stowa

FREATISCHE LIJN ONDER ASFALTBEKLEDING



RAPPORT 2026 37

FREATISCHE LIJN ONDER ASFALTBEKLEDING

RAPPORT 2026 37

ISBN 978.94.6479.135.8

TEL 033 460 32 00
Stationsplein 89, 3818 LE Amersfoort
Postbus 2180, 3800 CD Amersfoort
stowa@stowa.nl www.stowa.nl

Publicaties van de STOWA kunt u gratis downloaden via www.stowa.nl/publicaties

COLOFON

Amersfoort, november 2026

Uitgave
Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer STOWA
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

Auteurs
André van Hoven (Deltares)

Begeleidingscommissie
Hendrik Meeuwise (waterschap Scheldestromen)
Jan van der Form (Rijkswaterstaat)
Jan willem Nieuwenhuis (waterschap Noorderzijlvest)
Rien Davidse (Rijkswaterstaat / STOWA)

Foto omslag
Plaatsen peilbuizen in asfalt, Vlissingen 2022
Bron: Waterschap Scheldestromen

Vormgeving
Buro Vormvast | Uitgeest

STOWA
STOWA 2026-37

ISBN
978.94.6479.135.8

Disclaimer
De inhoud van deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden in de publicatie, of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud ervan.

Copyright
STOWA spant zich in de rechthebbenden van in de uitgave gebruikte afbeeldingen te respecteren conform het auteursrecht. Indien u desondanks van mening bent dat uw rechten in het geding zijn, dan verzoeken wij u contact met ons op te nemen.

TEN GELEIDE

VERZADIGING ONDER ASFALTDIJKBEKLEDING: ALLEEN METINGEN GEVEN ZEKERHEID

Bij het beoordelen van asfaltdijken rekenen we vaak met conservatieve aannames over de grondwaterstand. Dit onderzoek laat zien dat die aannames soms te voorzichtig zijn. Maar eenvoudig de rekenregels aanpassen kan niet. Wie nauwkeuriger wil beoordelen, zal eerst moeten meten.

In het waterbeheer zoeken we voortdurend naar de juiste balans tussen veiligheid, betrouwbaarheid en doelmatigheid. We willen geen onnodige risico's nemen, maar ook voorkomen dat we dijken zwaarder beoordelen dan nodig is. Dat vraagt om een goed begrip van hoe een dijk zich in werkelijkheid gedraagt.

Dit onderzoek laat zien dat de grondwaterstand onder asfaltbekledingen sterk verschilt per locatie. De bestaande rekenregels blijken conservatief, maar de verschillen tussen dijken zijn te groot om deze regels generiek aan te passen. Dat is een belangrijke les: niet alles laat zich vangen in één landelijke rekenregel.

Voor dijkbeheerders betekent dit dat tijdig meten en het gebruik van daarop gekalibreerde modellen belangrijk zijn voor een betrouwbare beoordeling. Dat vraagt om vooruitdenken: meetgegevens moeten beschikbaar zijn voordat een beoordeling of ontwerp wordt uitgevoerd.

Met dit onderzoek willen STOWA en Rijkswaterstaat bijdragen aan een betere onderbouwing van veiligheidsbeoordelingen en dijkontwerpen. Tegelijkertijd blijven er kennisvragen bestaan over het bezwijken van asfalt op verzadigde zandbedden. Ook daaraan zullen we aandacht moeten besteden.

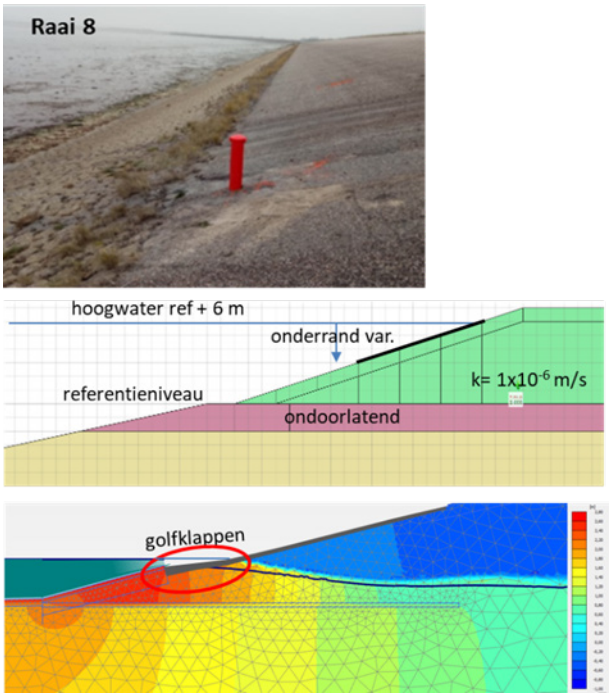
Mark van der Werf
Directeur STOWA

SAMENVATTING

Deze studie toont aan dat de eenvoudige regels voor het schematiseren van het freatisch vlak onder een asfaltbekleding uit het Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken conservatief zijn. Algemene aanscherping van de regels bleek echter niet mogelijk. De mate van conservatisme is namelijk zeer situatie specifiek. Dit komt door grote variabiliteit en onzekerheid in de doorlatendheid van voorland, steen- en kleibekledingen en de grondlagen in het dijklichaam zelf. Met peilbuismetingen gekalibreerde grondwaterstromingsmodellen voorspellen het freatisch vlak onder hoogwatercondities het meest betrouwbaar.

Een golfklapbelasting op een asfaltbekleding op een verzadigd zandbed heeft naar verwachting een hoge faalkans van de asfaltbekleding. De hoogte van het freatisch vlak is belangrijk voor het bepalen van de faalkans van de asfaltbekleding. Onder de werking van golfklappen zal een verzadigd zandbed vervormen, waardoor het asfalt scheurt en bezwijkt. Veelal is dit onacceptabel, omdat de kans op vervolgerosie, een bres en een overstroming te groot worden.

Figuur S.1 **Peilbuismeting Waddenzeedijk (boven), schematisering (midden) en rekenresultaat (onder).**



Het onderzoek heeft bestaan uit een evaluatie van een groot aantal peilbuismetingen en hierop gekalibreerde berekeningen uit de adviespraktijk en daarnaast uit een variatiestudie met een numeriek model. De peilbuizen stonden in het zandlichaam van de dijk onder de asfaltbekleding. Er is gemeten op meer dan 20 locaties in de Waddenzeedijken van Noord-Holland en Friesland (Figuur S.1).

De peilbuismetingen konden achteraf worden teruggerekend door doorlatendheden van bekledingen, voorland en dijklichaam aan te passen. Het bleek nauwelijks mogelijk om de doorlatendheden op voorhand zodanig te schatten dat de respons van de dijk kon worden voorspeld. Dit was ondanks dat de doorlatendheden waren onderbouwd met veld- en laboratoriumonderzoek.

Peilbuismetingen blijken noodzakelijk voor een betrouwbaar model.

Het onderzoek is uitgevoerd in het kader van de samenwerking tussen Rijkswaterstaat WVL (Water Verkeer en Leefomgeving) en STOWA (Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer). De resultaten van het onderzoek dienen ter ondersteuning van veiligheidsbeoordelingen en ontwerpen van asfaltdijkbekledingen op een fundering van zand.

STOWA IN HET KORT

KENNIS OVER WATER, VOOR NU ÉN LATER

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer – kortweg STOWA – is het kennisplatform van regionale waterbeheerders in Nederland. Vanuit Amersfoort werken we aan het ontwikkelen, verzamelen, verspreiden en implementeren van toegepaste kennis. Die kennis hebben waterbeheerders nodig om de opgaven waar zij voor staan, goed uit te kunnen voeren. Of het nu gaat om klimaatadaptatie (zowel stedelijk als landelijk gebied), een goede waterkwaliteit, duurzame en effectieve afvalwaterzuivering, veilige dijken en kaden, energietransitie of circulaire economie.

Het soort kennis dat wij ontwikkelen, is breed: technisch en natuurwetenschappelijk, maar soms ook bestuurlijk en/of juridisch. Om te zorgen dat die kennis kan worden toegepast in de praktijk, presenteren we onze onderzoeksresultaten indien mogelijk in de vorm van rapporten, praktische handreikingen, tools en instrumenten. Ook faciliteren we met het oog op kennisdoorwerking leergemeenschappen en organiseren we symposia, werksessies en webinars.

Om zo veel mogelijk impact te creëren met ons werk, besteedt STOWA nadrukkelijk aandacht aan de organisatorische en menselijke factoren die de impact van ons werk kunnen beïnvloeden. Want verandering gaat via de inhoud (kennis), maar wordt gedragen door mensen. Bovendien kijken we breder dan het eigen netwerk bij het zoeken naar oplossingen. We richten onze blik daarvoor tevens op andere sectoren, gaan op zoek naar andere invalshoeken en leren van het buitenland. Via onze eigen en andermans media geven we uitleg over de achtergronden bij ons werk.

STOWA werkt vraaggestuurd en agendeert ook. We inventariseren welke kennisvragen waterbeheerders hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers: universiteiten, kennisinstituten, kennisbedrijven of adviesbureaus. Wij nemen de aanbesteding en begeleiding van gezamenlijke kennisprojecten op ons. Wij zorgen ervoor dat waterbeheerders verbonden blijven met de projecten en er ook 'eigenaar' van zijn. Dit om te waarborgen dat de projectresultaten de deelnemers praktische handelingsperspectieven bieden. Ieder project wordt om die reden begeleid door een commissie waar regionale waterbeheerders zelf deel van uitmaken. De grote onderzoekslijnen worden vastgesteld door programmacommissies, waar waterbeheerders zitting in hebben.

STOWA is onafhankelijk, onpartijdig en transparant. De gebruikers van onze kennis moeten erop kunnen vertrouwen dat de inhoud van onze rapporten objectief en representatief is. Alleen zo kan onze kennis worden ingezet voor beter waterbeheer en innovaties die antwoord geven op de uitdagingen van vandaag en morgen. Het is aan waterbeheerders te bepalen hoe ze de kennis van STOWA in de praktijk gebruiken.

STOWA is een stichting die de richtlijnen volgt voor organisaties zonder winstoogmerk (RJ-640). In ons jaarverslag is daarom naast een cijfermatige jaarrekening een directieverslag opgenomen over de stichting en haar activiteiten. Het budget bedraagt jaarlijks ongeveer 20 miljoen euro. Onze deelnemers leggen gezamenlijk ieder jaar ongeveer 10 miljoen in als structurele bijdrage. Daarnaast ontvangen we jaarlijks ongeveer 10 miljoen euro in de vorm van bijdragen aan afzonderlijke projecten.

FREATISCHE LIJN ONDER ASFALTBEKLEDING

INHOUD

TEN GELEIDE
SAMENVATTING
STOWA IN HET KORT

1 INLEIDING 1

2 LITERATUUR: FAALMECHANISMEN, DOORLATENDHEDEN EN OUDE BEREKENINGEN 2
2.1 Inleiding 2
2.2 Faalmechanismen 2
2.3 Doorlatendheid steenzettingen 4
2.4 Doorlatend zandkern 5
2.5 Grondwaterstromingsberekeningen diverse dijken COW jaren 80 7

3 METINGEN EN BEREKENINGEN WADDENZEEDIJKEN FRIESLAND EN NOORD HOLLAND 9
3.1 Inleiding 9
3.2 Samenvatting analyses Waddenzeedijken Noord Holland storm 2019 10
3.3 Samenvatting analyses Waddenzeedijken Friesland storm 2019 11
3.4 Helderse zeewering 11
3.5 Samenvatting Lauwersmeerdijk 12
3.6 Samenvatting veldmetingen en gekalibreerde modellen 12

4 MODELBEREKENINGEN 14
4.1 Inleiding 14
4.2 Beschrijving rekenmodel 14
4.3 Invloedsfactoren en scenario's 15
4.4 Voorbeeld berekeningsresultaat 18
4.5 Gevoeligheidsberekeningen 21
4.5.1 Hoogwater door afvoergolf 21
4.5.2 Hoogwater door stormopzet zonder getij 25
4.5.3 Hoogwater door storm met getijde 28
4.5.4 Neerslag 36

5		ANALYSE EN DISCUSSIE	43
	5.1	Met metingen in gekalibreerde modellen	43
	5.2	Variatiestudie	44
	5.3	Relatie met overstromingskans	45
	5.4	Tijdsafhankelijkheid	45
6		CONCLUSIES EN VERVOLG	46
	6.1	Conclusies	46
	6.2	Wat nu?	46
7		REFERENTIES	49
BIJLAGE A		RESULTATEN ELEKTRISCH ANALOGON ONDERZOEK COW	51
BIJLAGE B		METINGEN EN BEREKENINGEN BIJ HOOGHEEMRAADSCHAP HOLLANDS NOORDERKWARTIER	55
BIJLAGE C		METINGEN WETTERSKIP FRYSLÂN	70
BIJLAGE D		NAREKENEN INDRINGING FREATISCHE LIJN LAUWERSMEERDIJK	84

1

INLEIDING

De ligging van het freatisch vlak in een dijk is van belang voor beoordeling en ontwerp van veel faalmechanismen, waaronder faalmechanismen van een asfaltbekleding. De eenvoudige rekenregels voor het schatten van de ligging van het freatisch vlak onder een asfaltbekleding zijn nauwelijks bruikbaar. Er wordt hiervoor verwezen naar het Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken (TRWD) uit 2004, welke oorspronkelijk niet zijn bedoeld voor de gedetailleerde schematisering van het freatisch vlak onder een asfaltbekleding [4], maar hier wel voor worden gebruikt.

Toepassing van de rekenregels leidt tot de schematisering van een verzadigd zandbed, waardoor de faalkans van de asfaltbekleding niet kan worden bepaald met het hiervoor beschikbare golfklapmodel. Gevreesd wordt ook voor een aanzienlijke, maar onbekende, toename van de faalkans van de asfaltbekleding als het zandbed verzadigd is. Bij een hoge golfbelasting op een zanddijk in combinatie met falen van het asfalt heeft dit in potentie veel invloed op de overstromingskans.

De vraag is in hoeverre de rekenregels conservatief zijn en of deze onderbouwd kunnen worden aangescherpt.

Sinds 2004 zijn op diverse dijkstrekkingen ervaringen opgedaan met peilbuismetingen in zanddijken met een asfaltbekleding en met het tijdsafhankelijk modelleren van de grondwaterstroming door een dijk.

In deze studie is gekeken of deze ervaringen uit de adviespraktijk en modellerings-mogelijkheden kunnen worden ingezet voor de aanscherping van de eenvoudige rekenregels uit het TRWD specifiek gericht op verzadiging onder een asfaltbekleding. Er is hiervoor gekeken in literatuur (Hoofdstuk 2), ervaringen uit de adviespraktijk (Hoofdstuk 3) en er is een variatiestudie uitgevoerd met een numeriek model (Hoofdstuk 4). Vervolgens is de analyse en discussie beschreven (Hoofdstuk 5) en zijn de conclusies en aanbevelingen voor het vervolg aangegeven in Hoofdstuk 6.

2

LITERATUUR: FAALMECHANISMEN, DOORLATENDHEDEN EN OUDE BEREKENINGEN

2.1 INLEIDING

De faalmechanismen van de asfaltbekleding en het belang van het freatisch vlak hierin zijn op een rij gezet. Hiervoor is gekeken naar leidraden, handreikingen, technische rapporten, zoals momenteel worden gebruikt voor ontwerp en beoordeling van WAB bekledingen (WAB: waterbouw asfaltbeton). Verder zijn oude onderzoeksrapporten naar dit onderwerp gevonden waarin informatie over de indringing van hoogwater in een dijk en doorlatendheden zijn beschreven. In de jaren 80 is veel onderzoek uitgevoerd naar onder andere WAB bekledingen in het kader van COW (Centrum voor Onderzoek Waterkeringen).

De faalmechanismen laten zien waarom de ligging van het freatisch vlak belangrijk is (Paragraaf 2.2) en dat conservatieve uitgangspunten over de ligging nauwelijks praktisch nut hebben. Voor het nauwkeuriger bepalen van de freatische lijn tijdens hoogwater zijn doorlatendheden van bekledingen en dijksmateriaal van belang (Paragraaf 2.3 en 2.4).

2.2 FAALMECHANISMEN

De freatische lijn onder de asfaltbekleding is van belang bij drie faalmechanismen van een asfaltbekleding:

Asfalt golfklappen (AGK) De hoogste ligging van het freatisch vlak wordt beschouwd. Risico van bezwijken van het verzadigde zandbed.

Asfalt wateroverdruk (AWO) Het grootste verval over de asfaltbekleding wordt beschouwd, dat wil zeggen het grootste verschil tussen de buitenwaterstand en de grondwaterstand. Deze grondwaterstand kan de asfaltbekleding opdrukken.

Asfalt S-profiel (ASP) Bezwijken van de verzadigde ondergrond onder golfklapbelasting waardoor een S-profiel ontstaat leidend tot bezwijken.

AGK

Een asfaltbekleding op een verzadigd zandbed kan zeer gevoelig zijn voor golfklappen. In een uitgave van de Vereniging voor Bitumineuze Werken uit 1962 [1] wordt hiervan melding gemaakt. Een Deltagootproef in 2018 toonde dit nog eens aan [2].

Als kritische grens van de grondwaterstand (freatisch vlak) in de dijk wordt de onderrand van de asfaltbekleding gebruikt [3]. Bij een hogere grondwaterstand wordt niet voldaan aan de toepassingsvoorwaarde voor het AGK model, vanwege 1) potentieel bezwijken van de ondergrond en 2) de schatting van de stijfheid van de ondergrond kan niet via de gebruikelijke manier plaatsvinden indien deze verzadigd is.

Voor de schatting van de ligging van het freatisch vlak wordt verwezen naar Bijlage 1 van het Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken [4]. Indien hiermee niet tot een oordeel kan worden gekomen wordt aanbevolen om een numerieke grondwaterstromingsmodellering uit te voeren, met de aanbeveling om deze te ijken op metingen. In de praktijk pakt Bijlage 1 van het technisch rapport nagenoeg altijd ongunstig uit.

Bijlage 1 van [4] is bedoeld als eerste veilige schatting van het verloop van waterspanningen in een dijk als gevolg van hoogwater voor de beoordeling van de binnenwaartse taludstabiliteit. In de schematiseringshandleiding voor asfaltbekledingen [5] wordt deze ook aanbevolen als eerste schatting bij de beoordeling op AGK.

Voor zanddijken op een zandondergrond en zanddijken op een cohesieve ondergrond maar met een open teen (bv steenzetting) wordt volgens Bijlage 1 van [4] uitgegaan van een freatisch vlak gelijk aan de buitenwaterstand. Een WAB bekleding als bescherming tegen golfklappen zou dan altijd een verzadigd zandbed hebben. Bij een over het hele talud gesloten bekleding op een dijk op een cohesieve ondergrond reduceert het freatisch vlak tot een halve hoogte onder de beschouwde waterstand. Op basis van Bijlage 1 van [4] kan bij een WAB bekleding als bescherming tegen golfklappen in de praktijk enkel worden uitgegaan van een verzadigd zandbed. Vanwege het conservatisme in deze eenvoudige rekenregel resteert de optie van nader onderzoek naar de werkelijke ligging van het freatisch vlak bij hoge waterstanden.

AWO

Voor het mechanisme wateroverdruk worden per watersysteem factoren gegeven waarmee het verval over de bekleding kan worden berekend [9]. Anders dan bij AGK wordt niet gekeken naar de maximale grondwaterstand, maar het maximale verval in buitenwaartse richting. Afhankelijk van de demping- en vertragingskarakteristieken van de grondwaterstand zal het grootste verval optreden als de buitenwaterstand snel daalt en de grondwaterstand onder de bekleding hierbij achterblijft. De tijdschaal van dit proces is in de orde van enkele uren (getijde/ stormopzet).

In het TR Asfalt voor Waterkeren [6] en de latere Handreiking Bekledingen deel 3 Asfalt [9] worden ontwerpwaarden voor de maatgevende grondwaterstand (MGWS) gegeven indien de doorlatendheid van het zand in de zandkern homogeen is en een doorlatendheid heeft van $1x10^{-4}$ tot $1x10^{-6}$ m/s (circa 10 m/dag tot 0,1 m/dag). Waarden voor de doorlatendheid van zand in zanddijken van 10^{-4} tot 10^{-5} zijn gangbaar, 10^{-6} m/s is voor zand zeer ondoorlatend. Bij een hogere doorlatendheid of als er bijvoorbeeld een doorlatende mijnsteenkade onder de bekleding aanwezig is wordt aanbevolen om een tijdsafhankelijke grondwaterstromingsberekening te maken. Indien de doorlatendheid lager is dan 10^{-6} m/s dan zal de grondwaterstand in de dijk de buitenwaterstand nauwelijks volgen bij een hoogwater en treedt geen verval over de asfaltbekleding op. Er hoeft dan niet naar falen door wateroverdruk te worden gekeken. De achtergrondberekeningen en overwegingen worden gegeven in [8].

De rekenwaarden voor de maatgevende grondwaterstand voor AWO worden gegeven in [6] en [9].

ASP

Bezwijken van de WAB bekleding door het ontstaan van een S-profiel wordt beschreven in de Technische Leidraden op de internetsite van IPLO. Dit mechanisme kan optreden bij een verzadigd zandbed. Beschouwd wordt de situatie waarbij het freatisch vlak onder tegen de asfaltbekleding staat op het moment van golfterugtrekking. Als hierdoor de asfaltbekleding tijdelijk een beetje wordt opgelicht migreren zandkorrels door de spleet naar beneden, waardoor de ondergrond en het asfalt vervormen. Als de vervormingen te groot worden scheurt het asfalt en breekt het uit. De bekleding faalt.

Het ASP-model beschouwt of het gewicht van de WAB bekleding plus eventueel een funderingslaag (onder voorwaarden), voldoende is om een contactdruk te houden met het onderliggende zand op het moment van golfterugtrekking. In de praktijk kan worden beredeneerd dat het freatisch vlak een stukje onder de bekleding mag oplopen, maar niet al te veel.

Opgemerkt wordt dat er geen rekening wordt gehouden met het mechanisme waarbij het verzadigde zandbed door golfklappen tijdelijk verweekt, waardoor zandmigratie leidend tot vervorming en een S-profiel kan optreden. Impliciet wordt er nog vanuit gegaan dat dit niet maatgevend is, maar een onderbouwing hiervan ontbreekt.

2.3 DOORLATENDHEID STEENZETTINGEN

Asfaltbekledingen liggen veelal boven het gemiddeld hoogwater. Lager op het talud ligt vaak een steenzetting, waarvan de doorlatendheid van invloed is op de potentiële stijging van het freatisch vlak onder de asfaltbekleding bij hoogwater.

De doorlatendheid van de steenzettingen en de funderingslagen van de steenzetting is op enkele locaties onderzocht in de jaren 80 door het COW en de Dienst Weg en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat [16], [17], [18]. De studies betreffen respectievelijk peilbuismetingen bij de Lauwersmeerdam, Brouwersdam en werkeiland Noordland. Op elk van de locaties zijn peilbuismetingen uitgevoerd. Bij de Lauwersmeerdam en Noordland zijn ook doorlatendheden van materialen bepaald, waarbij extra aandacht is besteed aan de doorlatendheid van mijnsteen. Doorlatendheden zijn bepaald met veld infiltratieproeven (steenzetting, mijnsteen en kernzand, Figuur 2.1) en in het laboratorium op geroerde en ongeroerde zandmonsters (kernzand). Een samenvatting van de gevonden resultaten wordt gegeven in Tabel 2.1.

Tabel 2.1 **Samenvatting doorlatendheden CROW studie uit de jaren 80.**

Locatie en verwijzing Locatie en type bekleding	Indicatie van de doorlatendheid (m/s)
Lauwersmeer:	
Koperslakblokken dik 0,25 m	$<10^{-5}$
Filterlaag grind 0,08 m	$0{,}7x10^{-4}$ à $1x10^{-4}$
Mijnsteen	$0{,}6x10^{-3}$
Kernmateriaal zand	Ca. 10^{-4}
Brouwersdam: (enkel peilbuismetingen)	-
Veld infiltratieproeven Noordland (0,6x0,6 m^2):	
(Haringman)blokken	$1{,}2x10^{-5}$
Zandasfalt	$0{,}7x10^{-5}$
Mijnsteen	$1x10^{-5}$ à $1x10^{-4}$
Kernmateriaal zand	2 à $3x10^{-5}$

Figuur 2.1 **Infiltroring onderzoek naar de doorlatendheid van mijnsteen (links) en Haringmanblokken (rechts) [18].**



Een belangrijke conclusie die voor de onderzoeklocaties werd getrokken is dat mijnsteen even (of meer) doorlatend was dan zand in de dijkkern. Mijnsteen is een grof materiaal, maar kan onder invloed van natte omstandigheden deels uit elkaar vallen. Ook kan er zand in de poriën spoelen, waardoor de doorlatendheid van de bulk afneemt.

Metingen en gekalibreerde grondwaterstromingsberekeningen leiden tot de conclusie dat de doorlatendheid van steenzettingen inclusief filters meestal in de orde is van 1 à 10 m/dag (10^{-5} tot 10^{-4} m/s). Enkele infiltratieproeven geven hogere doorlatendheden tot orde 30 m/dag (Hoofdstuk 3). Vanwege de kleinere tussenruimtes tussen rechthoekige blokken (koperslakblokken, Haringmanblokken) is de doorlatendheid hiervan aan de lage kant van het spectrum.

In de modelberekeningen (Hoofdstuk 4) is gevarieerd met de doorlatendheid van de bekleding lager op het talud, onder de asfaltbekleding.

2.4 DOORLATEND ZANDKERN

Asfaltbekledingen zijn veelal op een fundering van zand aangelegd en zeedijken zijn veelal opgetrokken uit zand. De doorlatendheid van het zand speelt een belangrijke rol bij de respons van het freatisch vlak in een zandlichaam onder het asfalt op een hoogwater. Daarnaast speelt de porositeit van het zand een rol.

Zand is een grondsoort waarvan minimaal 50% massa/massa een korrelgrootte heeft tussen 63 mm en 2 mm en maximaal 8% massa/massa een korrelgrootte heeft kleiner dan 2 mm. De doorlatendheid vertoont een grote variatie, afhankelijk van de korrelverdeling. In de literatuur wordt een range gevonden van 10^{-6} tot 10^{-2} m/s. De porositeit ligt ongeveer tussen 0,35 en 0,45 (-).

De grote spreiding aan doorlatendheden van zand zijn geldig voor alle in Nederland voorkomende zanden, van zeer grof tot zeer fijn. Voor dijklichamen opgetrokken uit zand is de spreiding kleiner. Vanuit laboratoriumbepalingen, correlaties met korrelverdelingen en nagerekende cases (Tabel 2.2) blijkt voor dijken de spreiding in de orde van $3x10^{-4}$ m/s tot $1x10^{-5}$ m/s waarschijnlijk. Hierbij wordt opgemerkt dat dijken met een WAB bekleding in het algemeen te maken hebben met hoge golven en vooral zijn gelegen langs de zee en estuaria. Hier is vooral fijn zand voorhanden. In het oosten en zuiden, langs de bovenrivieren is grover zand aanwezig, echter hier worden niet of nauwelijks WAB bekledingen toegepast als bescherming tegen golfaanval door storm.

Tabel 2.2 **Doorlatendheid zandkern (m/s) van diverse dijken.**

Locatie	Project	Resultaat
Waddenzeedijk Ameland	Veiligheids-beoordeling Projnr. 376710	Uniform zand, U 1,3 à 1,5 d_{10} 130 à 150 mm ; 8 bepalingen range k = 1,6 à 2,3 $x10^{-4}$ m/s
Waddenzeedijk Terschelling	Veiligheids-beoordeling Projnr. 376710	Uniform zand, U 1,3 à 1,7 d_{10} 100 à 140 mm; 8 bepalingen k circa 2 $x10^{-4}$ m/s
Waddenzeedijk Friesland	Infiltratieproef Boonweg Projnr. 423891/ 1001187	• 9 bepalingen korrelverdeling, uit correlatie 0,9$x10^{-5}$ m/s • Inverse-modellering van buis infiltratiemeting circa 2 à 3$x10^{-5}$ m/s. • Laboratorium onderzoek 0,5$x10^{-5}$ m/s
Afsluitdijk	Infiltratieproef Projnr. 1001189	Laboratoriumproeven op zand met verschillende pakkingen (los/ midden/ vast) Range 0,9$x10^{-4}$ à 2$x10^{-4}$ m/s
Vechtdijk	Overslagproef zanddijk Projnr. 1201541	• 4x buis- Infiltratieproeven, range 0,9$x10^{-5}$ à 0,8$x10^{-4}$ m/s, gemiddeld 0,4$x10^{-4}$ m/s • Laboratoriumproeven op verschillende pakkingen, range 0,8$x10^{-4}$ à 3$x10^{-4}$ m/s
Lauwersmeerdijk	COW 486394	• Zanddepot "Bantswal" diverse lab-proeven orde 1$x10^{-4}$ m/s • Zand uit Eems orde 0,4$x10^{-4}$ à 1$x10^{-4}$ m/s
Werkeiland Noordland	COW 111307	• 2x Infiltratieproef met bak 2$x10^{-5}$ en 3$x10^{-5}$ m/s • Laboratoriumproeven geroerde monsters 1,3$x10^{-4}$ à 2,6$x10^{-4}$ m/s • Laboratoriumproeven ongeroerde zandmonsters 1,2$x10^{-7}$ à 0,6$x10^{-5}$ m/s (lage k wordt geweten aan sliblensjes, aanwijzing voor veel slechtere verticale doorlatendheid dan horizontale doorlatendheid)
Balgzanddijk, Amsteldiepdijk en Wieringer zeewering	[19]	• Boorgat doorlatendheidmetingen 0,8$x10^{-4}$ m/s tot 3$x10^{-4}$ m/s.

Naast de (verzadigde) doorlatendheid en de porositeit van het zand heeft ook de capillaire werking van het zand invloed op de waterhuishouding in de dijk. Het freatisch vlak is het vlak waarop de waterdruk in de poriën gelijk is aan de atmosferische druk. Ook boven het freatisch vlak bevindt zich (stromend) water in de poriën. De stroming en berging van water boven het freatisch vlak kunnen worden gemodelleerd met de zogenaamde Van Genuchten relaties tussen de verzadiging en de (zuig)spanning en tussen de verzadiging en de doorlatendheid. Een lage verzadiging geeft een hoge zuigspanning en een lage doorlatendheid. De relatie tussen verzadiging en zuigspanning wordt weergegeven in de zogenaamde soil water retention curve (SWRC). Mathematisch kan de curve worden benaderd door bijvoorbeeld het Van Genuchten model, zoals onderstaand in Plaxis is opgenomen [15].

$$S = S_{res} + (S_{sat} - S_{res})\left[1 + \left(g_a \left|h_p\right|\right)^{g_n}\right]^{g_c}$$

$$\text{Effectieve verzadiging } S_e = \frac{S - S_{res}}{S_{sat} - S_{res}}$$

$$k_{rel} = \left(S_e\right)^{g_l}\left(1 - \left[1 - S_e^{\left(\frac{g_n}{g_n - 1}\right)}\right]^{\left(\frac{g_n - 1}{g_n}\right)}\right)^2 \quad \text{en } k_{rel} > 10^{-4}$$

Waarin:

S verzadiging (-).

h_p zuigspanning (meter waterkolom).

S_{res} Residuele verzadiging bij zeer hoge zuigspanning (-).

S_{sat} Verzadiging bij atmosferische druk (-).

g_a fitparameter (1/m).

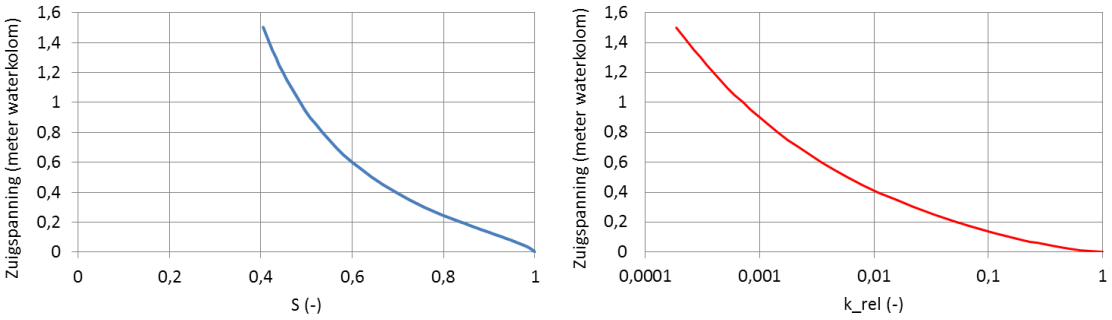
g_c fitparameter, in Plaxis berekend uit g_n (-).

g_n fitparameter (-).

g_l fitparameter (-).

In Figuur 2.2 staat een voorbeeld van de relaties voor fijn zand met de parameters S_{res} = 0,01 (-), S_{sat}=1 (-), g_a= 4 (1/m), g_n=1,5, g_l=1 en g_c=-0,33.

Figuur 2.2 **Voorbeeld relaties tussen zuigspanning (meter waterkolom) en verzadiging S (-) (links) en relatieve doorlatendheid k_{rel} (rechts).**



In de modelberekeningen (Hoofdstuk 4) is gevarieerd met de doorlatendheid van zand en met de parameters voor onverzadigde stroming.

2.5 GRONDWATERSTROMINGSBEREKENINGEN DIVERSE DIJKEN COW JAREN 80

Door het COW (Centrum voor Onderzoek Waterkeringen) is midden jaren tachtig onderzoek uitgevoerd naar de grondwaterstand onder asfaltbeton bekledingen op zanddijken tijdens stormvloedomstandigheden [20]. Bij dijkbeheerders zijn gegevens opgevraagd van bestaande dijken met een asfaltbekleding. Door middel van elektrische analogonmodellen (https://nl.wikipedia.org/wiki/ELNAG) konden tijdsafhankelijke grondwaterstromingen worden gemodelleerd. Het analogon bestond uit een netwerk van weerstanden en condensatoren. Het beschikbare elektrische analogon kon niet voor elke dijk in detail worden aangepast. Zo was bijvoorbeeld de taludhelling van het buitentalud constant. De doorlatendheid van de dijk en eventueel variabiliteit hierin (kleikern, dichte teenconstructies, damwandconstructies) konen wel worden aangepast, evenals de hoogteligging van de dichte asfaltbeton

bekleding op het buitentalud. Als randvoorwaarde is een aantal getijdeslagen opgelegd (in-slingeren van het systeem), gevolgd door een stormopzet met een maximale waterstand van NAP + 5 m. De rapportage van het onderzoek is beknopt, niet alle uitgangspunten zijn in detail beschreven. Er wordt vermeld dat soms enigszins conservatieve aannames zijn gedaan op het moment dat het analogon niet exact kon worden aangepast naar de door de beheerder aangeleverde situatie.

Over de doorlatendheid van het dijkzand wordt opgemerkt dat deze zelden locatie specifiek bekend was. Besloten is om voor de doorlatendheid uit te gegaan van een gemiddelde waarde van 10^{-4} m/s, waarbij als variatie is gekeken naar een factor 2 hogere en een factor 2 lagere doorlatendheid ($0{,}5x10^{-4}$ m/s en $2x10^{-4}$ m/s).

De resultaten uit het onderzoeksrapport [20] zijn overgenomen in Bijlage A. Voor 38 dijkvakken is een representatief profiel beschouwd en is berekend wat de stijging van het freatisch vlak onder de asfaltbekleding is als gevolg van een stormvloed. Er wordt onderscheid gemaakt in 3 soorten dijken:

- 22 dijkvakken waarvan de onderrand van de asfaltbekleding boven een open teen ligt. Onderrand asfalt ligt op ca. NAP + 1,2 m tot NAP + 3 m.
- 3 dijkvakken waarbij de asfaltbekleding bij de teen van de dijk begint.
- 13 dijkvakken waarbij een ontwerp is toegepast waarbij de teen gesloten is. De asfaltbeton bekleding sluit aan op een dichte constructie, het buitenwater kan dan niet in de dijk en er komt geen water onder het asfalt. De rapportage vermeldt logischerwijs dat deze conclusie afhankelijk is van de werking van dit ontwerp en er dus geen verzakkingen en/ of scheuren optreden die de teen doorlatend maken.

Uit het COW onderzoek blijkt dat bij veruit de meeste dijken, zonder afgesloten teenconstructie (25 van 38 dijkvakken), de grondwaterstand tot onder het asfalt komt. Meestal was deze zone beperkt zijn tot ongeveer 0,8 à 1,0 m boven de onderzijde van de asfaltbekleding. Soms werden hogere waarden dan 0,8 à 1 m gevonden. Dit was bij dijken waarbij de asfaltbeton bekleding begint bij de teen en dijken en waarbij een oude kleikern aan de buitenzijde met zand is versterkt (zandscheg buitenzijde). Het zandlichaam tussen de bekleding en de oude kleikern kan zich in dat geval snel vullen met water, het water draineert niet de dijk in.

3

METINGEN EN BEREKENINGEN WADDENZEE-DIJKEN FRIESLAND EN NOORD HOLLAND

3.1 INLEIDING

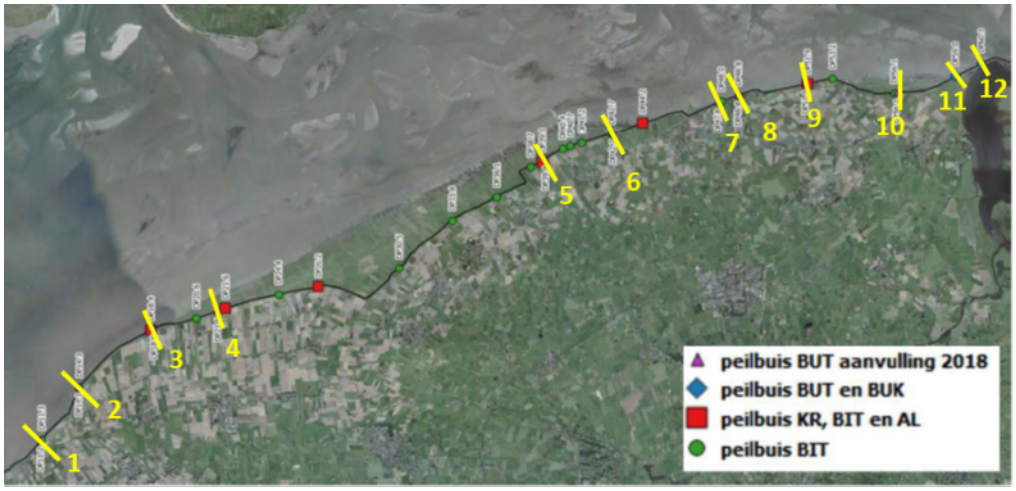
In het kader van de veiligheidsbeoordeling zijn in de Waddenzeedijken van Friesland en Noord-Holland waterspanningsmetingen verricht. Tijdens de metingen, op 8 januari 2019, is er een hoogwater opgetreden. De metingen, de analyse en de conclusies zijn door de betreffende waterschappen Wetterskip Fryslân en Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier beschikbaar gesteld. Een uitgebreide samenvatting van de metingen is opgenomen Bijlage B en C.

Tijdens de stormconditie van januari 2019 werden bij 23 raaien metingen uitgevoerd, 11 bij Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier en 12 bij Wetterskip Fryslân (Figuur 3.1 en Figuur 3.2).

Figuur 3.1 **Meetraaien Waddenzeedijken Noord Holland.**



Figuur 3.2 **Meetraaien Waddenzeedijken Friesland.**



Voor een groot aantal van deze raaien zijn ook 2D grondwaterstromingsberekeningen uitgevoerd. Er is een geotechnische schematisering van de dwarsprofielen opgesteld aan de hand van het uitgevoerde grondonderzoek. Per raai c.q. dwarsprofiel zijn in het algemeen meerdere boringen uitgevoerd, waardoor de grondlaagschematisering in het dwarsprofiel relatief gedetailleerd is.

De eerste stap in de analyses was het kalibreren van het grondwaterstromingsmodel op de metingen tijdens de stormconditie. De verschillende doorlatendheden van grondlagen zijn hierbij gebruikt als kalibratieparameters. Dit is conform de aanbevelingen in [4]. Daarna zijn in het op deze wijze gekalibreerde model de ontwerp stormcondities als randvoorwaarde ingevoerd en is gekeken naar de ontwikkeling van de waterspanningen in de dijk, waaronder de ligging van het freatisch vlak onder het buitentalud.

In 2023 zijn de analyses voor het dijkgedeelte tussen Den Helder en Den Oever opnieuw beschouwd. Er zijn geen nieuwe metingen uitgevoerd, maar er zijn aanvullende berekeningen met Plaxis uitgevoerd. Daarnaast zijn in 2023 metingen en grondwaterstromingsanalyses uitgevoerd voor de Helderse Zeewering [29]. Tijdens de meetperiode waren er (helaas) geen uitzonderlijke stormcondities. De hier aanwezige steenbekleding op het ondertalud is maar gedeeltelijk onder water geweest.

Tenslotte zijn in het kader van deze studie peilbuismetingen in de Lauwersmeerdijk nagerekend met Plaxis. De metingen zijn uitgevoerd in de jaren ’80 en betreffen de respons op een normaal getijde. De resultaten staan in detail gerapporteerd in Bijlage 6.2DD.

3.2 SAMENVATTING ANALYSES WADDENZEEDIJKEN NOORD HOLLAND STORM 2019

Voor de dijken tussen Den Helder en Den Oever treedt een wisselend beeld op van de indringing van een verhoogd freatisch vlak in de dijk bij hoge waterstanden. In het noordelijke deel van de Balgzanddijk (Raai 1, 2 en 3) is de respons van het freatisch vlak op het hoogwater zeer gering In het Zuidelijke deel van de Balgzanddijk en de Amsteldiepdijk is de respons hoog (Raai 4 tot en met 7) en de respons van de Wieringer Zeewering (Raai 8 tot en met 11) ligt hier tussenin.

De waterstand bij de norm leidt voor 4 van de 11 raaien tot een voorspelling van de grondwaterstand die aan de onderzijde tegen het asfalt komt. Die voorspelling geldt voor de situatie van dijk en voorland zoals aanwezig tijdens de stormconditie waarop is gekalibreerd.

De respons van het freatisch vlak in de kern van de dijk is in hoge mate afhankelijk van de hydraulische weerstand tussen het buitenwater en de zandkern van de dijk. Deze weerstand is afhankelijk van de doorlatendheid van de bekleding onder het asfalt (op het ondertalud), de weerstand van het voorland en de doorlatendheid van het dijkzand zelf. Ook de (on)mogelijkheid tot binnenwaartse drainage heeft invloed op de respons van het freatisch vlak onder het buitentalud. Dit kan bijvoorbeeld worden veroorzaakt door een oude kleikern in de dijk (Raai 7 met een hoge respons).

Geconcludeerd wordt dat zonder metingen van de respons tijdens de storm, niet betrouwbaar kon worden bepaald waar de respons van het freatisch vlak hoog of laag zou zijn. Ofwel waar de bekleding onder de asfaltbekleding en het voorland relatief ondoorlatend of juist

doorlatend waren. Metingen voor de kalibratie van een grondwaterstromingsberekening bleken essentieel voor een betrouwbare voorspelling.

Zie Bijlage B en rapportages [22], [23], [24] en [29] voor de achtergrond en een gedetailleerde beschrijving van het onderzoek.

3.3 SAMENVATTING ANALYSES WADDENZEEDIJKEN FRIESLAND STORM 2019

De uitgebreide meetcampagne levert ook hier een gevarieerd beeld van de respons van de grondwaterstand in de zandkern. Tijdens de meetcampagne, op 8 januari 2019, is een bijzonder hoogwater opgetreden, waarbij het water tegen de dijk stond.

Uit de analyse blijkt dat zowel de respons op hoogwater als de ligging onder dagelijkse omstandigheden van het freatisch vlak belangrijk zijn voor het al dan niet bereiken van de onderrand van het asfalt door het freatisch vlak onder normcondities. Slechts voor 3 van de 12 locaties leidt het onderzoek tot de conclusie dat onder normcondities het freatisch vlak de onderrand van het asfalt niet bereikt. Voor alle overige locaties is de conclusie dat hiermee wel rekening moet worden gehouden.

De onderzoeksresultaten duiden op een relatie tussen de aanwezigheid van voorland en de respons van het freatisch vlak in de zandkern op hoogwater. Hoog voorland leidt vaak tot een verminderde respons. Anderzijds leidt hoog voorland vaak tot een hoger freatisch vlak onder dagelijkse omstandigheden, wat kan worden verklaard door een hogere opbolling door neerslag. Het ligt dus niet altijd voor de hand dat een hoog voorland gunstig is ten aanzien van de verwachtte ligging van het freatisch vlak onder het asfalt onder normcondities. Ook de eventuele aanwezigheid van een oude kleikern in de dijk, die regulerend werkt op de binnenwaartse drainagemogelijkheid heeft invloed op de ligging van het freatisch vlak. Beide effecten zijn echter zonder peilbuismetingen en grondonderzoek niet met voldoende detailniveau te bepalen.

Geconcludeerd wordt dat zonder het uitvoeren van peilbuismetingen en de analyse hiervan geen betrouwbare voorspelling kon worden gedaan over de ligging van het freatisch vlak onder normcondities. Meten en analyseren bleek ook hier noodzakelijk. Waarbij opgemerkt wordt dat zelfs met metingen en analyses dit lastig is en soms moet worden teruggegrepen op eenvoudiger maar conservatievere modellering.

Zie Bijlage C en rapportage [21] voor de achtergrond en een gedetailleerde beschrijving van het onderzoek.

3.4 HELDERSE ZEEWERING

De Helderse zeewering betreft ca. 5,5 km dijk met een bekleding van waterbouwasfaltbeton. De bekleding bevindt zich tussen een niveau van circa NAP +2 m à NAP +2,5 m (onderzijde) tot NAP + 5 m à NAP +5,75 m (bovenzijde). De asfaltbekleding ligt op een doorlatende zandkern, waardoor er water onder het asfalt kan komen. Ook de ondergrond bestaat tot een diepte van circa NAP -5 m uit zand. Daaronder bevindt zich een afsluitende klei en veenlaag. Onder de asfaltbekleding bevindt zich een waterdoorlatende steenzetting, soms op een mijnsteenkade [29].

In de periode december 2022 tot en met maart 2023 zijn waterspanningsmetingen uitgevoerd in 30 peilbuizen verdeeld over 11 raaien. De maximale waterstand tijdens deze periode was circa NAP +1,5 m, dat is lager dan de onderrand van het asfalt. De getij-amplitude was in de orde van 1,4 m. De peilbuizen onder de asfaltbekleding gaven een respons variërend van enkele cm's tot circa 0,15 m. De gemiddelde grondwaterstand onder de asfaltbekleding lag veelal enkele decimeters boven NAP.

De waterspanningsmetingen zijn gebruikt om grondwaterstromingsmodellen te kalibreren voor drie van de 11 raaien. Opmerkelijk was dat hiervoor de doorlatendheid van de basaltbekleding moest worden aangepast naar 0,1 m/dag (ca. 10^{-6} m/s). Dit is orden lager dan voor een (schone) steenzetting werd gevonden in de literatuur (Paragraaf 2.3). Zeer waarschijnlijk zijn de spleten tussen de stenen en mogelijk het onderliggende filter ingezand.

Geconcludeerd is dat er niet zondermeer vanuit moet worden gegaan dat deze hoge weerstand overal aanwezig is en blijft. De mogelijkheid bestaat dat de inzanding vooral laag op het talud is opgetreden en dat de doorlatendheid hoger op het talud aanzienlijk hoger kan zijn. Dit laatste wordt bevestigd door indicatieve metingen van de doorlatendheid van de basaltbekleding. Hieruit blijkt een grote variabiliteit en een soms veel hogere doorlatendheid.

3.5 SAMENVATTING LAUWERSMEERDIJK

In het kader van deze studie zijn peilbuismetingen in de Lauwersmeerdijk nagerekend met Plaxis. De metingen zijn uitgevoerd in de jaren '80 en betreffen de respons op een normaal getijde.

De peilbuismetingen in de Lauwersmeerdijk laten zich relatief goed narekenen, indien de doorlatendheden en schematisering van verschillend grondlagen en bekleding worden aangepast ten opzichte van de eerste aannames uit het veld- en laboratoriumonderzoek.

De dijk betreft een zanddijk op een zandondergrond met een blokkenbekleding laag op het talud en daarboven een asfaltbekleding.

In het met de metingen afgeregelde model leidt een stormvloed net aan tot verzadiging van het zandbed onder de asfaltbekleding, echter treedt dit niet op in de zone waar golfklappen worden verwacht. Indien zou worden uitgegaan van het model op basis van alleen het beschikbare veld- en laboratoriumonderzoek (zonder het model af te regelen op de peilbuismetingen) dan volgt een veel ongunstiger modeluitkomst en komt het freatisch vlak wel onder het asfalt in de golfklapzone.

De analyses staan in Bijlage D.

3.6 SAMENVATTING VELDMETINGEN EN GEKALIBREERDE MODELLEN

Voor het betrouwbaar modelleren van de respons van het freatisch vlak in de dijk op hoogwater blijken peilbuismetingen onmisbaar voor de kalibratie van een grondwaterstromingsmodel. Grondwaterstromingsmodellen die enkel gebaseerd worden op een bij benadering verwachtte dijkopbouw en geschatte doorlatendheden zullen zelden leiden tot een betrouwbaar resultaat bij normcondities. De schatting van doorlatendheden gaat veelal over orden van

grootte, hetgeen een behoorlijke invloed heeft op de hoogte van het freatisch vlak onder een asfaltbekleding,

Samenvattende observaties:

- Bij ruim 50% van de aangeleverde beschouwde profielen wordt op basis van gekalibreerde modellen uitgegaan van een freatisch vlak onder de asfaltbekleding.
- Peilbuismetingen en modelkalibratie leidde tot flinke aanpassingen van de in eerste instantie geschatte doorlatendheden (tot meer dan een orde). En/of het invoegen van lagen met een hogere / lagere doorlatendheid in de geometrie.
- Bepalend voor de respons onder het asfalt zijn:
  - Doorlatendheid bekleding ondertalud/ steenzetting. Al dan niet ingezand/ dichtgeslibd. Over de hele hoogte, of enkel onderaan.
  - Doorlatendheid dijkzand.
  - Blokkade c.q. oude kleikern binnenwaarts in de dijk.
  - Aansluiting dijkzand op zandondergrond (doorlatend) of cohesieve ondergrond (ondoorlatend).
  - Voorlandhoogte en doorlatendheid (klei/ zand).
    - In veel gevallen ligt de dijk en/of het bovenste zandpakket op een aaneengesloten klei en of veenlaag. Wat daar onder ligt heeft nauwelijks invloed op de hoogte van het freatisch vlak onder de asfaltbekleding. Grondlagen hier onder hoefden niet te worden gekalibreerd. De bovenzijde van deze laag kan dan als ondoorlatende laag worden geschematiseerd.
    - Bij de HHNK studie (Bijlage B) is geconstateerd dat doorlatendheden van het dijkzand op basis van boorgat Falling head testen goed aansloten op de gekalibreerde doorlatendheden. Terwijl k-waarden op basis van correlaties met korrelverdelingen structureel te laag waren (te weinig doorlatend).
    - Een hoog freatisch vlak onder normcondities wordt voorspeld bij zowel 1) een hoge gemeten respons als 2) een lage respons in combinatie met een hoge ligging van het freatisch vlak onder dagelijkse omstandigheden. Dat laatste komt bijvoorbeeld voor hoge voorlanden. Het hoge voorland levert weerstand bij indringing van buitenwater in de dijk en ondergrond, maar verhindert drainage vanuit de dijkskern naar buiten waardoor het freatisch vlak kan oplopen door neerslag. Ook weinig doorlatende perskaden waartussen het zandlichaam van de dijk is opgespoten leiden tot een verhoging van het freatisch vlak door neerslag.

4

MODELBEREKENINGEN

4.1 INLEIDING

Voor verschillende scenario's van dijkopbouw, ondergrond, bekledingen en hoogwaters, zijn grondwaterstromingsberekeningen gemaakt met het grondwaterstromingsmodel in softwarepakket PLAXIS. Het doel was om inzicht te krijgen in de invloedsfactoren voor het oplopen van de freatische lijn tijdens een hoogwater tot onder de asfaltbekleding, aanvullend op het in H3 gegeven areaal van Waddenzeedijken. Met deze inzichten wordt geprobeerd de conservatieve aannames over het freatisch vlak uit het Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken aan te scherpen.

De verschillende berekende scenario's zijn fictief, maar bedoeld als realistisch en karakteriserend voor veel van de in Nederland voorkomende situaties (archetypes)

In de jaren 80 zijn door het COW eveneens modelberekeningen gemaakt voor door waterkering beheerders aangeleverde dwarsprofielen met een elektrisch analogon. Deze worden kort beschreven in Paragraaf 2.5 en Bijlage A.

4.2 BESCHRIJVING REKENMODEL

Er is gebruik gemaakt van softwarepakket PLAXIS 2D, Versie 22.00.00.1733. Achtergrondinformatie over de rekenprocedures en formules wordt gegeven in de handleiding (versie CONNECT Edition V22.00 laatste update: December 14, 2021).

Er is gebruik gemaakt van de rekenoptie 'transient groundwater-flow' voor tijdsafhankelijke, 2-dimensionale (2D) grondwaterstroming, zowel in de verzadigde zone, als in de onverzadigde zone. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de Van Genuchten relaties tussen verzadiging, (zuig-)spanning en doorlatendheid. Er is gebruik gemaakt van 15-knoops elementen.

De 2D geometrie van ondergrond en dijk wordt opgebouwd uit polygonen die elk andere doorlatendheidseigenschappen kunnen worden toegekend. De polygonen kunnen tevens worden verwijderd (uitgezet) of ondoorlatend worden gemaakt.

Rondom de 2D geometrie worden randvoorwaarden opgegeven. Aan de onderzijde is de geometrie gesloten. Aan de polderzijde wordt een vast polderpeil opgelegd, zowel ter plaatse van de teensloot als op de verticale rand van het model. Aan de waterzijde wordt de tijdsafhankelijke randvoorwaarde opgelegd, eveneens op het maaiveld of voorland voor zover dat onder water staat, als op de verticale modelrand. In het geval er sprake is van een getijde, wordt voorafgaand aan het hoogwater enkele dagen een getijde gemodelleerd om tot een stabiele uitgangssituatie te komen voorafgaand aan de stormopzet.

Het dijkgedeelte boven polderpeil en boven de buitenwaterstand hebben de randvoorwaarde:

- Seepage — droog oppervlak, vrije uitstroom van grondwater eventueel mogelijk (modeluitkomst).
- Infiltration — voor modelleren van neerslag of een nat oppervlak als gevolg van golfoploop en golfoverslag.

Er wordt bij de randvoorwaarde 'infiltration' een intrededebiet opgelegd en een limitering aan de druk op het oppervlak dat nodig is voor het bereiken van het debiet. Bij het modelmatig simuleren van neerslag is het opgelegde debiet relatief laag ten opzichte van de doorlatendheid van de grond (zand of bekledingslagen van klei met een ontwikkelde bodemstructuur). In dat geval wordt geen aandacht besteed aan de limitering van de druk. Bij het modelmatig simuleren van infiltratie door golfoploop en golfoverslag is juist een relatief hoog debiet ingevuld, van gelijke orde van grootte als de verzadigde doorlatendheid. Hierbij is de maximale druk gelimiteerd tot 0,05 m waterkolom. Dit komt overeen met een randvoorwaarde waarbij een waterlaagje van 0,05 m op het oppervlak aanwezig is. Het werkelijke infiltratiedebiet wordt in dat geval bepaald door de doorlatendheidseigenschappen van de grond.

De asfaltbekleding is geschematiseerd als een ondoorlatende randvoorwaarde op het taludoppervlak. De bovenzijde van de asfaltbekleding is boven de hoogste waterstand gekozen. De ligging van de onderzijde van de asfaltbekleding is gevarieerd.

4.3 INVLOEDSFACTOREN EN SCENARIO'S

Het al dan niet oplopen van het freatisch vlak onder het asfalt is afhankelijk van diverse factoren die kunnen worden onderverdeeld naar factoren met betrekking tot de hydraulische belasting, geometrische factoren (maaiveld, grondlaag- en dijkopbouw) en factoren met betrekking tot de grond en doorlatendheidseigenschappen hiervan.

De volgende factoren zijn door middel van een variatiestudie met modelberekeningen onderzocht:

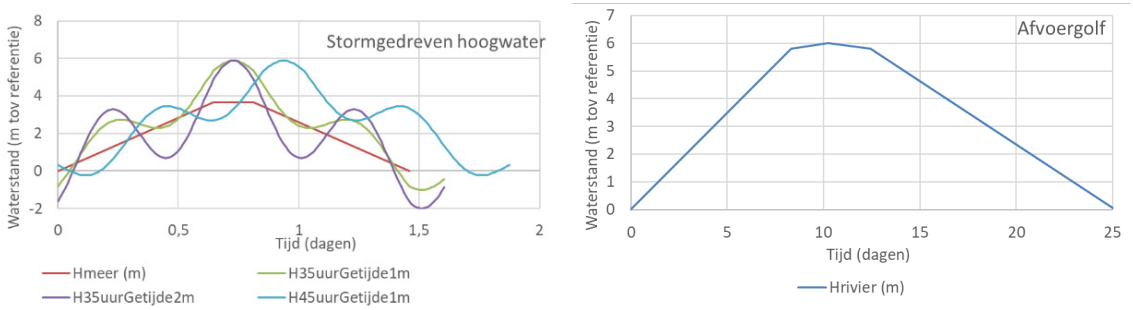
1. Duur van het hoogwater (stormduur 35 uur, 45 uur en hoogwatergolf op de rivieren).
2. Amplitude van het getijde langs de kust bij stormvloed gedreven hoogwaters.
3. Neerslag.
4. Optreden van golfoploop en golfoverslag.
5. Taludhelling buitentalud (1:3 en 1:4); binnentalud 1:3; dijkhoogte 6 m en 10 m.
6. Aanwezigheid voorland en ondoorlatende slib en of kleilagen op voorland.
7. Aanwezigheid en doorlatendheid van een (klei)bekleding boven en onder de asfaltbekleding.
8. Hoogte van de onderrand van de asfaltbekleding.
9. Doorlatendheid van de zandkern.
10. Doorlatendheidsparameters onverzadigde zone.
11. Aanwezigheid van een kleikern in het zandlichaam van de dijk.
12. Aanwezigheid van een relatief ondoorlatende kleilaag onder de zandkern.

De variatiestudie was niet systematisch dekkend. Een typische zeedijkgeometrie stelde we bijvoorbeeld niet bloot aan een (rivier-)afvoergolf. De invloed van onverzadigde parameters is niet voor alle, maar slechts voor twee berekeningen gevarieerd. Hetzelfde geldt voor het meenemen van infiltratie door golfoploop en golfoverslag. Het aantal berekeningen was beperkt tot circa 120.

Ad 1 Duur van het hoogwater

Het hoogwater is als randvoorwaarde opgelegd aan de buitenzijde van de dijk, op het talud, het voorland indien aanwezig en de hele verticaal van de buitenwaartse modelrand tot aan de ondoorlatende basis. Er zijn 5 hoogwater scenario's beschouwd (Figuur 4.1). Het hoogwater is gegeven in meters ten opzichte van een referentieniveau dat gelijk ligt aan de buitenteen van de dijk. De storm gedreven hoogwaters hebben een tijdschaal van enkele dagen, de afvoergolf van tientallen dagen.

Figuur 4.1 **Scenario's waterstandsverloop (m tov ref) tegen tijd (dagen) voor storm gedreven hoogwater (links) en voor een afvoergolf op de rivieren (rechts)**



Ad 3 Neerslag

Neerslag voorafgaand aan een hoogwater zorgt potentieel voor een hogere aanvangshoogte van het freatisch vlak in de dijk en daarmee een grotere kans dat het zandbed onder het asfalt verzadigd. Er is gekeken naar meerdere scenario's:

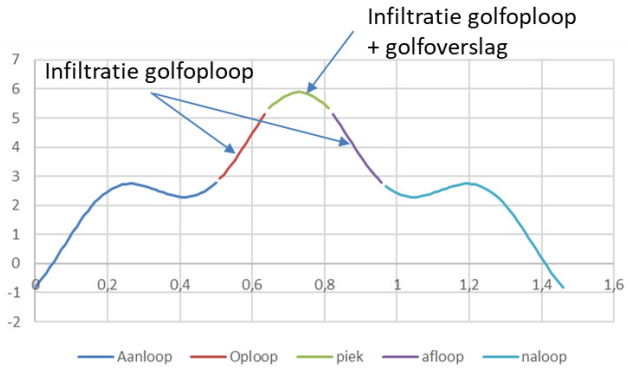
- Geen neerslag.
- Stationair 365 mm/jaar (het gemiddelde neerslagoverschot per jaar).
- Verdeeld over twee seizoenen droog/nat; zie ook Paragraaf 4.5.4.
- Diverse buien/ regenperiodes met een duur tot 8 uur overgenomen uit de neerslagstatistieken in [26].

Verschillende neerslagscenario's zijn meegenomen als variant bij de verschillende watersysteemvarianten. In Paragraaf 4.5.4 is daarnaast specifiek ingegaan op de invloed van neerslag op het freatisch vlak.

Ad 4 Golfoploop en golfoverslag

Infiltratie door golfoploop en golfoverslag zorgt voor een aanvullend wateraanbod op de dijk, waardoor het freatisch vlak in potentie sneller kan stijgen en er een grotere kans is dat het zandbed onder het asfalt verzadigd raakt tijdens een hoogwater. Infiltratie door golfoploop en golfoverslag is gemodelleerd bij het scenario met een storm gedreven hoogwater met getijde. Gedurende een deel van de storm is infiltratie door golfoploop gemodelleerd tussen de bovenzijde van de asfaltbekleding en de kruin. Gedurende de piek van de storm is daarbij infiltratie gemodelleerd op de kruin en het binnentalud van de dijk (Figuur 4.2).

Figuur 4.2 **Voorbeeld tijdsintervallen gedurende een hoogwaterverloop waarbij infiltratie door golfoploop en golfoverslag wordt gemodelleerd.**

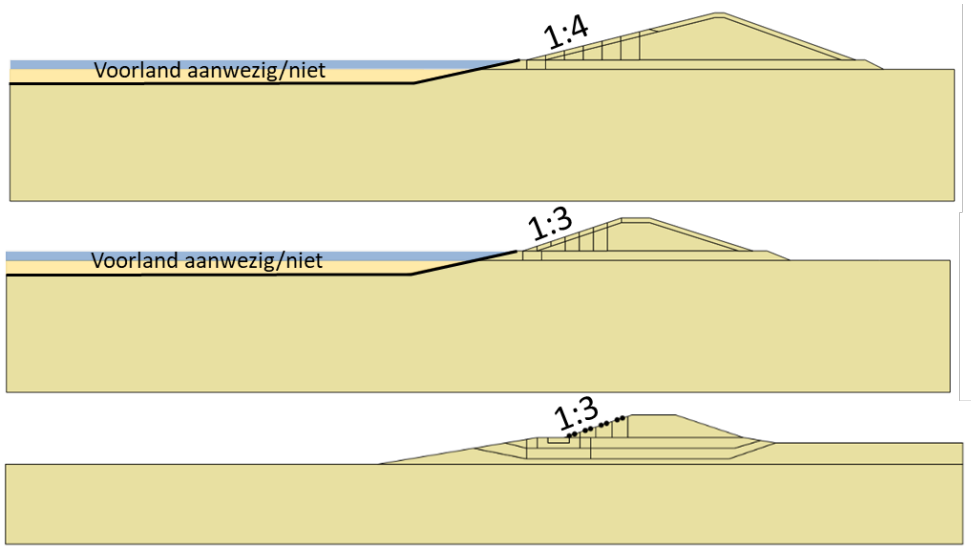


Gedurende de perioden met infiltratie wordt een waterlaagje van 0,05 m gemodelleerd. Het infiltratiedebiet is afhankelijk van de doorlatendheid van de grond en aldus een modeluitkomst.

Ad 5, 6 en 7 Geometrie en dijkopbouw

Er zijn berekeningen gemaakt met drie basis geometrieën (Figuur 4.3).

Figuur 4.3 **Geometrievarianten (buitenwater links, polder rechts; 10 m hoge (zee-)dijk boven en 6 m hoge dijk midden en 4,25 m hoge (meer-)dijk onder)**



In elk van deze basisgeometrieën kunnen de polygonen, weergegeven door de zwarte lijnen, andere doorlatendheidseigenschappen krijgen. Zo wordt gemodelleerd of een polygoon eigenschappen heeft van zand of van klei en welke doorlatendheid, porositeit en Van Genuchten parameters hierbij horen.

Ad 8 Hoogte onderrand asfalt

Hoe hoger de onderrand van het asfalt hoe korter de waterstand boven de onderrand uit komt en hoe groter het effect van binnenwaartse drainage wordt. Logischerwijs leidt tot een kleinere kans dat het zandbed verzadigd raakt. Er zijn diverse berekeningen uitgevoerd met verschillende hoogtes van de onderrand.

Ad 9 Doorlatendheid zandkern

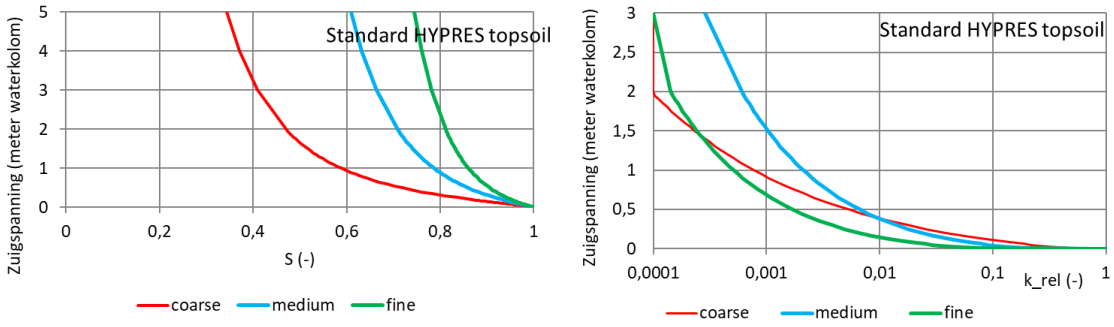
Hoe doorlatender de zandkern, hoe makkelijker het freatisch vlak in de dijk indringt, waardoor het zandbed onder de asfaltbekleding eerder verzadigd raakt. Anderzijds zien we dat een lagere doorlatendheid leidt tot een slechtere drainage en daarmee een hoger freatisch vlak als gevolg van neerslag. Er zijn diverse berekeningen gemaakt met een kerndoorlatendheid van 10^{-5} tot 10^{-3} m/s (gemiddeld heeft zand een doorlatendheid rondom 10^{-4} m/s.

Ad 10 Doorlatendheidsparameters onverzadigde zone

De relaties tussen verzadiging, doorlatendheid en (zuig)spanning zijn gevarieerd. In Plaxis zijn diverse standaard relaties beschikbaar welke zijn overgenomen uit datasets uit de literatuur, bijvoorbeeld HYPRES (Hydraulic Properties of European Soils).

Als voorbeeld worden enkele van de gebruikte relaties gegeven in Figuur 4.4. Voor de Van Genuchten parameters wordt verwezen naar de Plaxis handleiding tabellen 10 tot en met 14 [28].

Figuur 4.4 **Relaties verzadiging S (-) en zuigspanning (meter waterkolom) en zuigspanning en relatieve doorlatendheid k_rel (-) voor HYPRES top soil coarse, medium en fine [28].**



Ad 11 Aanwezigheid kleikern in de dijk

Dijken zijn veelal met verloop van jaren tot zelfs eeuwen opgebouwd en uitgebouwd. Regelmatig komt de situatie voor dat kleidijken zijn versterkte met zandlichamen met een bekleding. De oude kleidijk zit dan nog verwerkt in het nieuwe profiel. De kleikern is in potentie één of twee orden minder doorlatend dan zand, waardoor er invloed is op de hydrologie in de dijk. De kern hindert drainage waardoor het freatisch vlak sneller kan oplopen. Dit is bij enkele gevallen als variant meegenomen.

Ad 12 Aanwezigheid waterremmende laag onder de dijk

Veruit de meeste dijken zijn gebouwd op afzettingen van klei en of veen. Zelfs als deze natuurlijk afgezette klei of veenlaagjes dun zijn, dan zijn ze orden minder doorlatend dan het zand in de dijkkern. In enkele gevallen ligt de dijk echter ook op zand en ontbreekt een dergelijke waterremmende laag. Hierdoor kan in potentie de dijk makkelijker/ sneller vollopen met water. Dit is voor een paar gevallen als variant meegenomen.

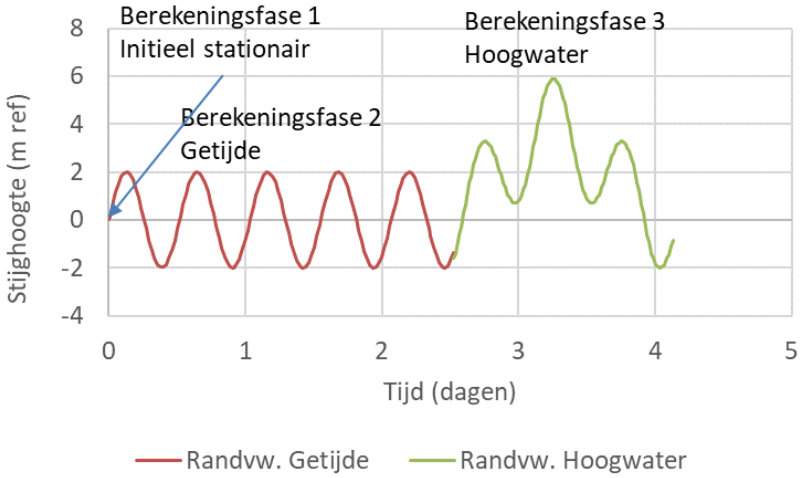
4.4 VOORBEELD BEREKENINGSRESULTAAT

Deze paragraaf geeft een gedetailleerd beeld van de berekeningsresultaten voor één voorbeeld. Verdere berekeningsresultaten worden gepresenteerd als één uitvoerparameter, namelijk de hoogste ligging van het freatisch vlak onder de asfaltbekleding ten opzichte van de onderrand van de asfaltbekleding tijdens een gemodelleerd hoogwater.

Het voorbeeld betreft een zanddijk op een zandondergrond met een verzadigde doorlatendheid van $1x10^{-4}$ m/s en een geometrie volgens de bovenste afbeelding in Figuur 4.3, zonder voorland. Het hoogwater bestaat uit een stormopzet met een getijdeslag van 4 m (amplitude 2 m). De onderrand van het asfalt ligt op ref. + 2,5 m.

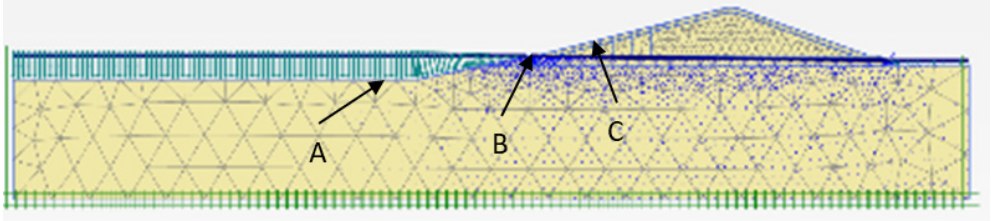
Een berekening bestaat uit twee fasen als er geen getijde is of uit drie fasen als er wel getijde is. De randvoorwaarde aan de buitenzijde als geschematiseerde waterstand tijdens drie berekeningsfasen voor een berekening met getijde wordt gegeven in Figuur 4.5.

Figuur 4.5 **Randvoorwaarde buitenzijde van het model bij een getijde met amplitude van 2 m.**



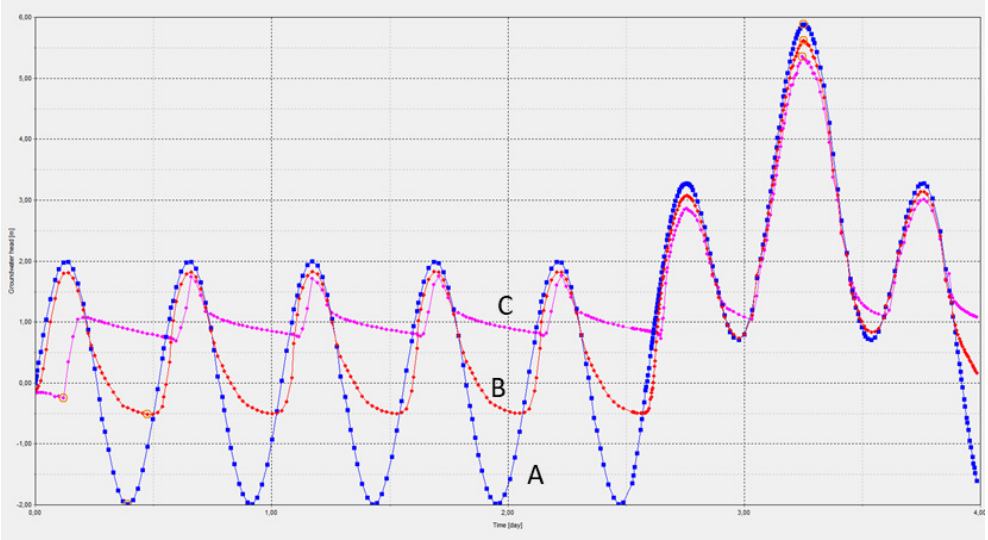
De eerste fase is een stationaire fase waarin een gemiddelde buitenwaterstand als stationaire randvoorwaarde wordt opgelegd voor de bepaling van de initiële opbouw van waterspanningen in de geometrie (Figuur 4.6).

Figuur 4.6 **Resultaat initiële berekeningsfase, freatisch vlak in de dijk (buitenzijde waterstand ref +0 m, binnenzijde ref -1 m). A, B en C geven de plaatsen van de stijghoogtes.**



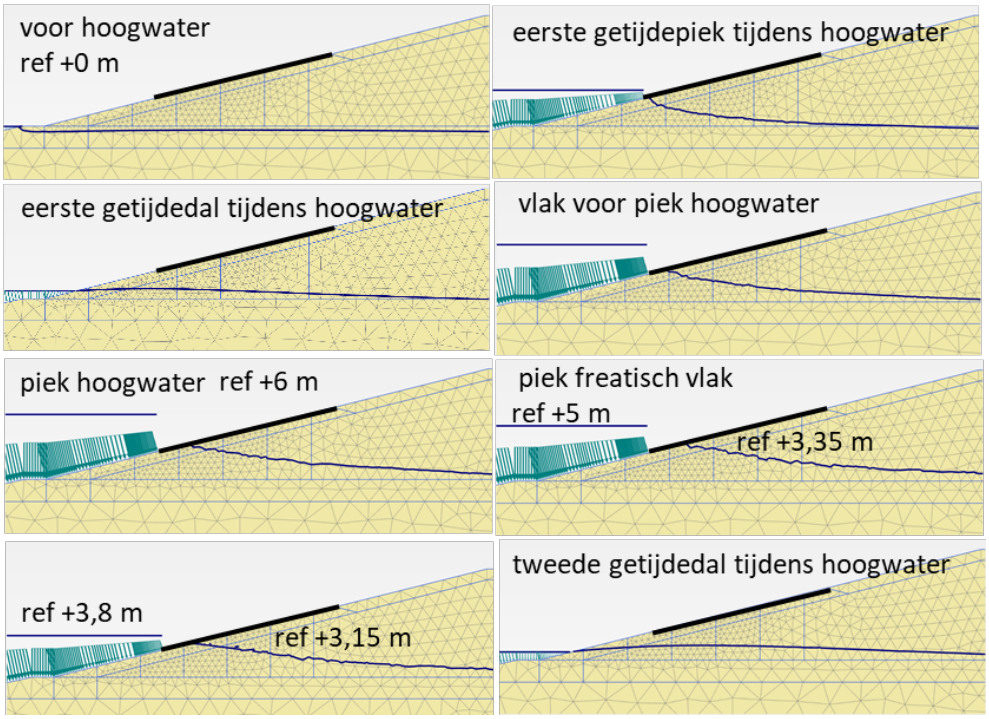
Voor dijken langs getijdewater zijn er circa 5 getijdeperioden gemodelleerd om het model hierop te laten reageren ten opzichte van de stationaire situatie met een gemiddelde buitenwaterstand. Gebleken is dat na één periode de hoogte van het freatisch vlak min of meer is ingespeeld. In de daarna volgende getijdenperioden voorafgaand aan het hoogwater hebben weinig invloed meer op de initiële situatie voor het hoogwater. Alleen in de onverzadigde zone van de dijk neemt de zuigspanning iets af en neemt de drukspanning sneller toe als de buitenwaterstand hoger wordt (punt C in Figuur 4.6 en Figuur 4.7). De werkwijze met enkele getijdeperioden voorafgaand aan het hoogwater is in de rest van de studie gehandhaafd, waarbij is gecontroleerd of de hoogte van het freatisch vlak min of meer is ingespeeld.

Figuur 4.7 **Modeluitvoer stijghoogte (m +ref) voor punten A, B en C tegen tijd (dagen) (zie Figuur 4.5).**



Tijdens het hoogwater volgen de waterspanningen in de dijk en de hoogteligging van het freatisch vlak de buitenwaterstand gedempt en vertraagd. Voor het voorbeeld met een randvoorwaarde zoals gegeven in Figuur 4.5, leidt dat tot een beeld van de verhoging van het freatisch vlak gedurende de storm zoals gegeven in Figuur 4.8.

Figuur 4.8 **Voorbeeld van de berekende ligging van het freatisch vlak op verschillende momenten tijdens een hoogwater met getijde.**



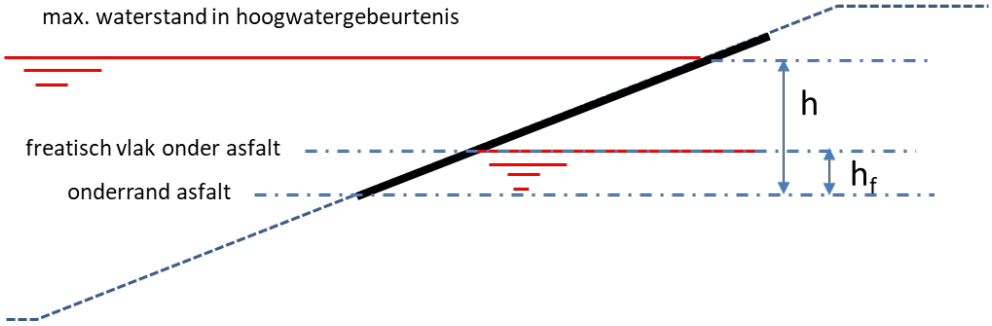
De onderrand van het asfalt ligt op ref +2,5 m en is schematisch weergegeven door de dikke zwarte lijn op het talud in Figuur 4.8. Bij de eerste getijdepiek tijdens het hoogwater (ref +3,25 m) komt het freatisch vlak al net onder de onderrand van het asfalt. Bij het hierop volgende getijdedal (ref +0,75 m) daalt het freatisch vlak onder de onderrand van het asfalt.

Bij de volgende piek wordt de hoogste waterstand bereikt (ref +6 m) en komt het freatisch vlak onder het asfalt te liggen.

In hoeverre de golfklappen optreden op het asfalt op een verzadigd zandbed is afhankelijk van de golfhoogte en de ligging van de buitenwaterstand ten opzichte van de ligging van het freatisch vlak. De tijdsafhankelijke berekeningen bieden een mogelijkheid om dit te beoordelen. De hoogste ligging van het freatisch vlak treedt op enige uren na het hoogwater en wordt ref +3,35 m bij een buitenwaterstand op dat moment van ref +5 m. Het freatisch vlak ligt dan 1,65 m onder de buitenwaterstand. Nog wat later tijdens het hoogwater is de buitenwaterstand ref +3,8 m en ligt het freatisch vlak in de dijk op ref +3,15 m, 0,65 m onder de buitenwaterstand. In deze conditie kunnen golfklappen worden verwacht op het verzadigde zandbed.

Deze studie heeft zich beperkt tot de bepaling onder welke condities het freatisch vlak onder het asfalt komt en niet of dit ook gebeurt in de zone waar golfklappen optreden of waar door golfterugtrekking problemen kunnen ontstaan (mechanisme ASP). Of ASP leidt tot een hoge faalkans van de bekleding staat beschreven in de verwijzing gegeven in Paragraaf 2.2. Of de verzadiging van In de navolgende paragrafen wordt daarom per scenario enkel gegeven of en hoeveel de hoogte van het freatisch vlak ten opzichte van de onderrand van het asfalt stijgt h_f (m) (Figuur 4.9). In het bovenstaande voorbeeld is het resultaat van de berekening bijvoorbeeld h_f = 0,85 m.

Figuur 4.9 **Schematische weergave opkomen van het freatisch vlak onder het asfalt.**



Opgemerkt wordt dat er in het voorbeeld op geen moment sprake is van een buitenwaarts verval over de asfaltbekleding dat van belang is voor het mechanisme AWO (Asfalt Wateroverdruk zie par 2.2). Dit was bij geen enkele van de berekeningen het geval.

4.5 GEVOELIGHEIDSBEREKENINGEN

4.5.1 HOOGWATER DOOR AFVOERGOLF

Dijken langs de rivieren hebben te maken met hoge waterstanden door een hoge rivierafvoer. De duur hiervan is een orde langer dan bij storm gedreven hoogwaters. De afvoergolf is niet gecorreleerd met het optreden van een storm en hoge golven. Dit leidt ertoe dat de kans op hoge golven het grootst is bij relatief lage waterstanden. Als er een asfaltbekleding als bescherming tegen golfaanval aanwezig is, dan zal dit vooral nodig zijn op de lagere taluddelen.

In lijn met de eerdere studie naar de ligging van het freatisch vlak onder een asfaltbekleding [8] zijn er een aantal berekeningen gemaakt voor deze omstandigheden.

De duur van het hoogwater is bijvoorbeeld in de orde van 25 dagen met en piek van ongeveer 4 dagen (Figuur 4.1). De geschematiseerde dwarsdoorsnede staat in Figuur 4.3, middelste afbeelding, met taludhellingen van 1:3.

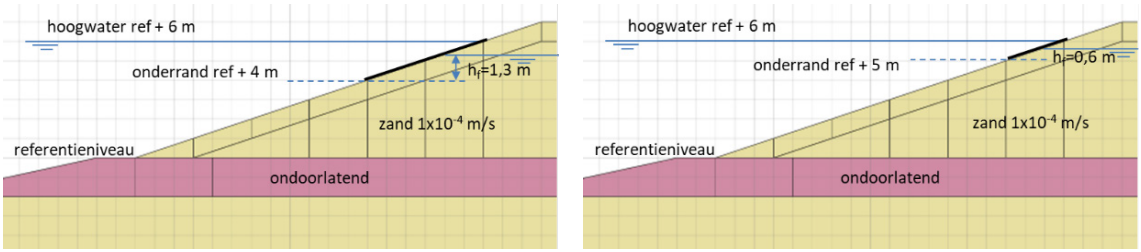
BASISSCENARIO

Als basis is uitgegaan van een zandkern op een slecht doorlatende laag, bijvoorbeeld een klei en/of veenlaag.

In het basisscenario is de slecht doorlatende laag als ondoorlatend geschematiseerd. Dit is gerechtvaardigd bij een open teen onder de asfaltbekleding, omdat de doorlatendheid van de open teen veruit dominant is voor het omhoog komen van het freatisch vlak onder het asfalt.

De zandkern heeft een voor zand gangbare verzadigde doorlatendheid van $1x10^{-4}$ m/s. Voor de van Genuchten parameters is uitgegaan van Hypres, topsoil, coarse. De bovenzijde van het asfalt is gelijk aan de hoogste waterstand (ref + 6 m), de onderzijde van het asfalt ligt 2 m lager op ref + 4 m). Uit de berekening volgt een maximale ligging van het freatisch vlak tot 1,3 m boven de onderrand van het asfalt h_f=1,3 m. Als de onderrand van het asfalt wordt verhoogd naar ref + 5 m, dan volgt h_f = 0,6 m (Figuur 4.10).

Figuur 4.10 **Hoogste ligging freatisch vlak tijdens hoogwater bij een onderrand van het asfalt op ref+4m (links) en ref+5 m (rechts).**

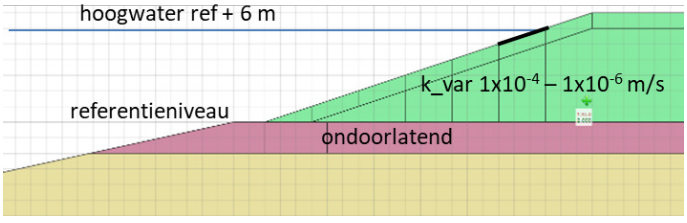


Voor het basisscenario geldt dat het freatisch vlak onder het asfalt zal komen tijdens een hoogwater. Een lagere ligging van de onderrand van het asfalt leidt tot een grotere hoogte waar het zandbed onder het asfalt verzadigd zal raken.

VARIATIE DOORLATENDHEID KERNMATERIAAL

De doorlatendheid van de dijkkern is gevarieerd van $1x10^{-4}$ m/s tot $1x10^{-6}$ m/s (Figuur 4.11). Een lagere doorlatendheid leidt tot een kleinere indringing van het freatisch vlak in de dijk.

Figuur 4.11 **Variatie doorlatendheid kernmateriaal.**



De randvoorwaarden en overige materiaalparameters zijn gelijk gehouden. Bij een onderrand van het asfalt één meter onder de hoogwaterstand leidt dit tot de volgende resultaten:

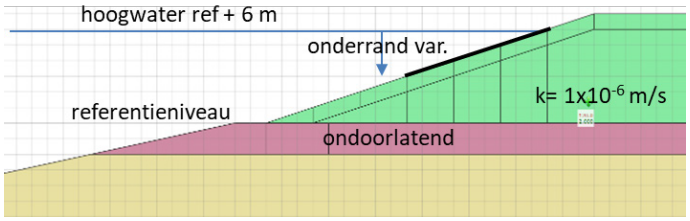
- k_{zand} =1x10^{-4} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 1 m h_f=0,6 m.
- k_{zand} =1x10^{-5} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 1 m h_f=0,25 m.
- k_{zand} =0,5x10^{-5} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 1 m h_f=0,05 m.
- k_{zand} =1x10^{-6} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 1 m h_f=0 m.

Vanaf een doorlatendheid van circa 0,5x10^{-5} m/s en lager zal het freatisch vlak niet meer onder het asfalt komen tijdens een hoogwater, als de onderrand één meter onder het hoogwaterpeil ligt. Een doorlatendheid van deze orde of lager komt waarschijnlijk weinig voor in de praktijk (zie Paragraaf 2.4).

VARIATIE ONDERRAND ASFALT BIJ LAGE KERNDOORLATENDHEID

Bij een heel lage doorlatendheid van de kern van 1x10^{-6} m/s is gekeken in hoeverre de onderrand van het asfalt verlaagd kan worden zodanig dat het freatisch vlak niet onder het asfalt komt (Figuur 4.12).

Figuur 4.12 **Variatie ligging onderrand asfalt bij lage kerndoorlatendheid 1x10^{-6} m/s.**



Dit leidt tot het volgende resultaat:

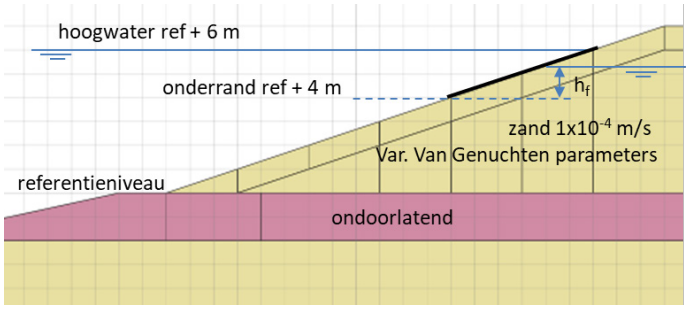
- K_{kern} =1x10^{-6} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 1 m h_f=0 m.
- k_{kern} =1x10^{-6} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 2 m h_f=0,1 m.
- k_{kern} =1x10^{-6} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 3 m h_f=0,3 m.

Bij een lage kerndoorlatendheid van 1x10^{-6} m/s kan de onderrand van het asfalt tot circa 2 m onder het hoogwater liggen zonder dat het zandbed onder het asfalt verzadigd raakt. Een lagere ligging op het talud leidt tot verzadiging van het zandbed.

VARIATIE VAN GENUCHTEN PARAMETERS

De Van Genuchten parameters zijn gevarieerd van die voor standaard zand tot aan eigenschappen die richting klei gaan. De verzadigde doorlatendheid is hierbij gelijk gehouden aan 1x10^{-4} m/s (Figuur 4.13).

Figuur 4.13 **Variatie Van Genuchten parameters van het kernmateriaal.**



Er is gevarieerd met de standaard in Plaxis aangeboden parametersets. De volgende varianten zijn gebruikt: Staring, coarse sand, non loamy sand (B1), loamy sand (B2), extremely loamy sand (B4) en clayey loam (B9).

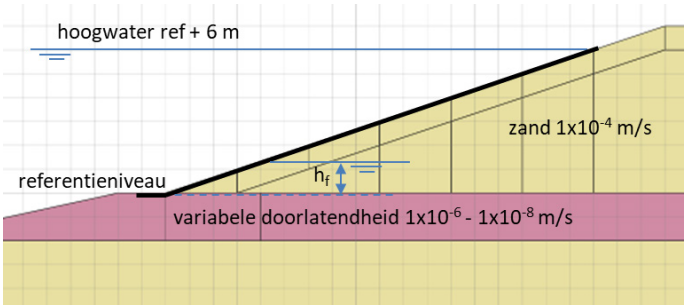
In alle gevallen stijgt het freatisch vlak onder het asfalt tot 1,3 m boven de onderrand van het asfalt. Op basis hiervan is verder niet meer gevarieerd met de Van Genuchten parameters en is uitgegaan van de voor zand gangbare parameters (Hypres, top soil, coarse), waarbij de (verzadigde) doorlatendheid is aangepast volgens de berekende variant.

DICHTE TEEN

Er zijn berekeningen gemaakt waarbij de onderzijde van de asfaltbekleding op een zandkern aansluit op een slecht doorlatende ondergrond.

Bij de berekeningen is de doorlatendheid van de basislaag van klei en/of veen met een dikte van 2 m gevarieerd van $1x10^{-6}$ m/s tot $1x10^{-8}$ m/s (Figuur 4.14). De asfaltbekleding is 1 m op het voorland doorgezet, om een stromingsconcentratie bij de buitenteen de dijk in te voorkomen (Figuur 4.14).

Figuur 4.14 **Asfaltbekleding aansluitend op basislaag, variabele doorlatendheid basislaag.**



Uit de berekeningen volgt:

- k_{basis} =$1x10^{-6}$ m/s Onderrand asfalt: ref +0 m h_f=2,4 m.
- k_{basis} =$1x10^{-7}$ m/s Onderrand asfalt: ref +0 m h_f=0,6 m.
- k_{basis} =$1x10^{-8}$ m/s Onderrand asfalt: ref +0 m h_f=0 m.

Bij een doorlatendheid van $1x10^{-8}$ m/s is de afdichting zodanig dat infiltratie van water door een hoge buitenwaterstand nauwelijks onder het asfalt komt. Bij hogere doorlatendheden moet hier wel rekening mee worden gehouden. Een doorlatendheid van 10^{-6} m/s is ook voor cohesieve lagen gangbaar indien het gaat om grondlagen die zich in de onverzadigde zone bevinden. De doorlatendheid kan dan zelfs nog een orde groter zijn, door de vorming van bodemstructuur in deze zone. Bij de aanleg van een ‘dichte’ constructie zal zorgvuldig naar de aansluiting op ondoorlatende lagen moeten worden gekeken.

DICHTE TEEN EN EXTREME NEERSLAG

Voor de berekening met k_{basis} = $1x10^{-8}$ m/s (h_f=0 m bij hoogwater), is grofstoffelijk gekeken naar de invloed van neerslag op de waterhuishouding in de dijk. Door de dichte buitenkant zal neerslag minder makkelijk draineren en is een hogere opbolling mogelijk. Volgens de berekening zal een jaargemiddeld neerslagoverschot van circa 350 mm leiden tot een freatisch vlak dat ongeveer 0,6 m onder het asfalt komt (ref+0,6 m). Met een aanvullende neerslagperiode van 150 mm in 10 dagen met een kans van 1/50 jr^{-1} stijgt het freatisch vlak tot ref +0,7 m. Door de hogere verzadiging van de dijk is de invloed van een hoogwater ook

groter dan indien neerslag niet wordt meegenomen bij de berekeningen. Zonder neerslag was er geen stijging van het freatisch vlak tijdens het hoogwater, in dit scenario stijgt het freatisch vlak 0,35 m tot ref +1,05 m.

- k_{basis} =1x10^{-8} m/s Onderrand asfalt ref +0 m Extreme neerslag h_f=1,05 m.

SAMENVATTING

Door de duur van een afvoergolf op de rivieren moeten zeer ondoorlatende lagen tot aan de teen van de waterkering aanwezig zijn om een verzadigd zandbed te voorkomen. Bij een asfaltbekleding hoog op het talud en een 'open' teen moet de dijkkern een doorlatendheid van orde 10^{-6} m/s of lager hebben.

Een dichte (asfalt)bekleding tot aan de teen van het talud moet goed aansluiten op een ondoorlatende deklaag. In dat geval moet worden opgelet dat drainage van neerslag enkel naar de binnenzijde kan plaatsvinden, waardoor het freatisch vlak onder de asfaltbekleding niet alsnog kan oplopen door opbolling. Aanvullende drainage in binnenwaartse richting kan nodig zijn om de opbolling door neerslag beperkt te houden.

Variatie in de onverzadigde parameters, binnen de verwachtte variatie van standaard parameterssets in Plaxis, leidt niet tot significante verschillen in het oplopen van het freatisch vlak.

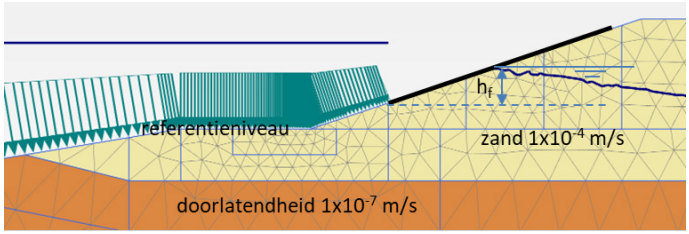
4.5.2 HOOGWATER DOOR STORMOPZET ZONDER GETIJ

Dijken langs de meren kunnen te maken hebben met hoge waterstanden door stormopzet, zonder getijde. We kijken in dit geval niet naar langdurig verhoogde meerpeilen door hoge afvoer en gebrek aan spuicapaciteit, maar de opzet door wind (scheefstand) die gecorreleerd is met hoge golven. De duur van het hoogwater door scheefstand is een orde korter dan hoogwater door een hoge rivierafvoer. De aangehouden duur van het hoogwater is 35 uur met en piek van 4 uur (Figuur 4.1). De geschematiseerde dwarsdoorsnede staat in Figuur 4.3, onderste afbeelding, met taludhellingen van 1:3.

BASISSCENARIO

Als basis is uitgegaan van een zandkern op een ondergrond van klei. De zandkern heeft een verzadigde doorlatendheid van 1x10^{-4} m/s. Voor de van Genuchten parameters is uitgegaan van Hypres, topsoil, coarse. De ondergrond van klei heeft een doorlatendheid van 1x10^{-7} m/s. De bovenzijde van het asfalt is gelijk aan de hoogste waterstand (ref + 3,66 m), de onderzijde van het asfalt ligt 2,67 m lager op ref + 1 m). Uit de berekening volgt een maximale ligging van het freatisch vlak tot 1,35 m boven de onderrand van het asfalt h_f=1,35 m (Figuur 4.15).

Figuur 4.15 **Hoogste ligging freatisch vlak tijdens hoogwater bij een onderrand van het asfalt op ref+1m.**



De hoogste ligging van het freatisch vlak wordt bereikt ongeveer een uur na de piek van de buitenwaterstand. Verzadiging van het zandbed treedt op in de zone waar golfklapbelastingen kunnen optreden.

VARIATIE HOOGTE ONDERRAND ASFALT

Verhogen van de onderrand van het asfalt levert de volgende resultaten:

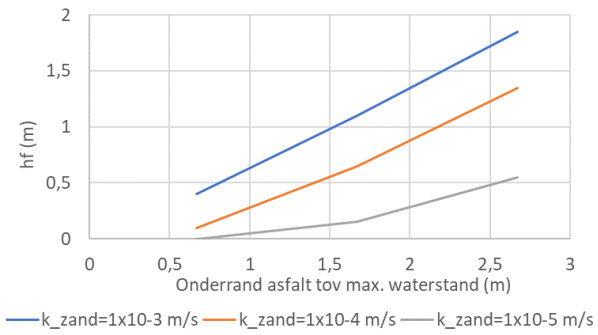
- k_{zand} = 1x10^{-4} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 2,67 m h_f=1,35 m.
- k_{zand} = 1x10^{-4} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 1,67 m h_f=0,65 m.
- k_{zand} = 1x10^{-4} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 0,67 m h_f=0,1 m.

Verhogen van de onderrand leidt tot een kleinere hoogte waarover het zandbed verzadigd is. Als de onderrand minder dan circa een halve meter onder de hoogste waterstand ligt dan zal het zandbed waarschijnlijk niet meer verzadigen. Hierbij gaat het om een smalle strook asfalt van circa 1,5 m onder de hoogste waterstand. Als over een grotere hoogte een asfaltbekleding wordt toegepast dan moet er op het buitentalud een waterremmende voorziening worden toegepast om te voorkomen dat het zandbed verzadigt.

VARIATIE DOORLATENDHEID ZAND

De doorlatendheid van het zand is gevarieerd van 10^{-3} m/s tot 10^{-5} m/s. Bij verder gelijkblijvende opbouw en randvoorwaarde leidt dit tot de resultaten in Figuur 4.16. Alleen bij de laagste doorlatendheid van het zand (10^{-5} m/s) en de hoogste ligging van de onderrand van het asfalt komt de freatische lijn niet onder het asfalt en is er sprake van een onverzadigd zandbed.

Figuur 4.16 **Rekenresultaten h_f (m) bij verschillende hoogtes van de onderrand van het asfalt (m) en doorlatendheden van het zandlichaam (m/s).**

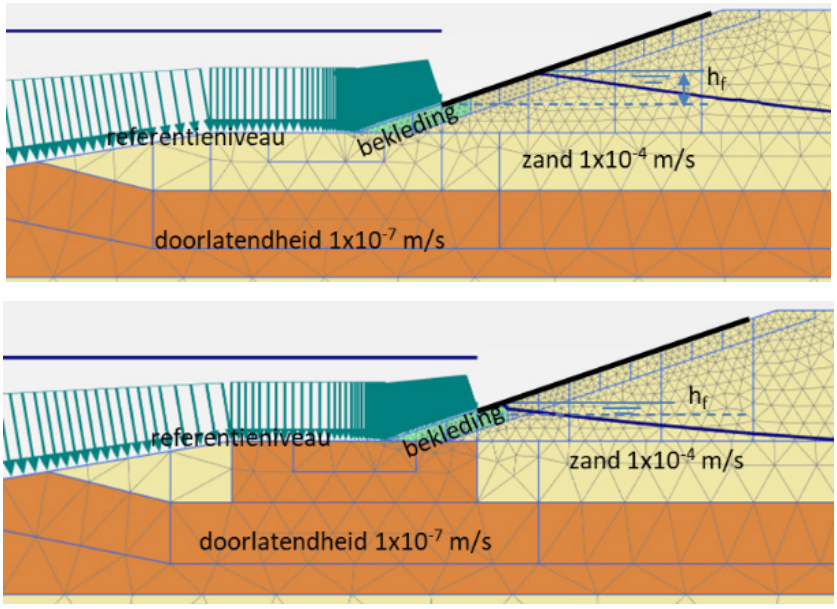


KLEIBEKLEDING LAAG OP TALUD

Een slecht doorlatende (klei)bekleding, al dan niet onder een steenzetting, kan de hoeveelheid water die in de zandkern infiltreert verminderen. Er zijn berekeningen gemaakt waarbij de onderrand van het asfalt op ref +1 m ligt. Dit is 2,67 m onder de hoogste waterstand en één meter boven de buitenteen. Vanaf de teen tot aan de asfaltbekleding is een kleibekleding gemodelleerd met een variërende doorlatendheid. De schematisering staat in Figuur 4.17. Tussen de bekleding en de slecht doorlatende ondergrond is zand aanwezig.

Een tweede variant is gemodelleerd, waarbij de kleibekleding is aangesloten op de slecht doorlatende ondergrond (onderste afbeelding in Figuur 4.17).

Figuur 4.17 **Schematisering bekleding onderste taluddeel; niet en wel aangesloten op de ondergrond.**



De doorlatendheid van de bekleding is gevarieerd. De resultaten van de berekeningen **zonder aansluiting** op de ondergrond zijn als volgt:

- $K_{bekleding}$ = 1x10^{-4} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 2,67 m h_f=1,35 m.
- $K_{bekleding}$ = 1x10^{-5} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 2,67 m h_f=1,05 m.
- $K_{bekleding}$ = 1x10^{-6} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 2,67 m h_f=0,9 m.
- $K_{bekleding}$ = 1x10^{-7} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 2,67 m h_f=0,8 m.

De resultaten van de berekeningen **met aansluiting** op de ondergrond zijn als volgt:

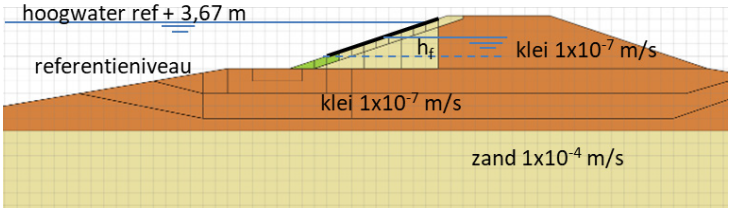
- $K_{bekleding}$ = 1x10^{-5} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 2,67 m h_f=0,55 m.
- $K_{bekleding}$ = 1x10^{-6} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 2,67 m h_f=0,15 m.
- $K_{bekleding}$ = 1x10^{-7} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 2,67 m h_f=0,1 m.

Alleen bij een aansluiting van de bekleding op de ondoorlatende ondergrond zal er nauwelijks sprake zijn van een verzadigd zandbed onder het asfalt. Een waterremmende bekleding onder het asfalt, waarbij er via een zandlichaam een ‘open’ verbinding is met het buitenwater is matig effectief in het voorkomen van een freatische lijn onder het asfalt.

KLEIKERN BINNENZIJDE

Een kleikern aan de binnenzijde van de dijk zorgt voor een verminderde drainagemogelijkheid binnenwaarts en daardoor een sneller oplopend freatisch vlak in het zandlichaam onder de asfaltbekleding. Dit kan voorkomen als een kleidijk buitenwaarts is versterkt met zand. Om het effect hiervan te onderzoeken zijn de bovenstaande berekeningen herhaald met een kleilichaam aan de binnenzijde met een doorlatendheid van 1x10^{-7} m/s (Figuur 4.18). De bekleding op het buitentalud sluit aan op de slecht doorlatende ondergrond.

Figuur 4.18 **Schematisering kleikern aan de binnenzijde.**



De resultaten van de berekeningen met een kleikern zijn als volgt:

- $K_{bekleding}$= 1x10^{-5} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 2,67 m h_f=1,8 m.
- $K_{bekleding}$= 1x10^{-6} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 2,67 m h_f=1,15 m.
- $K_{bekleding}$= 1x10^{-7} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 2,67 m h_f=1,1 m.

Door de aanwezigheid van een kleikern loopt het freatisch vlak aanzienlijk hoger op. Een gesloten bekleding die aansluit op een weinig doorlatende ondergrond is niet meer effectief als de dijk aan de binnenzijde niet goed kan draineren.

SAMENVATTING

Bij een hoge waterstand door stormopzet zal in een zanddijk met een asfaltbekleding veelal rekening moeten worden gehouden met een verzadigd zandbed bij hoogwater. Op basis van de modeluitkomsten zijn er enkele uitzonderingen, waarbij de doorlatendheid wordt beperkt, of de hoogte van de toepassing van het asfalt:

- Bij heel fijn zand met een doorlatend van 1x10^{-5} m/s of minder en toepassingen van asfalt over een beperkte hoogte onder hoogwater van ca. 1 m of minder.
- Bij een slecht doorlatende bekleding met een doorlatendheid van orde 1x10^{-6} m/s of minder in het taluddeel onder het asfalt die aansluit op een slecht doorlatende ondergrond.

In beide gevallen moet vrije drainage van de zandkern in binnenwaartse richting mogelijk zijn. Deze mag niet gehinderd worden door bijvoorbeeld een oude kleikern. Deze geremde drainage zorgt voor een snelle reactie van het freatisch vlak op de buitenwaterstand.

4.5.3 HOOGWATER DOOR STORM MET GETIJDE

Dijken met asfaltbekledingen liggen veelal langs de kust waar de waterstand wordt bepaald door getijde en stormopzet. Het getijde zorgt ervoor dat de duur rondom de piek van het hoogwater korter is dan in het geval van enkel stormopzet (Paragraaf 4.5.2).

De rekenwaarde van de stormduur is afhankelijk van het gebied, voor de Waddenzee 45 uur en voor de overige kustgebieden 35 uur. De optelsom van het getijde en de stormopzet geeft het waterstandsverloop. Aangehouden wordt dat de piek van het getijde gelijktijdig is met de piek van de stormopzet (Figuur 4.1).

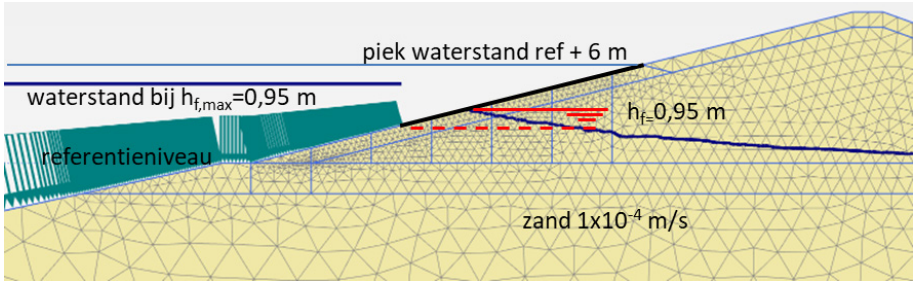
Het getijde varieert langs de kust. In de berekeningen zijn een amplitude van 1 m en 2 m gebruikt, ofwel een getijdeslag van 2 m en 4 m. Een getijdeslag van ongeveer 2 m komt veel voor. Een getijdeslag van 4 m komt bijvoorbeeld voor in de Oosterschelde en de Westerschelde.

De geschematiseerde dwarsdoorsnede staat in Figuur 4.3, bovenste afbeelding, met een buitentaludhelling van 1:4.

BASISSCENARIO VOLLEDIG ZAND

Als basis is uitgegaan van een zandkern op een ondergrond van zand, zonder voorland. De zandkern en zandondergrond hebben een gangbare doorlatendheid van $1x10^{-4}$ m/s. Voor de van Genuchten parameters is uitgegaan van Hypres, topsoil, coarse. De bovenzijde van het asfalt is gelijk aan de hoogste waterstand (ref + 6 m), de onderzijde van het asfalt ligt op ref +2,5 m. De stormduur is 35 uur en de getijamplitude is 1 m (getijdeslag 2 m). Uit de berekening volgt een maximale ligging van het freatisch vlak tot 0,95 m boven de onderrand van het asfalt h_f=0,95 m (Figuur 4.15).

Figuur 4.19 **Hoogste ligging freatisch vlak tijdens hoogwater bij een onderrand van het asfalt op ref+3 m.**



Als de buitenwaterstand van ref+6 m is gedaald naar circa ref+5 m bereikt het freatisch vlak onder het asfalt hoogste stand, circa ref +3,5 m. De buitenwaterstand daalt sneller dan het freatisch vlak, waardoor deze redelijk in de buurt van elkaar komen te liggen. Dit betekent dat golfklappen optreden in de zone met een verzadigd zandbed. De situatie waarbij de buitenwaterstand lager is dan het freatisch vlak onder het asfalt komt in de berekeningen niet voor (mechanisme AWO niet relevant).

VERHOGEN ONDERRAND ASFALT

Verhoging van de onderrand van het asfalt geeft een kleinere h_f. Er staat dan een kortere tijd water boven de onderrand van het asfalt. De onderrand is in stappen van 1 m verticaal opgetrokken. De strook asfalt wordt daarmee telkens circa 4 m minder breed in taludrichting (talud 1:4). Dit geeft de volgende resultaten bij verder gelijk gebleven randvoorwaarden:

Getijdeslag 2 m

- Onderrand asfalt hoogwater – 3,5 m h_f=0,95 m.
- Onderrand asfalt hoogwater – 2,5 m h_f=0,35 m.
- Onderrand asfalt hoogwater – 2 m h_f=0,2 m.
- Onderrand asfalt hoogwater – 1,5 m h_f=0 m.

Getijdeslag 4 m

- Onderrand asfalt hoogwater – 4 m h_f=1,2 m.
- Onderrand asfalt hoogwater – 3,5 m h_f=0,75 m.
- Onderrand asfalt hoogwater – 3 m h_f=0,5 m.
- Onderrand asfalt hoogwater – 2,5 m h_f=0,3 m.
- Onderrand asfalt hoogwater – 2 m h_f=0 m.
- Onderrand asfalt hoogwater – 1,5 m h_f=0 m.

Als de onderrand van het asfalt wordt opgetrokken tot minder dan 2 m onder de hoogste buitenwaterstand (ref +4 m), dan treedt geen of nauwelijks verzadiging van het zandbed op. Bij eenzelfde hoogste waterstand, maar opgebouwd uit een hoge getijdeslag en een lagere

stormopzet, is het resultaat marginaal gunstiger, het verschil is in de orde van enkele decimeters.

ONDOORLATENDE BASIS

In veel gevallen ligt een zanddijk op een slecht doorlatende basis in de vorm van een klei en/of veenlaag. In potentie stroomt water hierdoor minder makkelijk de zandkern in. Uit berekeningen blijkt echter dat dit echter nauwelijks invloed heeft op de hoogte van het freatisch vlak onder het asfalt. Het verschil met de berekeningen zonder ondoorlatende basis is slechts circa 0,05 m:

- Ondoorlatende basis Onderrand asfalt hoogwater – 3,5 m h_f=1,0 m.
- Ondoorlatende basis Onderrand asfalt hoogwater – 2,5 m h_f=0,4 m.
- Ondoorlatende basis Onderrand asfalt hoogwater – 2 m h_f=0,2 m.
- Ondoorlatende basis Onderrand asfalt hoogwater – 1,5 m h_f=0 m.

DOORLATENDHEID ZAND

De doorlatendheid van zand in de kern van een dijk is gevarieerd tussen 10^{-5} m/s en 10^{-3} m/s. Voor deze variatie is de hoogste ligging van het freatisch vlak berekend:

- k_{zand} =10^{-3} m/s Onderrand asfalt hoogwater – 3,5 m h_f=1,85 m.
- k_{zand} =10^{-4} m/s Onderrand asfalt hoogwater – 3,5 m h_f=0,95 m.
- k_{zand} =10^{-5} m/s Onderrand asfalt hoogwater – 3,5 m h_f=0,2 m.

De doorlatendheid van het zand heeft binnen het bereik dat hiervoor kan worden verwacht een behoorlijke invloed op het al dan niet verzadigen van het zandbed onder het asfalt.

Een hogere ligging van de onderrand van het asfalt geeft een minder hoog freatisch vlak onder het asfalt. Bij de verschillende doorlatendheden van het zand is bepaald hoe hoog de onderrand van het asfalt mag liggen zonder dat het zandbed verzadigt tot meer dan 0,2 m verticaal onder het asfalt (h_f≤0,2 m).

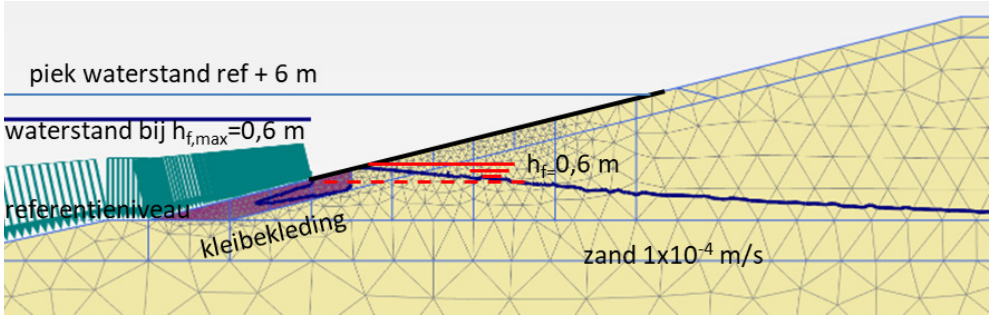
- k_{zand} =10^{-3} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 0,5 m h_f≤0,2 m.
- k_{zand} =10^{-4} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 2 m h_f≤0,2 m.
- k_{zand} =10^{-5} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 3,5 m h_f≤0,2 m.

Bij zand met een doorlatendheid die gemiddeld wordt aangetroffen (orde 10^{-4} m/s) lijkt toepassing van asfalt tot circa 2 m onder de hoogwaterstand mogelijk. In de praktijk was de aanleghoogte veelal een stukje boven gemiddeld getijde hoogwater, wat ongeveer hoogwater -4 m is. Zonder waterremmende lagen die infiltratie verhinderen wordt er in die gevallen veelal een verzadigd zandbed berekend. Dit zien we tevens bij de oude berekeningen in het kader van COW (Paragraaf 2.5). Bij de gekalibreerde berekeningen wordt het beeld wisselend, omdat de hydraulische weerstand hoger blijkt dan verwacht op basis van gangbare schattingen en dijkopbouw (Hoofdstuk 3).

EFFECT WATERREMMENDE LAAG TEEN - ASFALT

Waterremmende lagen op het talud tussen de teen en de onderrand van het asfalt kunnen verzadiging van het zandbed gedeeltelijk tegenhouden. Deze lagen kunnen bijvoorbeeld bestaan uit gepenetreerde steenbekledingen en of een kleilaag.

Figuur 4.20 **Hoogste ligging freatisch vlak tijdens hoogwater bij een onderrand van het asfalt op ref+2 m en een kleibekleding tot de teen met een doorlatendheid van 10^{-7} m/s.**



Een waterremmende bekleding zonder dat deze aansluit op een deklaag van veen of klei is maar matig effectief bij het voorkomen van verzadiging van het zandbed. De doorlatendheid van de waterremmende laag is gevarieerd, de resultaten zijn als volgt:

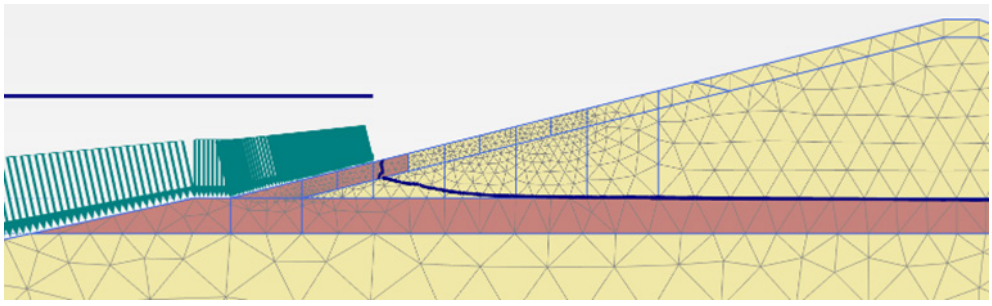
- $k_{kleibekleding}$ =10^{-5}m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 4 m h_f=1,0 m.
- $k_{kleibekleding}$ =10^{-6} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 4 m h_f=0,65 m.
- $k_{kleibekleding}$ =10^{-7} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 4 m h_f=0,60 m.

Een verdere verlaging van de doorlatendheid, bijvoorbeeld tot helemaal dicht, maakt in dit geval weinig meer uit in het afnemen van h_f, omdat het water door de onderliggende zandlaag de dijk instroomt. Hierbij wordt opgemerkt dat het aan de onderzijde afdichten met een constructie die niet gevoelig is voor golfklappen op een verzadigd zandbed een effectieve methode kan zijn om tot lager op het talud asfalt aan te leggen.

WATERREMMENDE LAAG AANGESLOTEN OP ONDERGROND

Als de waterremmende bekleding tussen de teen en de onderrand van het asfalt aansluit op een slecht doorlatende ondergrond van klei en of veen, dan is dit nog effectiever bij het voorkomen van de verzadiging van het zandbed mits de waterremmende bekleding en ondergrond een doorlatendheid heeft van orde 10^{-6} m/s of minder (Figuur 4.21).

Figuur 4.21 **Waterremmende laag ondertalud sluit aan op slecht doorlatende ondergrond.**



Voor deze opbouw zijn enkele scenario's berekend, dit zijn de resultaten:

- $k_{kleibekl}$ = $k_{ondergrond}$=10^{-6} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 4 m h_f=0,1 m.
- $k_{kleibekl}$ =10^{-6} m/s $k_{ondergr}$=10^{-7} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 4 m h_f=0,1 m.
- $k_{kleibekl}$ =10^{-5} m/s $k_{ondergr}$=10^{-7} m/s Onderrand asfalt: hoogwater – 4 m h_f=0,60 m.

Bij een doorlatendheid kleiner dan orde 10^{-6} m bij een laagdikte van 1 m, wordt de kans op een verzadigd zandbed door een hoogwater klein. Echter het afsluiten van de buitenteen kan leiden tot een verhoogd freatisch vlak doordat de drainage van neerslag richting buitentalud

wordt gehinderd. Dit effect is bekeken met enkele oriënterende berekeningen met neerslag en een gesloten buitenteen.

NEERSLAG

Een dichte buitenteen hindert drainage in buitenwaartse richting en zorgt daarmee voor een verhoging van de opbolling door neerslag. Tijdens een hoogwater is er dan minder stijging van het freatisch vlak nodig om het zandbed onder het asfalt te verzadigen. De opbolling kan ook zodanig worden dat lange perioden van hevige neerslag stabiliteits- en/of uitspoelproblemen geven bij de (dichte) bekleding op het buitentalud. Zeker als ook aan de binnenzijde de drainage wordt gehinderd door bijvoorbeeld een (oude) kleikern, kan dit problemen geven.

Om hierin inzicht te krijgen zijn berekeningen uitgevoerd met een waterremmende bekleding op de buitenteen die aansluit op het asfalt aan de bovenzijde en op de natuurlijke afgezette cohesieve slecht doorlatende laag onder de dijk. Er is gekeken naar een gemiddelde neerslag 1 mm/dag continu (ongeveer het jaargemiddelde neerslagoverschot) en kortere hevige neerslag ontleend aan [26]. Voor de waterremmende bekleding op de buitenteen is uitgegaan van een doorlatendheid van 10^{-7} m/s en 10^{-6} m/s en voor de kleilaag onder de dijk van 10^{-8} m/s.

Neerslagscenario		Opbolling (m + ref)	h_t (m)
Continu 1 mm/d		0,85	0,1
Continu 1 mm/d	+ 85 mm in 2 d (kans 1/20 jr^{-1})	0,9	0,1
Continu 1 mm/d	+130 mm in 8 dn (kans 1/20 jr^{-1})	0,9	0,1
Continu 1 mm/d	+150 mm in 8 d (kans 1/100 jr^{-1})	0,9	0,1

Uit de berekeningen volgt dat de opbolling onder de bekleding oploopt tot bijna 1 m, met name als gevolg van het continue deel van de neerslag. Een aanvullende neerslagperiode van 2 of 8 dagen met een kans van 1/20 jr^{-1} levert een marginale verhoging van de opbolling. Hierbij wordt opgemerkt dat enkel de buitenteen een waterremmende bekleding heeft, binnenwaarts is vrije drainage nog wel mogelijk in het model. Hoewel de dijk bij aanvang van een hoogwater al een hoger freatisch vlak heeft, verhoogt het freatisch vlak door het hoogwater echter maar zeer gering.

INFILTRATIE GOLFOPLOOP EN GOLFOVERSLAG

Als golven oplopen boven de asfaltbekleding en zelfs over de kruin van de dijk slaan, dan zal dat leiden tot extra infiltratie van water in de dijk. Om te kijken of dit ook een significante verhoging van het freatische vlak onder de asfaltbekleding leidt zijn enkele berekeningen uitgevoerd.

Boven de asfaltbekleding bestaat de bekleding veelal uit een kleilaag met gras. De doorlatendheid hiervan kan van dezelfde orde zijn als die van zand. Dit komt omdat zelfs bij aanleg goed verdichte kleilagen worden blootgesteld aan bodemstructuur vormende processen (droog/nat cycli, vorst, indringing en afsterven wortels, wormen) die de klei doorlatend maken. Als de kleilaag wat dikker is, bijvoorbeeld 1 m, en goed verdicht is aangelegd, dan kan de doorlatendheid ook lager zijn, bijvoorbeeld in de orde van 10^{-5} m/s. Voor de berekeningen zijn we uitgegaan van 10^{-4} m/s en 10^{-5} m/s.

Voor het modelleren van infiltratie en golfoverslag is de hoogwatergolf opgeknipt in tijdvakken. Bij de opgaande flank van het hoogwater komen golven boven de asfaltbekleding,

gemodelleerd door infiltratie op het boven(buiten)talud, tijdens de piek golfoverslag op kruin en binnentalud en in de afgaande flank weer enkel infiltratie op boven(buiten)talud (zie Figuur 4.2). Dit komt neer op een nat boven(buiten)talud gedurende totaal 9,75 uur en een natte kruin en binnentalud gedurende de piek van 4,25 uur.

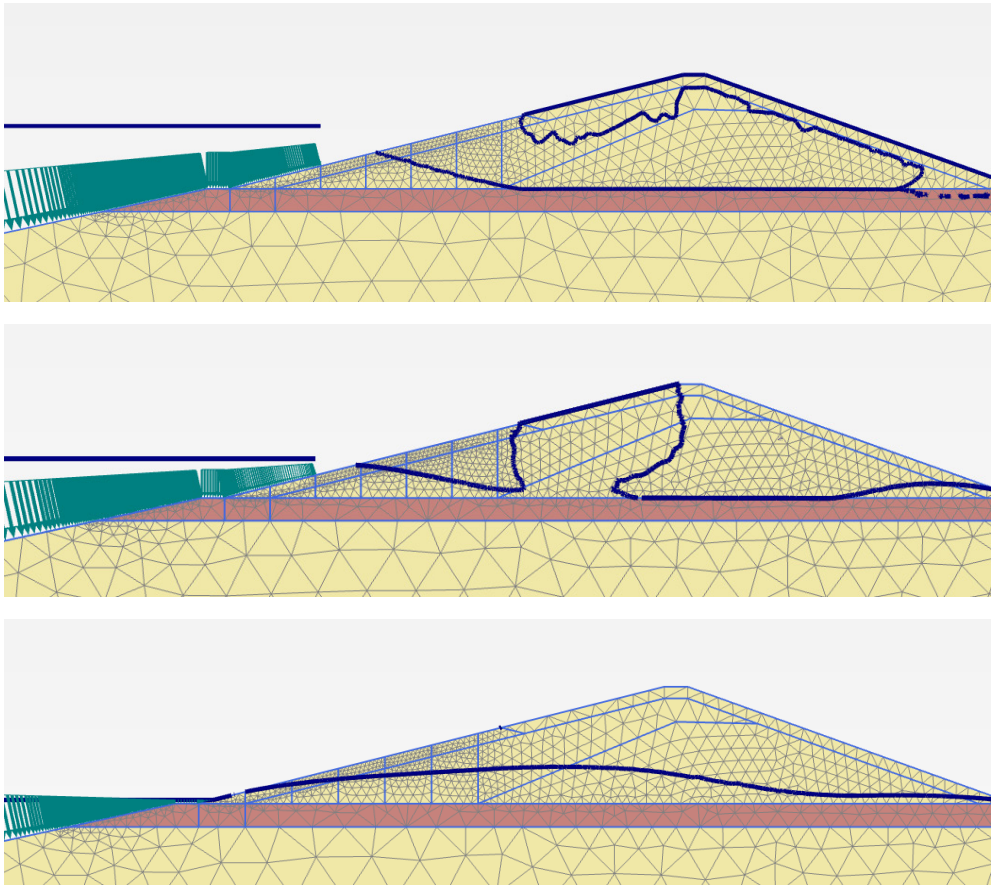
Om het effect inzichtelijk te maken is uitgegaan van een zandkern met doorlatendheid 10^{-4} m/s, standard-coarse Van Genuchten parameters, een slecht doorlatende basis (10^{-7} m/s) en een onderrand van het asfalt op ref. + 2 m (3,9 m onder de hoogwaterpiek). De basis storm-duur is 45 uur (Figuur 4.1) met een getijdeamplitude van 1 m. In de uitgangssituatie is rekening gehouden met 1 mm neerslag per dag (gemiddeld neerslagoverschot in Nederland).

De berekeningen laten zien dat het effect van oploop en golfoverslag marginaal is bij een zanddijk met een kleibekleding.

- Dichte bekleding in oploop en overslagzone h_f=1,15 m.
- Kleibekleding doorlatendheid 10^{-5} m/s h_f=1,20 m.
- Kleibekleding doorlatendheid 10^{-4} m/s h_f=1,25 m.

De infiltratie op het boventalud, kruin en binnentalud zakt door de dijk naar beneden, maar bereikt binnen de duur van het hoogwater niet het freatisch vlak (Figuur 4.22). Op het buitentalud dat gedurende 9,75 uur nat is door golfoploop bereikt de door de dijk zakkende waterbel het freatisch vlak. De hoge waterstand is dan alweer gedaald. Aan het einde van het hoogwater zorgt het geïnfiltreerde water voor een opbolling van het freatisch vlak, echter niet meer aan de onderzijde van de asfaltbekleding.

Figuur 4.22 **Freatisch vlak bij hoogste ligging freatisch vlak onder het asfalt net na de piek van de buitenwaterstand (boven) en aan het einde van aflopende flank met golfoploop (midden) en aan het einde van het hoogwater (onder). Infiltratiefront zakt ook van bovenaf de dijk in (h_f=1,25 m).**



Bij een kleibekleding die minder doorlatend is dan de zandkern treedt hetzelfde beeld op, maar in (veel) mindere mate.

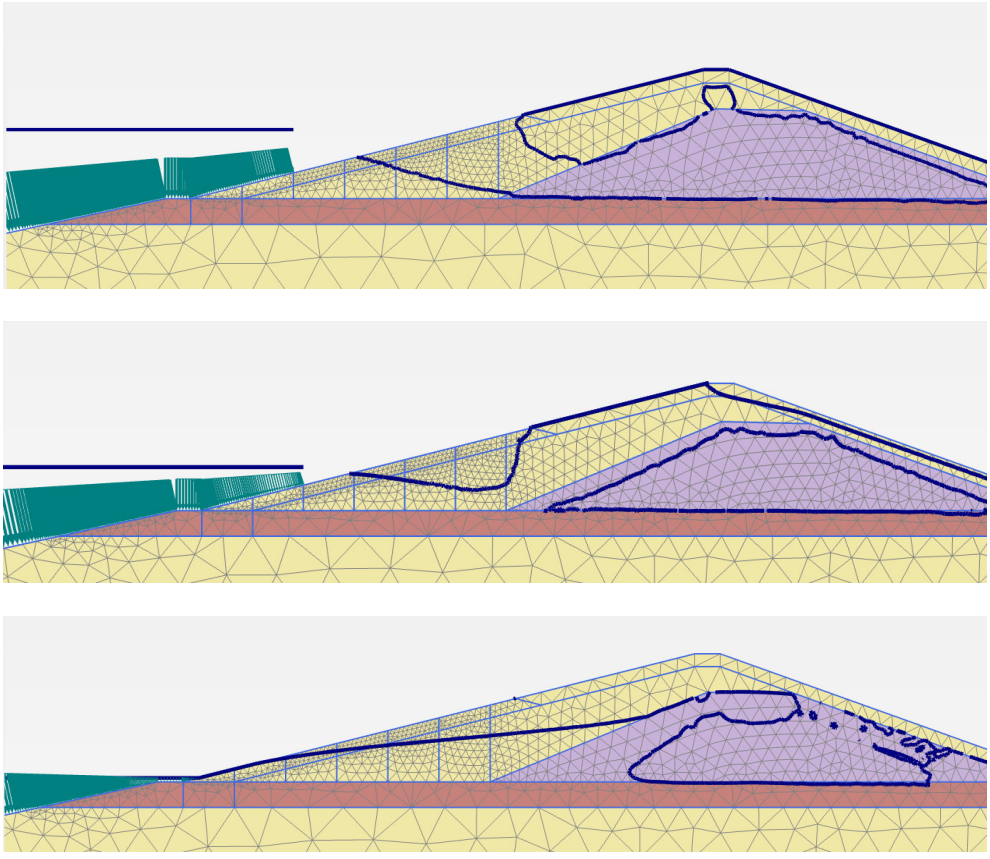
AANWEZIGHEID KLEIKERN BINNENZIJDE

De aanwezigheid van een kleikern aan de binnenzijde van de dijk verhindert drainage van water binnendijks en geeft in potentie een snellere en hogere stijging van het freatisch vlak onder de asfaltbekleding. Er is gekeken naar het effect door middel van enkele modelberekeningen waarbij een (arbitrair gekozen) kleikern aan de binnenzijde in de dijk zit. De kern heeft een bulk doorlatendheid van 10^{-6} m/s, twee orden minder dan van het dijkzand, 10^{-4} m/s. Het zandlichaam tussen de kleikern en het buitentalud is ruim 15 m.

De randvoorwaarden zijn gelijk aan die in het scenario waarbij is gekeken naar de invloed van oploop en golfoverslag bij een doorlatende bekleding, eveneens 10^{-4} m/s. De neerslag is gemiddeld gekozen, 1 mm/dag, continu. De stormopzet is 45 uur en de getijdeamplitude 1 m.

In Figuur 4.23 staat de ligging van het freatisch vlak op verschillende momenten tijdens het hoogwater. Tijdens de hoogste waterstand onder het asfalt net na de piek van de buitenwaterstand, na de aflopende flank van het hoogwater nadat het buitentalud 9,75 uur nat was (golfoverslag was toen al voorbij) en na het hoogwater.

Figuur 4.23 **Freatisch vlak bij hoogste ligging freatisch vlak onder het asfalt net na de piek van de buitenwaterstand (boven) en aan het einde van aflopende flank met golfoploop (midden) en aan het einde van het hoogwater (onder). Infiltratiefront zakt ook van bovenaf de dijk in (h_f=1,25 m).**



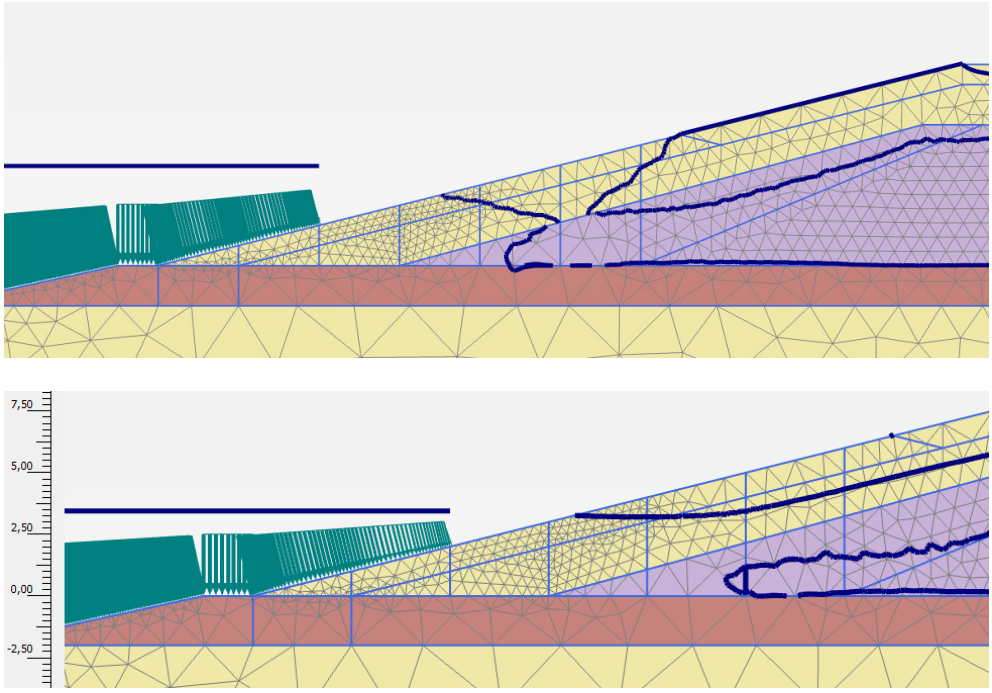
Bij de gekozen opbouw met een zandlichaam aan de buitenzijde met een dikte van circa 18 m (in plaats van 15 m) is de intredelengte van het buitenwater net kleiner dan de afstand tot

de kleikern. Daardoor heeft het slechts een marginale invloed op de hoogste stand van het freatisch vlak onder het asfalt (h_f=1,25 m).

Ook de infiltratie op het boventalud, kruin en binnentalud leiden binnen het hoogwater niet tot een extra hoge ligging van het freatisch vlak tegen de onderzijde van de asfaltbekleding. Wel zorgt dit water aan het einde van het hoogwater voor een extra opbolling die hoger is vanwege de kleikern en de gehinderde drainage binnenwaarts.

Als het zandlichaam aan de buitenzijde versmalt tot circa 10 m, dan wordt de hoogste ligging tijdens de piek van het hoogwater wel wat hoger hf= 1,50 m. Daarna neemt de ligging van het freatisch vlak weer wat af, echter maar heel langzaam, vanwege het water dat is geïnfiltreerd in het boventalud en de kruin en via het zandlichaam naar beneden zakt. Hierdoor ligt het freatisch vlak gedurende lange tijd hoog onder de asfaltbekleding (Figuur 4.24).

Figuur 4.24 **Freatisch vlak op het hoogste punt onder de bekleding h_f=1,50 m, circa 2 uur na de piek van het hoogwater (boven) en nog steeds hoog richting het einde van het hoogwater (onder).**



Als de dikte van het zandlichaam verder wordt versmald van 10 m naar 4 m, dan wordt ongeveer dezelfde hoogte van het freatisch vlak gehaald (h_f=1,45 m).

TALUDHELLING

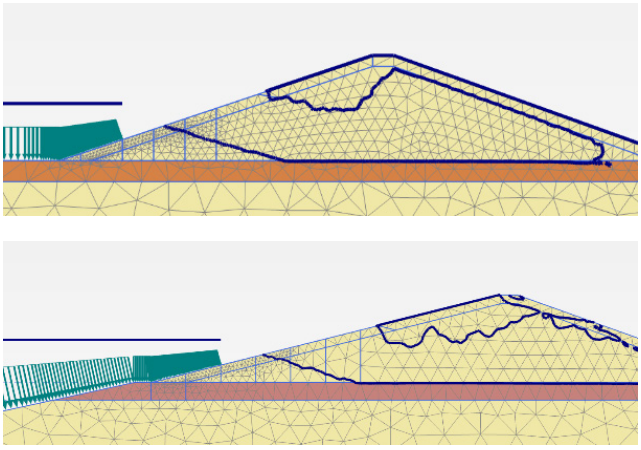
De taludhelling bepaald de breedte van de dijk en het oppervlak waarover water kan infiltreren in de dijk. Dit heeft invloed op het kunnen oplopen van het freatisch vlak onder de asfaltbekleding. Om te kijken naar dit effect zijn twee berekeningen gemaakt waarin enkel de taludhelling is veranderd (1:3 en 1:4).

De berekende variant betreft een volledige zanddijk met doorlatendheid 10^{-4} m/s, met kleibekleding met gelijke doorlatendheid (niet apart gemodelleerd). De dijk ligt op een slecht doorlatende basis met een doorlatendheid van 10^{-7} m/s. Het buitentalud is 1:3 of 1:4. Er is een continue neerslag van 1 mm/dag (gemiddeld neerslagoverschot). Golfoploop en golfoverslag leiden tot een nat boven(buiten)talud, kruin en binnentalud. De buitenwaterstand is storm

gedreven (35 uur) met een getijdeslag van 2 m. De onderrand van het asfalt ligt op ref +2 m. Dit leidt tot de volgende resultaten:

Taludhelling	h_f (m)
1:3	1,35
1:4	1,20

Figuur 4.25 **Moment hoogst opgelopen freatisch vlak, links talud 1:3 (h_f=1,35 m), rechts talud 1:4 (h_f=1,20 m).**



In Figuur 4.25 is het moment weergegeven waarop het freatisch vlak het hoogst is. Bij het talud 1:4 is dit wat later tijdens het stormverloop, net na de piek waarbij er golfoverslag is. Bij het talud van 1:4 is de weerstand hoger, het water moet meer volume vullen c.q. afstand afleggen om tijdens het hoogwater onder het asfalt te komen. Het verschil is echter gering en in beide gevallen verzadigt het zandbed in de golfklapzone.

4.5.4 NEERSLAG

Neerslag zorgt voor een verhoging van het freatisch vlak in de dijk (opbolling). Bij een hoogwater kan het freatisch vlak al relatief hoog liggen en is minder stijging nodig om het zandbed onder de asfaltbekleding te verzadigen. Bij eerdere analyses bij de Waddenzeedijk van Friesland is geconstateerd dat neerslag in sommige gevallen een verhoogd freatisch vlak geven (Bijlage C). Vanwege deze invloed is een korte analyse gemaakt van de invloed van neerslag met enkele grondwaterstromingsberekeningen om de gevoeligheid hiervoor te onderzoeken.

HOEVEELHEID NEERSLAG

Gemiddeld is de jaarlijkse neerslag ca. 850 mm. Door verdamping verliest de bodem ca. 500-600 mm water, afhankelijk van diverse eigenschappen van de grond en het weer (vegetatie, bodem, helling, zonnestraling, wind, luchtvochtigheid et cetera). Het jaarlijkse neerslagoverschot is daarmee gemiddeld ongeveer 300 mm, ofwel orde 1 mm per dag.

Er zit uiteraard verschillen tussen het natte en droge seizoen. In het droge seizoen april — september is er veelal een neerslagtekort van gemiddeld orde 100 à 200 mm. Dat betekent dat in het natte seizoen oktober — maart het neerslagoverschot gemiddeld orde van 400 à 500 mm is, om op een jaargemiddelde van 300 mm overschot uit te komen. Uiteraard zijn er uitschieters, bijvoorbeeld het droge 1976 met een tekort van ca. 350 mm en 2018 met een tekort van circa 300 mm.

Voor de kortere tijdschaal dan seizoenen zijn de statistieken van neerslag van belang. Op korte tijdschaal domineert de neerslaghoeveelheid ten opzichte van de verdamping. STOWA publiceert geregeld de statistiek van extreme neerslag [26]. De publicatie geeft een idee van de jaarlijkse kans op verschillende hoeveelheden neerslag in mm per periode van 10 minuten tot aan 8 dagen. De basis jaarstatistiek waar naar is gekeken in deze studie is overgenomen in Tabel 4.1.

Tabel 4.1 **Basis jaarstatistiek neerslag overgenomen uit [26].**

T [jaar]	10 min	30 min	60 min	2 uur	4 uur	8 uur	12 uur	24 uur	2 dagen	4 dagen	8 dagen
0.5	8.1	10.4	12.6	15.3	18.6	22.2	24.6	30.4	38.6	50.4	68.3
1	10.2	13.5	16.2	19.5	23.4	27.7	30.5	36.8	46.0	59.3	79.4
2	12.2	16.6	20.0	24.0	28.4	33.4	36.5	43.8	54.0	68.6	90.5
5	15.1	21.2	25.8	30.7	35.9	41.7	45.2	54.2	65.5	81.4	105.1
10	17.5	25.3	31.0	36.8	42.8	49.1	52.9	63.0	74.9	91.6	116.1
20	20.3	30.2	37.2	44.2	51.1	58.0	61.9	72.6	85.0	102.1	127.0
25	21.3	32.0	39.5	46.9	54.1	61.2	65.2	75.9	88.5	105.6	130.5
50	24.7	38.2	47.7	56.5	64.8	72.5	76.6	86.9	99.5	116.6	141.5
100	28.7	45.8	57.7	68.4	78.0	86.2	90.2	98.9	111.4	128.1	152.3
200	33.4	55.0	70.0	81.3	88.7	95.0	98.1	112.1	124.2	140.0	163.2
250	35.0	58.4	74.5	86.5	93.9	100.0	102.9	116.7	128.5	143.9	166.7
500	40.8	70.4	90.7	105.0	112.2	117.5	119.6	131.7	142.5	156.4	177.5
1000	47.6	84.9	110.6	127.6	134.4	138.3	139.2	148.2	157.5	169.4	188.3

CORRELATIE HOOGWATER EN EXTREME NEERSLAG

Voor het oplopen van het freatisch vlak tijdens een hoogwater, leidend tot verzadiging van het zandbed, is het van belang of extreme neerslag gecorreleerd is aan extreme noordwesten wind. Ofwel: valt een extreme bui of regenperiode precies voorafgaand aan de extreme waterstand?

Dat is in het kader van deze studie niet in precies uitgezocht. Een zekere mate van correlatie is te verwachten, omdat diepe depressies en daarmee harde wind, veelal gepaard gaan met neerslag. Voor een hoge waterstand is echter een wind uit een bepaalde hoek nodig, voor de kust vanuit het noordwesten, waardoor een deel van de correlatie zal verdwijnen en het minder aannemelijk is dat de uitersten in waterstand en uitersten in neerslag precies samenvallen.

Een meting is bijvoorbeeld beschikbaar rondom de storm van 8 januari 2019 [21]. In de vijf weken voor het hoogwater viel er ongeveer 110 mm neerslag (meetpunt Lauwersmeer). Eerst viel vijf weken voor het hoogwater 80 mm in ongeveer een week. Dat is een eens per 1 à 5 jaar gebeurtenis. Twee weken voor het hoogwater viel er nog circa 20 mm en in de dagen voor de storm nog eens 10 mm. Alles bij elkaar niet een extreme neerslag, maar wel meer dan gemiddeld.

In het kader van deze studie is gekeken naar extreme waterstanden in combinatie met neerslag met een overschrijdingskans van 1/20 en 1/100 jr^{-1}, zonder verdere onderbouwing.

AFSTROMEN VS INFILTREREN

De neerslag die op de dijk valt kan voor een deel infiltreren en voor een deel afstromen. Voor het bepalen van het deel dat infiltreert kijken we als indicatie naar het verschil tussen

de neerslagintensiteit ten opzichte van de bulk infiltratiecapaciteit. De bulk infiltratiecapaciteit van een kleibekleding is in de orde van 10^{-5} à 10^{-4} m/s. De neerslagintensiteit uit [26], omgerekend naar m/s, staat in Tabel 4.2. Hierbij is uitgegaan van de basis jaarstatistiek van neerslag.

Tabel 4.2 **Neerslagintensiteit (m/s) bij verschillende overschrijdingskansen (2 – 1/2.000 jr^{-1}) en beschouwde tijdsintervallen (10 min – 8 dagen). Groen = in range infiltratiecapaciteit 10^{-5} -10^{-4} m/s.**

T[jaar]	10 min	30 min	60 min	2 uur	4 uur	8 uur	12 uur	24 uur	2 dagen	4 dagen	8 dagen
0,5	1,4E-05	5,8E-06	3,5E-06	2,1E-06	1,3E-06	7,7E-07	5,7E-07	3,5E-07	2,2E-07	1,5E-07	9,9E-08
1	1,7E-05	7,5E-06	4,5E-06	2,7E-06	1,6E-06	9,6E-07	7,1E-07	4,3E-07	2,7E-07	1,7E-07	1,1E-07
2	2,0E-05	9,2E-06	5,6E-06	3,3E-06	2,0E-06	1,2E-06	8,4E-07	5,1E-07	3,1E-07	2,0E-07	1,3E-07
5	2,5E-05	1,2E-05	7,2E-06	4,3E-06	2,5E-06	1,4E-06	1,0E-06	6,3E-07	3,8E-07	2,4E-07	1,5E-07
10	2,9E-05	1,4E-05	8,6E-06	5,1E-06	3,0E-06	1,7E-06	1,2E-06	7,3E-07	4,3E-07	2,7E-07	1,7E-07
20	3,4E-05	1,7E-05	1,0E-05	6,1E-06	3,5E-06	2,0E-06	1,4E-06	8,4E-07	4,9E-07	3,0E-07	1,8E-07
25	3,6E-05	1,8E-05	1,1E-05	6,5E-06	3,8E-06	2,1E-06	1,5E-06	8,8E-07	5,1E-07	3,1E-07	1,9E-07
50	4,1E-05	2,1E-05	1,3E-05	7,8E-06	4,5E-06	2,5E-06	1,8E-06	1,0E-06	5,8E-07	3,4E-07	2,0E-07
100	4,8E-05	2,5E-05	1,6E-05	9,5E-06	5,4E-06	3,0E-06	2,1E-06	1,1E-06	6,4E-07	3,7E-07	2,2E-07
200	5,6E-05	3,1E-05	1,9E-05	1,1E-05	6,2E-06	3,3E-06	2,3E-06	1,3E-06	7,2E-07	4,1E-07	2,4E-07
250	5,8E-05	3,2E-05	2,1E-05	1,2E-05	6,5E-06	3,5E-06	2,4E-06	1,4E-06	7,4E-07	4,2E-07	2,4E-07
500	6,8E-05	3,9E-05	2,5E-05	1,5E-05	7,8E-06	4,1E-06	2,8E-06	1,5E-06	8,2E-07	4,5E-07	2,6E-07
1000	7,9E-05	4,7E-05	3,1E-05	1,8E-05	9,3E-06	4,8E-06	3,2E-06	1,7E-06	9,1E-07	4,9E-07	2,7E-07

Uit de tabel blijkt dat vooral bij relatief kortdurende hevige buien de neerslag intensiteit groter wordt dan de onderzijde van de range van de infiltratiecapaciteit. In geen van de gevallen wordt de intensiteit groter dan de bovenkant van de range van infiltratiecapaciteit (10^{-4} m/s).

Als we kijken bij een overschrijdingskans van 1/20 en 1/100 jr^{-1} dan zal er enkel bij hevige relatief korte buien van 10 minuten tot 1 uur sprake zijn van een intensiteit groter dan de ondergrens van de infiltratiecapaciteit. Het gaat daarbij om een hoeveelheid tussen 20 en 60 mm neerslag. Als dit water zich instantaan zou toevoegen aan het freatische water, bij een effectieve porositeit van 0,2 (-), dan leidt dat tot maximaal 0,3 m verhoging van het freatisch vlak. Bij gedeeltelijke afstroming over het maaiveld zal de verhoging van het freatisch vlak uiteraard minder groot zijn. Gezien de potentiële verhoging en de neerslagintensiteit ten opzichte van de range van infiltratiecapaciteit is de (modelmatige) aanname van volledige infiltratie redelijk.

TIJDSCHALEN NEERSLAG JAAR/ SEIZOEN/ BUI

Neerslag infiltreert, zakt door het dijklichaam en voegt zich bij het grondwater, voor zover het niet verdampt of blijft hangen in de capillaire zone. Het door de dijk zakken van het water vergt tijd. De respons van het freatisch vlak zal vertraagd zijn, en mogelijk lager door de genoemde verdamping en de zijdelingse afstroming van water uit het dijklichaam.

In de tijdschaal van een bui of neerslagperiode tot 8 dagen speelt verdamping naar verwachting geen significante rol. Neerslag gaat gepaard met een hoge luchtvochtigheid en bewolking en de tijd is kort, waardoor er weinig water kan verdampen. Voor de tijdschaal van een jaar speelt verdamping wel een rol. Gedurende een jaar zijn er droge perioden met zon en droge lucht. Daarom zijn we in de berekeningen met neerslag op tijdschaal van een jaar uitgegaan van een neerslagoverschot: neerslag min (standaard berekende) verdamping, zoals te vinden op de www.knmi.nl .

RESPONS FREATISCH VLAK OP NEERSLAG

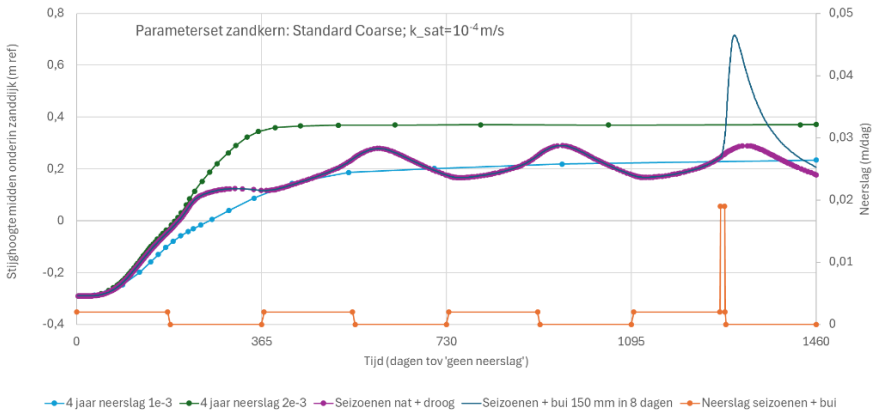
De respons van het freatisch vlak in een zanddijk op een slecht doorlatende klei- of veenlaag is onderzocht door het uitvoeren van enkele neerslagberekeningen. Er is gebruik gemaakt van de geometrie 'zeedijk', 10 m hoog, buitentalud 1:4 en binnentalud 1:3 (bovenste in Figuur 4.3).

Er zijn vier scenario's berekend met twee sets van Genuchten parameters voor onverzadigd stromingsgedrag van het zand. Het zand heeft een verzadigde doorlatendheid van 10^{-4} m/s (ca 10 m/dag) en een porositeit van 0,4 (-). De basis is heel ondoorlatend gemaakt (10^{-8} m/s). De berekeningen betreffen een tijdspanne van 4 jaar, beginnend bij een dijk zonder neerslag, gevolgd door:

1. Neerslag constant 1 mm/dag (neerslagoverschot 365 mm in jaar).
2. Neerslag constant 2 mm/dag (neerslagoverschot 730 mm in jaar; heel erg nat jaar).
3. Neerslag nat/ droog seizoen: ½ jaar 2 mm/dag en ½ jaar 0 mm/dag.
4. Neerslag nat/ droog seizoen + bui: ½ jaar 2 mm/dag en ½ jaar 0 mm/dag + 8 dagen 19 mm per dag (1/100 jr^{-1} gebeurtenis) aan einde nat seizoen.

De stijghoogterespons op de 4 neerslag scenario's in de kern van de dijk op de grens tussen zand en klei bij snede A-A* in Figuur 4.27 staat in Figuur 4.26.

Figuur 4.26 **Stijghoogte (m ref) in de zandkern bij verschillende neerslag scenario's. Neerslagscenario 4 (m/dag- secundaire y-as): seizoenen nat/droog met 150 mm in 8 dagen in oranje aan einde natte seizoen na 4 jaar. Parameterset Standard Coarse.**



De modelmatige uitgangssituatie bij t = 0 dagen is een dijk zonder neerslag. Er is in het beschouwde punt een geringe zuigspanning aanwezig. Het freatisch vlak bevindt zich een klein stukje onder het beschouwde punt op hoogte ref + 0 m (scheiding zandkern — ondergrond). Het freatisch vlak wordt bepaald door de randvoorwaarde aan de buitenzijde van de dijk (Ref + 0 m) en de binnenzijde (Ref — 1 m), die zorgen voor een klein binnenwaarts verhang over het dijklichaam en ondergrond.

Een continue neerslag van 1 mm/dag of 2 mm/dag (scenario 1 en 2) leiden na een inspeelperiode van respectievelijk 2 jaar en 1 jaar tot een stationair freatisch vlak op respectievelijk 0,2 en 0,4 m boven het beschouwde punt. Infiltrerend water op de dijk komt na de inspeelperiode in evenwicht met het zijdelings afstromen van het water.

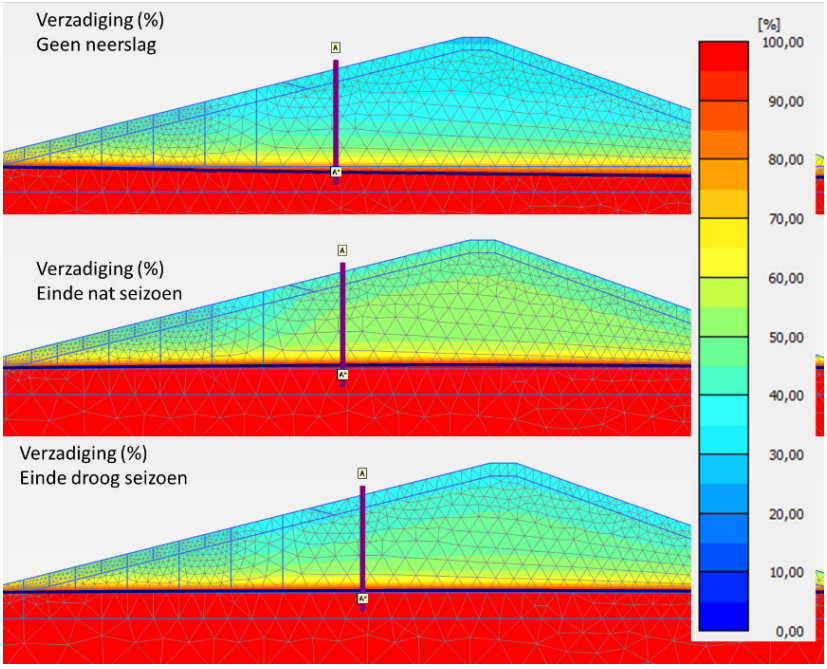
In scenario 3 wordt het jaargemiddelde van 1 mm/dag verdeeld over een half jaar droog (niets) en een half jaar nat (dubbel = 2 mm/dag). Dit leidt na een inspeelperiode van 2 jaar tot

een wisselend freatisch vlak door het gemiddelde van scenario 1. De wisseling om het gemiddelde is ongeveer 0,1 m. De reactie van het freatisch vlak is iets vertraagd. Grofweg stijgt het freatisch vlak in het natte seizoen en daalt het in het droge seizoen, echter de daling en stijging worden ongeveer 2 à 3 weken vertraagd ingezet.

Hetzelfde geldt voor de regenperiode van 8 dagen met 150 mm neerslag aan het einde van het laatste gemodelleerde natte seizoen (scenario 4). De stijghoogte piekt circa 2 weken na het optreden van de neerslagperiode. De stijging door de 8 dagen neerslag is ongeveer 0,4 m. Dit is meer dan verwacht zou worden uitgaande van de porositeit van 0,4 (-), die in potentie leidt tot 0,15/0,4 = 0,38 m. Bij aanvang van de bui is in een groot deel van de kern de verzadiging echter al bijna 50% (piek nat seizoen), waardoor de effectieve porositeit, waarin aanvullende waterberging mogelijk is, circa 0,2 (-) is. Uitgaande van deze kleinere effectieve porositeit stijgt het freatisch vlak in potentie 0,15/0,2 = 0,75 m. Door vertraging en ondertussen zijdelingse drainage wordt deze potentiële stijging niet gehaald en blijft deze beperkt tot 0,4 m.

De verzadiging (%) aan het begin van de berekening en aan het begin en einde van het natte seizoen staan in Figuur 4.27. De blauwe lijn op de rode zone is het freatisch vlak, het vlak waar de druk in het water 0 is. De afnemende verzadiging boven het freatisch vlak komt door de capillaire werking, leidend tot de grondwaterretentiecurve (beter bekend als SWRC Soil Water Retentie Curve), modelmatig beschreven door het van Genuchten -model en parameters.

Figuur 4.27 **Berekende verzadiging (%) in de dijk zonder neerslag en aan het begin en einde van het natte seizoen voor scenario 3.**

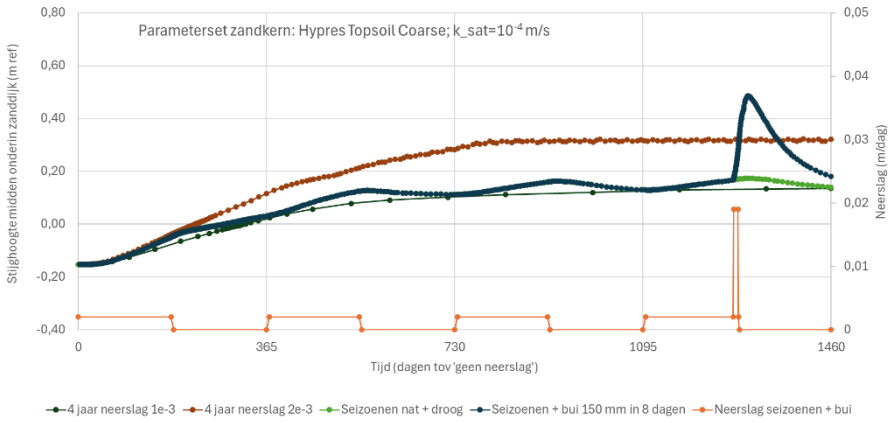


De opbolling van het freatisch vlak in het zand als gevolg van neerslag, verdeeld over een nat en een droog seizoen, is gering ten opzichte van de schaal van de dijk. Het gaat om orde enkele decimeters (zie Figuur 4.26). De geringe opbolling komt omdat de doorlatendheid en het drainerend vermogen van de dijk, de breedte, relatief groot zijn ten opzichte van de neerslag. Bij een ondoorlatende dijk van klei en/of een heel brede dijk zal de opbolling groter zijn.

De standaardiseerde SWRC in Plaxis (Standard Coars en Hypres Topsoil Coarse — approximate Van Genuchten) leiden tot 100% verzadiging op het freatisch vlak afnemend tot circa 50% op 1 meter boven het freatisch vlak en vervolgens maar heel weinig afnemend tot boven in de dijk. Een droog of nat seizoen heeft enige invloed op de verzadiging. Het verschil is ongeveer 5 à 10% (rondom 50%) tussen het einde van het droge seizoen en het einde van het natte seizoen. Bij een porositeit van 0,4 (-) betekent dit dat enkele procenten van de poriën extra gevuld worden tijdens het natte seizoen.

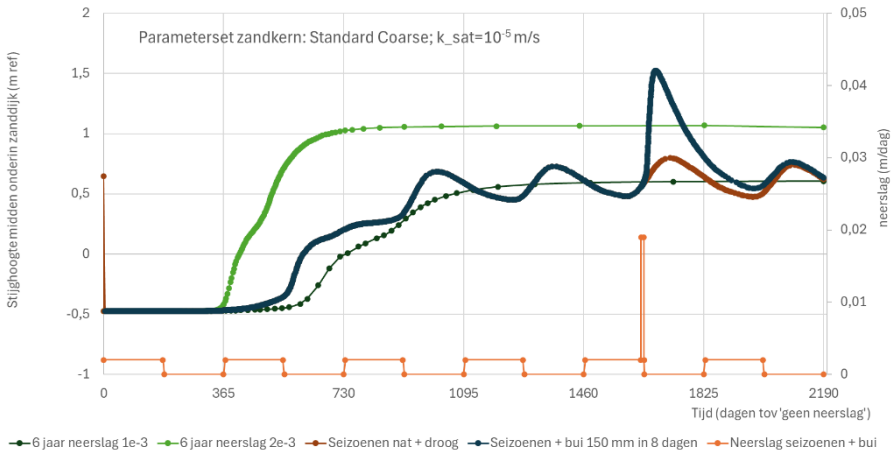
Het toepassen van een alternatieve set standaard parameters, zoals Hypres Topsoil Coarse, approximate van Genuchten, leidt tot geringe verschillen met de Standard Coarse parameterset. De resultaten van een berekening met deze parameters staan in Figuur 4.28. De respons van het freatisch vlak op neerslag is wat kleiner en langzamer.

Figuur 4.28 **Stijghoogte (m ref) in de zandkern bij verschillende neerslag scenario's. Neerslagscenario 4 (m/dag- secundaire y-as): seizoenen nat/droog met 150 mm in 8 dagen in oranje aan einde natte seizoen na 4 jaar. Parameterset Hypres Topsoil Coarse.**



Het verlagen van de verzadigde doorlatendheid van 10^{-4} m/s naar 10^{-5} m/s vermindert de zijdelingse drainagesnelheid. De opbolling door neerslag wordt daardoor hoger. In Figuur 4.28 staat het resultaat van de berekening. Let op dat de verticale schaal is vergroot ten opzichte van de vorige figuren, omdat de respons van het freatisch vlak hoger is.

Figuur 4.29 **Stijghoogte (m ref) in de zandkern bij verschillende neerslag scenario's. Neerslagscenario 4 (m/dag- secundaire y-as): seizoenen nat/droog met 150 mm in 8 dagen in oranje aan einde natte seizoen na 4 jaar. Parameterset Standard Coarse, k_sat 10^{-5} m/s.**



De opbolling bij een gemiddeld neerslagoverschot in de kern van de dijk is circa 0,6 m +ref, dat is 0,4 m hoger dan bij een doorlatendheid van 10^{-4} m/s. Bij een dubbelle hoeveelheid neerslag wordt de opbolling iets meer dan 1,0 m +ref, 0,6 m hoger dan bij de hogere doorlatendheid. De inspeeltijd van de dijk is langer, circa 3 jaar voor scenario 1 en ruim 2 jaar voor scenario 2 met het dubbele neerslagoverschot. Voor scenario 3 met een droog en een nat seizoen zien we hetzelfde beeld van variatie, echter op een hoger gemiddeld niveau en met een grotere (dubbel zo grote) amplitude. Ook de vertraging is langer. Het hoogste berekende freatische vlak wordt bijna midden in de droge periode berekend, het laagste juist midden in de natte periode.

Ook de 8 dagen 150 mm neerslagperiode, scenario 4, komt met meer vertraging door bij het freatisch vlak, na circa 40 dagen in plaats van 20 dagen. De verhoging van het freatisch vlak door deze 150 mm neerslag is 0,7 m. Bij aanvang van de regenperiode is de verzadiging in de kern over een groot deel ongeveer 60%. Dit betekent dat er ongeveer 0,16 (-) over is voor aanvullende waterberging, waardoor het freatisch vlak in potentie stijgt met 0,15/0,16 = 0,9 m. Door zijdelingse afstroming en vertraging wordt dit niet gehaald.

SAMENVATTEND

De ligging van het freatisch vlak voor aanvang van een hoogwater wordt beïnvloed door neerslag. Deze invloed kan volgens de modelberekeningen significant zijn, in de orde van enkele decimeters tot meer dan een meter in de kern van de dijk, afhankelijk van specifieke lokale omstandigheden.

Een neerslagperiode levert in potentie een (tijdelijke) waterschijf op het freatisch vlak. Afhankelijk van specifieke omstandigheden kan dit in de orde zijn van de neerslag gedeeld door de porositeit, circa 0,4 (-) tot 50% van deze porositeit, circa 0,2 (-).

Uit de berekeningen in de vorige sub-paragrafen en van peilbuiswaarnemingen bij de Waddenzeedijken Friesland (Bijlage C) blijkt dat verhindering van zijdelingse drainage de invloed van neerslag vergroot. Een verminderde drainage komt bijvoorbeeld door:

- Voorland.
- Brede dijkbasis.
- Klei(kern) binnenzijde/ buitenzijde.
- Perskades of andere waterremmende barrières.
- Lage kerndoorlatendheid (zeer fijn zand, klei).

Deze factoren zijn locatie specifiek, wel/ niet aanwezig, of in meerdere of mindere mate aanwezig. Met name de opbouw van de dijk, eventuele waterremmende perskades of oude dijkkernen en de doorlatendheden hiervan blijken in de praktijk moeilijk te achterhalen. Peilbuismetingen kunnen hierbij een zeer nuttig hulpmiddel zijn, omdat ze direct het effect meten.

Het kunnen fitten van een model op metingen van neerslag (buien) en de respons hierop in peilbuizen geeft nog geen antwoord op het aan te houden neerslagscenario (of scenario's) om voldoende inzicht te krijgen op de faalkans van het asfalt. Dit is in deze studie niet uitgewerkt en is een nog open vraag voor de beoordelaar.

5

ANALYSE EN DISCUSSIE

De hoogte van het freatisch vlak onder een asfaltbekleding onder invloed van hoogwater en neerslag blijkt behoorlijk variabel. De variabiliteit wordt vooral veroorzaakt door sterke lokale verschillen in dijkopbouw, voorland, teenconstructies en doorlatendheden van de zandkern en andere grondlagen waaruit de dijk is opgebouwd.

5.1 MET METINGEN IN GEKALIBREERDE MODELLEN

Uit de gekalibreerde berekeningen (Hoofdstuk 3) blijkt dat de hydraulische weerstand die bepaald wordt door de specifieke dijkopbouw en doorlatendheden nauwelijks zijn te voorspellen op basis van enkel grondonderzoek en archiefgegevens.

Continue peilbuismetingen zijn daarom van grote waarde om grondwaterstromingsmodellen te kalibreren en daarmee de betrouwbaarheid van een voorspelling bij extreme condities te verbeteren. Hierbij is geconstateerd dat ook dit in de praktijk lastig is.

Ten eerste omdat er in de meetperiode niet altijd een hoogwater is, waardoor water niet tot aan de dijk komt door aanwezigheid van voorland, of maar een beperkt deel van het buitentalud wordt blootgesteld aan infiltratie. Daardoor resteert er onzekerheid over de respons bij hogere waterstanden.

Ten tweede omdat een meting zich laat verklaren door aanpassing van meerdere parameters in het model. Als voorbeeld: een gemeten geringe respons op een hoogwater onder de asfaltbekleding kan worden verklaard door een lagere kerndoorlatendheid en/of een lagere bekleding doorlatendheid en/of een kleinere weerstand richting de binnenzijde van de dijk. Het kan hierbij helpen om breed te kijken naar de respons op verschillende tijdschalen (bv getijde vs storm vs langdurig gemiddelde), in plaats van te focussen op enkel de amplitude van de hoogste waterstand.

Het langdurig gemiddelde zal in hoofdzaak bepaald worden door de gemiddelden buiten- en binnenwaterstand, neerslag in relatie tot de kern doorlatendheid, en de verhouding tussen de hydraulische weerstand naar de binnenzijde van de dijk en de buitenzijde van de dijk ten opzichte van het meetpunt (in de zandkern). Op de tijdschaal van het getijde en de storm (in mindere mate) is met name de absolute hydraulische weerstand tussen het meetpunt en het buitenwater van belang.

Indien meerdere meetpunten beschikbaar zijn in een meetraai, dan kan daaruit worden bepaald wat de hydraulische weerstand is tussen de punten. Dat geeft informatie over de kerndoorlatendheid ten opzichte van de doorlatendheid van de bekleding op het buitentalud en beperkt daarmee het aantal mogelijke draaiknoppen om de respons te verklaren.

Het gaat voor deze studie te ver om een procedure te beschrijven, waarmee de kalibratie het beste kan worden uitgevoerd. Dat is te ingewikkeld en zou locatie specifiek moeten worden

uitgevoerd. Op hoofdlijnen moet de modelleur bedenken dat het er in hoofdzaak om gaat waar de grootste weerstanden zitten: aan de buitenzijde, binnenzijde, in de kern zelf, en/ of aan de onderzijde. Door het variëren met de verschillende parameters en het daarmee aanpassen van de weerstanden ontstaat het inzicht waarmee de kalibratie kan worden uitgevoerd en waarmee vervolgens een betrouwbare extrapolatie naar hoogwater kan worden uitgevoerd.

5.2 VARIATIESTUDIE

Uit de gevoeligheidsanalyses blijkt dat de meeste berekeningen van representatief veronderstelde varianten, leiden tot een freatisch vlak dat tijdens hoogwater oploopt tot onder het asfalt.

Bij dijken die belast worden door stormopzet, met of zonder getijde, en een asfaltbekleding vanaf NAP + 2 m à NAP + 3 m, bij een waterstand tot NAP + 6 m, word berekend dat het freatisch vlak oploopt tot circa 0,6 m à 1,4 m boven de onderrand van het asfalt (COW concludeerde 0,8 à 1 m in de jaren ‘80). Hierbij is uitgegaan van gangbare aannames over doorlatendheden en dijkopbouw op basis van literatuur. Dit is scherper dan het uitgangspunt in het Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken (freatisch vlak tot aan de waterstand). Echter het potentiële probleem van golfklappen op een verzadigd zandbed blijft. Dit komt omdat de golfklapzone, grofweg gelegen tussen de waterstand en een halve golfhoogte daaronder, na de piek van het hoogwater langs de zone met een verzadigd zandbed komt (zie Figuur 4.8).

Uit de variatie studie blijkt dat het freatisch vlak flink hoger kan oplopen als:

- Drainage binnenwaarts wordt gehinderd (oude kleikern/ perskade). Hoe smaller de zandkern aan de buitenzijde hoe groter de invloed.
- Het zand in de kern grover is (doorlatendheid > 10^{-4} m/s).
- De onderrand van de asfaltbekleding lager wordt doorgezet dan NAP +2 à +3 m.
- Uit de variatie studie blijkt dat het freatisch vlak lager blijft als:
- De asfaltbekleding wordt opgetrokken tot circa 1 à 2 m onder hoogwater.
- De doorlatendheid van de kern aanzienlijk lager is dan 10^{-4} m/s. Bij 10^{-6} m/s wordt geen freatisch vlak meer tegen het asfalt verwacht.
- De bekleding onder de asfaltbekleding zeer waterremmend is (10^{-6} m/s of minder) en aansluit op de slecht doorlatende klei- en of veenlagen onder de dijk.

De helling van het buitentalud en de (on)doorlatendheid van de klei- of veenondergrond blijken maar beperkte invloed te hebben. Ook de invloed van infiltratie door golfoploop boven de asfaltbekleding en golfoverslag op het binnentalud blijken beperkt. Dit komt door de relatief korte duur van de infiltratie en de vertraging waarmee het water door de onverzadigde zone van de dijk stroomt tot aan het freatisch vlak.

Verder zien we dat neerslag een significant effect heeft op de gemiddelde ligging van het freatisch vlak in de kern en dat een hevige neerslagperiode voorafgaand (weken) aan een hoogwater hier nog decimeters verhoging bij kan geven. Dit zal veelal een significant verhogend effect geven op het stijgen van het freatisch vlak bij een hoogwater. Aanbevolen wordt hiermee bij analyses rekening te houden.

De indruk ontstaat dat de berekeningen in de variatiestudie (hoofdstuk 4) veelal een iets ongunstiger beeld geven dan de gekalibreerde berekeningen (hoofdstuk 3). Dit betekent dat

de gangbare doorlatendheden zoals bijvoorbeeld volgen uit literatuur (hoofdstuk 2) in de praktijk eerder lager dan hoger zijn. Verklaring daarvoor is met name het met verloop van tijd inzanden/ dichtsibben van steenzettingen en de aanwezigheid van (onverwachte) sliblaagjes op het voorland.

Bij dijken die belast worden door langdurig hoogwater (afvoer gedomineerde waterstand) moet de onderkant van de asfaltbekleding worden opgetrokken tot bijna de beschouwde waterstand, of moet het ondertalud worden afgesloten. In dat laatste geval moet ook zorg worden gedragen voor drainage van de zandkern binnenwaarts, omdat anders neerslag voor verzadiging van de zandkern zal leiden.

5.3 RELATIE MET OVERSTROMINGSKANS

Deze studie richtte zich op de fysica van grondwaterstroming in een dijk met een asfaltbekleding. Er is niet expliciet en kwantitatief gekeken naar op de invloed van het freatisch vlak onder het asfalt op de overstromingskans via falen van de asfaltbekleding.

Voor zover bekend is er geen voorgeschreven rekenwaarde, of kans-eis, op het niveau van het freatisch vlak onder het asfalt, beschikbaar. Er is een omgevingswaarde voor het dijktraject. Er wordt (nog) gebruik gemaakt van de standaard faalkansbegroting en het lengte-effect zoals bepaald voor asfaltbekledingen. De ligging van het freatisch vlak is hierin slechts een onderdeel waaraan geen eis of rekenwaarde is verbonden.

Asfaltbekledingen zijn waarschijnlijk zeer gevoelig voor het verzadigde zandbed. Er is een behoorlijke kans op een veel hogere faalkans van het asfalt bij een verzadigd zandbed, in combinatie met golfaanval. De huidige aanpak is om de verzadiging uit te sluiten in een ontwerp en impliciet de faalkans en vervolgens overstromingskans hoog in te schatten bij een beoordeling. Dat is logischerwijs conservatief.

Een uitwerking van het effect van een verzadigd zandbed door een combinatie van neerslag en hoogwater, gevolgd door falen van het asfalt, een bres en een overstroming, op de overstromingskans, is niet voorhanden. Deze is wel gewenst, maar lag buiten de scope van deze studie.

5.4 TIJDSAFHANKELIJKHEID

Uit de analyses blijkt dat er altijd sprake is van een gedempte en vertraagde respons van het freatisch vlak onder het asfalt op het buitenwater. Dit betekent dat de hoogste ligging van het freatisch vlak wordt bereikt na de piek van het hoogwater (en dat de piek lager is). De asfaltbekleding is het meest kwetsbaar als de golfklappen optreden op het verzadigde zandbed. Op dat moment is de waterstand aan het dalen en resteert aldus een beperkte tijd dat er nog hoogwater en golfaanval is, in de orde van 10 à 15 uur. Daarbij moet ook het asfalt nog falen.

Dit aspect kan misschien worden meegenomen bij het schatten van de overstromingskans. Als dit wordt gedaan, dan wordt tevens aanbevolen daarbij ook mee te nemen over welke strekkingen welke mate van schade wordt verwacht, welke reparatietijd dat vergt en wat de kans is op een nieuw hoogwater.

6

CONCLUSIES EN VERVOLG

6.1 CONCLUSIES

We concluderen dat de eenvoudige rekenregels uit het Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken in het algemeen conservatief zijn.

Uit zowel de gekalibreerde berekeningen als de variatiestudie berekeningen blijkt dat bij gangbare aannames voor zanddijken langs kust en estuaria het freatisch vlak tijdens hoogwater vaak tot onder het asfalt kan oplopen, maar doorgaans lang niet tot aan de buitenwaterstand. Bij dijken die belast worden door stormopzet, met of zonder getijde, en een asfaltbekleding vanaf NAP + 2 m à NAP + 3 m, bij een waterstand tot NAP + 6 m, word berekend dat het freatisch vlak in de meeste gevallen oploopt tot circa 0,6 m à 1,4 m boven de onderrand van het asfalt.

Hierbij wordt uitgegaan van gangbare aannames over doorlatendheden en dijkopbouw op basis van literatuur. Het freatisch vlak kan aanzienlijk hoger oplopen bij een hogere zandkern doorlatendheid (bv 10^{-3} m/s), een relatief klein zandvolume onder het asfalt (bv door een oude kleikern aan de binnenzijde) en een lagere onderrand van het asfalt.

We stellen ook vast dat een generieke aanscherping van de rekenregels in het Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken niet goed mogelijk is. De variabiliteit in de respons van het freatisch vlak is aanzienlijk en blijkt sterk afhankelijk van locatiespecifieke kenmerken van de dijk, het voorland en de ondergrond en doorlatendheden van grondlagen en bekledingen.

Uit met peilbuismetingen gekalibreerde berekeningen blijkt dat deze locatiespecifieke kenmerken niet of nauwelijks betrouwbaar vooraf zijn te schatten op basis van archiefinformatie, standaard grondonderzoek of literatuurwaarden voor doorlatendheden alleen. Peilbuismetingen en daarop gekalibreerde grondwaterstromingsmodellen zijn daarom nodig om tot een realistische schatting van de ligging van het freatisch vlak onder normcondities te komen.

6.2 WAT NU?

We zien dat de aannames uit het Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken conservatief zijn en aangescherpt kunnen worden. Vooral bij een veiligheidsbeoordeling zijn tijdsafhankelijke grondwaterstromingsberekeningen daarvoor het aangewezen middel, zoals aangetoond in deze studie en in de adviespraktijk. Een eerste schematisering kan worden gemaakt op basis van bekende gegevens van de dijkopbouw en grondonderzoek, echter een grote verbetering van de nauwkeurigheid wordt verkregen door de kalibratie van het model met peilbuismetingen gedurende een langere periode, bijvoorbeeld een stormseizoen.

Deze aanscherping is waardevol voor de schatting van de kans op een verzadigd zandbed onder het asfalt, en daarmee op de kans op een hoge faalkans van het asfalt, en uiteindelijk op de overstromingskans. Het is daarbij wenselijk om het hele faalpad via de knoop falen van de asfaltbekleding, tot aan een overstroming te beschouwen.

Hierbij lopen we aan tegen de schatting van de kans dat het freatisch vlak oploopt tot in de golfklapzone, de kans dat de asfaltbekleding hierdoor bezwijkt en dat dit in de resterende stormduur (of volgende stormen) leidt tot een bres en overstroming. Deze studie geeft geen uitwerking van deze kansen, deze zullen met de nodige expertise geschat moeten worden, werkend van grof naar fijn.

Voor een snelle analyse van tijdreeksen van waterspanningsmetingen wordt gewezen op een model als bijvoorbeeld Pastas (https://pastas.readthedocs.io/stable/index.html). In het kader van deze studie is het niet gebruikt, maar het kan op een snelle manier inzichten leveren in het responsgedrag van de grondwaterstand op neerslag en hoogwater (en ook de verhouding hiertussen). In het model wordt een tijdreeks van peilbuismetingen verklaard door (gelijktijdige) tijdreeksen van bijvoorbeeld neerslag en buitenwaterstand. Met het model kan vervolgens de verwachtte respons in het meetpunt worden berekend op extreme hoogwater- en neerslagreeksen. Er zijn twee nadelen ten opzichte van een 2D grondwaterstromingsmodel. Het model geeft enkel informatie over het meetpunt, niet automatisch het punt direct onder het asfalt, en discontinuïteiten in de randvoorwaarden worden niet meegenomen. Bijvoorbeeld het niet onderwater lopen van het voorland tijdens de metingen of het niet onderlopen van een doorlatende steenbekleding vlak onder het asfalt. De voorspelling is logischerwijs enkel nauwkeurig als de metingen dicht in de buurt kwamen van de extremen waarin we geïnteresseerd zijn.

Bij een ontwerp wordt de bestaande situatie veranderd, waardoor metingen aan de bestaande situatie minder of niet meer representatief zijn. Hierdoor blijft de onzekerheid over de hoogte van het freatisch vlak en moet hier in een ontwerp rekening mee worden gehouden bijvoorbeeld door robuustheid in te bouwen. Er kan echter ook om het probleem van een hoog freatisch vlak heen worden ontworpen. Enkele mogelijkheden hiervoor zijn:

- Optrekken van de onderkant van de asfaltbekleding boven het niveau waar het freatisch vlak komt, dus niet te ver onder de waterstand bij de norm. De onderliggende steenzetting wordt hoger opgetrokken. Door de dikke constructie van een steenzetting wordt ervan uitgegaan dat deze niet of minder gevoelig is voor verweken/ vervormen van de ondergrond door golfklappen.
- Afdichting van de bekleding op het buitentalud, waardoor het freatisch vlak niet oploopt. Dit kan met een dikke, goed verdichte kleilaag die aansluit op de klei- of veenlagen onder de dijk. Een kleilaag kan mogelijk ook worden vervangen of aangevuld door/met een bentonietmat of robuust vlies/folie. Aandacht moet worden besteed aan de aansluitingen op de slecht doorlatende ondergrond en het asfalt. Ook moet worden gecontroleerd of de drainage van neerslag naar de binnenzijde voldoende is of dat hiervoor aanvullende maatregelen nodig zijn.
- Het onderaan dik maken van de asfaltbekleding, zodat dit voldoet aan het waarschijnlijk conservatieve ASP criterium (zie Paragraaf 2.2). Een onzekere factor hierin is dat geen rekening wordt gehouden met (kortstondige, herhaalde) verweking van het verzadigde zandbed onder golfklapbelasting waardoor zandmigratie kan plaatsvinden en een andere (lagere?) beddingconstante in een AGK- analyse. Deze twee mechanismen zijn niet verwerkt in het ASP-criterium, echter de zeer aanzienlijke laagdikte die nodig is om te

voldoen aan het ASP-criterium is waarschijnlijk voldoende om ook deze mechanismen te voorkomen.
- Robuust maken van het zandbed onder het asfalt of onder asfalt met een funderingslaag tegen golfklappen. Een dikke funderingslaag en/of stabilisatie van het zand met bijvoorbeeld cement, cement met toevoegingen, of schuimbitumen tot een bepaalde diepte zijn mogelijkheden. Hiervoor zijn momenteel echter nog geen ontwerpregels.

Voor zowel de beoordeling als het ontwerp resteren er vragen over het gedrag van asfaltbekledingen op een verzadigd zandbed en over de faalkans. Voor het ontwerpen geldt dat de situatie nu wordt vermeden. Er zijn aanknopingspunten voor het beter inschatten van de faalkans bij een hoog freatisch vlak en daarnaast het robuust maken van de bekledingsconstructie bij een hoog freatisch vlak. Dit vergt echter nog onderzoek en valt buiten de scope van deze studie.

7

REFERENTIES

[1] Waterspanningen onder de asfaltbekleding van dijken, voordracht Ir. W.C. Bischoff van Heemskerk, Verenging voor Bitumineuze Werken, 14 november 1962.

[2] Stabiliteit van oud asfalt tijdens golfaanval, Analyse van de resultaten van het Deltagootonderzoek met asfalt van de Lauwersmeerdijk, Deltares rapport 11200296-012-HYE-0004, versie 2, Juli 2018.

[3] Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Sterkte en veiligheid, Ministerie van Infrastructuur en Milieu.

[4] Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. RWS-DWW, ISBN-90-369-5565-3. Delft, september 2004.

[5] Schematiseringshandleiding asfaltbekleding. WBI 2017, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, versie 2.0, 1 december 2016.

[6] Technisch Rapport Asfalt voor Waterkeren, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), november 2002.

[7] Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage II Voorschriften bepaling hydraulische belasting primaire waterkeringen, Ministerie van Infrastructuur en Milieu.

[8] Dimensioneren op wateroverdrukken, presentatie en interpretatie resultaten grondwaterstromingsberekeningen, Oranjewoud documentnummer RB071098.004, revisie 3, 29 januari 1999.

[9] Handreiking Dijkbekledingen Deel 3: Asfaltbekledingen, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, januari 2015.

[10] Technische rapport klei voor dijken, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen TAW, mei 1996.

[11] Schematiseringhandleiding grasbekleding, WBI2017, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, april 2018.

[12] POVM Infiltratieproef II, Analyse Infiltratieproef IJsseldijk, A. van Hoven, A. Noordam, Deltares projectnummer 11202663-002, versie 3, oktober 2018.

[13] BAGT 569 Soft Soil correlatiestudies, P. Lubking, Grondmechanisch onderzoek algemeen, 1997, Projectnummer CO-374590.

[14] Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 1999.

[15] PLAXIS Material models manual, 2016, chapter 16 Hydraulic models.

[16] Peilbuisonderzoek Lauwersmeerdam, Dienst Weg en Waterbouwkunde, Notanr. WBA-N-87.026, proj. Nr. G8601/02.

[17] Peilbuiswaarnemingen Brouwersdam in de periode november 1979 - november 1981, S-71.066, CROW, april 1982.

[18] Onderzoek mijnsteenkaden op het werkeiland Noordland, Dienst Weg en Waterbouwkunde, S-78.023, maart 1985.

[19] Rapportage nader onderzoek DODH, HWBP-Verkenning Den Oever — Den Helder, RHDHV en HKV, PR3870.30, april 2019.

[20] Inventarisatie zanddijken met asfalt-beton-bekleding, notitie WBA-M-87.043, J.C.P. Johanson, 7 oktober 1987.

[21] Verkenning Waddenzeedijk Koehool — Lauwersmeer, Basisrapport Geohydrologie, referentie LW344-37/19-018.412, Witteveen en Bos, Definitief 14 november 2019.

[22] Rapportage nader onderzoek DODH, HWBP-Verkenning Den Oever - Den Helder, HKV en Royal Haskoning DHV, kenmerk PR3870.30, d.d. april 2019.

[23] HWBP - Verkenning Wieringer Zeewering, Balgzanddijk en Amsteldiepdijk tussen De Kooy en Den Oever, Resultaten geotechnisch onderzoek en installatie monitoringsnet, Inpijn Blokpoel, 06P004659-RG-01 versie 3, d.d. 9 april 2019.

[24] Tussenrapport betreffende metingen bij stormopzet (Dec. 1999) Balgzanddijk Dp 6.850 en Dp 8.850 behorende bij het detailonderzoek Fase 10, Fugro opdrachtnummer: U-1028/020, d.d. 15-12-199.

[25] Rijkswaterstaat Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Kenmerkende waarden Getijgebied 2011.0, Datum 22 juli 2013, Status Definitief.

[26] Neerslagstatistiek en -reeksen voor het waterbeheer 2019, Stowapublicatie 2019-19, ISBN 978.90.5773.860.9.

[27] De Looff, A.K., B.G.H.M. Wichman en R. ‘t Hart. Handreiking asfalt dijkbekledingen op funderingslagen. Kiwa KOAC en Deltares, rapport e140416901-3, mei 2020.

[28] PLAXIS 2D-Reference Manual, CONNECT Edition V22.00, Last update December 14, 2021.

[29] Onderzoek naar grondwater niveau onder asfalt bekleding, De Helderse Zeewering, CONCEPT STATUS, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, 28 augustus 2023.

BIJLAGE A

RESULTATEN ELEKTRISCH ANALOGON ONDERZOEK COW

Tabellen en tekst overgenomen uit [20].

dijkvak	lengte dijk-vak [km]	hoogte open teen [m ten opzichte van NAP]	rechtstreeks uit analogon afgeleide stijghoogte	gecorrigeerde stijghoogte (afwijkende geometrie)
Ommelander zeedijk	6,5	2,85	-	4,00
Emmapolderdijk	9,4	2,00	2,60	2,60
Eemshavendijk	14,6	2,00	2,60	2,60
Eemshavendijk: uitbr.	2,4	3,00	2,60	3,60
Lauwersmeerdam	13,2	2,00	2,80	2,80
Oost Holwerder/Peasens	±2,0	2,50	-	4,00
IJsdijk	4,8	1,80	2,80	2,70
Eendragtpolder	3,9	1,80	2,80	2,70
Banckspolder Schierm.	4,0	2,25	2,80	3,05
Polder Eijerland	1,7	1,70	2,80	2,65
Rijkszeew. Oudenschild	1,1	1,80	2,60	2,50
Wieringen noordzijde	3,0	2,30	2,80	3,10
Wieringen noordzijde	6,0	2,45	2,80	3,25
Pettemer zeewering	1,5	3,00	2,80	3,80
Helderse zeewering	7,5	2,00	2,80	2,80
Helderse zeewering		3,00	2,80	3,80
Noordzeekering Goeree	0,4	1,20	1,50	2,30
Flaauwe Werk	2,7	0,00	2,20	2,20
Tienhovenpolder	4,3	3,00	2,80	3,80
Herdijkte Zwarte Polder	4,3	3,00	2,80	3,80
Westkapelse zeedijk	0,6	1,60	2,80	2,60
Onrustpolder	1,2	3,00	2,50	3,50

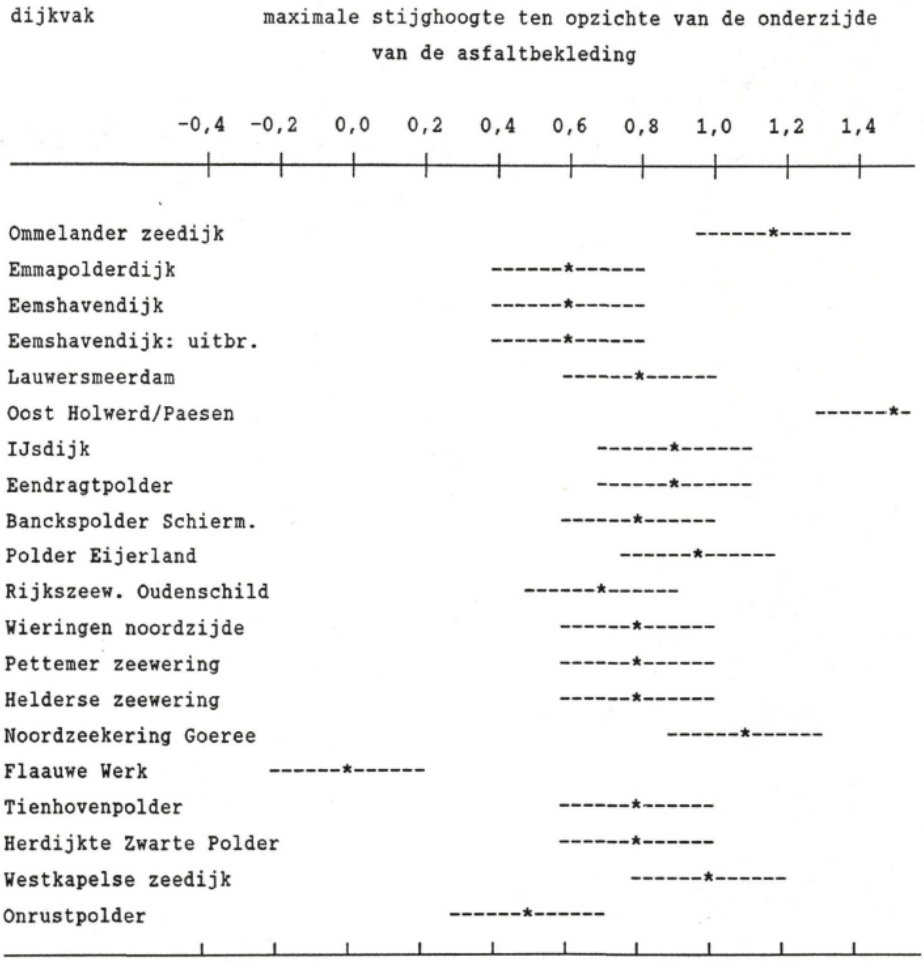
Stijghoogten van grondwaterstand bij dijkvakken waarbij de asfaltbetonbekleding halverwege het buitentalud begint (tussen NAP + 1,2 m en NAP + 3,0 m).

dijkvak	lengte dijk-vak [km]	hoogte open teen [m ten opzichte van NAP]	rechtstreeks uit analogon afgeleide stijghoogte	gecorrigeerde stijghoogte (afwijkende geometrie)
Bolwerk Eierland	1,1	0,60	2,20	2,40
Bolwerk Robbengat	0,5	0,50	2,20	2,35
Mokbaai	0,4	0,10	2,20	2,25

Stijghoogten van grondwaterstand bij dijkvakken waarbij de asfaltbetonbekleding ter plaatse van de teen begint.

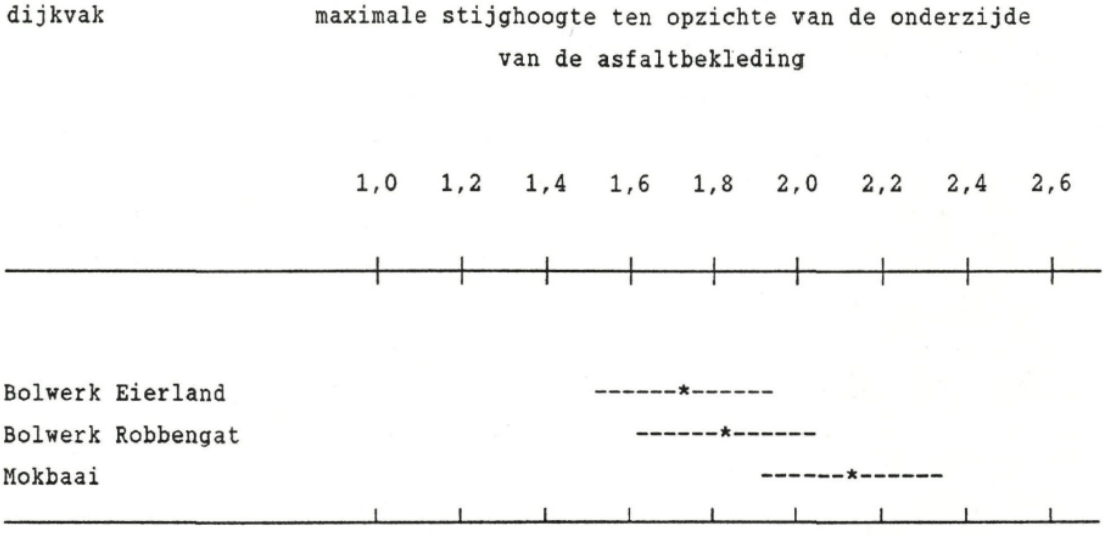
Dijkvakken waarbij de grondwaterstand niet tot onder de bekleding van asfaltbeton kan komen. Een voorwaarde hiervoor is dan vaak wel dat de kwaliteit van de ontworpen waterondoorlatende constructie goed blijft.

Koehool-Westhoek
Zwarte Haan-Sjoukeshoek
Oost Holwerderpolder
Wierum-Paesens
Hondsbossche zeewering
Hooglandpolder
Kievitspolder
Westhoek-Zwarte Haan
Sjoukeshoek-Noorderleeg
Ternaarderpolder
West Holwerderpolder
's Arendspolder
Nijspolder



Maximale stijghoogte ten opzichte van de onderzijde van de asfaltbetonbekleding bij dijkvakken waar de asfaltbetonbekleding halverwege het buitentalud begint (tussen NAP + 1,2 m en NAP + 3,0 m).

De doorlatendheidscoefficient varieert tussen 5 * 10^{-5} en 2 * 10^{-4} m/s.



Maximale stijghoogte ten opzichte van de onderzijde van de asfaltbetonbekleding bij dijkvakken waar de asfaltbetonbekleding ter plaatse van de teen begint.

BIJLAGE B

METINGEN EN BEREKENINGEN BIJ HOOGHEEMRAADSCHAP HOLLANDS NOORDERKWARTIER

B.1 INLEIDING

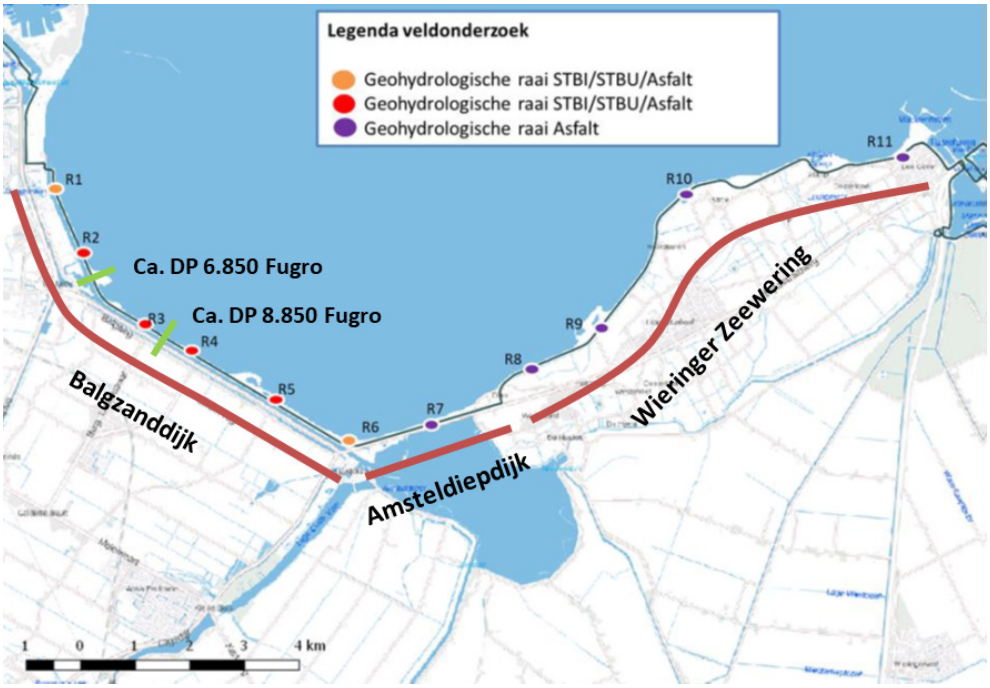
Door het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK) zijn metingen en analyses verstrekt die zijn uitgevoerd voor de Balgzanddijk, Amsteldiepdijk en de Wieringer Zeewering. De metingen en analyses zijn gerapporteerd in:

- Rapportage nader onderzoek DODH, HWBP-Verkenning Den Oever - Den Helder, HKV en Royal Haskoning DHV, kenmerk PR3870.30, d.d. april 2019.
- HWBP - Verkenning Wieringer Zeewering, Balgzanddijk en Amsteldiepdijk tussen De Kooy en Den Oever, Resultaten geotechnisch onderzoek en installatie monitoringsnet, Inpijn Blokpoel, 06P004659-RG-01 versie 3, d.d. 9 april 2019.
- Tussenrapport betreffende metingen bij stormopzet (Dec. 1999) Balgzanddijk Dp 6.850 en Dp 8.850 behorende bij het detailonderzoek Fase 10, Fugro opdrachtnummer: U-1028/020, d.d. 15-12-1999.

In deze bijlage wordt een samenvatting van de metingen en analyses gegeven, toegespitst op de respons van het freatisch vlak in de dijk onder de asfaltbekleding.

De meetlocaties (raaien) zijn weergegeven in Figuur B.1, welke is overgenomen uit [22] en waarbij de twee meetlocaties uit [24] zijn ingetekend. Tevens is ingetekend de naamgeving van de dijken, van West (links) naar Oost (rechts), Balgzanddijk, Amsteldiepdijk en de Wieringer Zeewering.

Figuur B.1 **Situatie meetlocaties HHNK, Raai R1 tot en met R11 en twee meetraaien bij DP6.6850 en DP 8.850 uit [24].**



B.2 DWARSPROFIELEN, SCHEMATISERINGEN EN DOORLATENDHEDEN GRONDLAGEN

De in deze paragraaf gegeven dwarsprofielen, schematiseringen en doorlatendheden van grondlagen zijn een samenvatting afkomstig uit [22].

De Balgzanddijk, Amsteldiepdijk en de Wieringer Zeewering zijn zanddijken met aan de buitenzijde in de meest door golven aangevallen zone een asfaltbekleding. Boven de asfaltbekleding op het buitentalud, op de kruin en het binnentalud ligt een kleilaag met een grasbekleding. De meest recente dijkversterking is vaak over een eerdere dijk aangelegd, waardoor in de dijk oude kleikernen en kleibekleding aanwezig kunnen zijn.

De opbouw van de ondergrond, dijk en eventueel aanwezige klei of keileemkernen of deklagen van eerdere dijken zijn in kaart gebracht en geschematiseerd voor Raai 1 en 6 tot en met 11. De raaien 2 tot en met 5 zijn niet apart geschematiseerd.

De geschematiseerde grondlagen bestaan voor alle Raaien uit de grondsoorten zoals weergegeven in Tabel B.1. Hierin zijn tevens de doorlatendheden gekarakteriseerd door k-waarden gegeven, omgerekend in m/s (in het rapport [22] werd m/dag gehanteerd). De k-waarden van dijkzand en Zand pleistoceen zijn aanvankelijk geschat op basis van doorlatendheidbepalingen uit korrelverdelingen en boorgat falling head proeven, maar daarna gekalibreerd op basis van peilbuismetingen tijdens de stormconditie van 8 januari 2019. De k-waarden voor de overige grondsoorten zijn schattingen gebaseerd op literatuuronderzoek.

,Tabel B.1 k-waarden (m/s) per grondlaag en raai (R1 - R11).

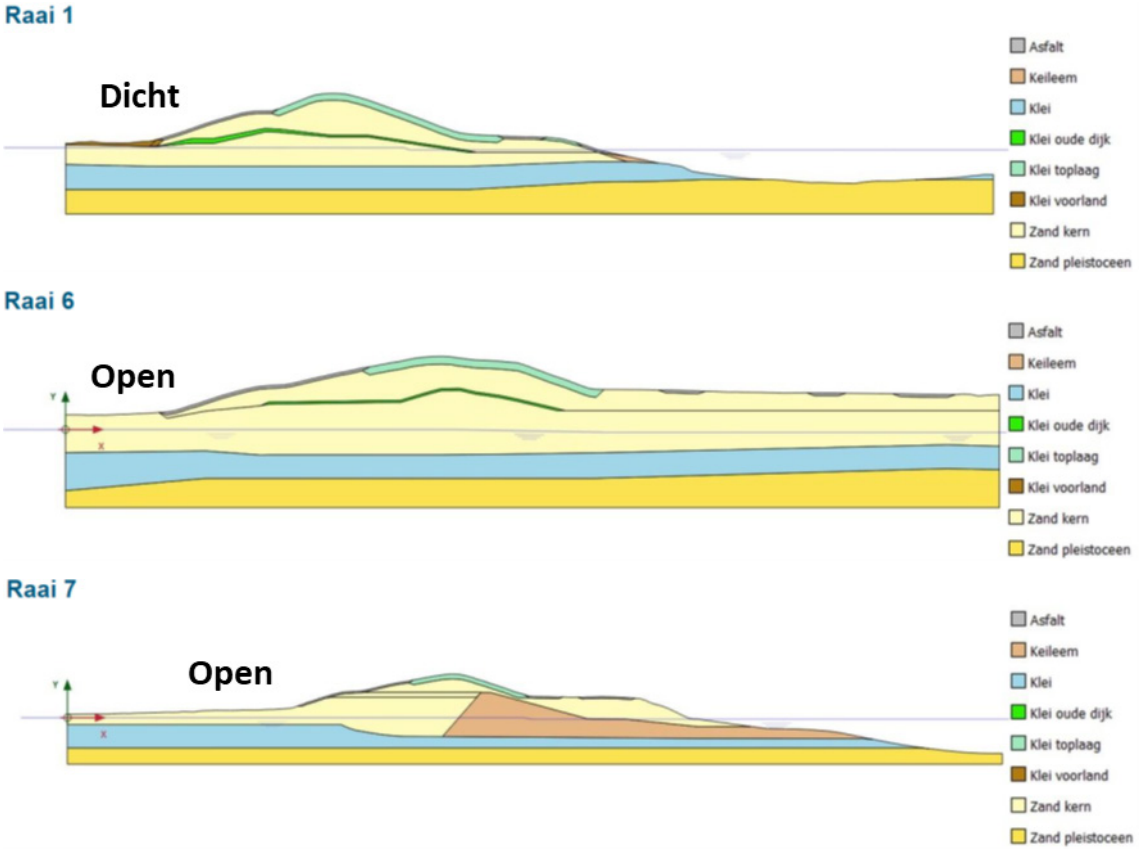
Raai	Asfalt	Klei toplaag	Dijkzand	Klei tussenlaag	klei	Keileem	Zand pleistoceen
R1	0	0,8E-06	0,7E-04	1,2E-07	1,2E-08	0,6E-05	1,1E-04
R6	0	0,8E-06	2,9E-04	1,2E-07	1,2E-08	0,6E-06	3,7E-05
R7	0	0,8E-06	3,5E-04	1,2E-07	1,2E-08	0,6E-07	1,3E-05
R8	0	0,8E-06	3,0E-04	1,2E-07	1,2E-07	0,9E-07	0,6E-04
R9	0	0,8E-06	3,0E-04	1,2E-07	1,2E-07	0,9E-07	2,6E-05
R10	0	0,8E-06	1,2E-04	1,2E-07	1,2E-07	0,6E-06	2,4E-05
R11	0	0,8E-06	3,8E-04	1,2E-07	1,2E-07	0,6E-06	2,2E-06

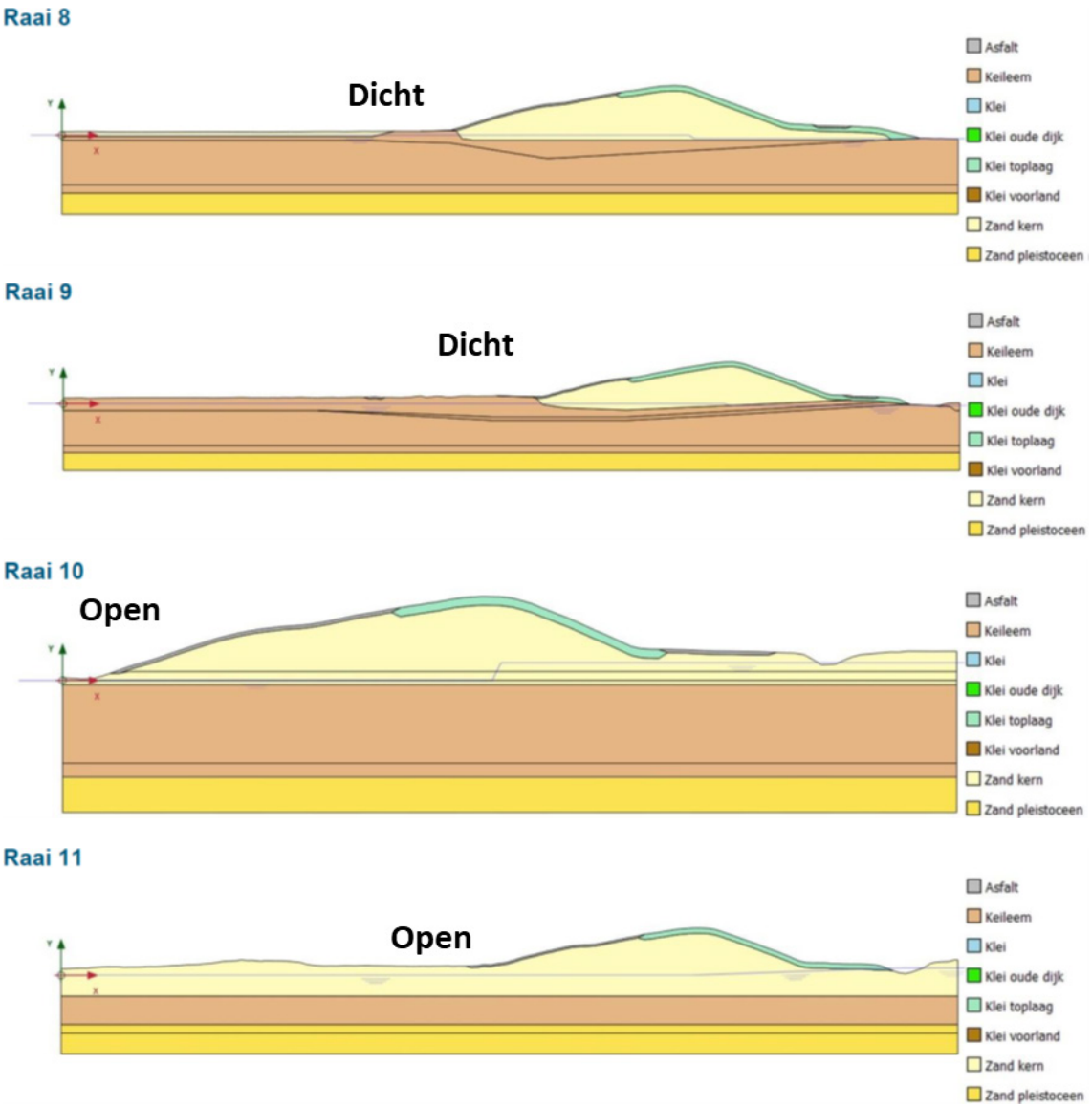
De gekalibreerde doorlatendheid van het dijkzand is in de orde van 10^{-4} m/s, met een factor 5 tussen de minimale en maximale waarde. Dit is van gelijke orde van grootte als de k-waarden bepaald op basis van korrelverdelingen en van de falling head testen in de peilbuizen.

De klei en klei-toplaag zijn een orde 100 minder doorlatend dat het dijkzand. Het is asfalt is als ondoorlatend geschematiseerd. Het is voor de respons van het freatisch vlak in de zandkern daarom van belang of er een afsluitende schil van klei en asfalt aanwezig is ter plaatse van de buitenteen, of dat het zand aan het oppervlak ligt, waar het buitenwater er direct in kan infiltreren. De geschematiseerde dwarsprofielen staan in onderstaande figuren, waarbij met ‘open’ en ‘dicht’ is aangegeven of het dijkzand aan het oppervlak van het profiel ligt (open), of dat deze volledig is afgesloten door klei en asfalt (dicht).

Bij Raai 1 en 7 is in de zandkern klei aangetroffen van een voormalige dijk waar later een nieuwe dijk overheen is aangelegd. Deze klei zal afstroming van grondwater naar binnen verhinderen, gezien geschematiseerde veel lagere doorlatendheid van deze klei. Voor de geschematiseerde dwarsprofielen zie Figuur B.2.

Figuur B.2 Geschematiseerde dwarsprofielen van Raai 1, en 6 tot en met 11 uit [22], waarin aangegeven of de teen ‘open’ of ‘dicht’ is.





De ligging van de onderrand van het asfalt is van belang in verband met de doorlatendheid van het buitentalud en daarmee mede bepalend hoeveel water tijdens een hoogwater in de dijk kan dringen. Daarnaast is in het kader van onderhavige studie van belang of het freatisch vlak de onderrand van het asfalt bereikt in extreme condities. De onderrand van het asfalt staat, samen met karakteristieke waterstanden, gemiddeld hoogwater, hoogste peil tijdens de storm van 8 januari 2019, waterstand bij de norm en bij de norm in 2073, in Tabel B.2.

Tabel B.2 **Onderrand asfalt en waterstanden per raai.**

Raai	Dp.	Onderrand asfalt (m NAP)	Gemiddeld hoogwater (m NAP)	Storm 2019 (m NAP)	Waterstand bij norm (m NAP)	Waterstand bij norm 2073 (m NAP)
R1	5	2,1	0,65	2,3	4,1	4,59
R6	12,5	3,1	0,7	2,5	4,35	4,79
R7	13,8	3,1	0,7	2,5	4,4	4,81
R8	16,3	2,4	0,7	2,5	4,4	4,84
R9	17,9	2,4	0,7	2,5	4,4	4,86
R10	20,8	2,5	0,7	2,6	4,4	4,86
R11	25,1	2,2	0,75	2,7	4,4	4,94

Opgemerkt wordt dat de onderrand van het asfalt in het model (het grijze laagje op het buitentalud) niet altijd overeen lijkt te komen met de onderrand van het asfalt in het veld. Op foto's van de plaatsing van de peilbuizen is te zien dat lager op het talud steenzettingen aanwezig zijn [23] (Figuur B.3). Er is vanuit gegaan dat deze steenzettingen zijn ingegoten met gietasfalt dan wel zijn dichtgeslibd, waardoor deze als ondoorlatend(asfalt) zijn gemodelleerd.

Figuur B.3 **Peilbuis 2 (PB2) onderaan het asfalt, boven de steenzetting.**



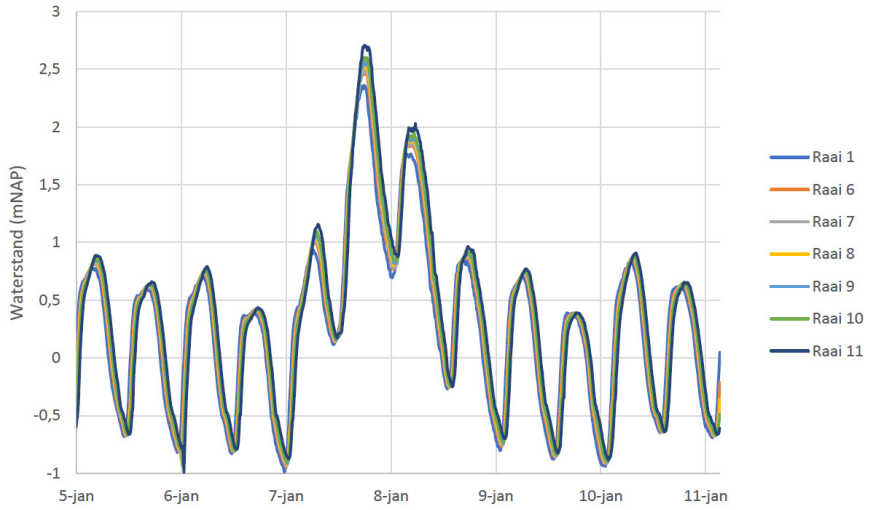
Tijdens de meetperiode is een storm met een hoge waterstand opgetreden. De waterstand was hoger dan het voorland en op veel plekken ook hoger dan de onderrand van het asfalt.

B.3 ANALYSE

In deze paragraaf wordt de analyse uit [22] kort samengevat. In enkele gevallen is in het kader van onderhavige studie een aanvullende opmerking gemaakt. In het kort is voor de Raaien 1 en 6 tot en met 11 een geohydrologisch model opgezet. Hiermee is de storm van 8 januari 2019 nagerekend en is de doorlatendheid van het dijkzand gebruikt als kalibratieknop om de metingen zo goed mogelijk passend te krijgen. Daarna is het model met eventueel aangepaste zanddoorlatendheid gebruikt voor een voorspelling van de freatische lijn bij de waterstand bij de norm 2073, ter plaatse van peilbuis 2 (PB2). De voorspelde stijghoogte bij PB2 in het dijkzand is vervolgens gehanteerd als grondwaterstand onder het asfalt.

De stormopzet voor de diverse raaien is weergegeven in Figuur B.4, overgenomen uit [22]. De piek van de waterstand varieert van NAP + 2,3 m nabij Den Helder tot NAP + 2,7 m nabij Den Oever.

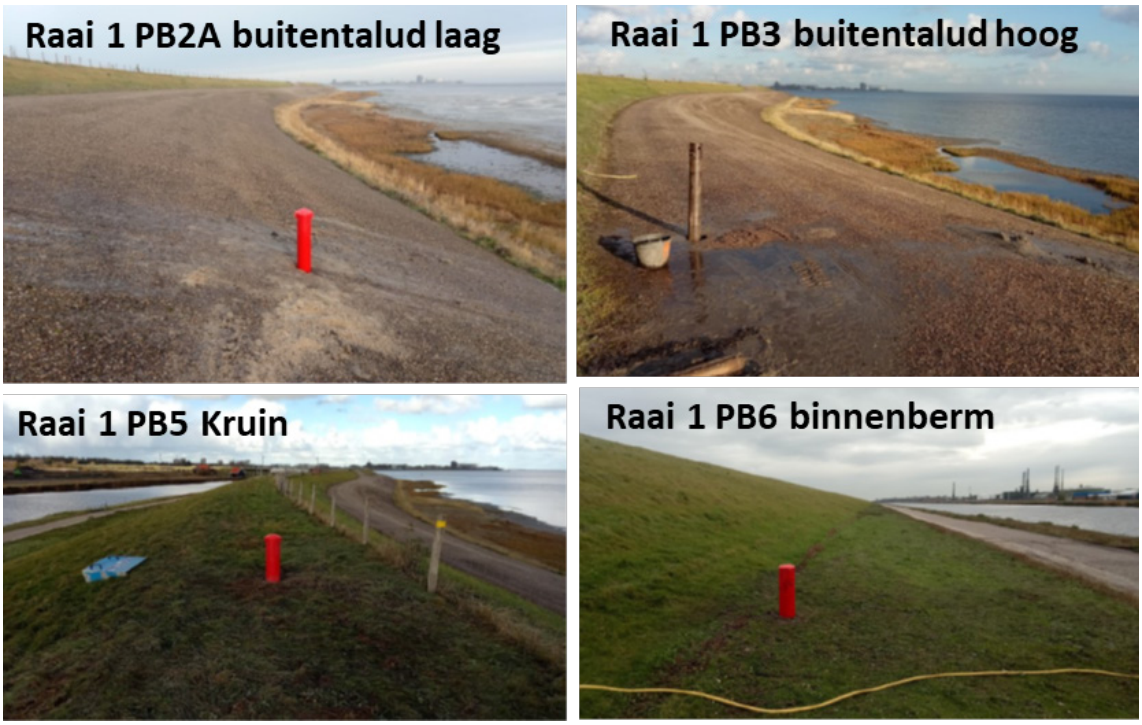
Figuur B.4 **Geïnterpoleerde waterstanden (m t.o.v. NAP) Raai 1 en 6 tot en met 11 op basis van waterstandsmetingen bij Den Oever en Den Helder.**



Over het algemeen is de respons van het freatisch vlak in de zandkern van de dijk op het hoogwater gering. In het kader van onderhavige studie is onderstaande Tabel B.3 opgesteld met de amplitude van de respons op het hoogwater van 8 januari 2019. De nummering van de peilbuizen geeft grofweg de locatie in het dwarsprofiel, zoals geïllustreerd door onderstaande foto's (Figuur B.5). Peilbuis 2 staat onderaan het buitentalud, hogere peilbuisnummers staan verder naar binnen. In een aantal raaien is er geen peilbuis op locatie 2 geplaatst, onderaan het buitentalud, maar is de eerste peilbuis van buitenaf gezien die op locatie 3, hoger op het buitentalud. Een peilbuis op locatie 2 geeft logischerwijs een hogere respons dan die op locatie 3.

Op elke locatie zijn soms meerdere puilbuizen geplaatst, met filters op verschillende dieptes. In deze tabel staan enkel de peilbuizen met het filter in het dijkzand, welke een indicatie geven van de hoogte van het freatisch vlak in de zandkern en onder de asfaltbekleding.

Figuur B.5 **Locatie peilbuizen in het dwarsprofiel (voorbeeld raai 1).**



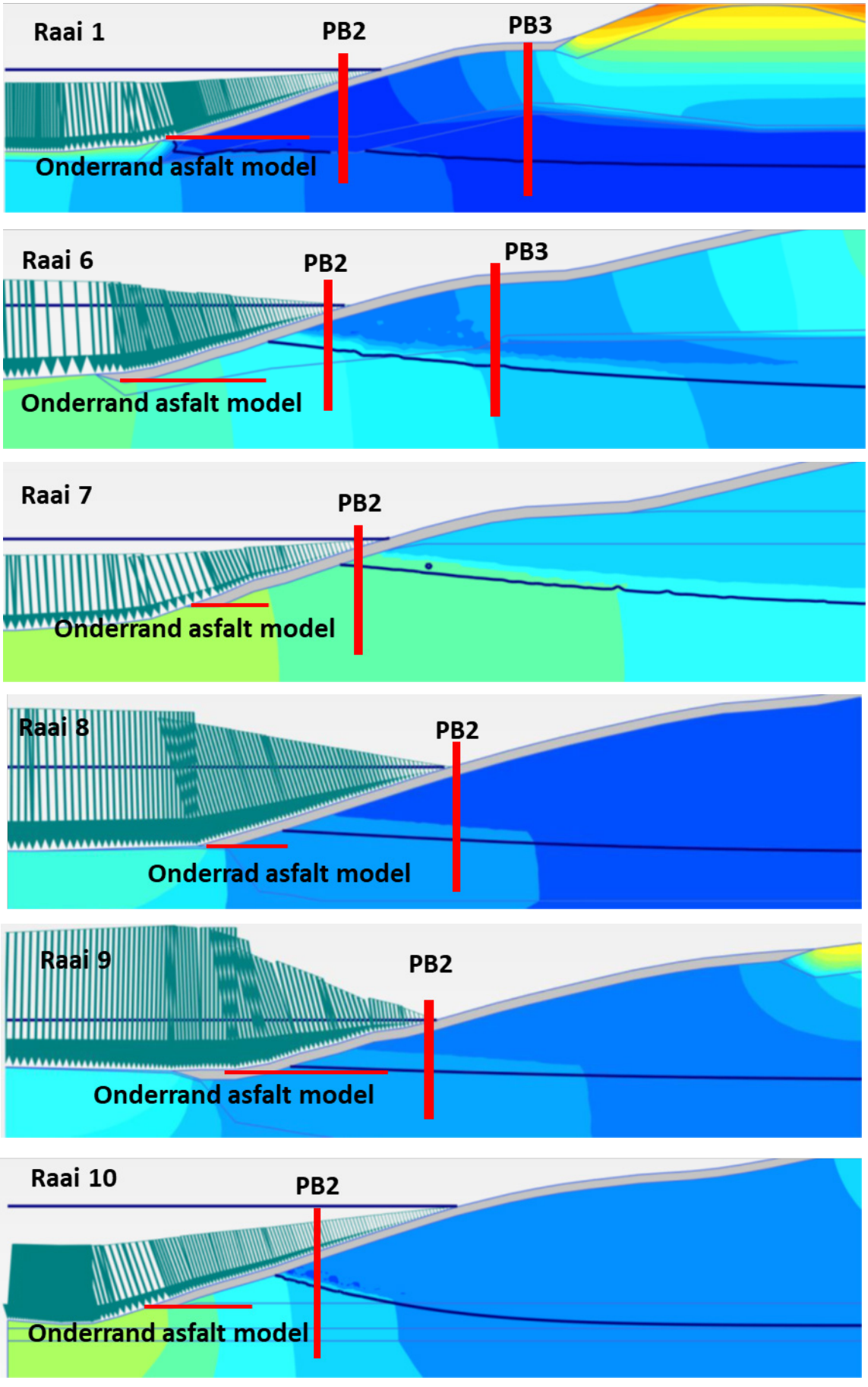
Tabel B.3 **Amplitude respons peilbuizen op hoogwater 8 januari 2019.**

Raai	Maximale waterstand storm 8 januari 2019 (m NAP)	peilbuis	Amplitude respons (m)
R1	2,3	PB2A	0,1
		PB3-1	0,05
		PB5-1	0
		PB6-1	0
R2	2,35	PB3-1	0
R3	2,4	PB3-1	0,1
R4	2,45	PB3-1	0,6
R5	2,5	PB3-1	0,3
R6	2,5	PB2A	0,5
		PB3-1	0,2
		PB5-1	0
		PB6-1	0
R7	2,5	PB2B	0,8
		PB3-1	0,25
R8	2,5	PB2B	0,25
		PB3-1	0,1
R9	2,5	PB2B	0,1
		PB3-1	0,05
R10	2,6	PB2B	0,55
R11	2,7	PB2B	0,3

De grootste respons treedt op bij Raai 4 en 5. Hier wordt ter plaatse van PB3 (buitenberm) een respons van 0,6 en 0,3 m gemeten. Bij deze raaien is geen PB2 beschikbaar. Deze respons in PB3 is hoger dan de respons van PB3 bij Raai 7 (circa 0,25 m), waar laag op het talud PB2 een respons van 0,8 m geeft. In Raai 4 en 5 waren geen peilbuizen lager op het talud geplaatst, waardoor de PB3's met elkaar zijn vergeleken. Het is vanwege de hogere respons in PB3 aannemelijk dat onder het buitentalud de respons zou was dan bij Raai 7.

Met behulp van Plaxis zijn voor de raaien 1 en 6 tot en met 11 grondwaterstromingsberekeningen gemaakt. Voor Raai 11 heeft dit niet tot bevredigende resultaten geleid, deze wordt verder buiten beschouwing gelaten. Voor de Raaien 2 tot en met 5 is op basis van Raai 1 en 6 tot een resultaat gekomen. In de berekeningen zijn de binnenwaterstand en de buitenwaterstand tijdens de storm van 8 januari 2019 als randvoorwaarden opgelegd en is middels aanpassing van de doorlatendheden (zie Paragraaf B.3) geprobeerd om de gemeten respons in peilbuizen na te rekenen. Vervolgens is met het gekalibreerde model de stormopzet behorend bij de waterstand bij de norm met zichtjaar 2073 nagerekend. Dit leidt tot de volgende beelden bij de freatische lijn (Figuur B.6).

Figuur B.6 **Beeld freatische lijn MHW 2073 berekend met Plaxis, waarin indicatief de plaats van PB2 en de onderrand van het asfalt in het model.**



Met uitzondering van Raai 1 wordt de modelmatige onderrand van het asfalt in alle gevallen gehaald tijdens het MHW 2073, zoals te zien in Figuur B.6.

Er is ook rekening gehouden met het scenario waarbij het voorland ter plaatse van de buitenteen onder extreme omstandigheden zal eroderen, waardoor de hydraulische weerstand vermindert. Het (geschematiseerde) gevolg van dit scenario is een extra verhoging van het freatisch vlak onder het asfalt van 1,0 m. De kans dat dit scenario optreedt wordt geschat op 10%.

Er is in het model vanuit gegaan dat de dichte randvoorwaarde op het buitentalud soms lager ligt dan de onderrand van het asfalt. Hier wordt in de rapportage niet expliciet aandacht aan besteed, enkel wordt gesteld dat de aanwezigheid van vegetatie op voorland zorgt voor een lage doorlatendheid op het voorland doordat de vegetatie slib vasthoudt. Ondanks dat de onderrand afwijkend is gekozen, is het dijkzand zodanig in doorlatendheid aangepast dat de meting (zo goed mogelijk) kan worden nagerekend. De hydraulische weerstand tussen buitenwater en de locatie van PB2 zal daarmee grofweg kloppen, waardoor het allicht van minder van belang is of dit komt door een afwijkende doorlatendheid van het dijkzand of een afwijkende ligging van de ondoorlatende onderrand.

Voor de beoordeling of het freatisch vlak de onderrand van het asfalt bereikt is, is uitgegaan van het modelresultaat ter plaatse van peilbuis 2. Vanwege de kromming van het freatisch vlak (Figuur B.6) ligt het freatisch vlak ter plaatse van het buitentalud waarschijnlijk hoger dan verwacht wordt op basis van de stijghoogte bij PB2.

De modelresultaten, normwaterstand en de onderrand per raai zijn samengevat in Tabel B.4.

Tabel B.4 **Samenvatting modelresultaten per Raai.**

Raai	Dp.	Onderrand asfalt (m NAP)	Waterstand norm 2073 (m NAP)	Freatisch vlak bij PB2 (m NAP)	Freatisch vlak bij PB2, gegeven scenario erosie (+1,0 m) (m NAP)
R1	5	2,1	4,59	0,84	1,84
R2	Geen Plaxis analyse, vergelijkbaar met R1				
R3	Geen Plaxis analyse, vergelijkbaar met R1				
R4	Geen Plaxis analyse, vergelijkbaar met R6				
R5	Geen Plaxis analyse, vergelijkbaar met R6				
R6	12,5	3,1	4,79	3,19	4,19
R7	13,8	3,1	4,81	4,06	4,81 (max waterstand bij norm)
R8	16,3	2,4	4,84	1,38	2,38
R9	17,9	2,4	4,86	1,71	2,71
R10	20,8	2,5	4,86	1,96	2,96
R11	Plaxis analyse leidt niet tot geloofwaardig resultaat.				

Bij twee van de zes met het Plaxis model geanalyseerde raaien (Raai 6 en 7) wordt onder normomstandigheden 2073 een freatisch vlak hoger dan de onderrand van het asfalt verwacht op locatie PB2. Bij het optreden van het scenario erosie bij de teen worden dat er vier van de zes, waarbij er één op 2 centimeter nadert (Raai 8). Het is op basis van de gemeten respons aannemelijk dat Raai 2 en 3 een met Raai 1 vergelijkbare respons hebben en dat Raai 4 en 5 vergelijkbaar zijn met Raai 6.

Grofstoffelijk is de verzameling resultaten in te delen in drie categorieën, die met een lage (Raai 1, 2 en 3), gemiddelde (Raai 8, 9 en 10) en hoge respons (Raai 6 en 7). In het kader van onderhavige studie is gekeken of er onderscheid is ten aanzien van:

1. Aanwezigheid van voorland en of geulen.
2. Doorlatendheid dijkzand (bij boorgaten van de peilbuis).
3. Aanwezigheid en diepte van scheidende laag tussen dijkzand en pleistoceen zand.
4. Blokkade van binnenwaartse drainage (oude kleidijk of kleibekleding aanwezig).

Ad 1. Voorland en of geulen.

De aanwezigheid van geulen en of voorland heeft invloed op de hydraulische weerstand tussen het buitenwater en het dijkzand. Bij een regime van aanslibbing en begroeiing op het voorland zal naar verwachting de hydraulische weerstand toenemen. In geval van een geul zal er waarschijnlijk geen of weinig slib aanwezig zijn, maar eerder schoon zand, wat naar verwachting een veel lagere hydraulische weerstand heeft.

De luchtfoto van google maps laat geen geulen voor de dijk zien (Figuur B.7). Alleen bij Raai 1 lijkt op enige afstand van de teen een ondiepe geul te liggen.

Figuur B.7 **Luchtfoto google maps met globale locaties Raai 1 tot en met 11.**



Op de foto's uit [23] van de plaatsing van de peilbuizen is een meer gedetailleerd beeld van de teen van de dijk te zien (Figuur B.8).

Figuur B.8 **Foto's buitenteen bij plaatsing peilbuizen.**



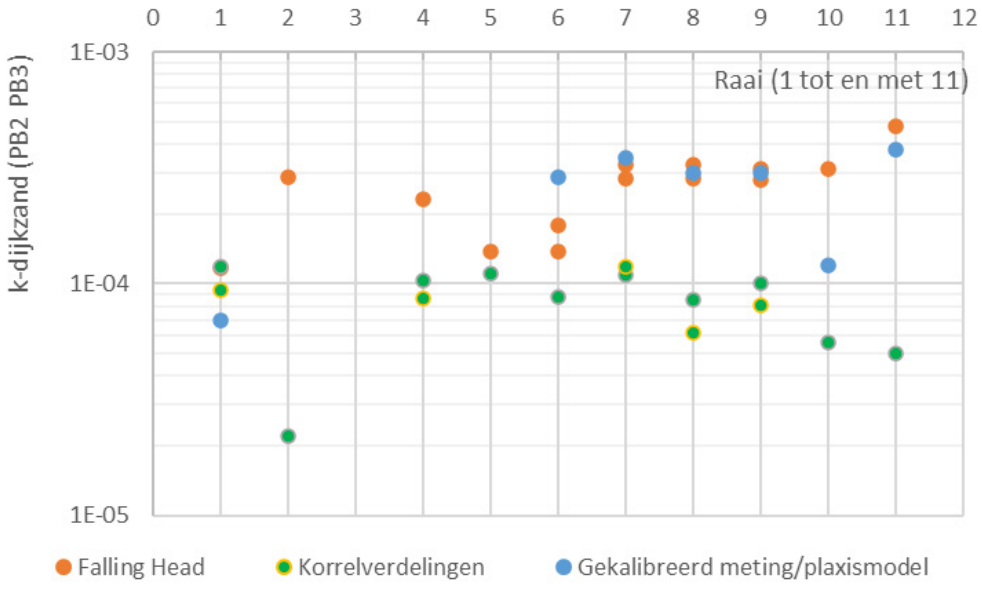


Bij de Raaien 2 en 3 is het voorland relatief laag (weinig begroeiing), terwijl hier de respons juist laag is. Bij de Raaien 6 en 7 is lokaal juist relatief hoog voorland aanwezig met begroeiing. De respons was hier juist hoog. Van de Raaien 8, 9 en 10 hebben raai 8 en 10 onbegroeide slikken als voorland. Bij Raai 8 is deze uitermate modderig ten opzichte van Raai 10. Bij Raai 9 is juist een behoorlijk hoog en begroeid voorland aanwezig. Hierin is geen duidelijke en of logische correlatie aanwezig tussen de gemeten en gemodelleerde respons in het dijkzand.

Ad 2 Doorlatendheid dijkzand

Naast de doorlatendheid van het voorland en de bekleding is de doorlatendheid van het dijkzand zelf van invloed op de respons op hoogwater. De resultaten van falling head testen op de boorgaten waarin peilbuizen PB2 en PB3 zijn geplaatst zijn uitgezet in onderstaande grafiek, naast de op basis van korrelverdelingen berekende k-waarden van het dijkzand (Figuur B.9).

Figuur B.9 **k-waarden (m/s) dijkzand uit falling head testen PB2 en PB3 van Raai 1 tot en met 11 [23] (oranje) en op basis van korrelverdelingen (groen) en gekalibreerde waarden uit PLAXIS model (blauw).**



De k-waarden van het dijkzand liggen in de gebruikelijke range van 10^{-4} m/s. De op basis van de korrelverdelingen bepaalde k-waarden liggen structureel lager (orde 10^{-5} à 10^{-4} m/s) ten opzichte van de op basis van boorgat Falling Head test bepaalde waarden (orde 10^{-4} à 10^{-3} m/s). De variabiliteit over de verschillende raaien is relatief gering en niet duidelijk onderscheidend naar de gemeten en berekende respons op de buitenwaterstand. Vermeldenswaardig is dat de Falling head testen in het boorgat veel beter overeenkomen met de op peilbuismetingen gekalibreerde k-waarden uit de modelberekeningen.

Ad 3 en 4. Aanwezigheid en diepte scheidende laag en blokkade binnenwaarts

De hydraulische weerstand tussen het buitenwater en het dijkzand is naast de doorlatendheden van de bekleding en het dijkzand ook afhankelijk van de dikte van het dijkzandpakket. Deze is weer afhankelijk van de aanwezigheid van een eventuele scheidende laag tussen het dijkzand en het onderliggende pleistocene zandpakket.

Er is voor de bepaling van de diepte van de scheidende laag gekeken naar de boringen uit [23] en de schematiseringen uit [22]. De eventuele blokkade van de zandkern in binnenwaartse richting door de aanwezigheid van een oude kleikern of bekleding is gebaseerd op de schematiseringen van het geohydrologische model.

De resultaten zijn samengevat in Tabel B.5.

Tabel B.5 **Diepte scheidende laag (m t.o.v. NAP) en eventuele blokkade van de zandkern binnenwaarts.**

Raai	Bovenkant scheidende laag (m t.o.v. NAP)	Blokkade in binnenwaartse richting (Ja/ nee, opmerking)
R1	-3	Ja, oude kleibekleding in schematisering
R2	-3	-
R3	-0,5	-
R4	-2,3	-
R5	-3	-
R6	-3	Nee, waarschijnlijk niet doorlopend. Wel klei in zandkern aangetroffen.
R7	onduidelijk in boring	Ja, oude kleikern
R8	-1	Nee
R9	-1,5	Nee
R10	-0,5	Nee
R11	-1	Nee

Uit de analyse blijkt geen duidelijk onderscheid, zowel in de diepte van de scheidende laag als in de eventuele blokkade van het binnenwaarts draineren. De diepte van de scheidende laag is bij Raai 1 relatief diep en er is een oude kleibekleding aanwezig, echter de respons is hier gering, wat op basis hiervan niet verwacht zou worden. Het is lastig om de 2D bodemopbouw in de dijk betrouwbaar te schematiseren op basis van boringen, omdat het maar de vraag is in hoeverre een kleilaagje doorloopt of niet en wat van een relatief dun laagje de doorlatendheid is.

Er wordt niet verwacht dat met de beschikbare gegevens op voorhand, zonder de metingen tijdens de storm van januari 2019, voorspeld zou kunnen worden waar de respons relatief hoog of laag zou zijn.

B.4 ANALYSE STORMCONDITIE 1999

In het tussenrapport betreffende de metingen bij stormopzet (Dec. 1999) Balgzanddijk Dp 6.850 en Dp 8.850 behorende bij het detailonderzoek Fase 10, Fugro opdrachtnummer: U-1028/020, d.d. 15-12-199 wordt kort ingegaan op de respons van peilbuizen in de dijk op een hoogwater.

Deze twee meetraaien bevinden zich tussen meetraaien R2 en R4 (zie Figuur B.1). Er is gemeten in het pleistocene zand, het eerste watervoerende pakket, en in de zandkern van de dijk. Dit laatste is van belang voor onderhavige studie. De peilbuizen stonden nabij de binnenteen van de dijk.

De hoogste waterstand tijden de storm van 4 december 1999 was NAP +2,12 m. Dit betekent dat voor de beide locaties het buitenwater tot aan de teen van de dijk stond en er een waterdiepte van respectievelijk 0,6 en 0,9 m op het voorland stond.

De peilbuizen in de zandkern van de dijk, nabij de binnenteen, reageren niet op de verhoogde buitenwaterstand. In het rapport wordt daarom geconcludeerd dat de teen relatief dicht is.

Gezien de resultaten van de peilbuismetingen in [22] is het echter niet ondenkbeeldig dat de respons ter plaatse van de binnenteen afwezig is, terwijl de respons in de zandkern aan de buitenzijde wel significant is.

Het eerste watervoerende pakket reageert wel op de verhoogde buitenwaterstand, maar deze is niet relevant voor deze studie.

B.5 CONCLUSIES

Geconcludeerd wordt dat langs de beoordeelde dijken tussen Den Helder en Den Oever een wisselend beeld optreedt van de indringing van een verhoogd freatisch vlak in de dijk bij hoge buitenwaterstanden. In het noordelijke deel van de Balgzanddijk (Raai 1, 2 en 3) is de respons van het freatisch vlak op het hoogwater zeer gering, duidend op een hoge weerstand tussen de zandkern en het buitenwater. In het Zuidelijke deel van de Balgzanddijk en de Amsteldiepdijk is de respons hoog (Raai 4 tot en met 7) en de respons van de Wieringer Zeewering (Raai 8 tot en met 11) ligt hier tussenin. De respons ter plaatse van PB2 en PB3 in het dwarsprofiel als percentage van de amplitude van het buitenwater is gegeven in Tabel B.6.

De hogere modelmatige respons wordt gedeeltelijk veroorzaakt door de wat langere duur van het hoogwater bij de waterstand bij de norm 2073. Hoe langer een hoogwater duurt, hoe groter de respons.

Tabel B.6 **Respons freatisch vlak in dijkzand (m t.o.v. NAP) ter hoogte van Peilbuis 2 en 3 (PB2 en PB3) gemeten tijdens de storm van januari 2019 en berekend voor de waterstand bij de norm 2073.**

Raai	Locatie in dwarsprofiel	Respons storm januari 2019 (Hoogste buitenwaterstand t.o.v. NAP/ hoogste meting t.o.v. NAP x100%)	Berekende respons op MHW2073 bij locatie PB2 (%)
1	PB2	4%	18%
	PB3	2%	
2	PB2	-	-*
	PB3	0%	
3	PB2	-	-*
	PB3	4%	
4	PB2	-	-**
	PB3	24%	
5	PB2	-	-**
	PB3	12%	
6	PB2	20%	67%
	PB3	8%	
7	PB2	32%	84%
	PB3	10%	
8	PB2	10%	29%
	PB3	4%	
9	PB2	4%	35%
	PB3	2%	
10	PB2	21%	40%
	PB3	-	
11	PB2	11%	-
	PB3	-	

* vergelijkbaar met R1

** vergelijkbaar met R6

De respons in de kern van de dijk is, naast de hoogte en duur van de buitenwaterstand, afhankelijk van de hydraulische weerstand tussen het buitenater en de zandkern van de dijk. Deze weerstand is afhankelijk van de aanwezigheid van een bekleding en de doorlatendheid hiervan, de aard van het voorland, zand, klei, slib en de aansluiting hiervan op de teen van de dijk en de doorlatendheid van het dijkzand zelf. Ook de (on)mogelijkheid tot binnenwaartse drainage heeft invloed op de respons van het freatisch vlak onder het buitentalud. Dit kan bijvoorbeeld worden veroorzaakt door een oude kleikern in de dijk. Geconcludeerd kan worden dat op voorhand, zonder metingen van de respons niet was te voorspellen op welke locaties de respons hoog of laag zou zijn.

BIJLAGE C

METINGEN WETTERSKIP FRYSLÂN

C.1 INLEIDING

In het kader van de verkenning Waddenzeedijk Koehool Lauwersmeer is het basisrapport geo-hydrologie opgesteld [21]. Het rapport beschrijft de interpretatie van metingen van waterspanningen gedurende meerdere maanden, waaronder een storm op 8 januari 2019. Tijdens deze storm trad in de Waddenzee langs Friesland een waterstand op van ruim NAP +3 m. Het voorland voor de dijk lag daarbij onder de waterspiegel, iets wat niet vaak voorkomt.

De waterspanningsmetingen waren verdeeld over een aantal dwarsprofielen op het dijktraject. Metingen zijn verricht in de kern van dijk, onder het buitentalud en in de kruin van de dijk, en in de eerste watervoerende zandlaag. De metingen in de kern van de dijk zijn gebruikt om de respons van het freatische vlak op een hoogwater te modelleren en daarna te voorspellen. De metingen en interpretatie worden in deze bijlage beschreven.

MEETLOCATIES VOOR FREATISCH VLAK IN DE DIJK

Voor het onderzoek naar de freatische lijn onder de asfaltbekleding zijn enkel de metingen onder het buitentalud en in de kruin van de zandkern van belang. Deze meetlocaties zijn weergegeven in Figuur C.1, genummerd van 1 tot en met 12.

Figuur C.1 **Meetlocaties 1 tot en met 12 met metingen in de zandkern onder het buitentalud en de kruin, op basis van [21].**



De koppeling tussen de locaties 1 tot en met 12 en met de locaties uit [21] op basis van de dijkpaalnummering van het Wetterskip Fryslân wordt gegeven in Tabel C.1.

Tabel C.1 **Locaties 1 tot en met 12 in relatie tot de locaties uit [21].**

Locatie	Locatie uit [21] op basis van dijkpaalnummering
1	11.2
2	14.3
3	18.4
4	21.6
5	39.4
6	42.7
7	47.8
8	48.8
9	51.9
10	56.2
11	59.0 (komt niet voor in analyse [21])
12	60.3 (komt niet voor in analyse [21])

C.3 DWARSPROFIELEN, SCHEMATISERINGEN EN DOORLATENDHEDEN GRONDLAGEN

De Waddenzeedijken waar het onderzoek is uitgevoerd kunnen worden gekarakteriseerd als een zanddijk op een ondergrond van relatief ondoorlatende klei, veen en zand met kleilaagjes. Er is in het algemeen voorland aanwezig dat al dan niet regelmatig onder water komt te staan bij hoogwater. Aan de binnenzijde van de dijk is een sloot aanwezig. Soms is er in de zanddijk een oude dijk aanwezig die bestaat uit minder doorlatend materiaal. Deze oude dijk kan op verschillende plekken in het dwarsprofiel aanwezig zijn (buiten/ binnenzijde).

De bekleding op het buitentalud bestaat in het algemeen uit een steenzetting op klei, daarboven een dicht veronderstelde asfaltbekleding en daarboven een kleilaagbekleding met gras tot aan de kruin van de dijk. Op de kruin en het binnentalud bestaat de bekleding ook uit een kleibekleding met gras.

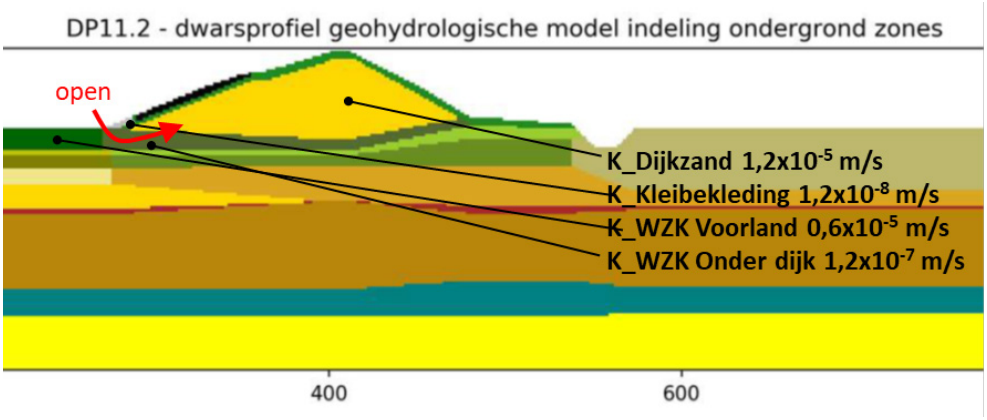
De dwarsprofielen met de doorlatendheden van grondlagen die naar verwachting het meest van invloed zijn op de freatische lijn onder het asfalt bij hoogwater zijn in onderstaande figuren weergegeven.

De dwarsprofielen zijn overgenomen uit [21], de k-waarden (m/s) zijn hierin ingetekend. De steenzetting is in het algemeen zeer doorlatend (>1,2x10^{-4} m/s) ten opzichte van de hieronder gelegen kleilaag (10^{-6} à 10^{-8} m/s). De doorlatendheid van de kleilaag onder de steenzetting is daarmee dominant voor de indringing van water en daarom in de figuur ingetekend. De k-waarden zijn gekalibreerd, dat wil zeggen dat ze in een grondwaterstromingsmodel zodanig zijn aangepast dat de metingen tijdens de storm van januari 2019 zo goed mogelijk konden worden nagerekend.

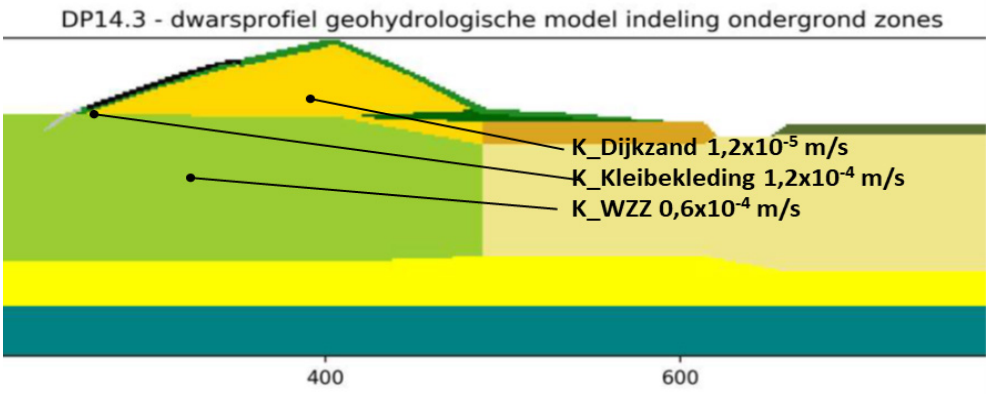
De doorlatendheid van het kernzand was in het algemeen 1,2x10^{-5} m/s. Dit is een gangbare waarde voor wat fijner zand. Alleen bij DP 21.6 is de doorlatendheid verdubbeld om de metingen beter te doen aansluiten bij de modelberekening.

De doorlatendheid van de kleilaag onder de steenzetting (genoemd kleibekleding) is zeer variabel geschematiseerd. Veelvuldig is hiervoor een waarde van 1,2x10^{-8} m/s aangehouden wat zeer ondoorlatend is en in twee gevallen (DP 14.3 en DP 47.8) is 1,2x10^{-4} m/s gehanteerd (een factor 10.000 hoger), wat een hogere doorlatendheid is dan het dijkzand.

Onder de dwarsprofielen is kort aangegeven of de buitenteen als min of meer als open kan worden gezien, of als gesloten. Open wil zeggen dat de zandkern niet wordt afgesloten van het buitenwater door kleilagen met een veel lagere doorlatendheid.

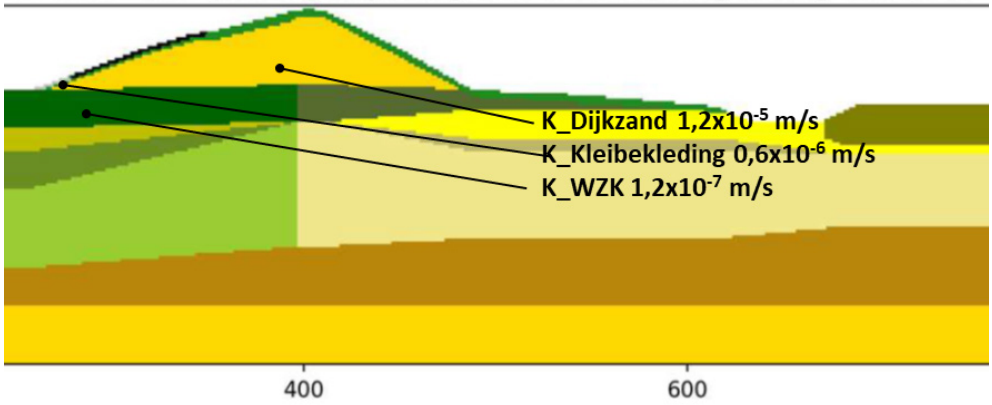


- De geschematiseerde relatief doorlatende grondlaag onder de buitenteen “K_WZK Onder dijk” maakt contact met het zand in de zandkern. De kleibekleding onder de steenzetting en de grond buitenwaarts op het voorland zijn relatief ondoorlatend.
- Respons buitenteen storm 8-1-2019 was 68%.



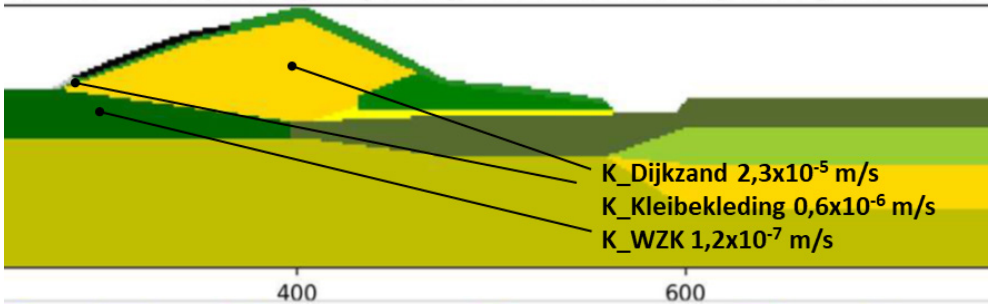
- Buitenteen is open. De doorlatendheid van de kleilaag onder de steenzetting en de grond onder de buitenteen zijn van gelijke orde van doorlatendheid als de zandkern.
- Respons buitenteen storm 8-1-2019 was 50%.

DP18.4 - dwarsprofiel geohydrologische model indeling ondergrond zones



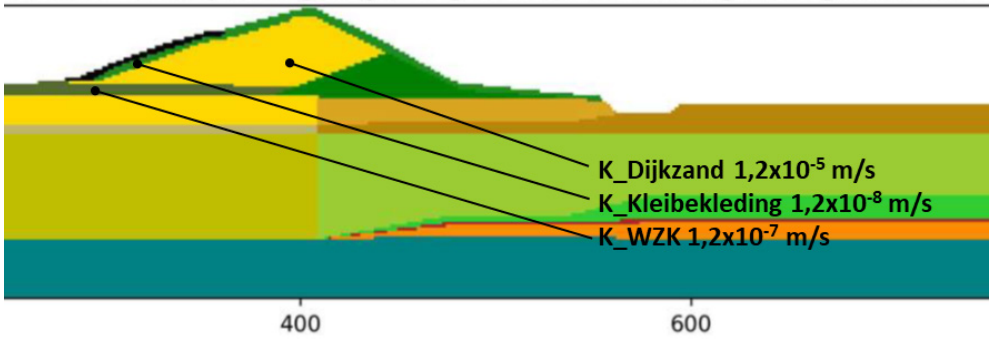
- Buitenteen is relatief open; de doorlatendheid van de kleilaag onder de steenzetting is slechts één orde lager, de doorlatendheid van de grondlaag onder de buitenteen is twee orden lager.
- Respons buitenteen storm 8-1-2019 was 45%.

DP21.6 - dwarsprofiel geohydrologische model indeling ondergrond zones

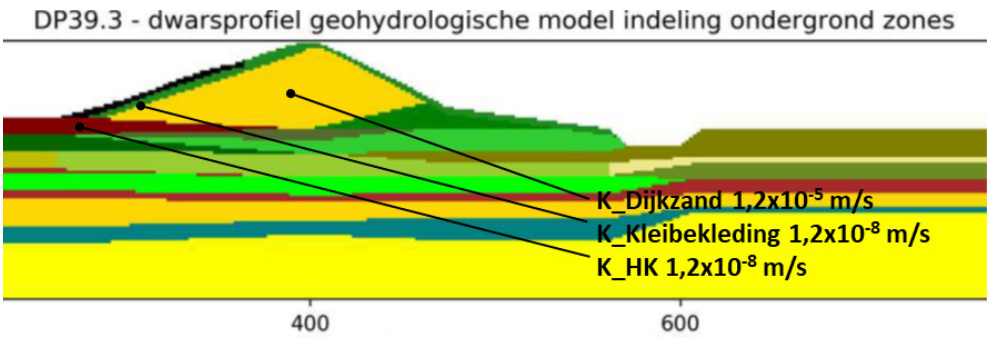


- Buitenteen is relatief open; de doorlatendheid van de kleilaag onder de steenzetting is slechts één orde lager, de doorlatendheid van de grondlaag onder de buitenteen is twee orden lager dan het dijkzand.
- Respons buitenteen storm 8-1-2019 was 1% (onverwacht laag bij deze schematisering).

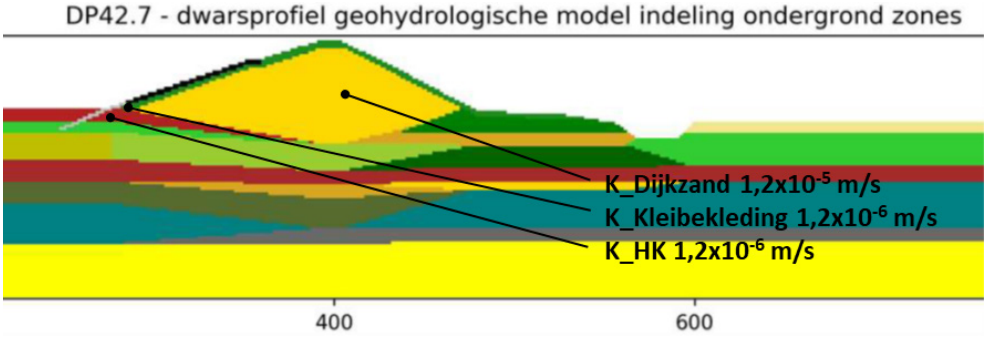
DP26.2 - dwarsprofiel geohydrologische model indeling ondergrond zones



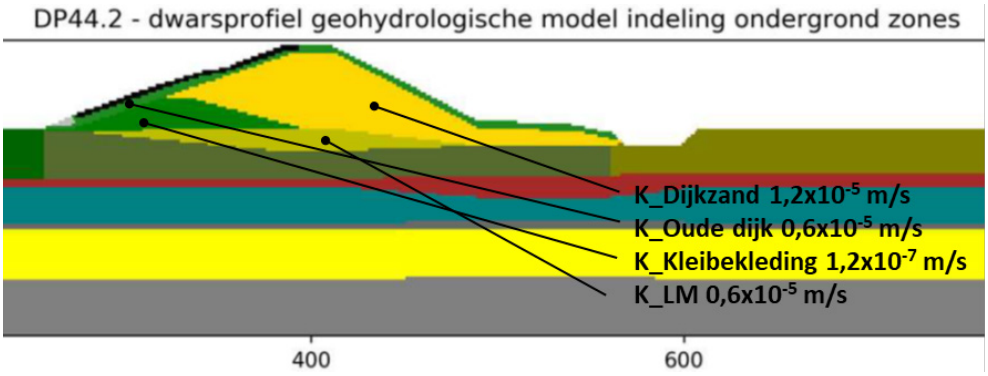
- Buitenteen is relatief dicht. De zandkern wordt afgesloten door grond die twee tot drie orden minder doorlatend zijn dan het dijkzand.
- Respons buitenteen storm 8-1-2019 was 4%.



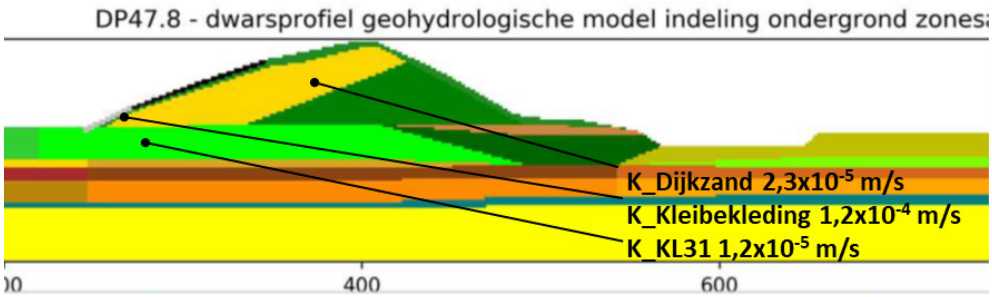
- Buitenteen is relatief dicht. De zandkern wordt afgesloten door grond die drie orden minder doorlatend is dan het dijkzand.
- Respons buitenteen storm 8-1-2019 was 4%.



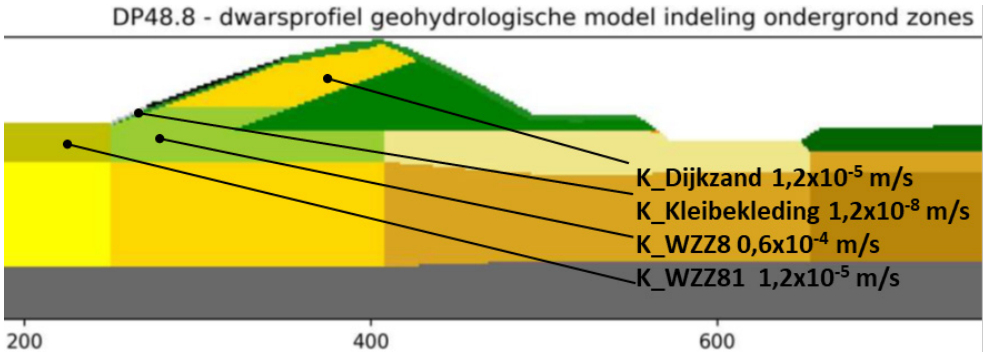
- Buitenteen is relatief open; de doorlatendheid van de kleilaag onder de steenzetting en die op het voorland is slechts één orde lager dan de zandkern.
- Respons buitenteen storm 8-1-2019 was 11%.



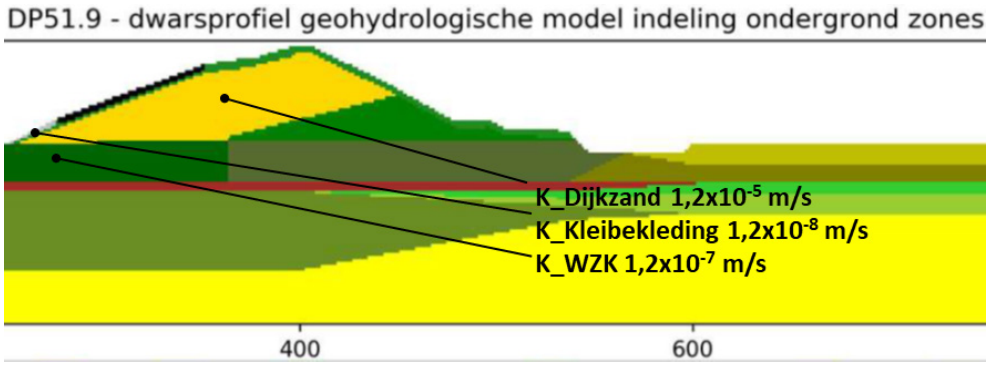
- Buitenteen is relatief dicht; de doorlatendheid van de kleilaag onder de steenzetting twee orden lager dan de zandkern (en de oude dijk).
- Geen meting buitenteen beschikbaar.



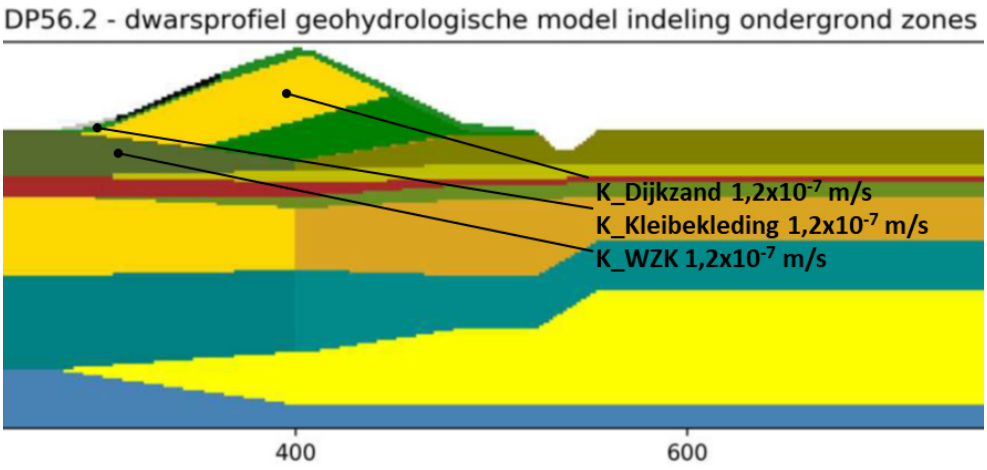
- Buitenteen is open.
- Respons buitenteen storm 8-1-2019 was 34%.



- Buitenteen is relatief dicht. Kleine spleet onder kleibekleding door grond “K_WZZ8” die een orde doorlatender is dan de zandkern.
- Respons buitenteen storm 8-1-2019 was 25%.



- Buitenteen is dicht.
- Respons buitenteen storm 8-1-2019 was 16%.



- Buitenteen is dicht. Ook het dijkzand heeft in deze schematisering een zeer lage doorlatendheid gekregen van circa twee orden lager dan normaal.
- Respons buitenteen storm 8-1-2019 was 3%.

Tijdens de storm van 8 januari 2019 zijn hoge waterstanden opgetreden, waarbij al het aanwezige voorland is ondergelopen. Dit maakt deze stormconditie geschikt om na te rekenen en te extrapoleren naar maatgevende condities. De opgetreden waterstanden zijn gemeten bij meetstations Harlingen en Lauwersoog (meetstation Holwerd was tijdens de storm buiten werking). De maximale waterstand bij Harlingen was NAP +2,01 m en bij Lauwersoog NAP +1,79 m. De verschillende locaties zijn 'gekoppeld' aan een meetstation (Tabel C.2). In deze tabel zijn tevens de waterstanden bij de norm gegeven voor de zichtjaren 2023 en 2073, afgerond op 0,1 m.

Tabel C.2 **Waterstanden voor de locaties, gemiddeld hoogwater, storm van 8 januari 2019 en bij de norm signaleringswaarde (1/3.000 jr^{-1}) voor zichtjaren 2023 en 2073.**

Locatie	Gemiddeld hoogwater (m + NAP)	Waterstand storm 8-1-2019 (m + NAP)	Waterstand norm 2023 (m + NAP)	Waterstand norm2073 (m + NAP)
11.2	0,95	2,01	4,8	5,1
14.3	0,95	2,01	4,8	5,1
18.4	0,95	2,01	4,8	5,1
21.6	0,95	2,01	4,8	5,1
39.4	0,95	2,01	4,8	5,1
42.7	0,95	2,01	4,8	5,1
47.8	1,06	1,79	4,9	5,2
48.8	1,06	1,79	4,9	5,2
51.9	1,06	1,79	4,9	5,2
56.2	1,06	1,79	5,0	5,3
60.3	1,06	1,79	5,0	5,3

Aan de binnenzijde van de dijk is bijna altijd een teensloot aanwezig waarin een streefpeil wordt gehandhaafd. Hiervoor wordt verwezen naar [21].

C4 ANALYSE

Deze paragraaf bevat een samenvatting van de analyse uit [21] toegespitst op de resultaten die voor onderhavige studie het meest relevant zijn. De respons van het eerste watervoerende pakket is bijvoorbeeld buiten beschouwing gelaten. De analyse van de respons van het freatisch vlak in de dijk op hoog buitenwater is op drie manieren uitgevoerd [21]:

1. Hysterese extrapolatie: plots van peilbuismetingen tegen buitenwaterstand geven een trend die kan worden geëxtrapoleerd naar maatgevende omstandigheden.
2. “Methode 2a “ uit het Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken (TRWD): eenvoudige grofstoffelijke schematisering aan de veilige kant op basis geometrie en categorie dijk.
3. Modelberekeningen met Modflow, uitgaande van de schematiseringen zoals aangegeven in Paragraaf C.3, gekalibreerd naar de gemeten respons tijdens het hoogwater van 8 januari 2019.

Voor deze studie is met name methode 3 van belang. Deze methode neemt in potentie de meeste locatiespecifieke eigenschappen van de dijk en de bekleding mee in de analyse. Methode 1 en vooral 2 zijn grofstoffelijk ten opzichte van methode 3.

De respons van de peilbuizen met het filter in de zandkern van de dijk op de storm van 8 januari 2019 is opgenomen in Tabel C.3. Dit betreft de respons (%) op de stormconditie ten opzichte van de dagelijkse omstandigheden voor de storm: (Freatisch vlak tijdens storm — freatisch vlak dagelijks)/(buitenwaterstand storm — freatisch vlak dagelijks) x100%. In de kern van de dijk is op sommige locaties al een relatief hoge freatische lijn aanwezig, waarschijnlijk door neerslag in combinatie met een relatief slechte drainage van de kern. De respons is bepaald door uit te gaan van deze reeds verhoogde freatische lijn in de periode voor het hoogwater en enkel de amplitude rondom het hoogwater mee te nemen.

Tabel C.3 **Respons van freatische peilbuizen op diverse locaties (dijkpaal) als percentage van het hoogwater tijdens de storm van 8 januari 2019.**

Locatie	Dijkpaal	Respons Freatisch Buitenteen	Respons Freatisch Kruin	Respons Freatisch Binnenteen
1	11.2	68%		3%
2	14.3	50%		2%
3	18.4	45%	2%	2%
	20.6			1%
4	21.6	1%	1%	1%
	24.4	4%		3%
	26.2		0%	1%
	30.5			1%
	33.8			7%
	36.1			17%
	38.7			1%
5	39.4	5%	9%	4%
	40.4			0%
	40.7			3%
	41.2			4%
6	42.7	11%		3%
	44.2		1%	2%
7	47.8	34%		2%
8	48.8	25%		7%
9	51.9	16%	1%	2%
10	56.2	3%		7%
12	60.3	11%		3%

De respons is zeer variabel, van enkele procenten ter plaatse van de buitenteen tot aan bijna 70%. De hoogste respons is bepaald voor de meest westelijke dwarsprofielen.

Met het grondwaterstromingsmodel Modflow zijn berekeningen gemaakt waarbij de doorlatendheid van grondlagen is aangepast zodanig dat het modelresultaat zo goed mogelijk overeen kwam met de metingen. Voor onderhavige studie zijn vooral de resultaten in het dijkzand onder de buitenteen van belang. De metingen ter plaatse van de buitenteen (stijghoogte in m + NAP) zijn samen met het modelresultaat in Tabel C.4 gezet.

Tabel C.4 **Maximale respons van de freatische peilbuis ter plaatse van de buitenteen op diverse locaties (in m + NAP) en modelresultaat op dezelfde locaties (in m + NAP) tijdens de storm van 8 januari 2019.**

Dijkpaal	Maximale buiten-waterstand 8 januari 2019 (m + NAP)	Gemeten Maximale respons peilbuis buitenteen (m + NAP)	Berekende Maximale respons model buitenteen (m + NAP)	Modflow modelprestatie en bruikbaarheid voor extrapolatie
11.2	2.01	2.7	2.59	Bruikbaar. Kleine onderschatting, veiligheidsmarge buitenteen nodig.
14.3	2.01	1.5	1,42	Bruikbaar
18.6	2.01	1.25	1.76	Bruikbaar, maar conservatief
21.6	2.01	0.8	0.62	Bruikbaar. Onderschatting, veiligheidsmarge buitenteen nodig.
39.4	2.01	1.85	2.31	Matig bruikbaar
42.7	2.01	2.16	2.16	Bruikbaar voor buitenteenlocatie
47.8	1.79	1.45	1.37	Bruikbaar.
48.8	1.79	1.23	1.23	Bruikbaar, maar conservatief.
51.9	1.79	0.94	0.94	Bruikbaar, maar conservatief.
56.2	1.79	2.34	1.86	Matig bruikbaar, veiligheidsmarge nodig voor buitenteenlocatie.

Het is in de meeste gevallen gelukt om de maximale waarde van de meting tijdens de storm en de maxima uit de berekening op elkaar te krijgen. In enkele gevallen is het echter niet gelukt, ondanks de vrijheid in de keuze van de verschillende doorlatendheden. Hoewel de maxima ter plaatse van de buitenteen in de meeste gevallen goed is benaderd, is in een aantal van deze gevallen het tijdsverloop van het freatisch vlak en de ontwikkeling hiervan verder in de dijk veel minder vergelijkbaar met de metingen. Daarom is de betrouwbaarheid van het model en daarmee de bruikbaarheid voor extrapolatie naar maatgevende omstandigheden soms als matig bruikbaar, of bruikbaar maar conservatief en bruikbaar maar met een veiligheidsmarge beoordeeld. Dit waardeoordeel uit [21] is toegevoegd als laatste kolom in de tabel.

Voor het advies over de aan te houden freatische lijn onder normomstandigheden voor de zichtjaren 2023, 2048 en 2073 zijn de resultaten van de drie analyse-vormen gecombineerd. Daar waar Modflow berekeningen betrouwbaar waren, zijn deze als leidend genomen, daar waar de betrouwbaarheid minder werd geacht is teruggevallen op de conservatieve methode uit het TRWD.

De rekenwaarde van de ligging van het freatisch vlak in de kern van de dijk voor zichtjaren 2023 en 2073 is samengevat in Tabel C.5. Hierbij is tevens de ligging van de onderrand van het asfalt aangegeven conform de schematisering in [21].

Tabel C.5 **Rekenwaarde freatisch vlak ter plaatse van de buitenteen (m + NAP), onderrand van het asfalt (m + NAP) respons storm 8-1-2019 (%) en rekenmethode voor vaststelling van de rekenwaarde (oranje markering geeft aan rekenwaarde > onderrand asfalt).**

Dijkpaal	Waterstand norm 2023/ 2073 (m + NAP)	Onderrand asfalt [1] (m + NAP)	Rekenwaarde Freatisch vlak buitenteen 2023 / 2073 (m + NAP)	Respons Storm 8-1-2019 (%)	Methode vaststelling rekenwaarde
11.2	4.8 / 5,1	2.6	3.1 / 3.6	**68%**	Methode TRWD
14.3	4.8 / 5,1	1.8	2.2 / 2.5	**50%**	Modflow + kleine marge
18.6	4.8 / 5,1	1.95	2.8 / 2.8	**45%**	Modflow + kleine marge
21.6	4.8 / 5,1	2.45	2.3 / 2.5	1%	Modflow + kleine marge
39.4	4.8 / 5,1	2.3	3.3 / 3.3	5%	Methode TRWD
42.7	4.8 / 5,1	2.35	3.0 / 3.1	11%	Modflow + marge
47.8	4.9 / 5,2	2.65	2.8 / 2.9	34%	Modflow + kleine marge
48.8	4.9 / 5,2	2.5	2.25 / 2.5	25%	Modflow + kleine marge
51.9	4.9 / 5,2	2.5	1.8 / 2.0	16%	Modflow + kleine marge
56.2	5.0 / 5,3	2.6	2.8 / 2.8	3%	Hysterese extrapolatie

Op drie van de tien in detail bekeken locaties kan op basis van metingen en modellering worden vastgesteld dat het freatisch vlak de onderzijde van het asfalt niet zal bereiken tijdens normcondities. Op alle overige locaties is dit wel het geval, waardoor niet wordt voldaan aan de voorwaarde voor toepassing van het golfklapmodel.

De ligging van de onderrand van het asfalt is beperkt van belang. Deze ligt vrijwel overal rondom NAP + 2,5 m, met uitzondering van locaties 14.3 en 18.6, waar deze iets onder de NAP + 2 m ligt.

Opvallend is dat de gemeten respons op de storm van 8 januari 2019 niet altijd bepalend is voor de voorspelling of de onderrand van het asfalt wordt gehaald onder normcondities. Locaties 56.2, 39.4 en 21.6 hebben een respons van respectievelijk 3%, 5% en 1% terwijl hier de onderrand van het asfalt bij normcondities 2023 (2x) en in 2073 (3x) wel wordt gehaald. Dit terwijl bij de locaties 48.8 en 51.9 de respons 25% en 16% is en hier volgens de voorspelling de onderrand niet wordt gehaald. Voor 56.2 (3% respons) en 39.4 (5% respons) ligt de oorzaak waarschijnlijk in de gemeten freatische lijn onder dagelijkse omstandigheden die al behoorlijk hoog ligt, respectievelijk NAP + 2.3 m en NAP + 1,75 m. Er is dan slechts een geringe verhoging nodig om de onderrand van het asfalt te bereiken. Voor 21.6 wordt een steil verhang in het freatisch vlak berekend, tussen de locatie van het filter van de buitenteen peilbuis en de bekleding. De berekende absolute respons ter plaatse van de peilbuis is NAP + 1 m, echter richting het talud loopt het freatisch vlak steil omhoog richting de genoemde waarden van NAP + 2.3 m en NAP + 2.5 m voor normcondities 2023 en 2073.

Naast de analyse in het kader van [21] is gekeken of op basis van uiterlijke kenmerken onderscheid is te maken tussen de locaties die verklarend kunnen zijn voor de respons. Er is gekeken naar de aanwezigheid van voorland en de mogelijk hydraulische weerstand die dit vormt in de richting van de zandkern. Een vooroever met diep water en schoon zand zal minder weerstand geven dan een voorland van klei en of slib die zodanig hoog is dat deze (bijna) aansluit op het asfalt. Deze informatie is samengevat in Tabel C.6.

Er zijn geen geulen op korte afstand van de dijkprofielen. Ook het profiel bij Lauwersoog (60.3) heeft voorland dat bij laagwater droogvalt. De geul rondom de afsluitdijk van het Lauwersmeer bevindt zich aan de oostkant van de afsluitdijk (oostelijk van dijkpaal 61.0).

Voor de onderzochte locaties is vooral onderscheidend of er al dan niet begroeid voorland aanwezig is. Logischerwijs is het begroeide voorland hoger, circa NAP +1.5 m of hoger. Dit is hoger dan hoogwater springtij in dit deel van de Waddenzee, grofweg tussen Harlingen en Lauwersoog. Op een aantal locaties komt gemiddeld hoogwater tot aan de buitenteen van de dijk. Dit zijn ook de plekken waar de steenbekleding laag op het talud direct in contact komt met het buitenwater en waardoor potentieel water de kern van de dijk in kan dringen. Vooral op deze plekken zijn peilbuizen in de zandkern bij de buitentteen zijn geplaatst.

Zoals te zien in Tabel C.6 worden de hoge responsen vooral gemeten bij de locaties met een relatief laag voorland, dat ook onder dagelijkse omstandigheden bij hoogwater onder loopt. Ook de steenzettingen lager op het talud lopen dagelijks onder bij hoog tij. Op 7 (alle) van de 7 locaties met laag voorland wordt een respons van meer dan 10% gemeten ter plaatse van de buitenteen. Op 4 van de 5 locaties met een hoog voorland wordt ter plaatse van de buitenteen een respons van 5% of minder gemeten.

Tabel C.6 **Respons van freatische peilbuizen op diverse locaties (dijkpaal) als percentage van het hoogwater tijdens de storm van 8 januari 2019, voorland karakteristieken en freatisch vlak onder dagelijkse omstandigheden.**

Dp	Respons (%)			Voorland karakteristieken	Overige opmerkingen	Freatisch vlak dagelijks (m + NAP)		
	Buiten-teen	Kruin	Binnen-teen			Buiten-teen	Kruin	Binne-teen
11.2	68%		3%	Hoogwater tot nabij de teen ca. NAP +1 m.	Steenzetting direct in contact buitenwater.	1.3		1.4
14.3	50%		2%	Hoogwater aan de teen ca. NAP +1 m.	Steenzetting direct in contact buitenwater.	0.5		0.5
18.4	45%	2%	2%	Hoogwater tot nabij de teen ca. NAP +1 m.	Steenzetting direct in contact buitenwater.	0.4	0.6	0.5
20.6			1%	Begroeid voorland ca 500 m NAP +1.5 m	Voorland sluit aan op asfaltbekleding.			0.4
21.6	1%	1%	1%	Begroeid voorland >500 m NAP +1.5 m	Voorland sluit aan op asfaltbekleding.	0.75	0.5	
24.4	4%		3%	Begroeid voorland >500 m NAP +1.5 m à NAP +2 m	Voorland sluit aan op asfaltbekleding.	1.1		0.4
26.2		0%	1%	Begroeid voorland >500 m NAP +2 m	Voorland sluit aan op asfaltbekleding.		0.8	0.5
30.5			1%	Begroeid voorland >500 m NAP +2 m	Brede groene dijk (geen asfalt)			-0.1
33.8			7%	Begroeid voorland >500 m NAP +1.5 m	Brede groene dijk (geen asfalt)			0.35
36.1			17%	Begroeid voorland >500 m NAP +1.5 m à NAP +2 m	Brede groene dijk (geen asfalt)			0.6
38.7			1%	Begroeid voorland >500 m NAP +1.5 m à NAP +2 m	Voorland sluit aan op asfaltbekleding.			0.3
39.4	5%	9%	4%	Begroeid voorland >500 m NAP +1.5 m	Voorland sluit aan op asfaltbekleding.	1.75	0.5	1.6
40.4			0%	Begroeid voorland >500 m NAP +1.5 m	Voorland sluit aan op asfaltbekleding.			1.9
40.7			3%	Begroeid voorland >500 m NAP +1.5 m	Voorland sluit aan op asfaltbekleding.			0.1
41.2			4%	Begroeid voorland >500 m NAP +1.5 m	Voorland sluit aan op asfaltbekleding.			0.25
42.7	11%		3%	Begroeid voorland ca 300 m NAP +2 m	Voorland sluit aan op asfaltbekleding.	1.95		0.4
44.2		1%	2%	Hoogwater aan de teen, NAP +0.5 m.	Steenzetting direct in contact buitenwater.		0.7	0.8
47.8	34%		2%	Hoogwater aan de teen, NAP +0.5 m.	Steenzetting direct in contact buitenwater.	0.8		0.4
48.8	25%		7%	Hoogwater aan de teen, NAP +0 m.	Steenzetting direct in contact buitenwater.	0.8		-0.15
51.9	16%	1%	2%	Hoogwater aan de teen, NAP +0 m.	Steenzetting direct in contact buitenwater.	0.65	0.5	0
56.2	3%		7%	Begroeid voorland 500 m NAP +1.5 m	Voorland sluit aan op asfaltbekleding.	2.3		0.5
60.3	11%		3%	Hoogwater aan de teen, NAP -0.5 m.	Zanddijk op zandlichaam (afsluitdijk Lauwersmeer)	-0.4		

Er zijn drie uitzonderingen. Bij locatie 42.7 is ook een hoog en begroeid voorland aanwezig, echter hier is de respons ter plaatse van de buitenteen toch aan de hoge kant (11%). Bij locaties 33.8 en 36.1 wordt een respons gemeten van 7% en 17% ter plaatse van de binnenteen. Dit is de hoogste respons aan de binnenzijde van de dijk op de storm van 8 januari 2019. Ter plaatse van de buitenteen was geen peilbuis beschikbaar, maar het is aannemelijk dat de respons hier aanzienlijk hoger zal zijn geweest dan 10%. Op het buitentalud is op deze locaties geen asfalt aanwezig, maar een flauw buitentalud (ca. 1:7) met een kleibekleding van circa 1 à 1,3 m dikte. De doorlatendheid van deze kleibekleding die onder normale omstandigheden droog staat is waarschijnlijk hoog en vormt weinig belemmering voor het indringen van water in de dijk.

Zoals eerder opgemerkt is de respons op hoogwater niet altijd bepalend voor de voorspelling of tijdens een hoogwater het zandbed onder het asfalt verzadigd raakt. Hiervoor is ook de ligging van het freatisch vlak onder dagelijkse omstandigheden van belang (rechter kolommen in Tabel C.6). Dit is met name het geval voor de locaties met een hoog voorland, waar de opbolling van het freatisch vlak door neerslag aanzienlijk hoger is: locaties 24.4, 39.4, 42.7 en 56.2. Door de aanwezigheid van hoog voorland is drainage richting de Waddenzee minder makkelijk, waardoor de opbolling hoger kan zijn. Opbolling kan ook worden veroorzaakt en of versterkt door de aanwezigheid van een oude dijkkern van minder doorlatend materiaal. Dit is te zien in de schematiseringen voor de Modflowberekeningen in [21] (zie ook Paragraaf C.3), waar een combinatie van een oude dijkkern van minder doorlatend materiaal in combinatie met hoog voorland bij locatie 56.2 leidt tot een freatisch vlak ter plaatse van de buitenteen van NAP +2.3 m. Ook bij de locatie 42.7 en 39.4 leidt de combinatie van een hoog voorland en een oude dijkkern aan de binnenzijde tot een hoog freatisch vlak onder dagelijkse omstandigheden.

C.5 CONCLUSIES

De uitgebreide meetcampagne waarin een hoogwater optrad die het voorland tot aan de dijk onderwater zette levert een zeer gevarieerd beeld van de respons van de grondwaterstand in de zandkern onder het buitentalud en de ligging van het freatisch vlak onder dagelijkse omstandigheden. Uit de analyse blijkt dat zowel de respons op hoogwater als de ligging onder dagelijkse omstandigheden belangrijk zijn voor het al dan niet bereiken van de onderrand van het asfalt door het freatisch vlak onder normcondities. Slechts voor drie locaties leidt het onderzoek tot de conclusie dat onder normcondities het freatisch vlak de onderrand van het asfalt niet bereikt. Voor alle overige locaties is de conclusie dat hiermee wel rekening moet worden gehouden.

De onderzoeksresultaten duiden op een relatie tussen de aanwezigheid van voorland en de respons van het freatisch vlak in de zandkern op hoogwater. Hoog voorland leidt vaak tot een verminderde respons. Anderzijds leidt hoog voorland vaak tot een hoger freatisch vlak onder dagelijkse omstandigheden. Het ligt dus niet altijd voor de hand dat een hoog voorland gunstig is ten aanzien van de verwachtte ligging van het freatisch vlak onder asfalt onder normcondities. Ook de eventuele aanwezigheid van een oude kleikern in de dijk, die regulerend werkt op de binnenwaartse drainagemogelijkheid heeft invloed op de ligging van het freatisch vlak. Beide effecten zijn echter niet zonder peilbuismetingen en grondonderzoek met een behoorlijk detailniveau te bepalen.

Geconcludeerd kan worden dat zonder het uitvoeren van metingen en de analyse hiervan geen uitspraak kan worden gedaan over de ligging van het freatisch vlak onder normcondities ten opzichte van de onderrand van het asfalt. Meten en analyseren blijkt noodzakelijk om hier conclusies over te trekken, waarbij wordt opgemerkt dat zelfs met metingen en analyses dit lastig is en soms moet worden teruggegrepen op eenvoudiger maar conservatievere modellering.

BIJLAGE D

NAREKENEN INDRINGING FREATISCHE LIJN LAUWERSMEERDIJK

D.1 INLEIDING

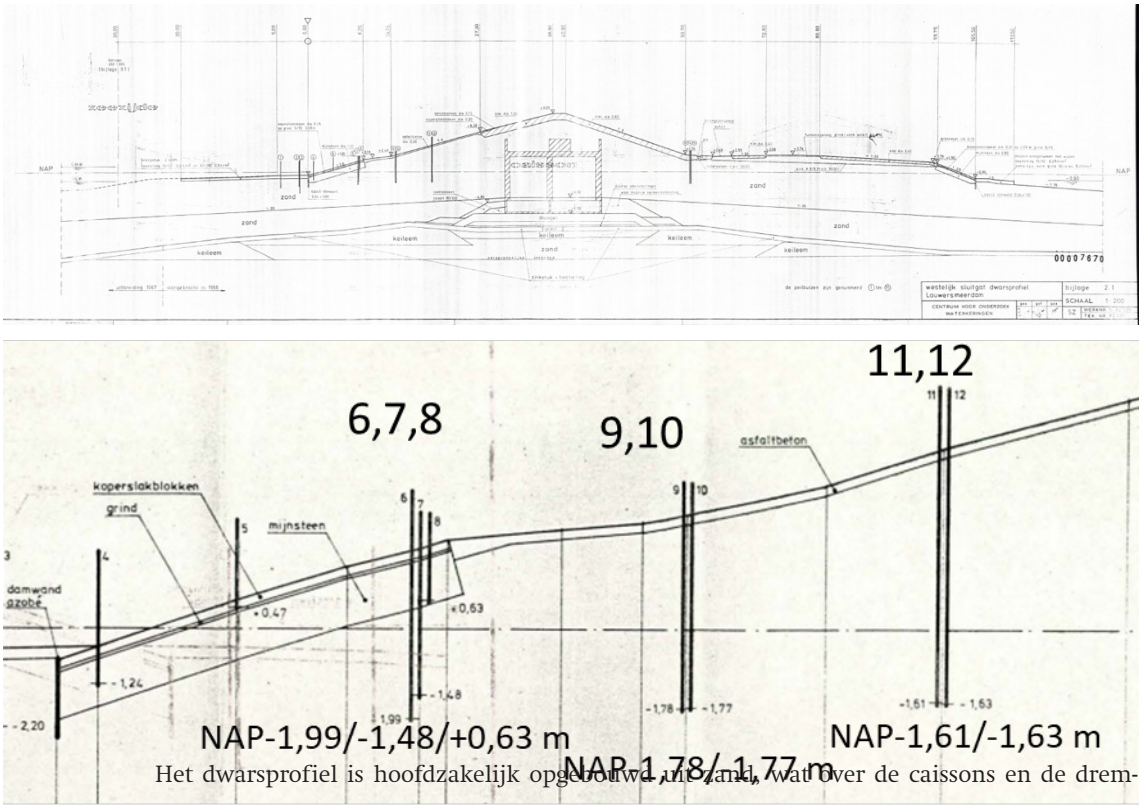
In de jaren 80 van de vorige eeuw is de indringing van water in de Lauwersmeerdam onderzocht met behulp van peilbuismetingen. De bevindingen zijn gerapporteerd in: Peilbuisonderzoek Lauwersmeerdam, Rijkswaterstaat notanr. WBA-N-87.026, d.d. 9 september 1987 (ref. [16] in het hoofdrapport).

In het kader van onderhavige studie is het dwarsprofiel van de dijk geschematiseerd en de grondwaterstroming in de dam gemodelleerd met Plaxis. Getracht is de metingen terug te rekenen en zo een goede inschatting te krijgen van de respons van het freatisch vlak onder het buitentalud als gevolg van een hoge buitenwaterstand.

D.2 VERZAMELDE GEGEVENS

De Lauwersmeerdam is een afsluitdam die de Lauwerszee afsloot van de Waddenzee. De dam is aangelegd door doorstroombare caissons te plaatsen op een drempelconstructie. Na plaatsing zijn de caissons gesloten en onder het dwarsprofiel van de dam verdwenen. Het dwarsprofiel met verschillende details en de plaatsing van de peilbuizen staat in Figuur D.1.

Figuur D.1 **Dwarsprofiel Lauwersmeerdam en locaties peilbuizen en filterstelling (m +NAP) per peilbuis in detail.**

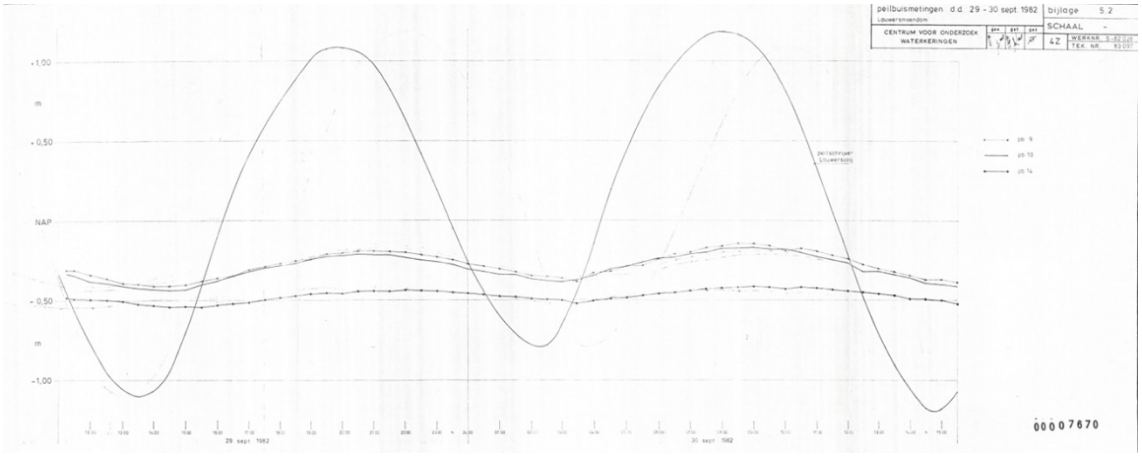


Het dwarsprofiel is hoofdzakelijk opgebouwd uit zand, wat over de caissons en de drem-

pelconstructie is aangebracht. De bekleding op het buitentalud bestaat uit een steenzetting (koperslagblokken) op een fundering van mijnsteen tot een hoogte van circa NAP +1,95 m. De onderrand van het asfaltbeton met een dikte van circa 0,2 m ligt op NAP +1,75 m. De steenzetting wordt aan de onderkant gesteund door een Azobe damwand. Buitenwaarts is een kraagstuk met bestorting aangebracht. Boven de steenzetting begint de asfaltbetonbekleding op zand tot een hoogte van NAP +6,20 m, daarboven en de binnenzijde van de dijk bestaat uit een kleilaag met een grasbekleding.

Begin jaren 80 zijn de peilbuizen gedurende enkele getijcycli gemeten en uitgezet in een grafiek tegen de buitenwaterstand. In Figuur D.2 staat een voorbeeld van de uitwerking hiervan voor de peilbuizen 9, 10 en 14, waarbij peilbuis 14 aan de binnenzijde van de dijk staat.

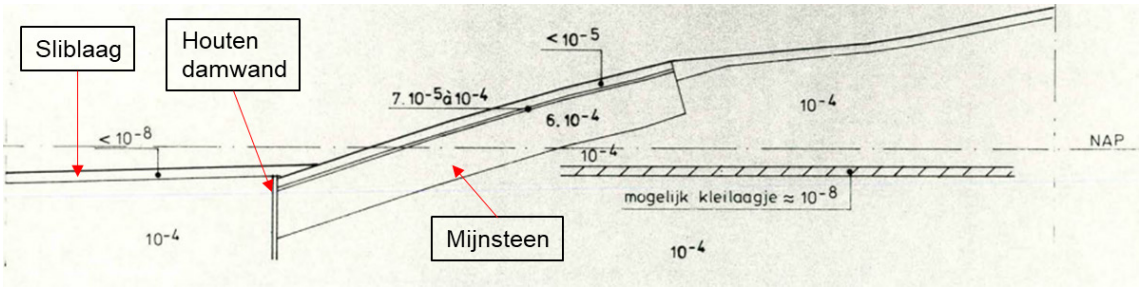
Figuur D.2 **Buitenwaterstand en peilbuismetingen (m + NAP) gedurende getijcyclus.**



De peilbuiswaarnemingen net aan de buitenzijde van de asfaltbekledingen in het zandlichaam van de dijk (nr. 7 in Figuur D.1) laten een amplitude zien van circa 0,35 m bij een getijdeslag van het buitenwater bij Lauwersoog van circa 2,4 m. De respons is aldus circa 15%. Dit is overigens vergelijkbaar met de meer recente peilbuismetingen in de dijk bij Lauwersmeer, waarbij een respons van circa 11% werd gemeten (Bijlage C). Omdat de buitenwaterstand bij laag tij lager is dan het voorland is de effectieve getijdeslag waarschijnlijk wat lager, en daarmee de procentuele respons iets hoger. De gemiddelde grondwaterstand in de dijk ter plaatse van de asfaltbetonbekleding is circa NAP -0,35 m. Dit ligt tussen de gemiddelde buitenwaterstand van circa NAP en de binnenwaterstand van circa NAP -0,9 m. Opbolling van het freatisch vlak in de dijk als gevolg van neerslag is nauwelijks aanwezig.

In het kader van COW onderzoek destijds zijn op basis van korrelverdelingen van het zand en berekeningen schattingen gemaakt van de doorlatendheden van grondlagen en bekledingen (Figuur D.3). Op het (opgespoten) voorland is waarschijnlijk een sliblaag aanwezig met een lage doorlatendheid. Deze sliblaag is middels boringen aangetoond tot 30 m uit de teen van de dijk. De doorlatendheid van het dijkzand is circa 10^{-4} m/s op basis van zowel correlaties met korrelverdelingen als falling head tests in boorgaten. De steenzetting, filterlaag en de mijnsteen zijn waarschijnlijk relatief doorlatend ten opzichte van het dijkzand. Bij de berekeningen in het kader van deze studie is gevarieerd met de doorlatendheden en met de mogelijke aanwezigheid van een waterremmend laagje in de dijk (mogelijk kleilaagje in Figuur D.3).

Figuur D.3 **Detail opbouw teenconstructie en schatting doorlatendheden (m/s).**



D.3 BEREKENINGEN EN RESULTATEN

Er zijn diverse berekeningen uitgevoerd met het eindige elementenprogramma PLAXIS met als doel om de peilbuismetingen zo goed mogelijk te benaderen. Daarna is een stormvloed als randvoorwaarde opgelegd met een maximale waterstand gelijk aan de waterstand bij de norm en is gekeken in hoeverre de freatische lijn onder het asfalt komt.

Er is in de berekeningen gevarieerd met de doorlatendheden van het dijkzand, de sliblaag op het voorland, de mijnsteenlaag en de koperblokslakken. Daarnaast is er gekeken naar de invloed van de mogelijk aanwezige kleilaag in de dijk, zoals gesuggereerd in het COW onderzoek [16].

De randvoorwaarde aan de buitenzijde heeft bestaan uit een periode van een aantal normale getijbewegingen, gevold door het hoogwater. Het grondwaterstromingsmodel heeft enige getijdeperioden nodig om een (dynamische) evenwichtssituatie te ontwikkelen, gevolgd door een stormvloed met een totale duur van 45 uur en een maximale waterstand van NAP + 5,9 m.

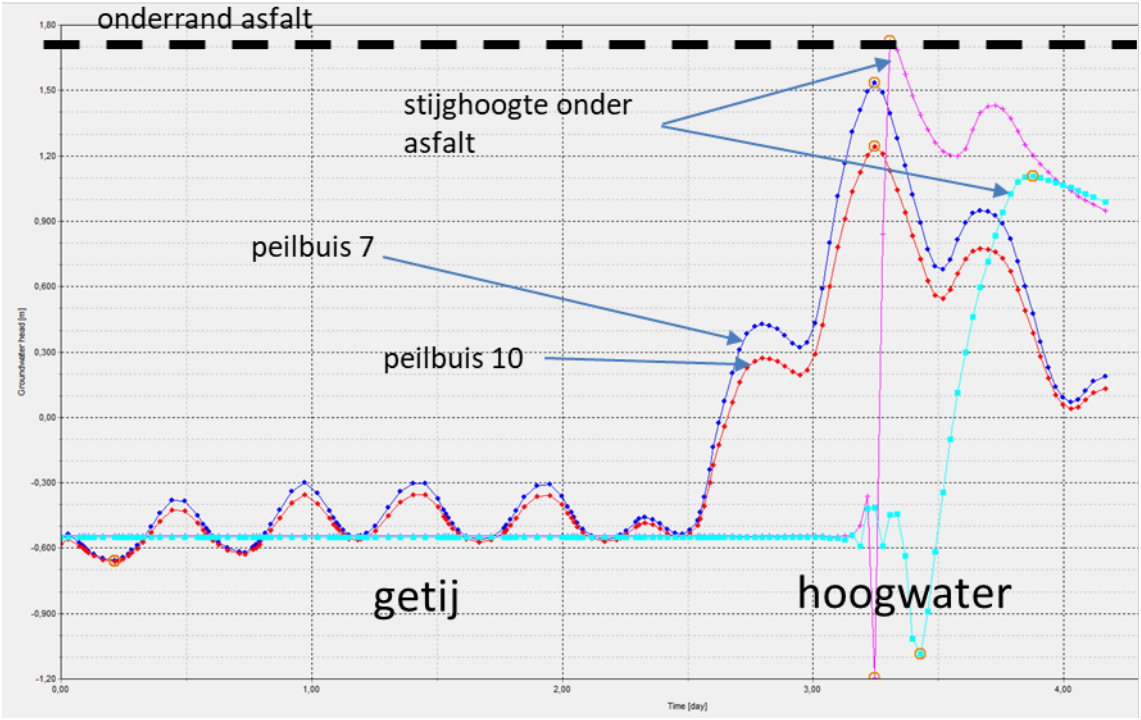
Uit de berekeningen blijkt dat de peilbuismetingen alleen verklaard kunnen worden als er op het voorland een aanzienlijke hydraulische weerstand aanwezig is. In de op het voorland uitgevoerde boringen blijkt ook een klei en/of sliblaag die dit onderschrijft. De buitenwaartse hydraulische randvoorwaarde op het model (getij en hoogwater) was aanvankelijk opgelegd op het voorland en ook op het hieronder gelegen zandpakket op de buitenrand van het model. De relatief lage gemiddelde stijghoogte ter plaatse van de buitenteen van ca. NAP -0,35 m kon hier echter niet mee worden verklaard. Daarop is de randvoorwaarde op het zandpakket als gesloten beschouwd en is de randvoorwaarde enkel op het gemodelleerde voorland (40 m) opgelegd. De doorlatendheid van het kleilaagje op het voorland diende als parameter om de gemiddelde stijghoogte ter plaatse van de buitenteen goed te krijgen. Ook de doorlatendheid van de bekleding (kopenslakblokken en mijnsteen) is iets aangepast ten opzichte van het COW onderzoek om de metingen en berekeningen van het getij zo goed mogelijk op elkaar te krijgen. Een samenvatting van de doorlatendheidparameters vanuit het COW onderzoek en van de in het kader van deze studie gemaakte berekening aangepast parameters staan in Tabel D.1.

Tabel D.1 **Doorlatendheden COW onderzoek en aangepaste parameter voor de huidige studie (m/dag en m/s).**

Materiaal	Doorlatendheid COW onderzoek (m/s) en (m/dag)		Aangepast voor fit op metingen (m/s) en (m/dag)	
Dijkzand	$1x10^{-4}$	8,6	$1x10^{-4}$	8,6
Koperslakblokken	$<1x10^{-5}$	<0,86	$1x10^{-6}$	0,086
Mijnsteen	$0,5x10^{-3}$	43	$1x10^{-4}$	8,6
Klei/ sliblaag voorland	$<1x10^{-8}$	$<8,6x10^{-4}$	$1x10^{-7}$	$8,6x10^{-3}$

Het resultaat van de berekening in de vorm van stijghoogtes ter plaatse van peilbuizen en de onderrand van het asfalt gedurende normaal getijde en een hoogwater staat in Figuur D.4.

=Figuur D.4 **Berekende stijghoogtes (m NAP) tegen tijd (dag) tijdens getij gevolgd door hoogwater ter plaatse van peilbuis 7, 10 en net onder de onderrand van het asfalt.**

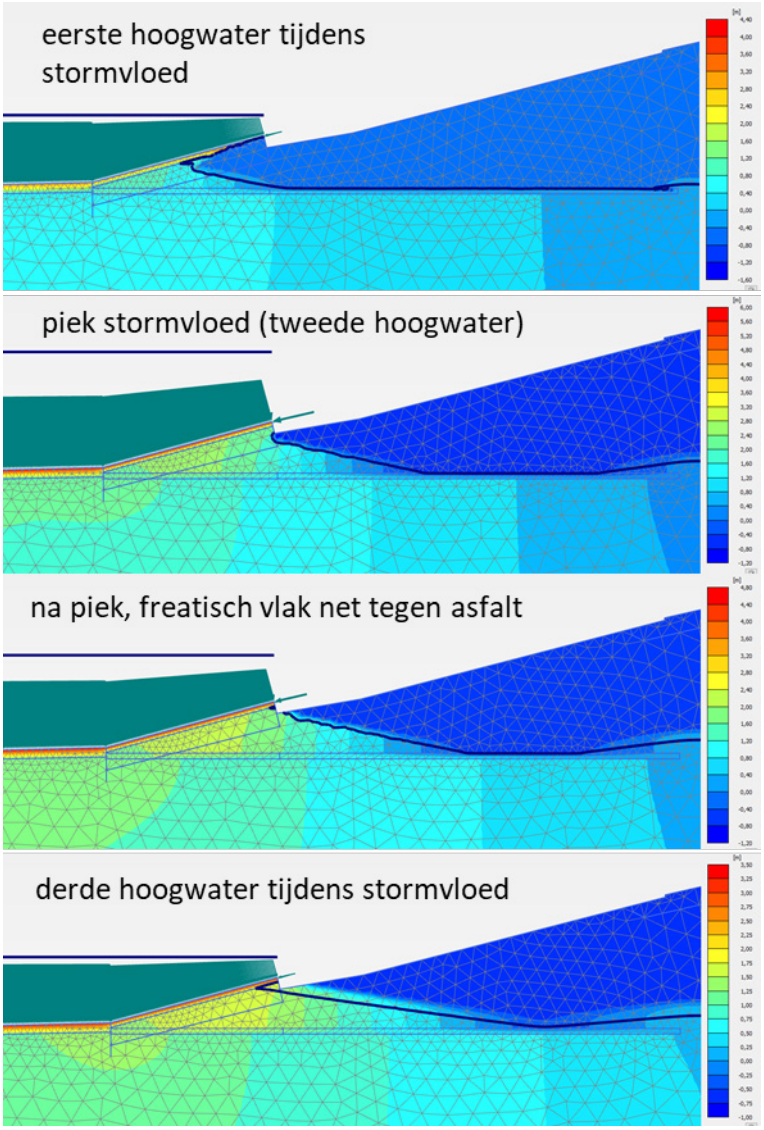


De respons (gemiddelde en amplitude) van het model ter plaatse van de peilbuizen komt overeen met de metingen die destijds op de dijk door het COW zijn uitgevoerd. De gemiddelde stijghoogte ter plaatse van de buitenteen van de dijk is circa NAP -0,35 m en de (dubbele) amplitude is circa 0,35 m. De respons van het model op het hoogwater laat zien dat de stijghoogte ter plaatse van het filter van peilbuis 7 (iets buitenwaarts van de onderrand rand van het asfalt) op een diepte van circa NAP - 1,5 m net wat lager wordt dan de onderrand van het asfalt (NAP + 1,60 m). Vlak onder de onderrand van het asfalt, roze lijn, wordt de stijghoogte gelijk aan de onderrand van het asfalt NAP + 1,75 m. Verder richting de kruin blijft de stijghoogte onder het asfalt lager dan de plaatshoogte, lichtblauwe lijn. Hier blijven zuigspanningen aanwezig en ligt de freatische lijn dus lager dan de onderkant van het asfalt.

De lengte waarover het freatisch vlak onder het asfalt komt wordt zichtbaar in Figuur D.5. Dit gebeurt over een lengte van enkele decimeters, onder het horizontale deel van het asfalt. Hierbij wordt opgemerkt dat de waterstand op dat moment bijna NAP + 5,5 m is en er dus op dat moment geen golfklappen optreden op het verzadigde zandbed. De golfklappen treden

op rondom de waterlijn, waar het zandbed volgens de modelberekening op dan moment niet verzadigd is.

Figuur D.5 **Berekende ligging van het freatisch vlak op enkele momenten tijdens de gesimuleerde stormvloed.**



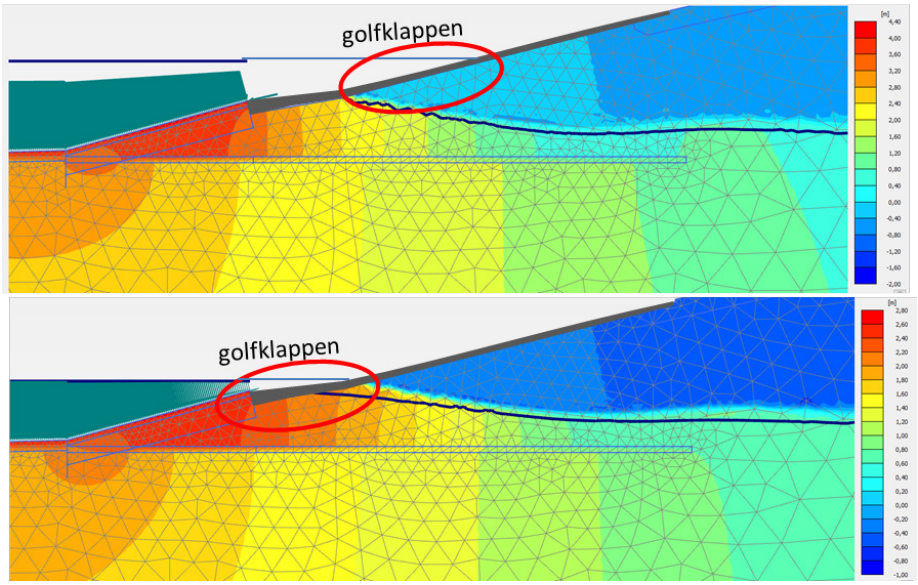
Op het moment dat de buitenwaterstand weer daalt en de zone waarin golfklappen optreden bij de onderrand van het asfalt komt, is de freatisch lijn alweer onder het asfalt gezakt. Uitgaande van deze berekeningen, wordt weliswaar niet voldaan aan het criterium dat het freatisch vlak niet tegen de onderkant van het asfalt mag komen. Op het moment dat de asfaltbekleding wordt belast met golfklappen is het zandbed volgens de berekeningen echter niet verzadigd.

In vergelijking met het elektrisch analogon onderzoek voor de locatie Lauwersmeerdam (zie Bijlage A) wordt een lagere ligging van het freatisch vlak berekend. Het analogon onderzoek gaf een freatisch vlak dat opliep tot 0,8 m boven de onderrand van het asfalt, wat een stukje hoger is dan het horizontale deel van de asfaltbekleding.

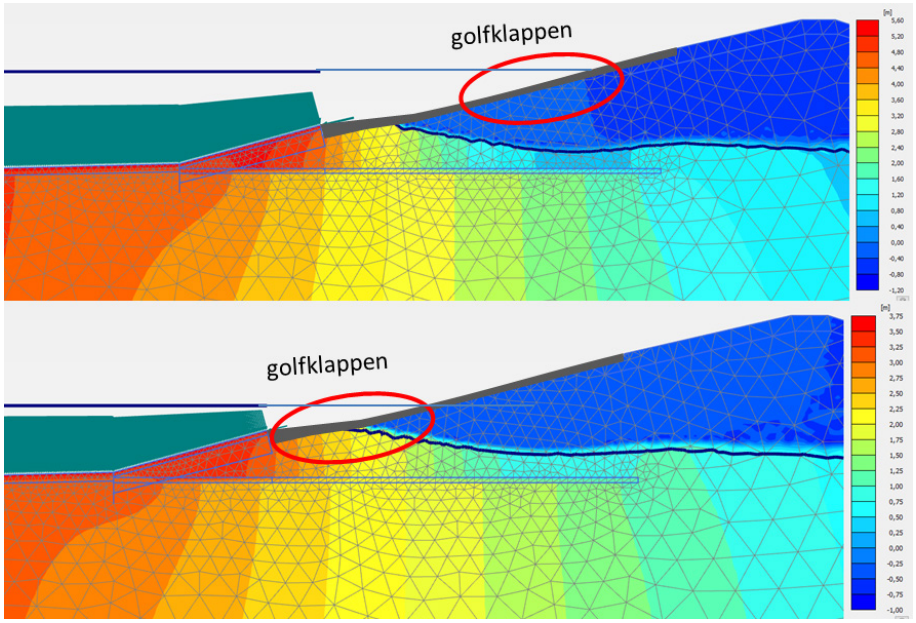
De ligging van het freatisch vlak volgens de grondwaterstromingsberekening blijkt gevoelig voor de doorlatendheden van de koperslakblokken (10^{-6} m/s ofwel 0,086 m/dag) en voor de

geslotenheid van het klei of sliblaagje op het voorland (volledig gesloten). De hoge weerstand van de combinatie van deze elementen aan de buitenzijde van de dijk leidt tot de beste benadering van de peilbuismetingen. Indien de slib of kleilaag op het voorland echter doorbroken wordt, of de doorlatendheid van de koperslakblokken om wat voor reden dan ook (ongelijkmatige zettingen, uitspoeling) 10^{-5} m/s of meer wordt, dan leidt dit tot een berekende ligging van het freatisch vlak tot onder het asfalt, ook in de zone waar golfklappen worden verwacht (Figuur D.6 en Figuur D.7).

Figuur D.6 **Berekende stijghoogte en ligging van het freatisch vlak bij een hogere doorlatendheid van de koperslakblokken (10^{-5} m/s in plaats van 10^{-6} m/s) tijdens de piek waterstand (boven) en na de piek van de stormvloed en indicatieve zone waar golfklappen optreden (onder).**



Figuur D.7 **Berekende stijghoogte en ligging van het freatisch vlak bij een doorbroken sliblaag op het voorland 20 m vanuit de buitenteen in de fase na de piek van de stormvloed en indicatieve zone waar golfklappen optreden.**



D.4 SAMENVATTING

De peilbuismetingen in de dam laten zich relatief goed narekenen. Hiervoor was het echter nodig om de doorlatendheidparameters en de schematisering aan te passen ten opzichte van de parameters die volgde uit het veld- en laboratoriumonderzoek. Aan de buitenzijde van de dijk blijkt een relatief hoge weerstand aanwezig in de vorm van een klei of sliblaag op het voorland en een relatief dichte steenzetting (koperslakblokken) op mijnsteen.

In het met de metingen afgeregelde model leidt een stormvloed net aan tot verzadiging van het zandbed onder de asfaltbekleding. Dit treedt echter maar in zeer geringe mate op, de berekening suggereert slechts enkele decimeters, gezien in de richting van de asfaltbekleding. Op het moment dat dit optreedt is de waterstand echter zo hoog dat er geen golfklappen optreden ter plaatse van het verzadigde zandbed, waardoor geredeneerd kan worden dat dit waarschijnlijk geen stabiliteitsprobleem voor de asfaltbekleding oplevert en/of geen waterveiligheidsprobleem.

Geconstateerd wordt dat op basis van de doorlatendheidparameters en schematisering die bij aanvang waren geschat op basis van veld- en laboratoriumonderzoek de berekening een veel ongunstiger resultaat gaven. Hierbij trad wel een freatisch vlak op onder de asfaltbekleding in de zone waar golfklappen worden verwacht. Dit geldt ook voor de situatie waarbij met verloop van tijd de hydraulische weerstand van het voorland vermindert (erosie van klei en of sliblaagjes) of de doorlatendheid van de steenzetting en fundering tegenvalt of vergroot door uitspoeling van inwasmateriaal en/of ongelijkmatige zettingen. De geslotenheid van het voorland en de steenzetting onder de asfaltbekleding zijn essentieel voor het laag houden van het freatisch vlak onder normcondities. De geslotenheid hiervan bleek alleen aantoonbaar met de peilbuismetingen.