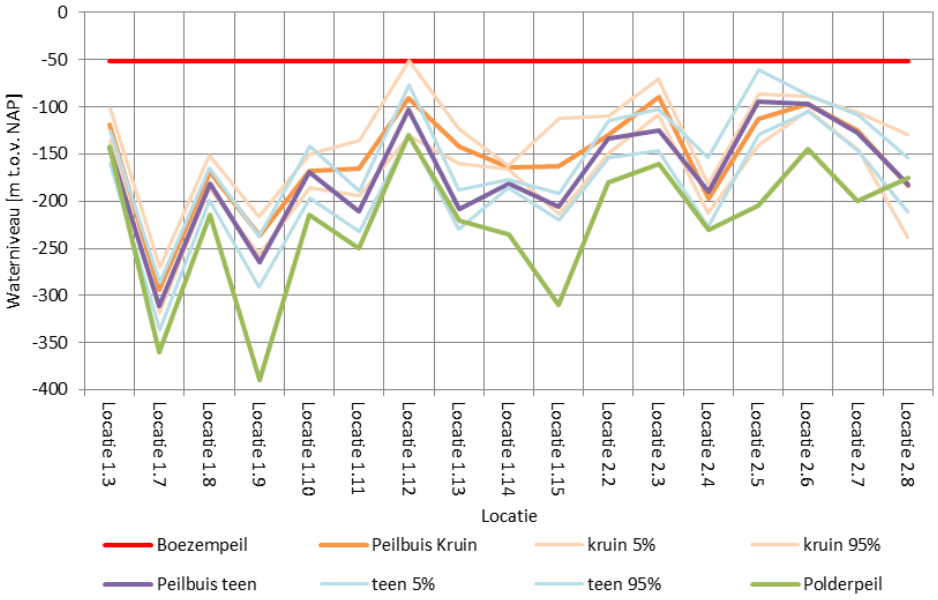
9.2.2 Geplaatste peilbuizen

Als eerste zijn de gegevens van de peilbuizen bekeken. Hierbij is voor alle peilbuizen de diepteligging van de filters bepaald. Deze diepteligging is vervolgens vergeleken met de diepteligging van de watervoerende laag. Dit is van belang omdat piping altijd plaatsvind in de lagen met de hogere doorlatendheden (de zandlaag), en hier dus ook de stijghoogte moet worden bepaald. In een klei of veenlaag zal als gevolg van de lage doorlatendheid van deze materialen en de hiermee samenhangende weerstand tegen grondwaterstroming een andere stijghoogte worden gemeten. Daarom zijn de peilbuizen die niet in de watervoerende laag staan, maar in een klei- of veenlaag, niet bruikbaar voor piping analyses. Indien het filter van peilbuizen in klei of veen staan zijn deze daarom buiten beschouwing gelaten.

Op de volgende locaties is gebleken dat peilbuizen niet bruikbaar zijn omdat het filter niet in de zandlaag staat:

- Bij locatie 1.1 Surwald staan geen peilbuisfilters in een zandlaag
- Bij locatie 1.2 Surwald staan geen peilbuisfilters in een zandlaag
- Bij locatie 1.4 Nes staat peilbuis 4HB15A niet in de zandlaag, omdat er maar 1 peilbuis over is, valt deze locatie
- Bij locatie 1.5 Nijbeets staat peilbuis 5HB10A niet in de zandlaag, de overige 2 zijn wel bruikbaar, maar omdat de peilbuis in de kruin voor de gelijkwaardigheid van de analyse van belang is valt deze locatie af
- Bij locatie 1.6 Nijbeets staan de peilbuisfilters 6HB12A en 6HB12C niet in de zandlaag, omdat er nog maar 1 peilbuis over is, valt deze locatie als geheel af
- Bij locatie 1.8 Allingawier staat peilbuis 8HB2B niet in een zandlaag
- Bij locatie 2.1 Ouddeel staat geen peilbuisfilters in een zandlaag
- Bij de locatie 2.2 tot en met 2.8 staan alle middelste peilbuizen niet in de zandlaag. De andere 2 staan wel goed op deze 7 locaties.

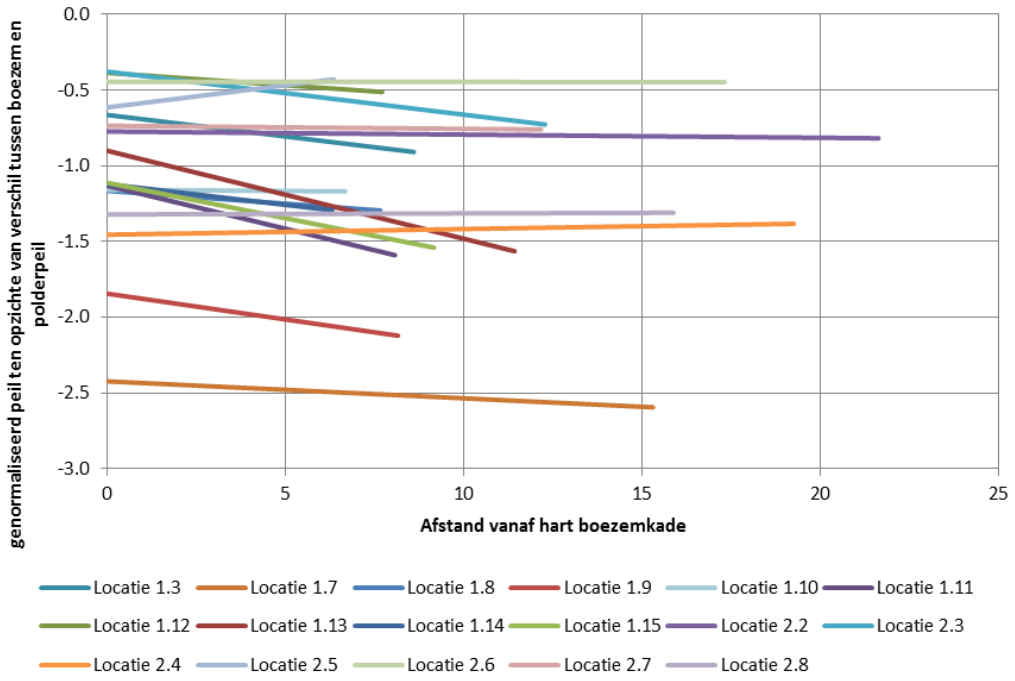
Doordat deze peilbuizen afvallen blijven er nog 17 locaties over waar die in de analyse kunnen worden gebruikt.



Figuur 56. Verschillende boezempeilen, gemiddelde grondwaterpeilen in de peilbuizen met de 5% en 95% waarde en polderpeilen op 17 locaties

9.3 Bepaling van het verhang

Stijghoogteverschillen binnen hetzelfde watervoerende pakket zijn bepalend voor het verhang. Dit verhang is de drijvende kracht achter grondwaterstroming en daarmee dus één van de belangrijkste aspecten in het risico op piping: hoe groter het verhang, hoe groter de aanjagende kracht die het ontstaan van een pipe mogelijk maakt. Daarom is voor alle locaties allereerst grafisch het verhang van het gemiddeld grondwaterniveau uitgezet, waarbij het polderpeil (-0,52) is genormaliseerd naar de waarde nul.



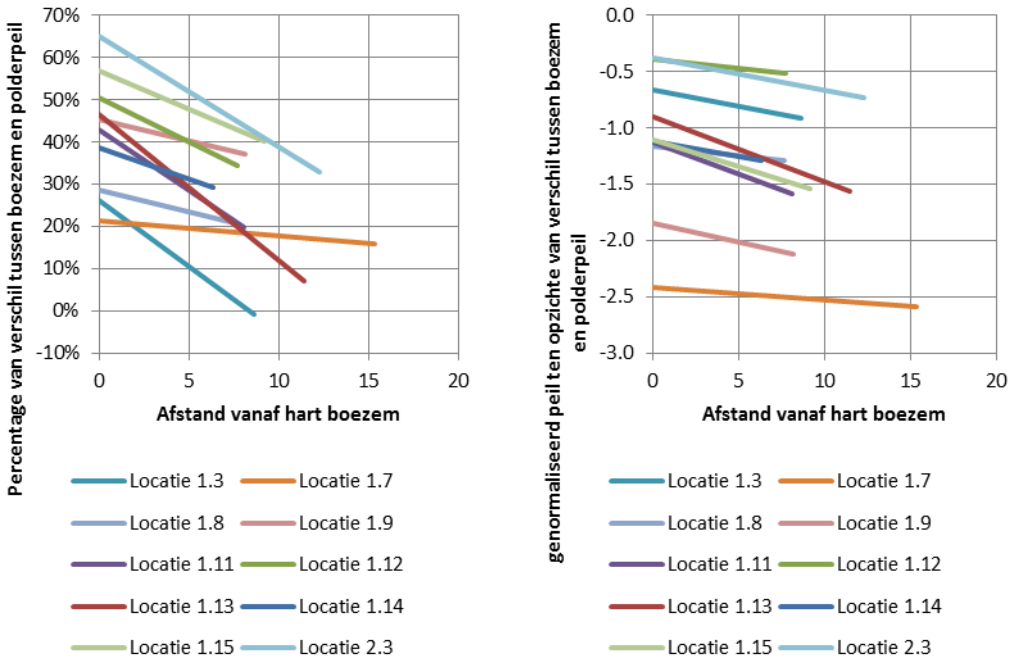
Figuur 57. Genormaliseerde verhanglijnen bij de verschillende peilbuizen ten opzichte van het hart van de boezemkade op 17 meetlocaties

In Figuur 57 is te zien dat op een aantal locaties geen of zelfs een positief verhang is. Bij deze locaties is het gemiddelde verhang waarschijnlijk niet representatief om een uitspraak te doen over piping. Dit kan bijvoorbeeld worden veroorzaakt indien er gelaagdheid in de ondergrond aanwezig is waardoor het filter van de meetlocaties niet in dezelfde zandlaag staan. Daarnaast kan ook het middelen van de meetgegevens in de tijd tot gevolg hebben dat de meetgegevens niet geschikt zijn om mee te nemen in de verdere analyse , het gaat hierbij om de volgende locaties:

- Locatie 1.10 – Ferwoude
- Locatie 2.2 – it Swin
- Locatie 2.4 – Hege Warren
- Locatie 2.5 – Bolsw Zeilvaart
- Locatie 2.6 – De Wijmerts
- Locatie 2.7 – ZO Fluessen
- Locatie 2.8 – de Tjonger
-

Deze 7 locatie zullen daarom verder buiten beschouwing worden gelaten

Aangezien de polderpeilen op de verschillende locaties behoorlijk verschillen, is bij de resterende 10 locaties het verhang tevens uitgerekend als percentage opzichte van het verschil tussen polderpeil en boezempeil (Figuur 58).



Figuur 58. Genormaliseerde verhanglijnen bij de verschillende peilbuizen op 10 meetlocaties

9.4 Bepaling boezemweerstand met behulp van formules

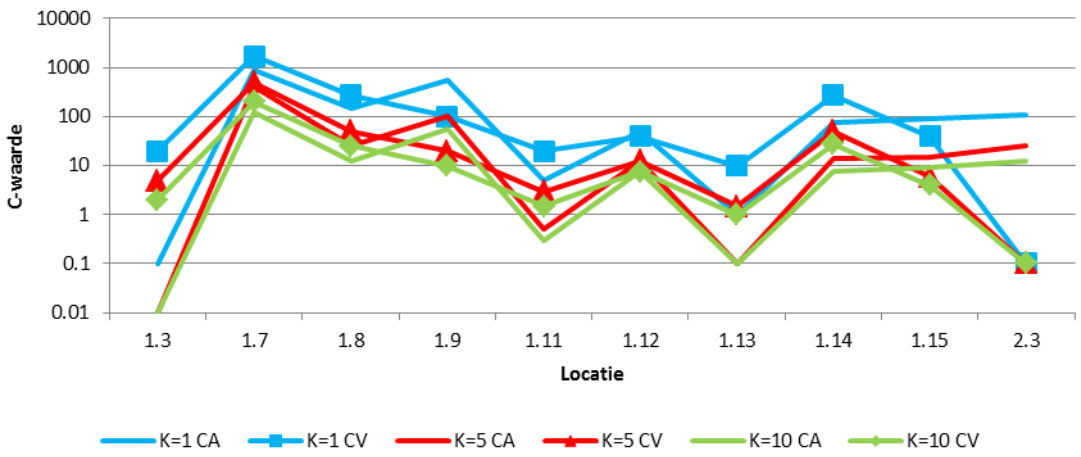
Vervolgens zijn op de 10 resterende locaties de diktes van de watervoerende lagen bepaald. Op alle locaties waar peilbuizen zijn geplaatst, zijn ook sonderingen uitgevoerd. Bij de grafische weergave van de ze sonderingen is ook een indicatieve bodemopbouw gegeven. Op basis van deze bodemopbouw is de dikte van het watervoerend pakket bepaald.

Aangezien de breedte van de boezem vanwege het aanbod van water van belang is, zijn de breedtes van de boezems bepaald. Deze boezembreedtes zijn in een GIS-omgeving ontleent aan topografische kaarten (Tabel 14).

Tabel 14. Dikte van de watervoerende laag en de breedte van de boezem op de verschillende locaties

Locatie	Dikte [m]	Boezembreedte [m]
1.3 Surwald	18,1	200
1.7 Nijbeets	1,8	45
1.8 Allingawier	1,75	45
1.9 Allingawier	2,13	45
1.11 Ferwoude	5,35	600
1.12 Terherne	2,66	130
1.13 Broek	1,55	3050
1.14 Ypecolsga	4,05	3800
1.15 Olde Ouwer	3,97	3800
2.3 Hege Warren	2	30

Deze gegevens zijn vervolgens gebruikt om de in hoofdstuk 4 gegeven formule te valideren. Hierbij dient te worden opgemerkt dat bij deze berekeningen er 3 variabelen (de kD-waarde van de watervoerende laag, de C-waarde van de boezem en de C-waarde van de polder en de sloot) zijn terwijl er maar 1 vergelijking beschikbaar is. Daardoor zijn er meerdere oplossingen voor de vergelijking mogelijk. Om hier meer inzicht in te krijgen zijn voor k-waardes van de watervoerende laag van 1, 5 en 10 m/dag de c-waarden van het voorland (CV) en van het achterland (CA) bepaald (Figuur 59).



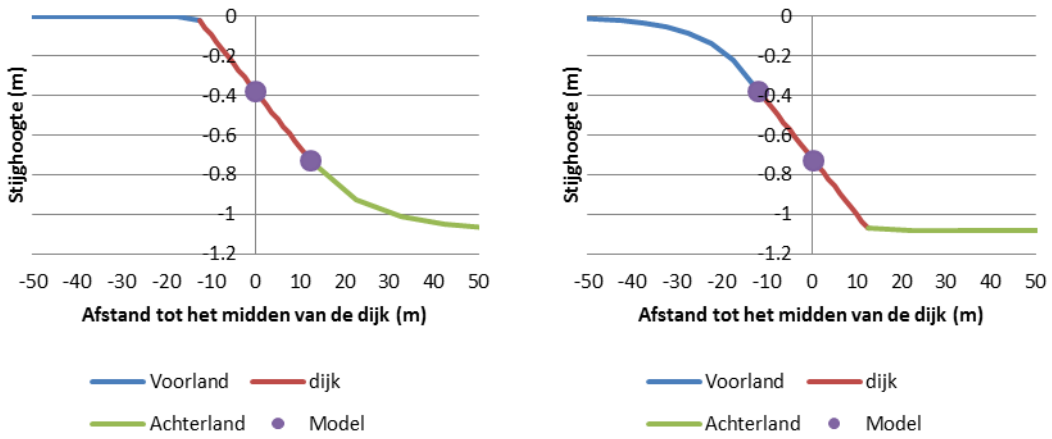
Figuur 59. Resultaten van de weerstand van boezem en polder bij verschillende k-waarden van het zand in de watervoerende laag voor de analytische formule om het stijghoogteverloop te berekenen

Uit Figuur 59 komt naar voren dat de permeabiliteit en de hiermee samenhangende kD-waarde van het pakket van belang is voor het rekenresultaat. Een factor 10 variatie in de permeabiliteit van het zand blijkt tot gevolg te hebben dat ook de weerstand van het voor- en achterland met een factor 10 varieert. Dit komt in orde grootte overeen met wat in hoofdstuk 5 is gevonden (zie Figuur 14).

Maar aangezien er vaak slechts alleen meetpunten van stijghoogten beschikbaar zijn maar geen gegevens van de doorlatendheid van de watervoerende laag dan wel de C-waarden van de polder en de boezem zijn er meerdere onbekende parameters, die samen tot meerdere oplossingen kunnen leiden. Hierdoor is het niet mogelijk de beschikbare formule voor de berekening van het stijghoogteverloop onder de kade te valideren.
Verder wordt opgemerkt dat het weten van de exacte locatie van de peilbuizen van wezenlijk belang is. Als de peilbuis niet in het midden van de kade, maar aan de rand van de kade staat (dichterbij de boezem dan wel dichterbij de polder) kan het resultaat ineens heel anders zijn: dezelfde helling van het grondwater kan optreden bij heel verschillende weerstanden. Dit voorbeeld is weergegeven in Figuur 60: in de linker grafiek is de weerstand berekend als de peilbuizen in het midden en aan de polder zijde staan. In de rechter

grafiek is de weerstand berekend als de peilbuizen aan de boezem zijde en in het midden staan. De helling in beide gevallen is hetzelfde, de berekende weerstand echter niet:

- de situatie die is berekend voor de linker grafiek resulteert in een weerstand van de boezem van 0,5 dagen en een weerstand in de polder van 125 dagen.
- de situatie die is berekend voor de rechter grafiek resulteert in een weerstand van de boezem van 85 dagen en een weerstand in de polder van 0,1 dag.



Figuur 60. Resultaten van de weerstand van boezem en polder bij verschillende weerstanden van het voorland: links bij een weerstand van de boezem van 0,5 dagen en een weerstand van de polder van 125 dagen en rechts bij een weerstand van de boezem van 85 dagen en een weerstand van de polder van 0,1 dag

Dit toont aan dat goede meetgegevens noodzakelijk zijn. Hierbij gaat het om goede inmetingen van het maaiveld en de boezem. Aangezien dit bij de case Rekerpolder het geval was, was het bij deze case goed mogelijk de situatie modelmatig na te rekenen.

Naast inmetingen zijn gegevens over de doorlatendheid van de watervoerende laag ook van groot belang. Met behulp van deze gegevens kan dan een veel betere inschatting gemaakt worden van de weerstand van de boezem en de polder, waardoor inzicht in de piping problematiek op de bemeten locatie wordt verkregen.

9.5 Conclusies

De analyse van de gegevens van de peilbuizen langs de Friese boezems hebben laten zien dat plaatsing van peilbuizen niet zomaar kan worden gedaan. Meerdere peilbuizen waren niet geschikt omdat de filters in een klei of veen laag stonden, of omdat ze niet in dezelfde watervoerende laag stonden.

Daarnaast zijn alleen 2 goed geplaatste peilbuizen niet genoeg. Dan zijn er nog steeds 3 onbekenden (doorlatendheid, weerstand van de polder en boezem). Als alleen de 2 peilbuizen beschikbaar zijn, moet dus 1 van deze 3 gekozen worden om de andere 2 te kunnen bepalen. 1 van de 3 onbekenden moet dus ook worden bepaald. Indien dit niet mogelijk is en de kD-waarde wordt ingeschat, zal er een bandbreedte van een orde grootte factor 10 zijn waar binnen weerstand van de boezem en polder kunnen worden bepaald.

Tenslotte heeft de berekening laten zien dat een goede inmeting van de situatie (maaiveld van voorland, boezem en achterland en exacte locatie van de peilbuizen) van groot belang is. Als deze niet is uitgevoerd wordt er een 4^e onbekende aan de vergelijking toegevoegd, wat maakt dat er teveel oplossingen mogelijk zijn.

10 Conclusies en aanbevelingen

10.1 Conclusies

De conclusies van alle beschreven onderwerpen zijn opgenomen aan het einde van elk hoofdstuk. Dit hoofdstuk brengt deze conclusies nogmaals samen.

10.1.1 Literatuuronderzoek infiltratie weerstand

Uit het literatuuronderzoek komt naar voren dat er vrijwel altijd van worden uitgaan kan worden dat in boezemwateren (infiltratie) weerstand aanwezig is. In grote lijnen kunnen we concluderen dat - als orde grootte - de infiltratieweerstanden van de bodemsliblaag variëren van 0,1 tot 1000 dagen. Uit de studies van de Zuid Willemsvaart en het Twentekanaal blijkt dit te gelden voor 95% van de gevallen. In vrijwel alle gevallen kan met uitgaan van een minimale weerstand van 0,1 dag.

De weerstanden van de landelijke kartering van de deklaag (TNO, 2007) vertoont een spreiding van enkele tientallen tot 20.000 dagen, maar zijn in het algemeen in Laag-Nederland hoger dan de weerstanden van de bodemsliblaag. Karteringen op een landelijke schaal houden geen rekening met lokale geologische variaties, lokaal kan de bodemsliblaag toch bepalend zijn voor de totale weerstand die het infiltrerende water ondervindt.

Voor de bepaling van sedimenttransport zijn meerdere formules en modellen beschikbaar. Deze modellen vergen echter een gedetailleerde invoer die vaak niet beschikbaar is. Belangrijke aspecten zijn de beschikbaarheid van sediment, de korrelgrootteverdeling en de stroomsnelheid. Indien de genoemde aspecten op de gewenste schaal beschikbaar zijn of kunnen komen is het aan te bevelen de bruikbaarheid van de beschikbare sedimenttransport formules voor de Nederlandse omstandigheden in boezems en kanalen nader te onderzoeken. Daarnaast kan gedacht worden aan het uitvoeren van metingen rond baggerwerkzaamheden om meer inzicht te krijgen in de snelheid waarmee een weerstand ter plaatse van de boezembodem wordt gevormd.

Vaak zijn niet alle benodigde invoerparameters voor formules die het sedimenttransport berekenen beschikbaar. Voor de vraag hoe snel een sliblaag met weerstand wordt gevormd is ook een meer kwalitatieve benadering mogelijk. Voor een kwalitatieve benadering is het in eerste instantie van belang inzicht te hebben in de parameters die bepalend zijn voor de vorming van een sliblaag. Uit deze studie is gebleken dat een aantal parameters van groot belang zijn voor de vorming van een sliblaag op de bodem van de watergang na baggerwerkzaamheden:

- Het aanbod van slibdeeltjes.
- De stroomsnelheid in de Boezem.
- De mate van scheepvaart die voor opwoeling van fijne deeltjes kan zorgen.
- Het stijghoogteverschil tussen de watergang en de omgeving.

Gebruikmakend van deze parameters kan een methode worden ontwikkeld waarmee de snelheid van bodemvorming op een kwalitatieve manier kan worden ingeschat. Ingeschat kan worden of er al dan niet bodemvorming plaatsvindt. Aan de hand hiervan kan dan de mate en orde grootte van de snelheid van

aanslibbing en de daarmee samenhangende weerstand worden bepaald. In het volgende hoofdstuk wordt aangegeven hoe deze bodemvorming kan worden bepaald en gemonitord.

10.1.2 Meetmethoden hydraulische (infiltratie)weerstand

De weerstand van de slibbodem kan worden bepaald door monstername gevolgd door laboratoriumproeven of door in situ metingen (infiltrometers). Echter, vanwege de heterogeniteit van de sliblaag en het geringe invloedgebied van deze methoden zijn de verkregen waarden slechts representatief voor heel kleine zones (ordegrootte enkele meters). Voor lijn- of gebiedsdekkend onderzoek is deze methode erg kostbaar.

De hydraulische weerstanden van de sliblaag en van de deklaag kan het meest betrouwbaar worden bepaald door invers modelleren aan de hand van waarnemingen van grondwaterstijghoogten in 3 peilbuizen bij een boezemkade. Afhankelijk van de complexiteit van de situatie, kan voor de berekening gebruik worden gemaakt van een analytisch rekenmethode (in ontwikkeling) of een numerieke rekenmodel zoals Plaxis, Hydrus of SVOffice (toegepast voor berekeningen in deze rapportage). Een dergelijke berekening heeft een invloedsgebied van een tiental tot enkele honderden meters. Voordeel is dat de waarnemingsputten die het oplevert, gebruikt kunnen worden voor het monitoren van bepaalde kritische tracés. Nadeel is dat het erg kostbaar is voor alle dijktracés. Toepassing is zinvol voor een aantal karakteristieke dijktracés en deze te combineren met minder kostbare methoden.

De dikte en dichtheid van een sliblaag kan met akoestische geofysische technieken worden bepaald. Dergelijke metingen worden nu al uitgevoerd voor waterbodemonderzoek. Het belang is echter de totale dikte en weerstand van zowel de sliblaag als de Holocene deklaag. De dikte van de Holocene deklaag kan met geoelectrische of electromagnetische geofysische methoden worden bepaald mits het grondwater geen hoog zoutgehalte heeft. Door beide methoden te combineren kan de totale dikte worden bepaald als ook het onderscheid tussen de sliblaag en Holocene deklaag. Deze metingen kunnen snel en continu worden uitgevoerd via een lijn met sensoren die die door een meetschip wordt voortgetrokken. Deze methode geven dan lijndekkende informatie. Ter verificatie dienen op enkele locaties wel prikstokmetingen (tot ca. 3m á 4m) of CPT sonderingen te worden verricht. De methoden leveren niet direct de hydraulische weerstanden van slib- en deklaag. Wel kunnen op basis van de diktes de weerstanden worden geschat. Dit is een kosteneffectieve methode om lange trajecten te meten.

Sommige methoden zijn kwantitatief, maar lokaal en duur, terwijl andere methoden meer kwalitatief, maar wel snel uitvoerbaar en lijndekkend zijn. Om die reden lijkt de volgende stapsgewijze meetstrategie zinvol:

1. Oriënterend onderzoek op basis bestaande hydrologische, topografische en geologische gegevens om prioriteitsgebieden te selecteren.
2. Lijndekkend onderzoek met geofysische meettechnieken binnen deze prioriteitsgebieden
3. Selectie van tracés voor nader detailonderzoek
4. Detailonderzoek met grondwaterstijghoogte metingen en modelberekeningen

10.1.3 Modelonderzoek weerstanden boezemkades

Effecten bodemweerstand voor stijghoogteverloop in het watervoerend pakket

Met behulp van modelsimulaties is voor een aantal karakteristieke situaties en verschillende bandbreedtes van parameterwaarden de effecten op enerzijds de gradiënt in de zandondergrond zelf en anderzijds de mogelijke toename van de stijghoogte door een afname van de infiltratieweerstand in de boezem gekwantificeerd.

De modelberekeningen laten zien dat een bodemweerstand (sliblaag en een combinatie van een sliblaag met Holocene deklaag) in de boezem bepalend is voor de waterdruk onder de boezem. Een weerstand van 10 dagen geeft, afhankelijk van de kD-waarde van het watervoerend pakket, al een reductie van 25% tot 75% van de stijghoogte in het watervoerend pakket onder de teen van de boezemkade. Bij een weerstand van 1 dag resulteert dit in een reductie van de stijghoogte in het watervoerend pakket van 5% tot 25%.

Verder heeft een grotere de kD-waarde van het watervoerend pakket tot gevolg dat het verhang van het grondwater afneemt, aangezien de weerstand van de watervoerende laag afneemt en het water dus sneller kan worden afgevoerd. Bij een lage bodemweerstand in de boezem en een grotere kD-waarde zal de druk onder de sloot in de polder dus hoger zijn dan bij een hoge bodemweerstand in de boezem.

De breedte van de boezem heeft grote invloed op de onderliggende stijghoogte: hoe breder de boezem hoe meer water kan infiltreren, waardoor de onderliggende stijghoogte bij grotere boezembreedtes hoger is dan bij kleinere boezembreedtes. De grootste toename in de stijghoogte treedt op bij een toename van de breedte tot 100 m. Bij een verdere toename tot 200 m neemt de stijghoogte nog steeds toe, maar minder sterk. Bij een nog verdere toename van de breedte neemt de stijghoogte niet meer noemenswaardig toe, aangezien de onderliggende laag niet genoeg capaciteit heeft om dit water af te voeren.

Een vermindering van de dikte van de weerstandsbiedende laag in de boezem van 2 naar 1,5 of 1,0 m heeft een stijging van de stijghoogte tot gevolg. Echter, dit is sterk afhankelijk van de doorlatendheid of de weerstand van deze laag. Als de laag bestaat uit klei met een beperkte doorlatendheid (k=0,01 m/d) is de invloed beperkt. De druktoename is 1 tot 6% van het totale drukverschil tussen de boezem en de polder bij een vermindering van 2 naar 1,5 m dikte, en 5 tot 15% bij een vermindering van 2 naar 1 m.

Ter plaatse van de sloot (op enige afstand van de boezem) maakt een beperkte weerstand van de slootbodem en boezem (kleiner dan 10 dagen) dat de boezem een groter effect heeft op de stijghoogte in het watervoerend pakket. Bij verdere toename (groter dan 10 dagen) van de bodemweerstand in de sloot en de boezem neemt de invloed van de sloot op de stijghoogte in het watervoerend pakket weer toe.

Effecten tijdelijke weerstandsverlaging door een gat met beperkte omvang
Het opdrijven van een deel van de boezembodem is een 3D probleem. Als dit wordt benaderd als een 2D probleem, vindt er een grote overschatting van de invloed van het ontstane gat plaats.
De 3 sets van 2D en 3D berekeningen laten zien dat een 2D berekening van een 3D situatie een zeer grote overschatting van de invloed van de 3D situatie geeft: bij een beperkt gat van 25 m2 is een verschil tussen de stijghoogten in 2D en 3D van 50 tot 60%. Zelfs een zeer groot tijdelijk gat van 800 m2 is het verschil tussen de stijghoogten onder het gat 25 tot 30%.

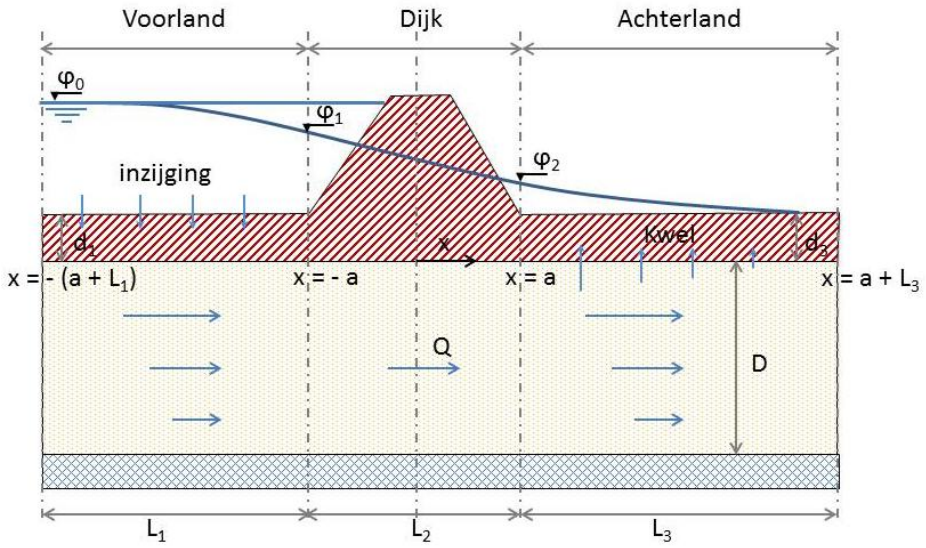
10.1.4 Modelsimulaties van veldproef piping HHNK Rekerpolder

De case Rekerpolder was uitgevoerd om real time te bepalen hoe het grondwater reageert op een gat in de boezembodem. De resultaten zijn gebruikt als verificatie voor de verschillende onderwerpen besproken in dit rapport. Geconcludeerd mag worden dat de resultaten van de modelsimulaties geheel in lijn met de resultaten die eerder zijn gevonden in de literatuur (hoofdstuk 2), gevoelheidsanalyses, (hoofdstuk 5) en modellering van gaten (hoofdstuk 6).

Primair doel was echter om te onderzoeken of met een eenvoudige modelschematisatie kan worden volstaan voor het bepalen van de effecten van de bodemweerstand op het verloop van de stijghoogte in het watervoerend pakket. De hier uitgevoerde berekeningen laten zien dat met een eenvoudige modelschematisatie het goed mogelijk is de case Rekerpolder na te bootsen. Voor verdere uitwerking en toetsing kan een vereenvoudigde situatie dus een juiste benadering zijn.

10.1.5 Alternatief voor het criterium voor piping controle

Om een eventuele correctiefactor voor piping te bepalen is het van belang deze af te stemmen op het mechanisme dat een rol speelt bij het ontstaan van piping. Kwelweglengte is één van de bepalende parameters bij het mechanisme piping en geeft de lengte van de weg die het kwelwater af moet leggen tussen het in- en uittredepunt.



Figuur 61. Situatieschets bij stationaire stroming onder een dijk waarbij inzijging plaatsvindt via een boezembodem en kwel via een deklaag.

In de huidige berekeningen voor piping controle middels de formule van Sellmeijer wordt geen boezembodemweerstand meegenomen. De modelsimulaties hebben laten zien dat dit leidt tot een overschatting van het risico op piping in deze situaties. De beoogde situaties waarvoor de modelberekeningen worden uitgevoerd zijn consistent van opbouw. Met de analytische formule kunnen de berekende modelresultaten worden nagerekend. Aanbevolen wordt om het verhang wat wordt gebruikt bij de piping controle te corrigeren gebruikmakend van de analytische oplossing. In de huidige situatie maakt wordt bij de piping controle gebruikt van boezempeil (φ_0) en polderpeil (φ_3).

$$(\Delta H - 0{,}3d) = \left((\varphi_0 - \varphi_3) - 0{,}3d\right) \leq \frac{1}{\gamma}\Delta H_c$$

Vergelijking 26

Op basis van de analytische formule wordt geadviseerd om de volgende aanpassing te doen van deze piping controle (zie ook figuur):

Gebruikmaken van de stijghoogtes bij de voet van de boezemkade en het polderpeil:

$$(\varphi_1 - \varphi_3) \leq \frac{1}{\gamma}\Delta H_c$$

Vergelijking 27

Met

$$\varphi_1 = \varphi_3 + (\,(\,\varphi_0 - \varphi_3\,)\,\frac{L_2 + \lambda_3}{\lambda_1 + L_2 + \lambda_3}$$

φ_3 = polderpeil

Hierbij is tevens het gebruik van een correctie voor de dikte van de deklaag achterwegen gelaten. Als vervolgstap hierop kan gebruik wordt gemaakt van het verhang in de watervoerende laag op basis van de stijghoogte bij de voet en de teen van de kade:

$$\varphi_1 - \varphi_2 \leq \frac{1}{\gamma}\Delta H_c$$

Vergelijking 28

Met

$$\varphi_1 = \varphi_3 + ((\varphi_0 - \varphi_3) \frac{L_2 + \lambda_3}{\lambda_1 + L_2 + \lambda_3}$$

$$\varphi_2 = \varphi_3 + ((\varphi_0 - \varphi_3) \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + L_2 + \lambda_3}$$

10.1.6 Analyses gemeten stijghoogten Friesland

De analyse van de gegevens van de peilbuizen langs de Friese boezems hebben laten zien dat plaatsing van peilbuizen niet zomaar kan worden gedaan. Meerdere peilbuizen waren niet geschikt omdat de filters in een klei of veen laag stonden, of omdat ze niet in dezelfde watervoerende laag stonden.

Daarnaast zijn alleen 2 goed geplaatste peilbuizen niet genoeg. Met de vergelijking voor de berekening van de stijghoogte in het watervoerend pakket zijn er dan nog steeds 3 onbekenden (doorlatendheid, weerstand van de polder en boezem). Als alleen de 2 peilbuizen beschikbaar zijn, moet dus 1 van deze 3 gekozen worden om de andere 2 te kunnen bepalen. 1 van de 3 onbekenden moet dus ook worden bepaald. Indien dit niet mogelijk is en de kD-waarde wordt ingeschat, zal er een bandbreedte van een orde grootte factor 10 zijn waar binnen weerstand van de boezem en polder kunnen worden bepaald (Figuur 59).

Tenslotte heeft de berekening laten zien dat een goede inmeting van de situatie (maaiveld van voorland, boezem en achterland en exacte locatie van de peilbuizen) van groot belang is. Als deze niet is uitgevoerd wordt er een 4^e onbekende aan de vergelijking toegevoegd, wat maakt dat er teveel oplossingen mogelijk zijn (Figuur 60).

10.2 Aanbevelingen

- De literatuurstudie heeft laten zien (zie bijvoorbeeld het voorbeeld van de dichtslibbing van het Twentekanaal), dat dichtslibbing snel kan gaan. Dit is echter afhankelijk van hoeveelheid fijne deeltjes en het beschikbaar slib. Aanbevolen wordt om deze kennis om te zetten in een handzame tool, waarbij op basis van fysische parameters (zoals aanbod van slibdeeltjes en stroomsnelheid) de snelheid van dichtslibben kan worden ingeschat.

- Aanbevolen wordt om rond baggerwerkzaamheden metingen uit te voeren ten einde meer praktijkvoorbeelden te krijgen over de snelheid van aan- en dichtslibben. Hierbij gaat het vooral om de in paragraaf 3.4.3 genoemde maatgevende parameters, maar ook bijvoorbeeld bodemmonsters te nemen (steekmonsters) en deze te beproeven op doorlatendheid en materiaal eigenschappen.

- Indien peilbuizen worden geplaatst in het kader van piping onderzoek, wordt aanbevolen niet alleen maar peilbuizen te plaatsen in de kade, maar gebruik te maken van langere raaien en deze te combineren met doorlatendheidsmetingen van de watervoerende laag, de deklaag en de boezembodem.

- Er zijn een tweetal typische situaties voor de bodemopbouw waarvoor piping een rol speelt (zie ook ‘Technisch rapport Zandmeevoerende wellen’ (1999)). In de twee situaties wordt uitgegaan van

1. een dik watervoerend pakket met deklaag en
2. een opbouw van deklaag met daaronder twee zandlagen en een klei/veenlaag.

Met behulp van modelsimulaties is voor standaardsituatie 1 een aantal karakteristieke situaties en verschillende bandbreedtes van parameterwaarden de effecten op enerzijds de gradiënt in de zandondergrond zelf en anderzijds de mogelijke toename van de stijghoogte door een afname van de intreeweerstand in de boezem gekwantificeerd. Aanbevolen wordt om ook de berekeningen voor deze 2e maatgevende situatie uit te voeren.

11 Referenties

Boogaard, F. , Bruins, G., Wentink, R. (2006). Wadi's: aanbevelingen voor ontwerp, aanleg en beheer. RIONED.

CHO (1986). Verklarende hydrologische woordenlijst. Gespreksgroep Hydrologische Terminologie CHO TNO.

Edelman, J.H. (1947). Over de berekening van grondwaterstroomingen. Delft

Edelman, J.H. (1972). Groundwater hydraulics of extensive aquifers. International lnstitute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen

Fonck, H. (1973). Een onderzoek naar de grootte van infiltratie vanuit watervoerende leidingen in het waterschap Salland. Instituut voor cultuurtechniek en waterhuishouding. ICW Nota 731.

Ieperen, H.J. van (1987). The fall velocity of grain particles. Publication 83 Agriicultural University Wageningen.

Jousma, G. , Massop, H. Th. L. (1996). Intreeweerstanden waterlopen : inventarisatie en analyse, Delft : TNO Grondwater en Geo-Energie [etc.], TNO - rapport, GG-R-96-15(A).

Kruseman, G.P., De Ridder, N.A. (1970). Analysis and Evaluation of Pumping Test Data.

Langendoen, E.J. (2004). Handboek Zandboek. CROW, 2004.

Massop, H. Th. L. , van der Gaast, J.W.J. (2006). Intreeweerstand, nader beschouwd Alterra / Wageningen UR, Alterra-rapport 1350

Massop, H.T.L., Wijnsma, M. (1988). Kanaalbodemweerstand voor en na ontgraving in verband met uitbreiding afmeergelegenheid bij Eefde. Instituut voor cultuurtechniek en waterhuishouding, ICW Nota 1843.

Mazure, J.P. (1936). Geohydrologische gesteldheid van de Wieringermeer. Algemene landsdrukkerij, pp 67-131,

Sellmeijer (2006). Numerical computation of seepage erosion below dams (piping)

Shields, A. (1936) Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung; In Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Heft 26

Stoppelenburg, F. J. (1999). Een overzicht van de toepassing van intreeweerstanden in modelstudies. RIZA, Nationaal Onderzoekprogramma Verdroging.

Technische adviescommissie voor de waterkeringen (1985). leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken

Technische adviescommissie voor de waterkeringen (1999). Technisch rapport zandmeevoerende wellen

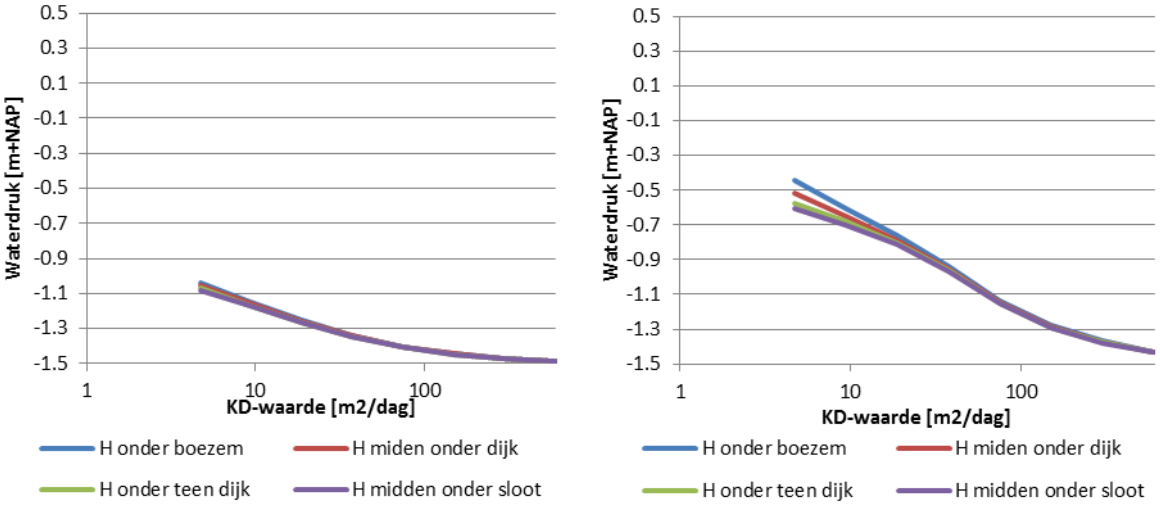
TNO (1964). Steady flow of ground water towards wells, Den Haag

Verruijt, A., Theory of groundwater flow. Macmillan and Co LTD, London.Wit, K.E. , Massop, H.T.L. , te Beest, J.G. en Wijnsma, M. (1987). Hydrologische en bodemfysische parameters in de omgeving van het hoofdkanaal van de Twenthekanalen (Traject Eefde - Lochem)
Instituut voor cultuurtechniek en waterhuishouding, ICW Nota 1751.

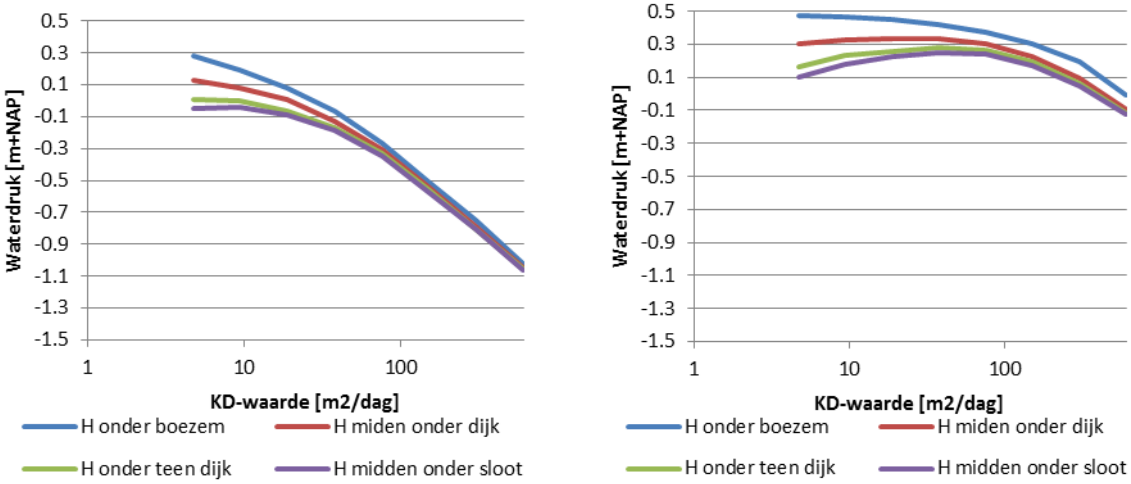
Wit, K.E. (1983). Berekening van de kanaalweerstand van de Zuid-Willemsvaart in het traject Den Dungen – Erp. Instituut voor cultuurtechniek en waterhuishouding, ICW Nota 1427.

Bijlagen

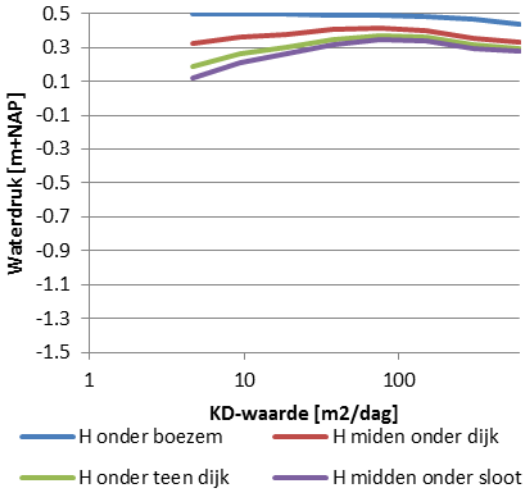
Bijlage 1: Resultaten Modelberekening 1



Figuur 62. Invloed afname kD-waarde van het watervoerend pakket op de waterdruk in het watervoerend pakket bij een C-waarde van het slib in de boezem van 1000 (links) en 100 (rechts) dagen.

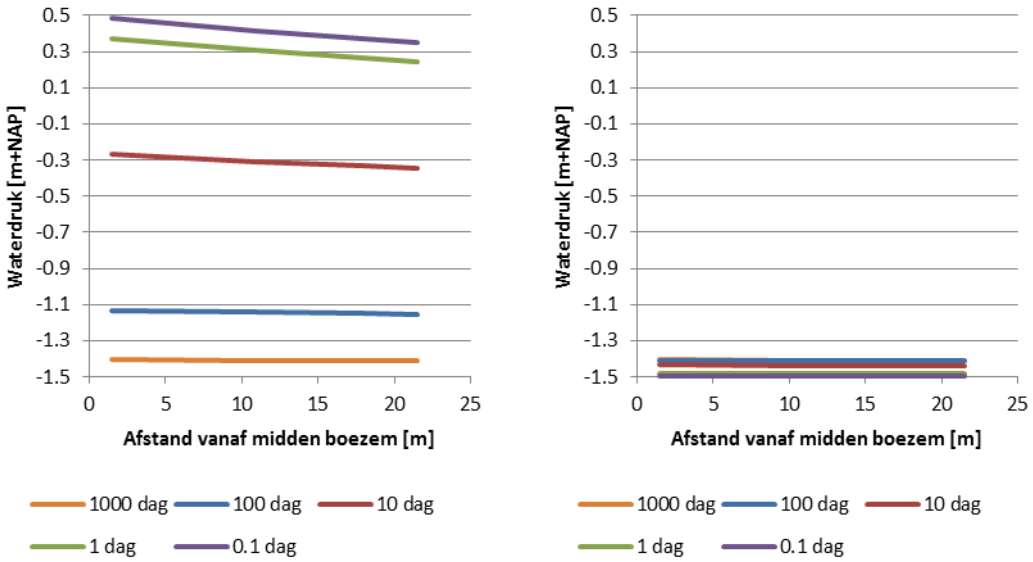


Figuur 63. Invloed afname kD-waarde van het watervoerend pakket op de waterdruk in het watervoerend pakket bij een C-waarde van het slib in de boezem van 10 dagen (links) en 1 dag (rechts).

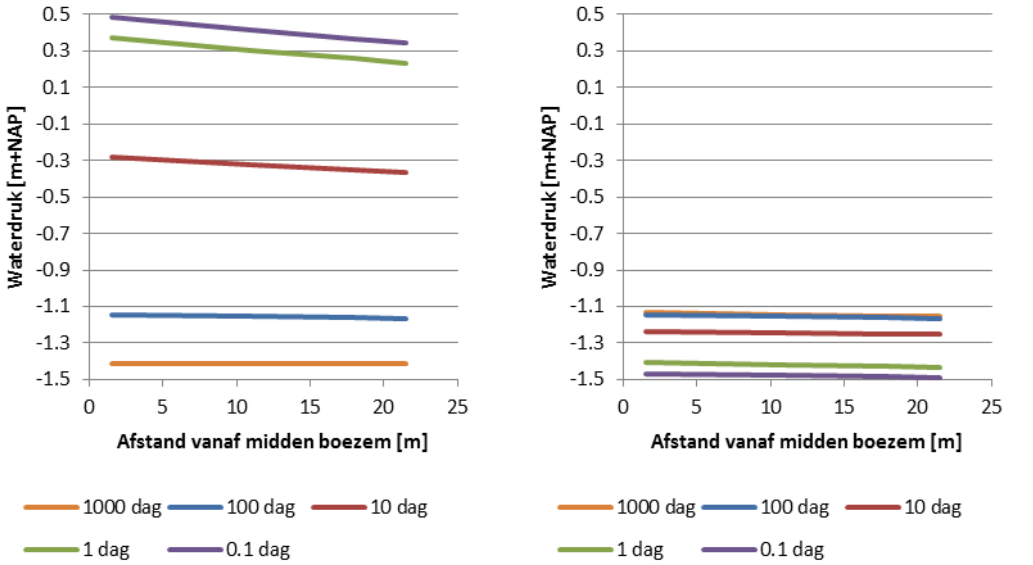


Figuur 64. Invloed afname kD-waarde van het watervoerend pakket op de waterdruk in het watervoerend pakket bij een C-waarde van het slib in de boezem van 0,1 dag.

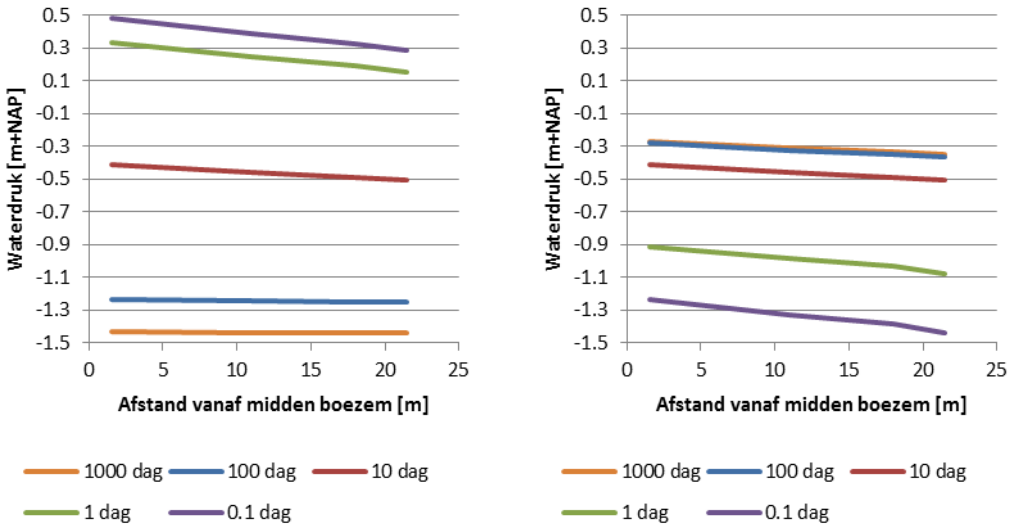
Bijlage 2: Resultaten Modelberekening 4



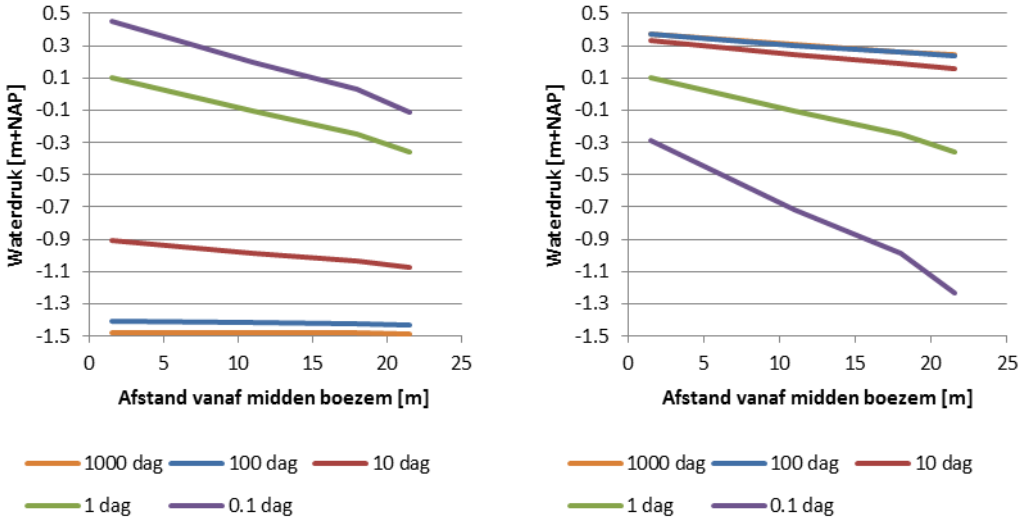
Figuur 65. Invloed van de variatie van de weerstand van de boezem (links) dan wel de weerstand van de sloot bodem (rechts) bij een weerstand van de sloot (links) dan de wel boezem (rechts) van 1000 dagen



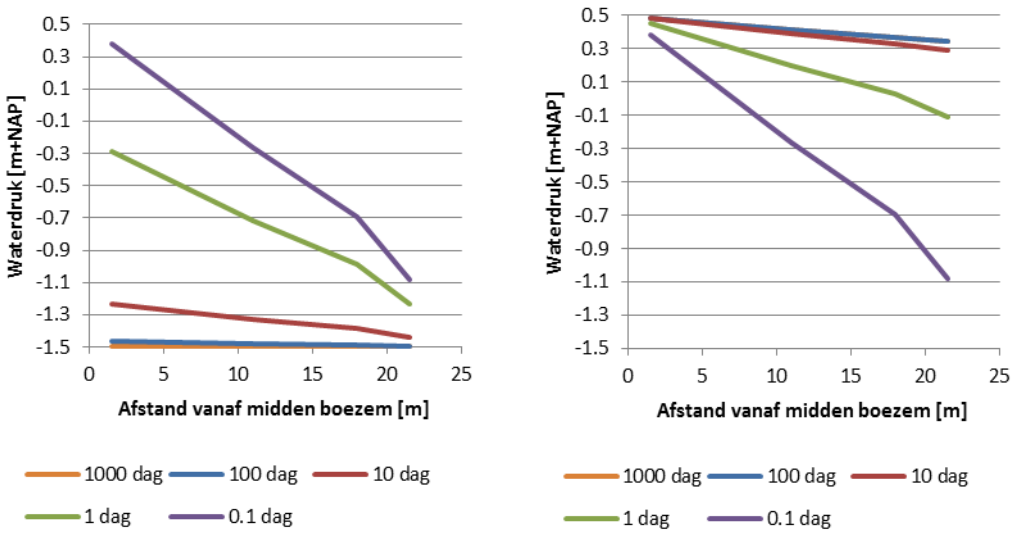
Figuur 66. Invloed van de variatie van de weerstand van de boezem (links) dan wel de weerstand van de sloot bodem (rechts) bij een weerstand van de sloot (links) dan de wel boezem (rechts) van 100 dagen



Figuur 67. Invloed van de variatie van de weerstand van de boezem (links) dan wel de weerstand van de sloot bodem (rechts) bij een weerstand van de sloot (links) dan de wel boezem (rechts) van 10 dagen



Figuur 68. Invloed van de variatie van de weerstand van de boezem (links) dan wel de weerstand van de sloot bodem (rechts) bij een weerstand van de sloot (links) dan de wel boezem (rechts) van 1 dag



Figuur 69. Invloed van de variatie van de weerstand van de boezem (links) dan wel de weerstand van de sloot bodem (rechts) bij een weerstand van de sloot (links) dan de wel boezem (rechts) van 0,1 dag

Acacia Water
Jan van Beaumontstraat 1
2805 RN Gouda

Telefoon: 0182 – 686424
Internet: www.acaciawater.com
Email: info@acaciawater.com

