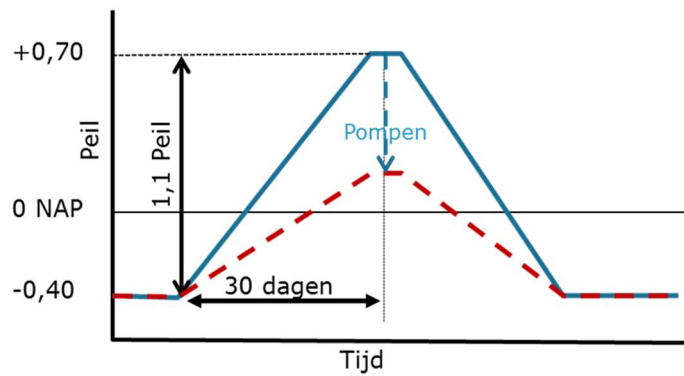
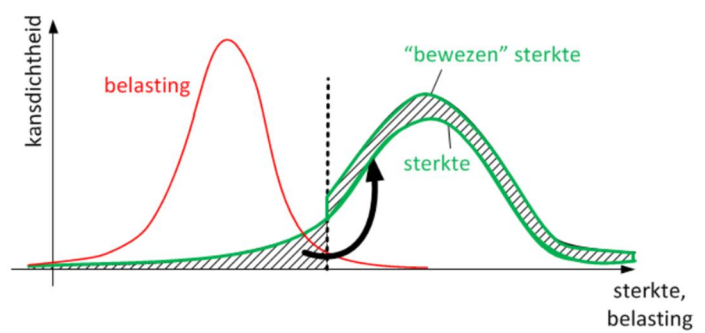


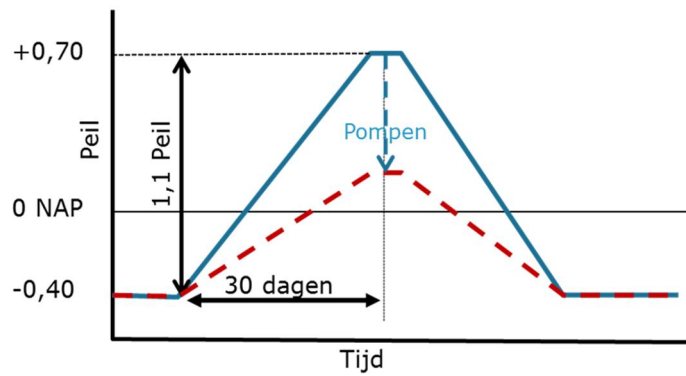
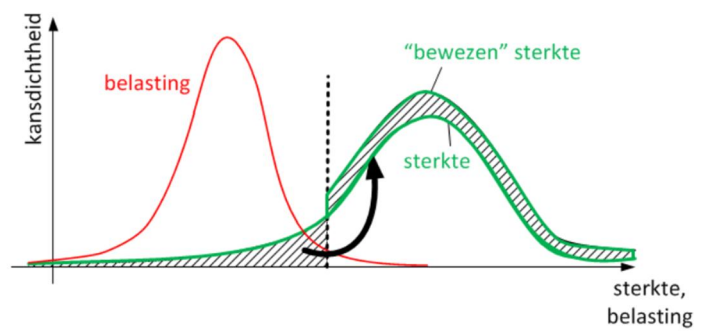


Kansrijkheid pompen en bewezen sterkte Markermeerdijken HWBP2



Datum 14 december 2015
Status Definitief

Kansrijkheid pompen en bewezen sterkte Markermeerdijken HWBP2



Datum 14 december 2015
Status Definitief

Colofon

Uitgegeven door	Rijkswaterstaat WVL; Hoogheemraadschap Noorderkwartier
Informatie	www.rijkswaterstaat.nl
Telefoon	0800 – 8002
Opdrachtgever	Min. IenM – DGRW
Uitgevoerd door	RWS en HHNK
Auteurs	Harold van Waveren (RWS), Alex Roos (HHNK), Harry de Looff (RWS)
Met bijdragen van	Deltares FUGRO Sota-engineering/Wim Pater
Opmaak	Rijkswaterstaat
Datum	14 december 2015
Status	Definitief
Versienummer	1.0

Voorwoord

Dit rapport is geschreven op verzoek van de minister van Infrastructuur en Milieu naar aanleiding van een advies van het Expertisenetwerk Waterveiligheid (ENW, advies 4 september 2015) en vragen van omwonenden van de Markermeerdijk tussen Hoorn en Amsterdam. De vraagstelling was het mogelijk was de omvang van de geplande dijkversterking te verminderen door een combinatie van 'bewezen sterkte' en pompen op de Houtribdijk om het meerpeil van het Markermeer beter te reguleren. Op verzoek van de minister heeft het Directoraat-Generaal Ruimte en Water (DGRW) van IenM opdracht gegeven aan Rijkswaterstaat voor het uitvoeren van dit onderzoek.

Aan deze studie is vervolgens door veel partijen en personen bijgedragen. Rijkswaterstaat heeft de studie uitgevoerd samen met Hoogheemraadschap Noorderkwartier en diverse andere partijen: Deltares/TU-Delft (hoofdstuk3), FUGRO (paragraaf 2.2), Sota engineering/Wim Pater (paragraaf 2.4) en het Kennisplatform Risicobenadering (paragraaf 2.3).

De kwaliteitsborging is verzorgd via diverse collegiale toetsen bij RWS en HHNK. Daarnaast heeft ir. Joop Weijers bijgedragen aan de kwaliteitsborging van de grondmechanische onderdelen. Tevens heeft een expertgroep meegekeken bij het ontwikkelen van de methodiek voor 'bewezen sterkte'. Deze expertgroep bestond uit de volgende leden: Ed Calle, Martin van der Meer (Fugro), Hans Niemeijer (Arcadis), Martin Nieuwjaar (Waternet), Chris Dykstra (Boskalis), Werner Halter (Fugro), Henk van Hemert (HHNK), Bart Hooijveld (Boskalis), Hans Janssen (RWS), Ruben Jongejan (Jongejan advies, namens KPR), Harry de Looft (RWS), Defne Osmanoglou (RWS, secretaris), Wim Pater (sota-engineering), Alex Roos (HHNK), Michel Tonnejck (RHDHV), Onno Waalewijn (Adviesgroep Markermeerdijken), Harold van Waveren (RWS, voorzitter) en Joop Weijers. Tot slot is ook het advies van het Expertise-Netwerk Waterveiligheid (ENW), dat in zeer korte tijd tot stand moest komen, een belangrijke kwaliteitstoets geweest voor het onderzoek.

Het onderzoek heeft plaatsgevonden onder begeleiding van een begeleidingscommissie onder voorzitterschap van Bart Parmet (Directeur staf-Deltacommissaris). Leden van de begeleidingscommissie waren verder Mattie Busch (DGRW), Wim van der Weijden (HHNK), Ard Wolters (RWS), Carla Zuiderwijk (DGRW, secretaris) en drie vertegenwoordigers namens de Adviesgroep: Wouter de Hollander, Wim Tuijp en Jaap Hoekman. Ik ben hen zeer erkentelijk dat zij namens alle omwonenden tijd hebben gestoken in de begeleiding van dit onderzoek en dank hen voor de waardevolle bijdrage die ze hebben geleverd.

De studie is uitgevoerd onder leiding van een kernteam bestaande uit Harold van Waveren (RWS), Alex Roos (HHNK), Timo Schweckendiek (Deltares), Mark van der Krogt (Deltares), Ruben Jongejan (namens KPR), Henk van Hemert (HHNK) en Harry de Looft (RWS). Daarnaast hebben bijgedragen (in de vorm van adviezen, reviews, communicatie en/of het aanleveren van informatie): Hester Faber (HHNK), Arthur Kors (RWS), Hans Heilen (HWBP2), Rob Willems (RWS), Jos van Alphen (staf-DC), Inge Lardinois (DGRW) en Koos Poot (DGRW).

De auteurs en de opdrachtgevers bij DGRW zijn iedereen die heeft bijgedragen aan deze studie zeer erkentelijk.

DIRECTEUR-GENERAAL RUIMTE EN WATER,

Drs. P.R. Heij

Inhoud

SAMENVATTING	2
1 INLEIDING.....	13
1.1 AANLEIDING ONDERZOEK	13
1.2 DOEL VAN HET ONDERZOEK	14
1.3 ONDERZOEKSVRAGEN	14
1.4 OP TE LEVEREN RESULTAAT	15
1.5 VERTREKPUNTEN	15
1.6 AFBAKENING	17
1.7 PROGRAMMA VAN EISEN	17
1.8 DEELONDERZOEKEN EN ACTIVITEITEN	17
1.9 GEOTECHNISCHE MODELLEN EN DOORWERKING HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN.	18
1.10 BEWEZEN STERKTE	20
1.11 HERBEOORDELING CONCLUSIES POMPENONDERZOEK MARKERMEERDIJKEN	20
1.12 KWALITEITSBORGING	21
1.13 LEESWIJZER	21
2 DIJKEN OP VEEN, NIEUWE NORMERING EN PLAXIS	22
2.1 INLEIDING	22
2.2 DIJKEN OP VEEN.....	22
2.3 IMPACTANALYSE NIEUWE NORMERING	24
2.4 PLAXIS	25
2.5 CONCLUSIES DIJKEN OP VEEN, NIEUWE NORMERING EN PLAXIS	26
3 BEWEZEN STERKTE	27
3.1 AANLEIDING	27
3.2 ONDERZOEKSVRAGEN	29
3.3 AANPAK ALGEMEEN.....	29
3.4 METHODEN.....	30
3.5 SCHEMATISATIE MARKERMEERDIJK	31
3.6 GEVOELIGHEID VOOR BUITENWATERSTAND	34
3.7 ANALYSES OVERLEEFDE BELASTING	35
3.8 BEWEZEN STERKTE MET FRAGILITY CURVES	36
3.9 BEWEZEN STERKTE MONTE CARLO	39
3.10 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	39
4 SYNTHESE, CONCLUSIES EN REFLECTIE.....	45
4.1 SYNTHESE	45
4.2 CONCLUSIES ONDERZOEK	46
4.3 REFLECTIE	47
4.4 AANBEVELINGEN EN AANDACHTSPUNTEN VOOR HET VERVOLG	49
LITERATUUR.....	52

Samenvatting

Context

In de tweede toetsing van de primaire waterkeringen (2006) is ruim 33 kilometer van de Markermeerdijken tussen Amsterdam-Noord en Hoorn afgekeurd (IVW, 2006). Het overgrote deel van de dijken (90%) is afgekeurd op het faalmechanisme binnenwaartse stabiliteit. Daarnaast zijn de dijken op een gering aantal plekken niet hoog genoeg, niet stabiel aan de buitenzijde of voldoet de bekleding niet.

In de Waterwet (MinVenW, 2009) is vastgelegd dat afgekeurde primaire keringen worden opgenomen in het Hoogwaterbeschermingsprogramma (www.hoogwaterbeschermingsprogramma.nl). Zo wordt ervoor gezorgd dat de dijken versterkt worden en weer het noodzakelijke beschermingsniveau bieden voor het achterliggende gebied.

De aanpak van het traject Hoorn-Amsterdam is opgenomen in het HWBP2. Hoogheemraadschap Noorderkwartier (HHNK) heeft het voortouw in het project. HHNK is onder meer een omgevingsproces gestart waarin omwonenden en andere belanghebbenden worden meegenomen. Daarbij is een Adviesgroep samengesteld, waarin enkele tientallen maatschappelijke groepen zijn vertegenwoordigd.

In mei 2015 bleek dat een aantal vragen van de Adviesgroep over het mogelijke effect van pompen op de Houtribdijk nog niet goed was onderzocht. Hierop heeft de minister van IenM opdracht gegeven aan Rijkswaterstaat om onderzoek in te stellen naar het effect van pompen op de Houtribdijk. Daarbij stonden twee vragen centraal:

1. In hoeverre kan met pompen op de Houtribdijk de hydraulische belasting (MHW) van het Markermeer significant verlaagd worden (met 30 tot 90 cm).
2. Wat is het effect van een MHW-verlaging op het ontwerp van de Markermeerdijken?

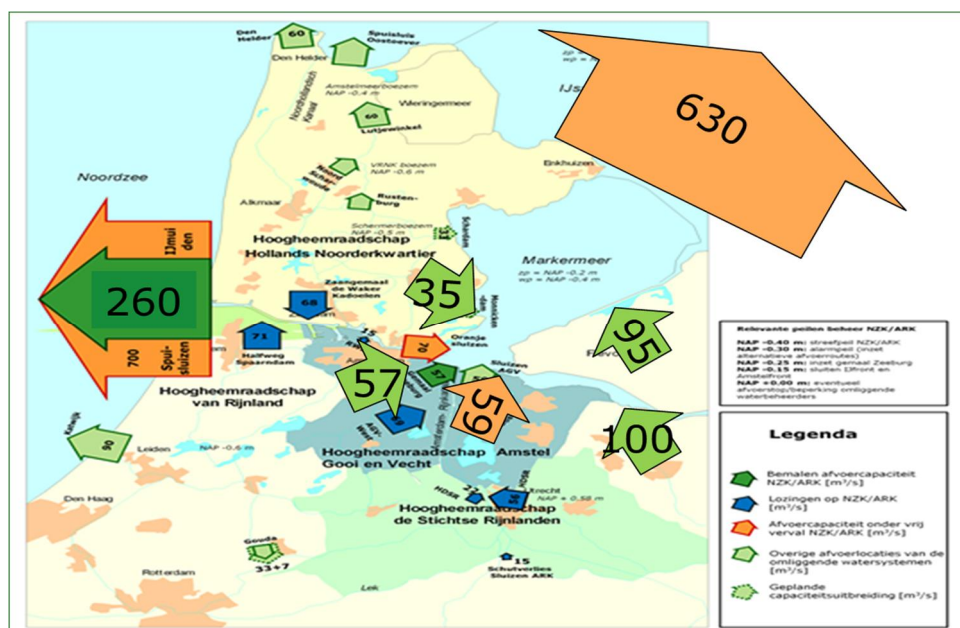
De eerste fase van het onderzoek is in september 2015 opgeleverd (RWS, sep. 2015), inclusief ook een advies van het Expertisenetwerk waterveiligheid.

Maatgevende omstandigheden voor macrostabiliteit

Het overgrote deel van de dijken tussen Amsterdam en Hoorn is afgekeurd op de stabiliteit van de binnenzijde. De maatgevende omstandigheden (behorend bij de norm van 1:10.000 jaar) die bij deze afkeuring bepalend zijn, zijn een meerpeil van +0,70m NAP in combinatie met windkracht 4 à 5 Beaufort uit oostelijke richting. Dergelijke omstandigheden kunnen ontstaan bij gestremde afvoer in de Afsluitdijk, waardoor het IJsselmeerpeil stijgt. Het Markermeerpeil stijgt vervolgens mee, omdat het Markermeer niet meer kan afvoeren via de spuisluizen op het IJsselmeer, terwijl de poldergemalen nog wel op het Markermeer blijven afwateren. Het is niet de bedoeling dat hoogwater van het IJsselmeer overloopt in het Markermeer. De wind in deze situatie is niet echt doorslaggevend, het gaat voor stabiliteit met name om de lange duur van de hoge meerpeilstand.

Intermezzo: Het watersysteem Markermeer en omgeving

Om de onderzoeksvragen uit fase 1 van het pompenonderzoek te kunnen beantwoorden is achtergrondinformatie verzameld over het watersysteem Markermeer en omgeving (zie figuur 0.1), de hydraulische aspecten en andere relevante achtergrondinformatie met betrekking tot het veiligheidsvraagstuk.



Groene pijlen: gemalen; oranje pijlen: spuisluizen; blauwe pijlen: gemalen op het Amsterdam-Rijnkanaal/Noordzeekanaal.

Figuur 0.1: Aan- en afvoerroutes (maximum debieten) van water rond het Markermeer (Bron: Waterakkoorden IJsselmeergebied, RWS, waterschappen).

Het effect van pompen op het meerpeil

Het onderzoek naar de effecten van pompen is in september 2015 opgeleverd. Op basis van het onderzoek naar hydraulische belastingen, kosten van pompen en de effecten op het dijkontwerp, is geconcludeerd dat waterstaatkundig gezien een MHW-verlaging van 0,6m het meest effectief is. Met een MHW-daling van 0,6 m zou het huidige toetspeil uitkomen op +0,10 m NAP. Dat is een situatie die in 1998 daadwerkelijk is opgetreden.

Een MHW-verlaging met 0,6 m heeft effect op het ontwerp van de Markermeerdijken tussen Hoorn en Amsterdam. Het effect verschilt per deeltraject. Een dijkversterking kan echter niet worden voorkomen. Financieel gezien varieert de besparing op het ontwerp van de Markermeerdijken bij een pompcapaciteit van 300 m³/s op de Houtribdijk tussen 40 miljoen euro (ondergrens) en 100 miljoen euro (bovengrens). Dit betreft een kostenbesparing ten opzichte van de bestuurlijk vastgestelde voorkeursvariant (VOPP).

De kosten van de pompen worden ingeschat op 300 miljoen euro (conform de standaard-systematiek voor kostenramingen), met als ondergrens 150 miljoen euro. Als de ondergrens van de kosten wordt gehanteerd is de bovengrens van de besparing (100 miljoen euro) kleiner dan de ondergrens van de investering (150 miljoen €). Bij deze ramingen is uitgegaan van 300 m³/s aan pompen op de Houtribdijk en 300 m³/s op de Afsluitdijk.

Op basis van deze uitkomsten is de investering in pompen niet rendabel.

ENW geeft in haar advies van september 2015 (zie bijlage 2) aan dat verder onderzoek naar de bewezen sterkte van de huidige dijk een aanzienlijke besparing in kosten en een substantiële reductie van de dijkversterkingsopgave kan opleveren, al dan niet in combinatie met het toepassen van pompen. ENW sluit in haar advies van september 2015 af met het advies om te verkennen in hoeverre 'bewezen sterkte' een kansrijk concept is om toe te passen bij de Markermeerdijken.

Daarnaast waren ten tijde van fase 1 van het pompenonderzoek een aantal onderzoekstrajecten nog niet afgerond. Het ging daarbij om het uitvoeren van een goede analyse naar de effecten van Dijken op Veen en de impact van de nieuwe normering op de omvang van de benodigde dijkversterking. Daarbij hoort ook een gevoeligheidsanalyse van de parameterinstellingen van het gehanteerde geotechnisch model, inclusief een beschouwing in hoeverre andere instellingen kunnen leiden tot nieuwe inzichten over de omvang van de dijkversterking. Separaat kan ook een beschouwing worden gegeven over de kansrijkheid om een geheel ander model (Plaxis) toe te passen.

Op basis van de onderzoeksresultaten uit fase 1 van het pompenonderzoek, het ENW-advies en het feit dat een aantal onderzoekstrajecten nog niet was afgerond, heeft de minister in september 2015 besloten nog geen definitief besluit over pompen te nemen. Eerst was er vervolgonderzoek nodig (fase 2 pompenonderzoek). De inhoud en resultaten worden in dit rapport beschreven, en hieronder samengevat.

Onderzoeksvragen fase 2 pompenonderzoek

In voorliggende studie zijn de volgende onderzoeksvragen geformuleerd:

1. In hoeverre is de in de pompenstudie gevonden relatie tussen hydraulische belasting en het effect op het dijkontwerp juist ingeschat?
2. In hoeverre kan 'bewezen sterkte' binnen afzienbare termijn (orde grootte 6 maanden) worden geoperationaliseerd, en leidt dat in combinatie met pompen tot een verkleining van de opgave. Uitgangspunt daarbij is een methode die kwantitatief, reproduceerbaar en toetsbaar is, zodanig dat de waterkeringbeheerder op een binnen de huidige systematiek passende wijze kan aantonen dat de kering veilig is.
3. Op basis van de voorgaande deelvragen is de hoofdvraag: In hoeverre leiden de nieuwe inzichten in de geotechnische modellen, de doorwerking van de hydraulische belasting op het dijkontwerp en 'bewezen sterkte' tot andere conclusies over de effectiviteit van pompen op de Houtribdijk?

Om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden, zijn de volgende deelonderzoeken en activiteiten uitgevoerd:

1. Geotechniek, modellen en doorwerking hydraulische randvoorwaarde op het dijkontwerp:
 - a. Aftappen van de laatste stand van zaken van Dijken op Veen, inclusief een gevoeligheidsanalyse van de geotechnische modellen en het effect op de opgave van de dijken.
 - b. Herbeoordelen van de impactanalyse van de nieuwe normering.
 - c. Afronden van de verkenning 'Kansrijkheid Plaxis'.
2. Bewezen sterkte: opstellen van een advies over de kansrijkheid van het operationaliseren van 'bewezen sterkte' voor de Markermeerdijken in combinatie met pompen.

3. Op basis van 1 en 2: beoordeling of de conclusies van de pompenstudie Markermeerdijken nog steeds geldig zijn of aangepast moeten worden.
4. Kwaliteitsborging.

Wat betreft dat laatste: voor elk deelproduct zijn de gebruikelijke interne kwaliteitsprocedures doorlopen. Naast kwaliteitsprocedures van opdrachtnemende bureaus is ook door opdrachtgevers van RWS en HHNK getoetst. Daarnaast heeft ir. Joop Weijers bijgedragen aan de kwaliteitsborging van het grondmechanisch onderzoek. Tevens heeft een expertgroep meegekeken bij het ontwikkelen van de methodiek voor 'bewezen sterkte' (zie het voorwoord voor de samenstelling van de expertgroep). Tot slot is ook het advies van het Expertise-Netwerk Waterveiligheid (ENW) een belangrijke kwaliteitstoets voor het onderzoek.

In hoofdstuk 2 zijn de resultaten van Dijken op Veen, de impactanalyse voor de nieuwe normering en Plaxis beschreven.

- Voor **Dijken op Veen** is het belangrijkste resultaat dat effecten van nieuwe parameterinstellingen in beeld zijn gebracht middels een gevoeligheidsanalyse. Hieruit bleek onder meer dat de winst op de veiligheidsopgave van de nieuwe parameterinstellingen beperkt is. De resultaten zijn tevens direct gebruikt bij het onderzoek naar bewezen sterkte.
- De impactanalyse voor de **nieuwe normering**, met name het effect van het nieuwe ontwerpinstrumentarium (OI2014, versie 3) heeft bij gebrek aan nieuwe rekenresultaten nog geen nieuwe inzichten opgeleverd ten opzichte van de vorige versie van het OI. Uit de vorige impactanalyse bleek dat er geen significante afwijkingen ten opzichte van de vigerende norm zijn, maar de ontwikkeling van het toets- en ontwerpinstrumentarium kunnen gevolgen hebben.
- Tot slot is in hoofdstuk 2 het mogelijke gebruik van **Plaxis** voor het HWBP2-project geanalyseerd. Daaruit blijkt dat toepassing van Plaxis voor het toetsen en ontwerpen van de 33 km afgekeurde Markermeerdijken niet realistisch is bij gebrek aan voldoende monitoringgegevens en een geschikte veiligheidsfilosofie. Voor het analyseren van vervormingen op kritische locaties (bij het ontwerp en tijdens de bouw) en het verifiëren van de resultaten van 'bewezen sterkte' kan Plaxis wel een waardevolle bijdrage leveren.

In hoofdstuk 3 zijn de resultaten van het onderzoek naar bewezen sterkte beschreven. Uit dit onderzoek komen 3 belangrijke resultaten:

1. Het lijkt kansrijk om binnen 6 tot 8 maanden een methode te ontwikkelen die gebruikt kan worden voor een nadere veiligheidsanalyse, met gebruikmaking van 'bewezen sterkte' die kwantificeerbaar, reproduceerbaar en toetsbaar is.
2. Toepassing van de methode leidt naar verwachting tot een kleinere veiligheidsopgave voor het belangrijkste faalmechanisme macrostabiliteit van de Markermeerdijken.
3. Uit het onderzoek naar 'bewezen sterkte' wordt bevestigd dat het effect van buitenwaterstanden op de veiligheidsopgave van de Markermeerdijken klein is. Maar ook zonder pompen leidt het effect van 'bewezen sterkte' tot een kleinere opgave.

Conclusies onderzoek fase 1 en fase 2

Op basis van dit onderzoek en het onderzoek uit fase 1 van de pompenstudie, kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

1. In fase 1 van het pompenonderzoek is geconcludeerd dat het effect van de buitenwaterstand op de opgave voor de dijken beperkt is (ten opzichte van het VOPP). In dit onderzoek wordt bevestigd dat een een lagere buitenwaterstand

van het Markermeer weinig invloed heeft op de stabiliteitsopgave voor de Markermeerdijken tussen Hoorn en Amsterdam. Dit betekent tevens dat pompen weinig effect zullen hebben op de veiligheidsopgave. Op basis van dit gegeven, en de kosten van de pompen (minimaal 150 miljoen euro) kan worden geconcludeerd dat het niet zinvol is om projectbudget van het HWBP2-project Markermeerdijken te besteden aan pompen op de Houtribdijk. De kosten voor de pompen zijn aanzienlijk hoger dan de besparingen op het dijkontwerp. Zie voor een verdere toelichting ook de reflectie in de volgende paragraaf.

2. Het is mogelijk gebleken om een methode te ontwikkelen om 'bewezen sterkte' toepasbaar te maken voor het uitvoeren van een nadere veiligheidsanalyse van de Markermeerdijken voor het onderdeel macrostabiliteit. Deze methode levert naar verwachting resultaten op die kwantificeerbaar, reproduceerbaar en toetsbaar zijn. Voor deze methode is breed draagvlak bij de geotechnische experts en ENW.
3. Het is mogelijk deze methode voor 'bewezen sterkte' binnen 6 tot 8 maanden te operationaliseren. In termen van operationaliseren lijkt het uitvoeren van een nadere veiligheidsbeoordeling met de methode fragility curves zeker haalbaar. Het bruikbaar maken van de methode met Monte Carlo simulatie voor ontwerpen zal een langere termijn voor ontwikkeling vergen (voor macrostabiliteit), waarschijnlijk twee tot drie jaar.
4. Op basis van de methode voor bewezen sterkte kan worden geconcludeerd dat 'bewezen sterkte' kan leiden tot een reductie van de veiligheidsopgave voor de Markermeerdijken, zonder dat hiervoor pompen op de Houtribdijk nodig zijn. Het inzetten van pompen levert geen extra reductie in de veiligheidsopgave. Hoe groot de reductie door 'bewezen sterkte' precies is, is nu nog niet te zeggen, maar geadviseerd wordt om dit in de planfase verder uit te werken.

Reflectie

In het onderzoek zijn een aantal opvallende zaken naar voren gekomen. In onderstaande reflectie wordt hier verder op ingegaan. Achtereenvolgens betreft dit:

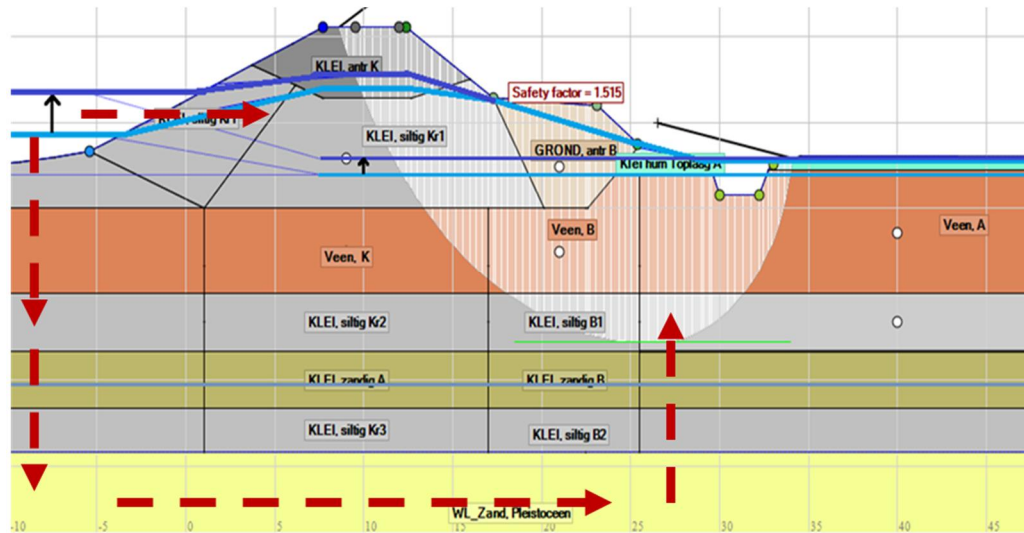
- De beperkte invloed van de buitenwaterstand.
- De positieve invloed van bewezen sterkte.

Beperkte invloed buitenwaterstanden

Uit beschouwing van de stabiliteitsfactoren is duidelijk geworden dat de dijk in de scenario's zonder tussenzandlaag nauwelijks reageert op de buitenwaterstand. Ook met tussenzandlaag (een fenomeen dat lokaal voor kan komen) is de gevoeligheid beperkt.

De verklaring hiervoor is dat verhoging van het buitenwater maar voor weinig extra stijging van de van nature al hoge freatische lijn zorgt. Dit wordt mede veroorzaakt door de samenstelling van het dijkmateriaal, waar in verschillende ophooggrondes veel klei in is verwerkt. Tevens is het slappe lagen pakket zo dik en ondoorlatend dat de kritieke glijvakken, die doorgaans door de kleilaag onder het veen gaan, niet of nauwelijks worden beïnvloed door verhoging van de stijghoogtes in de watervoerende zandlaag (geringe indringing).

De verklaring voor de beperkte respons van de buitenwaterstand voor de zuidelijke Markermeerdijken representatieve schematisatie 1 is geïllustreerd in figuur 0.2.



Figuur 0.2: Schematisatie 1: Illustratie van een typisch kritiek glijvlak met de relevante freatische lijnen en stijghoogtes bij dagelijkse omstandigheden (licht blauw) en bij het ontwerppeil (donkerblauw).

Verhoging van het buitenwater zorgt maar voor weinig extra stijging van de al bij dagelijkse omstandigheden hoge freatische lijn. Tevens is het slappe lagen pakket zo dik en ondoorlatend dat de lagen waar de kritieke glijvakken doorheen gaan, niet of nauwelijks worden beïnvloed door verhoging van de stijghoogtes in de watervoerende zandlaag (geringe indringing). Bij locaties waar een tussenzandlaag aanwezig is, is er meestal wel een verbinding met het buitenwater mogelijk, maar wordt de invloed beperkt door een dikke, vrijwel ondoorlatende sliblaag op de bodem van het Markermeer. Dit beeld is in de diverse expert bijeenkomsten herkend en onderschreven door experts met lokale ervaring.

In het algemeen heeft het toepasbaar maken van bewezen sterkte een grote invloed als de onzekerheid ten aanzien van de sterkte groot is ten opzichte van de onzekerheid ten aanzien van de belasting. Dit is waarschijnlijk het geval bij de Markermeerdijken. De kleine invloed van de buitenwaterstand op de waterspanningen wordt hierbij nog verder afgezwakt door de relatief lage invloed van de waterspanningen op de ongedraineerde schuifsterkte (vergeleken met gedraineerde schuifsterkte)

Positieve invloed bewezen sterkte

De positieve invloed van bewezen sterkte op het beeld van de opgave/de omvang van versterkingen bij de Markermeerdijken is als volgt te verklaren:

In het algemeen heeft bewezen sterkte een grote invloed als het belang van de onzekerheid ten aanzien van de sterkte groot is ten opzichte van de onzekerheid ten aanzien van de belasting. Dit is het geval ten aanzien van de macrostabiliteit bij de Markermeerdijken. Dit heeft de volgende oorzaken:

- De ondergrond reageert hier ongedraineerd: de afhankelijkheid van de buitenwaterstand is kleiner dan bij gedraineerd grondgedrag (zie voor een toelichting bijlage 4).
- De onzekerheden ten aanzien van de werkelijke waarden van de sterkte-eigenschappen (su-ratio, grensspanning) zijn bij de Markermeerdijken groot. Dat wordt ook wel geïllustreerd door de forse inspanning die via het Dijken op

- veen traject in de afgelopen jaren is geleverd om sterkte-eigenschappen beter te bepalen.
- De ondergrondopbouw van de Markermeerdijken is vaak dusdanig dat de waterspanningen (in het relevante gebied) en de freatische lijn beperkt afhankelijk zijn van de buitenwaterstand.
 - De onzekerheid ten aanzien van de jaarextremen van de buitenwaterstand op het Markermeer is relatief klein (decimeringhoogte slechts orde 20 tot 30cm).

Omdat de omstandigheden bij andere dijken anders (kunnen) zijn, laten de conclusies van de proof-of-concept-studie zich niet gemakkelijk veralgemeniseren. Per geval zal het effect van bewezen sterkte moeten worden beoordeeld.

Uitsluiten van 'bewezen sterkte'

Voor het mogen toepassen van 'bewezen sterkte' is het noodzakelijk dat de omstandigheden waarin een historisch hoogwater veilig is gekeerd, en die dus het bewijs vormen voor de werkelijke sterkte van een kering, nog steeds dezelfde zijn. Het gaat dan onder meer om de volgende aspecten:

- De dijk moet in het verleden een (extreme) waterstand zonder schade overleefd hebben.
- De dijk zelf alsmede het invloedsgebied van de dijk mag sinds het historisch opgetreden hoogwater geen veranderingen hebben ondergaan die de stabiliteit mogelijk in ongunstige zin hebben beïnvloed. Hierbij valt onder andere te denken aan:
 - Dijkversterking,
 - Bebouwing,
 - bodemdaling,
 - polderpeilverlaging,
 - veranderende intreeweerstand
 - veranderende sterkte van de dijk of de ondergrond als gevolg van veroudering (bijvoorbeeld bij veen) of oxidatie.
- De in het verleden opgetreden extreme waterstand moet vergelijkbaar zijn met de nu geldende maatgevende waterstand. Datzelfde geldt ook voor eventuele andere belastingen (o.a. wegverkeer, neerslag).

Het HWBP2-project Markermeerdijken wordt wellicht het eerste dijkversterkingsproject waar 'bewezen sterkte' kan worden toegepast. Tot nu toe strandden alle pogingen hiertoe op het niet kunnen kwantificeren van het effect, en/of het feit dat de omstandigheden sinds het optreden van historisch hoge waterstanden ingrijpend waren veranderd. Met de methode 'fragility curves' is wetenschappelijk gezien een doorbraak bereikt waarmee het effect wel kan worden gekwantificeerd. Het overstappen naar ongedraineerd rekenen en de voor Dijken op veen bepaalde parameters zorgen dat de proof-of-concept studie positieve resultaten laat zien. Daarnaast telt ook mee dat veel van de omstandigheden bij de Markermeerdijken sinds het ontstaan van het Markermeer stabiel zijn.

Aanbevelingen en aandachtspunten voor het vervolg

Eén van de hoofdconclusies van dit onderzoek is dat het kansrijk is om de methode voor 'bewezen sterkte' met fragility curves voor het faalmechanisme macro stabiliteit te operationaliseren. Aanbevolen wordt om dit de komende tijd op te pakken. Tevens wordt aanbevolen om te verkennen in hoeverre ook de geavanceerde methode (Monte Carlo) op tijd ontwikkeld kan worden om meerwaarde te hebben binnen het project voor het optimaliseren van het ontwerp,

met name op knelpuntlocaties. Als dit niet lukt, wordt geadviseerd bij het ontwerp gebruik te maken van de leerervaring die wordt opgedaan bij het toepassen van de fragility curves. Daarvoor zijn er grofweg de volgende opties:

1. Ontwerpverificatie met de eenvoudige methode: ontwerp beoordelen met de methode 'fragility curves', waarbij de invloeden van bijvoorbeeld ontworpen bermen conservatief worden meegenomen in de updating procedure. Vervolgens ontwerp bijstellen en herhalen.
2. Ontwerp opstellen volgens gangbare praktijk; daarbij de ontwerpuitgangspunten zodanig met onderbouwing via bewezen sterkte afwegingen corrigeren dat er geen sprake meer is van evidente strijdigheid met opgetreden belastingsituaties. De belangrijkste bij te stellen uitgangspunten kunnen mede gekozen worden op basis van de inzichten uit het bewezen-sterkteonderzoek. Voordeel is dat een dergelijke methode relatief eenvoudig te operationaliseren is. Nadeel is dat de potentie van bewezen sterkte niet volledig wordt benut. Door de onzekerheid die gepaard gaat met de benaderingen/keuzes, zal namelijk enige veilige marge in acht genomen moeten worden.
3. Ontwikkelen van verschillende scenario's voor onzekerheden in de schematisatie van de ondergrond. Bepalen bij welke scenario's sprake zal zijn van een verwaarloosbare faalkans, vervolgens ontwerpen op basis van de gangbare ontwerppraktijk. Nadeel is dat de winst relatief beperkt blijft, doordat de relaties tussen scenario's buiten beschouwing blijven. Maar ook hier geldt dat het in ieder geval de goede richting op werkt.
4. Toepassing geavanceerde reliability updating methode: update van kansverdelingen van de sterkteparameters. Theoretisch is dit ideaal, maar met een minimale ontwikkeltijd van 2 tot 3 jaar. Tevens is er een relatief groot risico op niet-tijdigheid vanwege de complexiteit.

Afhankelijk van hoe snel de doorontwikkeling verloopt, zal een ambitieuzere optie in de praktijk gebracht kunnen worden voor trajecten met een opgave voor macrostabiliteit.

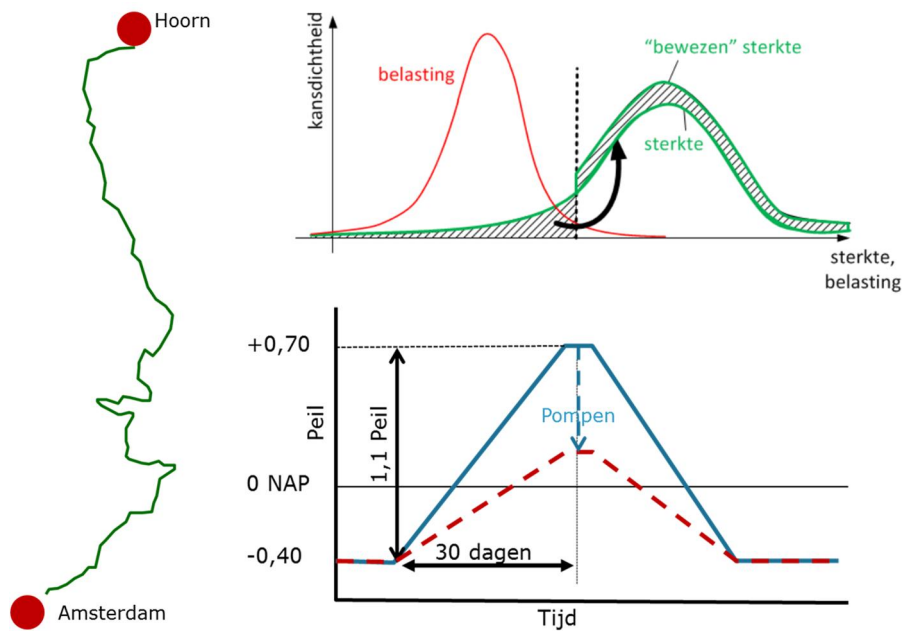
De belangrijkste aanbevelingen voor eventuele vervolgstudies ten aanzien van bewezen sterkte voor macrostabiliteit bij de Markermeerdijken zijn:

1. Beschouw ook andere belastingcondities dan het hoogwater van 1998, zoals condities met bekende hevige neerslag (hoog freatisch vlak in de dijk) of hoge verkeersbelastingen.
2. Neem expliciet de kansen op verschillende bodemopbouwscenario's mee en stel deze bij met de bewezen sterkte informatie.
3. Ga na of rekenen met verkeersbelasting in de toetsituatie werkelijk noodzakelijk is. In deze proof-of-concept studie is de verkeersbelasting buiten beschouwing gelaten op aanraden van de eerste expertsessie.
4. Analyseer meer representatieve dijkvakken om het effect voor andere condities te verkennen.

Tenslotte wordt opgemerkt dat het meenemen van overleefde belastingen ook voor andere dijken een gunstiger beeld van de veiligheid kan geven. Het lijkt zinvol om op korte termijn de potentie voor het Hoogwaterbeschermingsprogramma te verkennen door ook elders in het land een reeks van uiteenlopende representatieve dijken te analyseren. Op basis van meerdere pilots zou het mogelijk moeten zijn binnen enkele jaren een breed geaccepteerde methode voor bewezen sterkte te ontwikkelen, die na goedkeuring door ENW opgenomen kan worden in het Ontwerp-Instrumentarium.

Voor het analyseren van vervormingen op kwetsbare locaties, met name bij aanwezigheid van funderingen nabij het verwachte glijvlak, en bij het gebruik van constructieve elementen als damwanden in het ontwerp, kan Plaxis worden ingezet. Op dergelijke locaties is het aan te bevelen om de glijcirkelmodellen daarmee te valideren. Hiervoor is het wel zaak voldoende monitoringgegevens te hebben. Geadviseerd wordt om aan het begin van de volgende fase te bepalen voor welke locaties Plaxis ingezet gaat worden, te analyseren welke invoergegevens daarvoor nodig zijn en indien noodzakelijk daar dan een gericht monitoringprogramma voor op te stellen.

Kansrijkheid pompen en bewezen sterkte Markermeerdijken HWBP2



1 Inleiding

1.1 Aanleiding onderzoek

In de tweede toetsronde op de primaire waterkeringen (2006) is ruim 33 kilometer van de Markermeerdijken tussen Amsterdam-Noord en Hoorn afgekeurd (IVW, 2006). Het overgrote deel van de dijken (90%) is afgekeurd op het faalmechanisme binnenwaartse stabiliteit. Daarnaast zijn de dijken op een gering aantal plekken niet hoog genoeg, niet stabiel aan de buitenzijde of voldoet de bekleding niet.

In de Waterwet (MinVenW, 2009) is vastgelegd dat afgekeurde primaire keringen worden opgenomen in het Hoogwaterbeschermingsprogramma (www.hoogwaterbeschermingsprogramma.nl). Zo wordt ervoor gezorgd dat de dijken versterkt worden en weer het noodzakelijke beschermingsniveau bieden voor het achterliggende gebied.

De aanpak van het traject Hoorn-Amsterdam is opgenomen in het HWBP2. Hoogheemraadschap Noorderkwartier (HHNK) heeft het voortouw in het project. HHNK is onder meer een omgevingsproces gestart waarin ook omwonenden en andere belanghebbenden worden meegenomen. Daarbij is een Adviesgroep samengesteld, waarin enkele tientallen maatschappelijke groepen zijn vertegenwoordigd.

In mei 2015 bleek dat een aantal vragen van de Adviesgroep over het mogelijke effect van pompen op de Houtribdijk nog niet goed was onderzocht. Hierop heeft de minister van IenM opdracht te geven aan Rijkswaterstaat onderzoek in te stellen naar het effect van pompen op de Houtribdijk.

In september 2015 is het onderzoek "Pompen Markermeerdijken HWBP-2" afgerond (RWS, 2015). Dit onderzoek heeft inzicht gegeven in de effecten en kosten van pompen om de waterstand in het Markermeer bij extreme omstandigheden te verlagen. Het onderzoek heeft ook inzicht gegeven in het effect van lagere waterstanden op de benodigde dijkontwerpen volgens het VOPP (Voorkeursalternatief).

Terminologie: VOPP en dijkontwerp

De afkorting VOPP staat voor Voorlopig Ontwerp ProjectPlan. Het VOPP wordt gebruikt als huidige referentie voor het dijkontwerp. De term 'dijkontwerp' staat in dit rapport nadrukkelijk niet synoniem aan VOPP. Als het VOPP wordt bedoeld, wordt ook de term VOPP gebruikt. In alle andere gevallen wordt de term 'dijkontwerp' gebruikt.

De begeleidingscommissie van het onderzoek heeft de feiten en conclusies zoals die in het eindrapport zijn geformuleerd onderschreven, met daarbij de kanttekening dat de scope van de studie door de beperkte doorlooptijd redelijk beperkt was. Zo is vanuit praktische overwegingen uitgegaan van het VOPP en de huidige rekenmodellen.

Vanwege die reden heeft de begeleidingscommissie de Minister van IenM geadviseerd nu nog geen besluit te nemen over wel of geen pompen (en daarmee over de definitieve scope voor de versterking van de Markermeerdijken), en de komende maanden te benutten voor nadere analyse van de volgende onderwerpen (bron: advies begeleidingscommissie, d.d. 14 september 2015):

1. Bewezen sterkte, wat volgens het ENW een substantiële reductie van de kosten en dijkversterkingsopgave kan opleveren, al dan niet in combinatie met pompen.
2. Dijken op Veen, inclusief gevoeligheidsanalyse van de gebruikte geotechnische modellen,
3. Impact van de nieuwe normering,
4. Het gebruik van het geotechnisch rekenmodel Plaxis.

De minister van IenM heeft dit advies overgenomen.

1.2 Doel van het onderzoek

Met het onderzoeken van bovengenoemde vragen wordt beoogd een besluit te kunnen nemen over het wel of niet installeren van pompen op de Houtribdijk. Dat is dus ook het hoofdoel van dit onderzoek. Daarbij worden de volgende nevendoelen nagestreefd:

- a. Beter inzicht in de opgave van de dijkversterking en de betrouwbaarheid van de modellen, en daarmee beter inzicht in de kansrijkheid van optimalisaties in het dijkontwerp door het verlagen van de hydraulische belasting door middel van pompen.
- b. Inzicht in de kansrijkheid om te komen tot een methodiek waarmee 'bewezen sterkte' kan worden aangetoond (kwantitatief, reproduceerbaar, toetsbaar; zodanig dat de keringbeheerder op een transparante wijze kan aantonen dat de kering veilig is of wordt (bij respectievelijk toetsen of ontwerpen).
En op basis daarvan: inzicht in de vraag in hoeverre de combinatie 'bewezen sterkte' en pompen kansrijk is.

Doel is dus niet om binnen enkele maanden een geaccepteerde methodiek voor bewezen sterkte te hebben (dat lijkt op voorhand onhaalbaar), doel is wel om zicht te krijgen op de vraag of binnen afzienbare termijn (orde grootte 6 maanden) een geaccepteerde methodiek ontwikkeld kan worden, en in hoeverre dat in combinatie met pompen kansrijk is voor de Markermeerdijken.

Het vervolgonderzoek zal conform de aanbeveling van de begeleidingscommissie op dezelfde wijze worden voortgezet als de eerste fase van het onderzoek (joint fact-finding). De minister van IenM heeft Rijkswaterstaat gevraagd dit onderzoek te trekken.

1.3 Onderzoeksvragen

In het vorige hoofdstuk is de aanleiding geschetst voor dit onderzoek. Vertrekpunt daarbij is het onderzoek naar pompen op de Houtribdijk (RWS, september 2015). In deze studie is geconcludeerd dat op basis van de gekozen uitgangspunten (onder andere VOPP en geotechnische modellen) het verkleinen van de hydraulische belasting door middel van pompen op de Houtribdijk minder oplevert dan gehoopt. De invloed van een kleinere hydraulische belasting op het dijkontwerp lijkt beperkt, en de kosten van de pompen zijn groter dan de baten in het dijkontwerp.

Definitieve conclusies konden echter nog niet worden getrokken. Dit heeft te maken met de beperkte scope van de studie. Zo is uitgegaan van de huidige geotechnische modellen, waarin onder andere de resultaten van Dijken op Veen nog niet goed waren verwerkt. Ook waren de nieuwste inzichten ten aanzien van de impact van de nieuwe normering nog niet meegenomen. Tevens is er een verkenning uitgevoerd naar de haalbaarheid van het gebruik van het Eindige Elementen model Plaxis voor de stabiliteitsanalyse van de Markermeerdijk (SOTA-engineering, 2015). Deze was niet in de pompenstudie meegenomen.

Bovenstaande punten hebben alle te maken met de geotechnische modellen, de effecten van de daling van de hydraulische belasting en daarmee de omvang van de opgave van de dijkversterking.

Een tweede hoofdvraag gaat over 'bewezen sterkte'. In het ENW-advies is geadviseerd om hier nader onderzoek naar te doen. Gezien de waterstanden en bijbehorende hydraulische belastingen die in het verleden zijn opgetreden (en door de dijk zijn gekeerd) zijn er aanwijzingen dat dit aan de orde zou kunnen zijn. Als dat kan worden aangetoond (kwantitatief, reproduceerbaar, toetsbaar; zodanig dat de keringbeheerder op een binnen de huidige systematiek passende wijze kan aantonen dat de kering veilig is) zou dat een verkleining van de opgave kunnen betekenen, al of niet in combinatie met pompen.

Samengevat zijn er drie hoofdthema's van onderzoek:

1. Geotechniek, modellen en doorwerking van de verlaging van de hydraulische randvoorwaarden op de dijkopgave.
2. Bewezen sterkte.
3. Effectiviteit van pompen op de opgave voor de Markermeerdijken.

Daarvoor kunnen de volgende onderzoeksvragen worden geformuleerd:

1. In hoeverre is de in de pompenstudie gevonden relatie tussen hydraulische belasting en het effect op het dijkontwerp juist ingeschat?
2. In hoeverre kan 'bewezen sterkte' binnen afzienbare termijn (orde grootte 6 maanden) worden geoperationaliseerd, en leidt dat in combinatie met pompen tot een verkleining van de opgave? Uitgangspunt daarbij is een methode die kwantitatief, reproduceerbaar en toetsbaar is, zodanig dat de keringbeheerder op een binnen de huidige systematiek passende wijze kan aantonen dat de kering veilig is.
3. Op basis van de voorgaande deelvragen is de hoofdvraag: In hoeverre leiden de nieuwe inzichten in de geotechnische modellen, de doorwerking van de hydraulische belasting op het dijkontwerp en 'bewezen sterkte' tot andere conclusies over de effectiviteit van pompen op de Houtribdijk ten behoeve van het HWBP2-project Markermeerdijken?

1.4 Op te leveren resultaat

Zoals door de Minister aangegeven, dient het onderzoek om een uitspraak te kunnen doen over de effectiviteit van pompen op de Houtribdijk om de opgave van de dijkversterkingen tussen Hoorn en Amsterdam te verminderen.

Het onderzoek wordt begeleid door een begeleidingscommissie met vertegenwoordigers van de adviesgroep, Rijkswaterstaat, het ministerie van Infrastructuur en Milieu (DGRW) en HHNK. De begeleidingscommissie staat onder voorzitterschap van de directeur van de staf-Deltacommissaris

1.5 Vertrekpunten

Als vertrekpunt voor de voorgenoemde analyse worden de volgende rapportages aangehouden:

- Syntheserapport pompenonderzoek Markermeerdijken (RWS, September 2015).
- Notitie 'Peilbeheer en hydraulische randvoorwaarden van het Markermeer' (RWS, Mei 2015).
- Advies ENW 'Onderzoek pompen t.b.v. Markermeerdijken' d.d. 4 september 2015.

- Brief van de directeur Staf-Deltacommissaris aan de DG Ruimte en Water met daarin het advies van de begeleidingscommissie van het pompenonderzoek, d.d. 14 september 2015.

Intermezzo: Uitleg over beperkte invloed buitenwaterstanden en positieve invloed bewezen sterkte

Bij de veiligheidsbeoordeling van dijken, dus ook bij de beoordeling van de stabiliteit, zijn 2 dingen belangrijk: de belasting en de sterkte van de dijk. Belasting: bij alle dijken zijn er verschillende soorten belastingen. De waterstand, golven, neerslag enzovoorts. Voor stabiliteitsberekeningen zijn vooral de buitenwaterstand (de druk die het buitenwater uitoefent op de dijk, maar ook via de invloed van de buitenwaterstand op de waterdruk in de dijk), de duur van de belasting en eventuele bijkomende neerslag bepalende belastingen. Andere bepalende elementen zijn verkeer en het eigen gewicht van de dijk. Sterkte: De sterkte van een dijk wordt bepaald door de vorm en afmetingen van de dijk, het materiaal dat gebruikt is, de samenstelling van de ondergrond, enzovoorts.

Bij een stabiliteitsberekening wordt gekeken naar het verschil tussen belasting en sterkte. De kans dat de belasting groter is dan de sterkte moet voldoende klein zijn. Dat wordt uitgedrukt in een veiligheidsfactor of een faalkans. In dergelijke berekeningen speelt onzekerheid een grote rol. Als we iets niet zeker weten, gaan we aan de veilige kant zitten om ervoor te zorgen dat de dijk niet onverwachts bezwijkt. Gezien het belang van waterveiligheid is dit een logische keuze. Naarmate de sterkte een grotere mate van onzekerheid heeft, wordt de onzekerheidsfactor hoger en leidt dit eerder tot afkeuring.

In het geval van het faalmechanisme stabiliteit, en met name bij de Markermeerdijken tussen Hoorn en Amsterdam, is de onzekerheid in de sterkte erg groot. Dat heeft te maken met de ondergrond: veen en slappe klei, waarvan de samenstelling langs het dijktraject ook nog behoorlijk varieert (niet-homogeen). Ook het materiaal waaruit de dijk opgebouwd is, is door de verschillende historische versterkingen divers en variabel. Uit de berekeningen in het kader van de toetsing in 2006 komt een aanzienlijk veiligheidstekort. Dit zou zonder aanscherping van de factoren die de sterkte bepalen (de zogenaamde sterkteparameters) leiden tot zeer grote versterkingsprofielen. Vanwege die reden is het project Dijken op veen gestart. Uit het onderzoek, waarbij overgestapt is op een andere manier van berekenen van de sterkte van de ondergrond, blijkt dat de sterkte van veen hoger is dan eerst gedacht. Maar de sterkte van de kleilagen valt tegen. Zelfs zodanig, dat dit het positieve effect van het sterkere veen min of meer compenseert. De onzekerheid in klei blijft groot.

Die onzekerheid in de ondergrond is zo groot, dat deze een overheersende rol speelt in de berekening. Dit wordt mede veroorzaakt door de keuzes die bepalen welke onzekerheidsfactor op de verschillende sterkteparameters moet worden toegepast. Dit noemen we ook wel de veiligheidsfilosofie. De keuzes voor de te hanteren onzekerheidsfactoren kunnen pas bijgesteld worden, als zeker is dat het totaal aan te hanteren onzekerheidsfactoren tot voldoende veiligheid leidt (bij toetsen en ontwerpen).

In het kader van Dijken op veen is de veiligheidsfilosofie bijgesteld aan de hand van de toegenomen kennis van de onzekerheid van de parameters. Bij het toepassen van de nieuwe werkwijze zien we dat de buitenwaterstand nu minder invloed heeft dan voorheen. De belasting door de buitenwaterstand wordt met andere woorden minder belangrijk.

Wat betreft de sterkte kan dankzij de nieuwe methode voor bewezen sterkte de situatie anders komen te liggen. De kern van de methode komt er op neer dat je de onzekerheid in de sterkteparameters reduceert, door informatie van situaties die in het verleden zijn opgetreden en veilig zijn gekeerd, mee te nemen in het bepalen van de veiligheid. Hoe groter de onzekerheid in de sterkte is in de stabiliteitsberekening, hoe meer effect 'bewezen sterkte' lijkt te hebben.

Doet die buitenwaterstand dan helemaal niets? Nee, je zult zien dat naarmate de onzekerheid in de sterkte afneemt, de buitenwaterstand op een gegeven moment een grotere rol gaat spelen. Maar dan nog zijn er voor de Markermeerdijken een aantal hele specifieke omstandigheden die dat effect beperken. Door onder andere een dikke, ondoorlatende laag slib op de bodem van het Markermeer, en de samenstelling van de dijk en de ondergrond, dringt het water van het Markermeer slechts langzaam in de dijk. Wijzigingen in het systeem, bijvoorbeeld door bodemdaling of zandwinning in het Markermeer, kunnen de situatie ook veranderen.

1.6 Afbakening

Wat betreft de afbakening geldt het volgende:

- Er wordt op basis van de resultaten van fase 1 van de pompenstudie gewerkt met een MHW-verlaging door pompen van 60 cm.
- De studie concentreert zich op geotechniek en bewezen sterkte. Aan de watersysteemkant (inclusief pompen en kosten daarvan) wordt in eerste instantie geen aanvullend onderzoek gedaan. Als de resultaten van het onderzoek naar geotechniek en bewezen sterkte daar aanleiding toe geven, kan dit alsnog worden opgepakt.

1.7 Programma van Eisen

Voor het onderzoek gelden de volgende eisen:

- scope: de resultaten van het onderzoek moeten het mogelijk maken voor de minister van IenM om half december 2015 een besluit te kunnen nemen over wel of niet inzetten van pompen op de Houtribdijk ten behoeve van het HWBP2-project Markermeerdijken.
- tijd: het onderzoek moet medio december 2015 zijn afgerond.
- kwaliteit: er zal door DGRW een adviesaanvraag worden ingediend bij ENW om de kwaliteit van het onderzoek en de resultaten te beoordelen.
- geld: het onderzoek moet worden uitgevoerd binnen de beschikbare financiële randvoorwaarden.

1.8 Deelonderzoeken en activiteiten

Om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden, zijn de volgende deelonderzoeken en activiteiten uitgevoerd:

1. Geotechniek, modellen en doorwerking hydraulische randvoorwaarde op het dijkontwerp:
 - a. Aftappen laatste stand van zaken Dijken op Veen, inclusief gevoeligheidsanalyse geotechnische modellen en effect op opgave dijken.
 - b. Herbeoordelen impactanalyse nieuwe normering.
 - c. Afronden Notitie 'kansrijkheid Plaxis'.
 - d. Integratie van bovenstaande resultaten tot een conclusie over het effect van pompen op de Markermeerdijken.
2. Bewezen sterkte: opstellen advies over de kansrijkheid van het operationaliseren van 'bewezen sterkte' voor de Markermeerdijken in combinatie met pompen.
3. Op basis van 1 en 2: beoordeling of conclusies van de pompenstudie Markermeerdijken nog steeds geldig zijn of aangepast moeten worden.
4. Kwaliteitsborging.

In onderstaande figuur is de samenhang tussen de eerste drie activiteiten weergegeven. Kwaliteitsborging vindt continu plaats (zie paragraaf 1.12).



Figuur 1.1: Samenhang tussen onderzoeksactiviteiten.

In de volgende paragraaf worden de activiteiten verder toegelicht en uitgewerkt.

1.9 Geotechnische modellen en doorwerking hydraulische randvoorwaarden.

1.9.1 Dijken op Veen

De keuze is al gemaakt om de onderzoeksresultaten uit het project Dijken op Veen mee te nemen als optimalisatiekansen in de nadere planuitwerking van de Markermeerdijken. Hoofdvraag voor deze studie is daarom: Wat is de impact van de mogelijke uitkomsten van Dijken op Veen op de beslissing over de effectiviteit van de pompen. Subvraag is: Wat is de bandbreedte van de effecten op het dijkontwerp bij verschillende scenario's voor Dijken op Veen? Hierbij wordt uitgegaan van twee hydraulische belastingniveaus: met en zonder pompen op de Houtribdijk.

Qua aanpak wordt er gewerkt op basis van de rapportage van Deltares en Fugro "Gevoeligheidsanalyse / Uitgangspunten Dijken op Veen" (FUGRO/Deltares, aug. 2015). In deze rapportage is voor een aantal nog definitief vast te stellen parameters de bandbreedte voor de keuze nader onderzocht. In de toetsing in 2006 is voor een aantal parameters een conservatieve keuze gemaakt op basis van de toenmalige beschikbare kennis. Afgelopen periode zijn die keuzes nader onderbouwd, soms met voorstellen voor scherpere keuzes. In het najaar van 2015 is een middenscenario nader uitgewerkt, met een bandbreedte tussen conservatief/robuust en scherp/minder robuust. Definitieve besluitvorming wordt nog voorbereid en grondonderzoek naar de sterkte van de kleilagen loopt nog tot eind 2015.

Deze actie is onafhankelijk van het VOPP, de parameters hebben betrekking op de huidige dijk en de huidige ondergrond, en kunnen zowel op de veiligheidsopgave effect hebben als op het ontwerp.

Opbrengst 1: Bandbreedte voor de gevolgen op het dijkontwerp van keuzes in parameters in beeld brengen.

Opbrengst 2: De nieuwe inschatting van de parameters kunnen gebruikt worden bij de verkenning naar 'bewezen sterkte'.

1.9.2 *Nieuwe normering*

In de Stuurgroep HWBP-2 is de keuze gemaakt (juni 2015) om tot nader order voor de Markermeerdijken uit te blijven gaan van de huidige normering. Bij het definitief worden van het Ontwerp Projectplan moet een impactanalyse worden uitgevoerd naar het effect van de nieuwe normering met behulp van de dan beschikbare versie van het Ontwerpinstrumentarium (OI).

Hoofdvraag is: Wat is de impact van de mogelijke effecten van nieuwe normering op de beslissing over de effectiviteit van de pompen. Belangrijkste subvraag is: wat is op dit moment de beste indicatie van het effect van de nieuwe normering op de opgave voor de Markermeerdijken.

De impactanalyse wordt uitgevoerd op basis van het Ontwerpinstrumentarium versie 2 (OIv2), en aangevuld met een kwalitatieve analyse op basis van OIv3. Bij deze impactanalyse wordt naar effecten van wijzigingen in het instrumentarium gekeken. Dit wordt niet gedaan op basis van het VOPP, maar betreft effecten van wijzigingen van ontwerpuitgangspunten.

Bovenstaande vragen worden, in samenwerking met onder andere Kennisplatform Risicobenadering (KPR), beantwoord.

Opbrengst: inzicht in het effect van nieuwe normering op de opgave voor de dijken.

1.9.3 *Plaxis*

Binnen het project Markermeerdijken worden de best beschikbare modellen en rekenregels gebruikt. Daarbij is ook geëxperimenteerd met Plaxis, maar dit heeft nog niet tot een operationeel model met passende veiligheidsfilosofie geleid. Tevens kostte het moeite geschikte data te vinden om het model goed te valideren. In potentie zou Plaxis wel meerwaarde bij het optimaliseren van het ontwerp op kunnen leveren, maar het is onduidelijk of op tijd een stabiel en goed afgeregeld model te bouwen is voor dit project.

Hoofdvraag: Is op een termijn van maximaal 1.5 jaar het gebruik van Plaxis praktisch toepasbaar binnen de context van de Markermeerdijken?

Subvraag 1: Helpen satellietbeelden bij het valideren van de schematisatie en het model Plaxis, of zijn er andere bruikbare meetmethoden die praktisch inzetbaar en bruikbaar zijn voor de Markermeerdijken?

Subvraag 2: Kan een passende veiligheidsfilosofie worden ontwikkeld binnen de gegeven tijdstermijn van 1.5 jaar?

Beantwoording van deze subvragen vindt plaats op basis van rapportage van State Of The Art Engineering / Wim Pater.

Opbrengst: inzicht in de haalbaarheid om binnen 1,5 jaar Plaxis toepasbaar te maken voor het project Markermeerdijken.

1.9.4 *Integratie nieuwe inzichten geotechnische modellen, impactanalyse nieuwe normering en Plaxis, leidend tot een conclusie over de effectiviteit van pompen op de Houtribdijk op het HWBP2-project Markermeerdijken.*

De nieuwe inzichten die door bovenstaande acties ontstaan, geven elk voor zich meer inzicht in de opgave voor de dijken en de effectiviteit van de pompen. Maar uiteindelijk gaat het om het geïntegreerde totale effect.

Actie: Integreren van de resultaten van D.o.V., impactanalyse nieuwe normering en verkenning Plaxis.

Opbrengst:

- Beter inzicht in de opgave voor de Markermeerdijken.
- Beter inzicht in de effectiviteit van pompen op het ontwerp van de Markermeerdijken (op basis van VOPP).
- Beter inzicht in de effectiviteit van pompen in combinatie met bewezen sterkte op de huidige Markermeerdijken.

1.10

Bewezen sterkte

ENW heeft in haar advies aanbevolen om te onderzoeken in hoeverre 'bewezen sterkte' kan worden gebruikt in de context van het project Markermeerdijken.

Uitgangspunt bij het Nederlandse waterveiligheidsbeleid is dat een waterkeringbeheerder moet kunnen aantonen dat een dijk aan de veiligheidsdoelstellingen voldoet. Tot nu toe zijn er geen methoden of rekenregels waarmee 'bewezen sterkte' kan worden gekwantificeerd. In overleg met de experts van ENW is bekeken welke methoden om 'bewezen sterkte' te operationaliseren er zijn, en wat de kansrijkheid is dat dit binnen afzienbare termijn bij de Markermeerdijken kan worden toegepast.

Hoofdvraag is op welke termijn het concept Bewezen Sterkte kan worden verwerkt in geaccepteerde, valideerbare en reproduceerbare methoden die gebruikt kunnen worden bij het toetsen en ontwerpen van waterkeringen. Tevens moet een indicatie van de te verwachten winst gegeven kunnen worden voor een heldere besluitvorming.

Actie: via onderzoek en een aantal expertsessies bovenstaande vraag beantwoorden, met als tussenstappen:

- Selectie experts (stuk of 10)
- Inventarisatie beschikbare informatie en methoden (in binnen- en buitenland).
- Analyse bruikbaarheid voor de Markermeerdijken.
- Selectie van de meest kansrijke methode.
- Uitwerking methode.
- Inschatting van benodigde werkzaamheden en tijd om tot een geschikt instrument te komen voor de Markermeerdijken (kwantificeerbaar, reproduceerbaar, toetsbaar; ENW-proof).
- Inschatting van het effect van meenemen van bewezen sterkte op de opgave en het effect van pompen.

Resultaat: advies over de kansrijkheid om het begrip 'bewezen sterkte' te operationaliseren voor de Markermeerdijken, inclusief de benodigde activiteiten en de termijn die daarvoor nodig is. Inclusief inzicht of daarmee de opgave voor de Markermeerdijken op een effectieve manier kan worden verkleind in combinatie met pompen.

1.11

Herbeoordeling conclusies pompenonderzoek Markermeerdijken

Nadat alle acties zijn uitgevoerd, kan opnieuw worden beoordeeld of pompen op de Houtribdijk een effectief middel zijn om de opgave van de Markermeerdijken tussen Hoorn en Amsterdam te verminderen, al of niet in combinatie met 'bewezen sterkte'.

Resultaat: eindrapportage met conclusies. Zoals afgesproken met ENW wordt ook over dit rapport een advies gevraagd.

Resultaat: Op basis van het eindrapport is de minister in staat een besluit te nemen over het al of niet inzetten van pompen voor het HWBP2-project Markermeerdijken.

1.12 Kwaliteitsborging

Voor elk deelproduct worden de gebruikelijke interne kwaliteitsprocedures doorlopen. Naast kwaliteitsprocedures van opdrachtnemende bureaus wordt ook door opdrachtgevers RWS en HHNK getoetst.

Daarnaast heeft ir. Joop Weijers bijgedragen aan de kwaliteitsborging van het grondmechanisch onderzoek. Tevens heeft een expertgroep meegekeken bij het ontwikkelen van de methodiek voor 'bewezen sterkte' (zie het voorwoord voor de samenstelling van de expertgroep). Tot slot is ook het advies van het Expertise-Netwerk Waterveiligheid (ENW) een belangrijke kwaliteitstoets voor het onderzoek.

1.13 Leeswijzer

In dit rapport worden per hoofdstuk de uitgevoerde deelonderzoeken beschreven.

- Hoofdstuk 2: Dijken op Veen, nieuwe normering en Plaxis.
- Hoofdstuk 3: Bewezen sterkte.
- Hoofdstuk 4: Synthese, conclusies en reflectie.

2 **Dijken op Veen, nieuwe normering en Plaxis**

2.1 **Inleiding**

In fase 1 van het pompenonderzoek (RWS, sep 2015) konden een aantal aspecten nog niet worden meegenomen die potentieel wel invloed kunnen hebben op de opgave en het ontwerp van de dijk (zie hoofdstuk 1). Het ging daarbij om de volgende onderwerpen:

1. Dijken op Veen,
2. Impact nieuwe normering,
3. Plaxis.

Voor elk van deze onderwerpen was in het kader van het HWBP2-project Markermeerdijken al wel een onderzoekstraject in gang gezet, maar dat was nog niet afgerond ten tijde van de publicatie van het syntheserapport van fase 1 van de pompenstudie. Inmiddels is dat wel het geval. In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste resultaten.

2.2 **Dijken op Veen**

2.2.1 *Methode en resultaten*

De nieuwe rekenmethode voor Dijken op Veen is in oktober 2014 opgeleverd door Deltares. Het ENW heeft in december 2014 positief geadviseerd over deze methode. Om met de methode te kunnen rekenen, was vooruitlopend op het definitief vaststellen van de rekenmethode al conform eerder in 2014 door ENW goedgekeurde protocollen grondonderzoek en laboratoriumonderzoek uitgevoerd.

Vanaf oktober 2014 is door HHNK, samen met Deltares en Fugro de implementatie van de rekenwijze voorbereid. Voor een aantal invoerparameters zijn op basis van nader onderzoek of meer recente inschattingen de bandbreedte rondom de keuzes in beeld gebracht. Specifieke aandacht is geschonken aan de inschatting van de sterkte parameters van de kleilagen. Door de overschakeling naar ongedraineerde sterkteparameters zijn de eerder door HHNK bepaalde parameters tijdens de toetsing en de eerdere ontwerpfasen niet meer bruikbaar. Tijdens het grondonderzoek uitgevoerd in 2014 is al op een aantal locaties grondonderzoek uitgevoerd voor de kleilagen. Begin 2015 werd een grote spreiding in de resultaten voor de kleiparameters gevonden, waardoor weinig optimalisatie aantoonbaar was. Daarom is in het voorjaar en de zomer van 2015 ook aanvullend grondonderzoek voor de kleilagen uitgevoerd. Dit moet leiden tot bruikbare ongedraineerde sterkteparameters voor de kleilagen.

Een rapportage met de beschrijving van de bandbreedte van de bepalende parameters voor de Dijken op Veen rekenmethode is sinds augustus 2015 beschikbaar (Fugro/Deltares, 2015). In deze rapportage wordt een middenscenario beschreven, en ter onderbouwing van de keuzes een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Op basis van de bepaalde bandbreedte (tussen onder- en bovengrens, met daartussen een middenwaarde) voor de bepalende parameters, is er op basis van een aantal doorgerekende profielen langs de Markermeerdijken een inzicht verkregen over de bandbreedte die verschillende keuzes in de parameters op kan leveren. Dit heeft in het syntheserapport van fase 1 over de pompen en in het daarop volgende ENW-advies geleid tot conclusie dat de invloed van Dijken op Veen op de ontwerpogave beperkt is.

Door het onderzoek Dijken op Veen, en de analyse van de onder- en bovengrenzen van de bepalende parameters is veel nieuwe kennis vastgelegd ten opzichte van de parameters zoals die gebruikt zijn ten behoeve van de toetsing in 2006. Als voorbeeld kan genoemd worden de stijghoogterespons, die de gevoeligheid van de freatische lijn in de dijk aangeeft voor de buitenwaterstand. In de toetsing was deze vastgesteld op 80%, terwijl nu in het middenscenario een veel scherper percentage van 40% onderbouwd is.

De nieuwe parameterwaarden van Dijken op Veen zijn doorvertaald naar invoer voor het deelonderzoek naar 'bewezen sterkte'.

2.2.2 *Status en belang van Dijken op Veen in vervolgproces*

Tijdens de periode september 2015 – november 2015 is verder gegaan met het afronden van de parameter bepaling. Met name het onderzoek naar de klei parameters is ingezet. Eind 2015 worden de te gebruiken parameters vastgesteld als uitgangspunten voor het ontwerp. In de alliantie kan HHNK samen met de private partner nog met voorstellen voor optimalisatie komen.

Ten tijde van het schrijven van deze rapportage loopt het kleionderzoek nog. Uit tussentijdse resultaten van het kleionderzoek blijkt dat de uitkomsten van de laboratorium testen van de sterkte parameters dicht bij het middenscenario liggen. Dat betekent dat er qua inzichten in Dijken op Veen geen nieuwe inzichten zijn op de grootte van de effecten op het ontwerp sinds september 2015.

In het door de alliantie af te ronden planproces wordt de rekenmethode Dijken op Veen meegenomen. De keuzes voor de parameters en de uitkomst van het sterkte onderzoek uit de laboratorium proeven wordt daarbij meegenomen.

2.2.3 *Effect Dijken op Veen op besluit pompen*

In fase 1 van het onderzoek naar pompen (RWS, sep 2015) is uitgegaan van de parameterwaarden voor de ondergrond zoals die bij de toetsing in 2006 zijn gebruikt, en die ook ten grondslag liggen aan het ontwerp zoals het thans in het project Markermeerdijken vigerend is. In voorliggend onderzoek zijn de nieuwe parameterwaarden uit Dijken op Veen gebruikt. Op een aantal punten wijken die behoorlijk af ten opzichte van fase 1. Zo is de stijghoogterespons gereduceerd van 80% in 2006 tot 40% nu en is veen sterker dan eerst gedacht. Doordat het veen sterker is, worden de kleiparameters belangrijker omdat de berekende glijcirkels nu door de kleilagen gaan.

Uit de gevoeligheidsanalyses blijkt dat, ondanks de winst van bijvoorbeeld de sterkere veenlagen en de scherpere schatting van de stijghoogterespons, de winst door Dijken op Veen nog steeds niet groot is. Blijkbaar werkt de grote spreiding in de sterkte van klei of de onzekerheid van andere parameters zo hard door, dat de totale winst beperkt is.

Dit leidt dan ook niet direct tot nieuwe inzichten met betrekking tot de kansrijkheid van de pompen.

Wel worden via Dijken op Veen en de bijbehorende parameters de meest actuele geaccepteerde modellen voor macrostabiliteit en bijbehorende parameters gebruikt. Die parameterwaarden zijn input voor 'bewezen sterkte'.

2.3 Impactanalyse Nieuwe Normering

2.3.1 Uitgangspunten en methode

Uitgangspunt van het project Markermeerdijken is de bestaande normering, en de daarbij horende leidraden. Inmiddels is een voorstel voor nieuwe normen in het Deltaprogramma 2015 neergelegd, en wordt de nieuwe wetgeving waarmee de nieuwe normen van kracht worden voorbereid. Ook het instrumentarium dat bij de nieuwe normen hoort, het toets- en ontwerpinstrumentarium, wordt ontwikkeld. Het Wettelijk Toetsinstrumentarium (WTI) is naar verwachting in 2017 gereed. Ter ondersteuning van met name projecten uit het Hoogwaterbeschermingsprogramma wordt het OntwerpInstrumentarium (OI) ontwikkeld. Het OI wordt in een aantal versies stapsgewijs ontwikkeld en ter beschikking gesteld aan projecten.

Om te voorkomen dat het ontwerp van de Markermeerdijken op de bestaande uitgangspunten bij de volgende toetsronde te groot of te klein blijkt te zijn, worden impactanalyses uitgevoerd. Met name in het voorjaar van 2015 is op basis van de toenmalige versie van het OI (versie 2) een impactanalyse uitgevoerd. Op basis van deze analyse is in de stuurgroep HWBP-2 geconcludeerd dat vooralsnog de bestaande normering als uitgangspunt gebruikt blijft worden, maar dat de impactanalyses herhaald moeten worden.

Inmiddels is een nieuwe versie van het OI verschenen. Hierin zijn de nieuwste inzichten opgenomen met betrekking tot onder meer het kritisch overslagdebiet en de Gebruikstoestand/ Uiterste Grenstoestand. Ten behoeve van het huidige onderzoek naar pompen is aan het Kennisplatform Risicobenadering (KPR) gevraagd een uitspraak te doen over mogelijke wijziging van schatting van de effecten van de nieuwe normering.

Op basis van de beschikbare berekeningen heeft KPR aangegeven geen uitspraak te kunnen doen over het eventuele gewijzigde effect van nieuwe normering op het ontwerp. Dit levert dus geen nieuwe inzichten op. Wel is geadviseerd in de toekomst een nieuwe impactanalyse uit te voeren. Binnen het HWBP2-project Markermeerdijken was dit ook voorzien.

2.3.2 Belang van nieuwe normering in vervolgproces

Ook in het komende planproces, in de eerste fase van de alliantie, is de nieuwe normering van belang. Het huidige uitgangspunt is om uit te gaan van de bestaande normering, maar daarnaast moet de impact van de nieuwe normering op het ontwerp in beeld zijn. Indien duidelijk wordt dat nieuwe normering kansen biedt voor optimalisatie, of anderzijds dat de nieuwe normering tot zwaardere profielen zal leiden, zal dit in overleg tussen HHNK en het Rijk tot keuzes in het ontwerp of de gebruikte uitgangspunten leiden. Dit speelt tijdens de komende fase waarin het planproces wordt afgerond.

2.3.3 Effect op besluit pompen

In het voorgaande ENW advies op basis van de RWS rapportage van 14 september 2015 werd al geconcludeerd dat het effect van (Dijken op Veen en) nieuwe normering beperkt is. Op dit moment ligt er geen nieuwe inzichten die een andere inschatting onderbouwen. Voor de discussie over de pompen speelt de nieuwe normering geen doorslaggevende rol.

In de komende fase wordt via impactanalyses omgegaan met nieuwe normering, leidend tot een helder besluit onderbouwd in het Ontwerp Projectplan.

2.4 Plaxis

2.4.1 *Aanleiding, methode en toepassing binnen het project Markermeerdijken*

In een van de ontwerpateliers in Uitdam is gevraagd om het uitvoeren van een verkenning naar de mogelijkheden voor het gebruik van het rekenmodel Plaxis. Plaxis is een geavanceerd rekenmodel dat in tegenstelling tot de huidige gebruikelijke stabiliteitsmodellen ook vervormingen kan berekenen. Door het geavanceerde karakter zijn er echter ook een aantal nadelen aan het gebruik van Plaxis. Om de sterke punten van Plaxis te kunnen benutten, zijn extra monitoringsgegevens nodig. Daarnaast is er geen door ENW goedgekeurde veiligheidsfilosofie. Vanwege deze reden wordt Plaxis (en andere Eindige Elementen Modellen) niet vaak als standaard model gebruikt voor toetsen of ontwerpen.

Sinds eind 2014 wordt door HHNK in samenwerking met SOTA Engineering een verkenning uitgevoerd naar de mogelijkheden voor het gebruik van Plaxis. Een eerste verkenning en een second opinion hebben eind 2014 plaatsgevonden. In maart 2015 is een plan van aanpak opgesteld in afstemming met experts van onder andere Deltares, HHNK en RHDHV. De verkenning is conform dit plan van aanpak uitgevoerd, en in augustus 2015 gerapporteerd (SOTA-Engineering, 2015). In oktober 2015 is kwaliteitsborging uitgevoerd door dezelfde experts die betrokken waren bij de opzet van het plan van aanpak. De uitkomsten van de kwaliteitsborging zijn samengevat in een rapportage (HHNK, nov. 2015). Uit de verkenning is geen nieuwe informatie gekomen over wel of niet pompen op de Houtribdijk.

Op 11 november is het resultaat van de verkenning toegelicht aan de begeleidingscommissie en vertegenwoordigers vanuit Uitdam. Op basis van dit gesprek zijn de volgende conclusies getrokken.

Er zijn drie potentiële mogelijkheden om Plaxis in te zetten voor het project Markermeerdijken:

1. Voor het hertoetsen (en ontwerpen) van het gehele afgekeurde traject (33 km). Dit lijkt op voorhand niet kansrijk vanwege de volgende redenen (zie ook de review van Deltares en ir. Weijers):
 - a. Er is veel extra data nodig om rendement te halen uit de extra mogelijkheden die Plaxis in potentie biedt. Het gaat hier onder andere om monitoringgegevens. Hiervoor moeten meetcampagnes worden opgezet.
 - b. Er is geen goedgekeurde veiligheidsfilosofie.
2. Voor het analyseren van vervormingen op kwetsbare locaties, met name bij aanwezigheid van funderingen nabij het verwachte glijvlak, en bij het gebruik van constructieve elementen als damwanden in het ontwerp. Op dergelijke locaties is het aan te bevelen om de glijcirkelmodellen te valideren met een vervormingsmodel als Plaxis. Dit zal overigens plaatsvinden tijdens het valideren van het ontwerp, hetgeen plaatsvindt in de komende fase waarin het planproces wordt afgerond. Hiervoor is het wel zaak voldoende monitoringgegevens te hebben. Geadviseerd wordt om aan het begin van de volgende fase te bepalen voor welke locaties Plaxis ingezet gaat worden, te analyseren welke invoergegevens daarvoor nodig zijn en indien noodzakelijk daar dan een gericht monitoringprogramma voor op te stellen.
3. Omdat zowel het gebruik van Plaxis als bewezen sterkte uitgaan van in de praktijk te valideren situaties kan Plaxis bijdragen aan het begrijpen van bewezen sterkte van de huidige dijken. Het gebruik van Plaxis levert lokaal mogelijk fysische verificatie van de resultaten van bewezen sterkte met de methode met fragility curves (zie hoofdstuk 3).

2.4.2 *Effect op besluit pompen*

De verkenning naar de mogelijkheden voor Plaxis leidt niet tot nieuwe inzichten met betrekking tot het besluit over pompen. Wel is er duidelijkheid gekomen over het mogelijk gebruik van Plaxis in de volgende fases.

2.5 **Conclusies Dijken op Veen, nieuwe normering en Plaxis**

Geen van de drie onderwerpen heeft nieuwe inzichten opgeleverd inzake optimalisaties van het ontwerp in relatie tot het besluit over pompen. Wel zijn er duidelijke punten die in de komende fase door de alliantie gebruikt kunnen worden om het ontwerp te kunnen optimaliseren. Het gaat daarbij om de volgende punten:

- De implementatie van de nieuwe rekenmethode voor Dijken op Veen is verder voorbereid door HHNK in samenwerking met Fugro en Deltares. Tussenresultaten zijn gebruikt voor de studie naar bewezen sterkte. Het onderzoek naar de sterkte van de kleilagen is naar verwachting op tijd klaar om toegepast te worden in de afronding van de planfase.
- De instrumenten en wetgeving voor de nieuwe normering worden momenteel nog ontwikkeld. In de komende fase zal het effect van nieuwe normering gevolgd worden, en leiden tot een duidelijk besluit in het Ontwerp Projectplan.
- Het gebruik van Plaxis ter verificatie (en optimalisatie) van het ontwerp op specifieke locaties.

Deze optimalisatiekansen zullen door HHNK in de komende fase worden ingebracht in de alliantie.

3 Bewezen sterkte

Dit hoofdstuk is grotendeels gebaseerd op (Schweckendiek en van der Krogt, 2015).

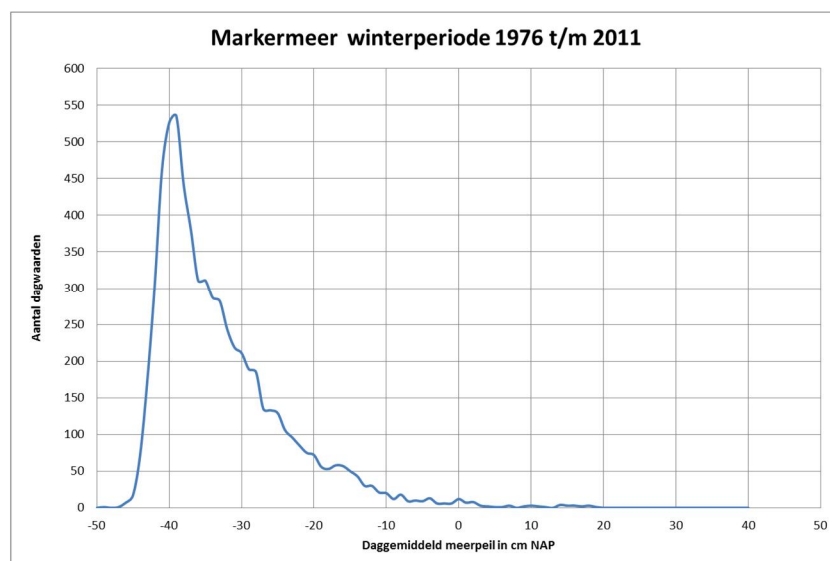
3.1 Aanleiding

Om een besluit te kunnen nemen over pompen in de Houtribdijk, is een aantal optimalisatiemogelijkheden in het dijkontwerp nader onderzocht, waaronder het concept bewezen sterkte. Naast een algemene inschatting van het effect van bewezen sterkte op de versterkingsopgave wordt in deze verkenning de combinatie van meerpeilverlaging en bewezen sterkte nader onderzocht.

Wat is bewezen sterkte?

De methode 'Bewezen Sterkte' is in het verleden geïntroduceerd als een geavanceerde toetsmethode. Deze methode komt erop neer dat de berekende stabiliteitfactor van een dijk bij de maatgevende hoogwaterstand opgevaardeerd wordt op grond van het overleefd hebben van een historische hoogwaterstand. Daarbij zullen echter wel de nodige aanvullende controles en analyses moeten worden uitgevoerd om mogelijk voor het bewijs ongunstige informatie en aannames te identificeren. Het gaat dan bijvoorbeeld om ingrepen in het watersysteem of in de constructie van de dijk. Bij ingrepen in het watersysteem kan gedacht worden aan een mogelijk andere maatgevende belasting, of een verandering in de geohydrologie. Bij ingrepen in de dijk kan gedacht worden aan een ingrijpende dijkversterking, bebouwing of de aanleg van een weg. Ook zou een dijk door natuurlijke processen minder sterk kunnen worden, bijvoorbeeld veen dat langzaam afbreekt of oxideert. Al deze veranderingen kunnen er toe leiden dat de historische situatie waarin een hoogwater is gekeerd, niet meer vergelijkbaar is met het heden, en dus niet als 'bewijs' kan worden gebruikt.

De directe aanleiding om te vermoeden dat bewezen sterkte wellicht iets op kan leveren voor de Markermeerdijken, ligt in de historisch opgetreden waterstanden. In onderstaande figuur zijn de daggemiddelde meerpeilen van het Markermeer weergegeven sinds 1976, het jaar waarin de Houtribdijk werd gesloten en het Markermeer ontstond.



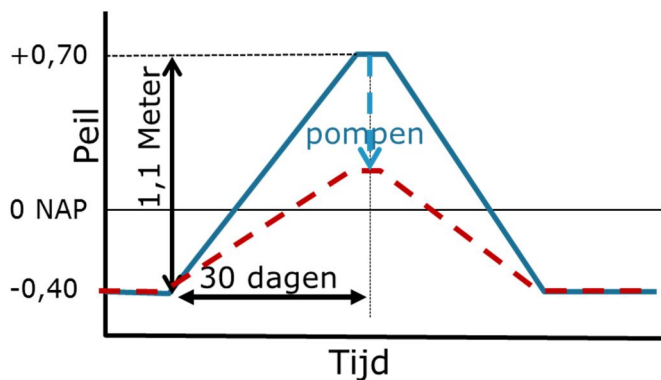
Figuur 3.1: Daggemiddelde meerpeilen Markermeer tijdens het stormseizoen (1 oktober tot 1 april) sinds de afsluiting van de Houtribdijk.

De Markermeerdijken waar het hier om gaat, keerden in het verleden de waterstanden van de Zuiderzee. Die waren aanzienlijk hoger dan nu, na de aanleg van de Afsluitdijk en de Houtribdijk. Maar omdat het waterstaatkundige karakter daardoor sterk is veranderd, kunnen dit soort situaties niet één op één worden gebruikt om bewezen sterkte aan te tonen.

Verskil met nu is namelijk, dat het destijds om stormsituaties ging die maatgevend waren voor de dijken, met relatief kortdurende hoogwaters (hooguit enkele dagen). De huidige dijken zijn afgekeurd op macrostabiliteit. Daarbij zijn vooral aanhoudende peilverhogingen van belang, die weliswaar lager zijn dan de pieken bij een storm, maar wel meer dan een maand aanhouden. Het toetspeil is in dit geval +0,70 m NAP. In figuur 3.2 (de blauwe lijn) zijn de maatgevende omstandigheden voor macrostabiliteit weergegeven. In een periode van ongeveer 30 dagen stijgt het meerpeil met ruim een meter.

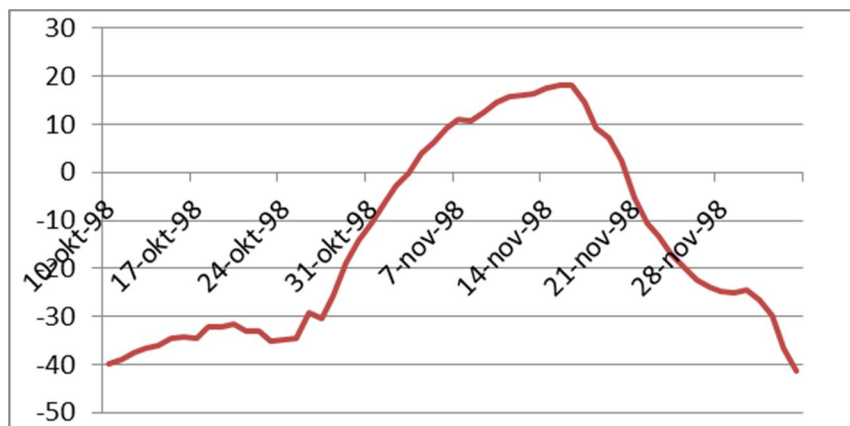
Sinds de afsluiting van de Houtribdijk, zijn dit soort maatgevende omstandigheden nog niet gemeten. De hoogste waterstand die sinds 1976 is gemeten, is +0,18 m NAP (najaar 1998). In eerste instantie lijkt 'bewezen sterkte' daarom niet te kunnen worden toegepast.

Het wordt echter anders als met pompen het meerpeil fors naar beneden wordt bijgesteld. Indien het Maatgevend Hoogwater met 60 cm naar beneden kan worden gebracht, ontstaan waterstanden die wel in de buurt liggen van historisch opgetreden, en dus ook overleefde, waterstanden. In figuur 3.2 is dit weergegeven met de rode lijn.



Figuur 3.2: Maatgevende omstandigheden voor macrostabiliteit voor de Markermeerdijken tussen Hoorn en Amsterdam, met en zonder pompen.

In figuur 3.3 is het meerpeilverloop in het najaar van 1998 weergegeven. Te zien is dat een patroon optreedt dat sterke overeenkomsten heeft met de rode lijn in figuur 3.2.



Figuur 3.3: Daggemiddelde meerpeilen van het Markermeer (in cm NAP), periode 10 oktober 1998 tot 5 december 1998.

De combinatie van pompen en recent gemeten hoge waterstanden leidt er dus toe, dat er aanwijzingen zijn dat 'bewezen sterkte' aan de orde kan zijn.

In het advies ten aanzien van het pompenonderzoek door RWS beval ENW aan om een probabilistische bewezen sterkte methode voor het faalmechanisme macro-instabiliteit te verkennen, zoals eerder succesvol toegepast voor het faalmechanisme piping (Schweckendiek, 2014). Het voordeel van een probabilistische methode is, dat niet alleen naar de toetspeilen wordt gekeken (+0,70 m NAP in dit geval), maar dat de belasting en kans van voorkomen van alle meerpeilen worden meegenomen, ook die in het lagere bereik. Die hebben immers ook een bijdrage aan de totale faalkans voor een dijk. In dit hoofdstuk wordt dat verder uitgewerkt.

3.2 Onderzoeksvragen

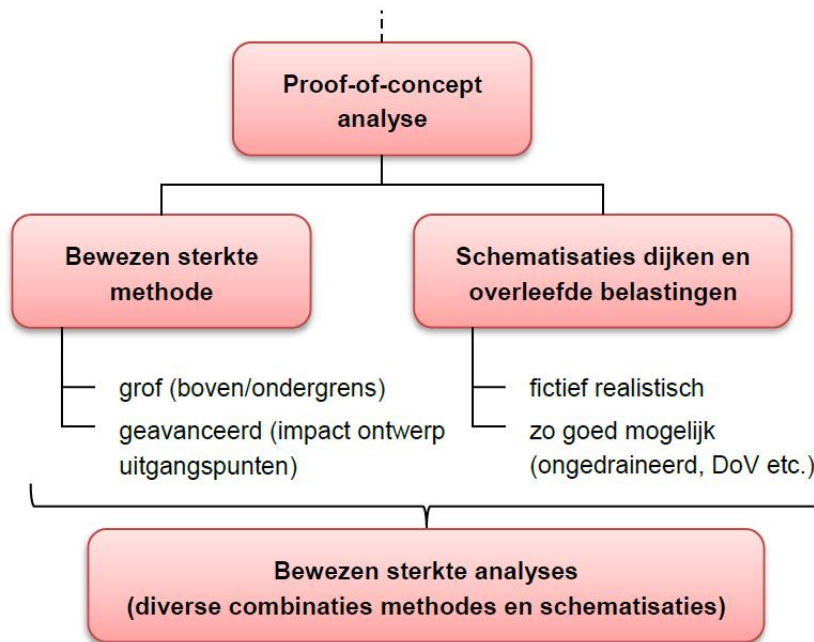
De doelstelling van de verkenning is tweeledig, zoals geformuleerd in onderstaande onderzoeksvragen:

1. Wat is de verwachte impact van een probabilistische bewezen sterkte analyse op de veiligheidsopgave van de Markermeerdijken (met en zonder meerpeilverlaging door middel van pompen)?
2. Hoe kansrijk is het operationaliseren van een probabilistische bewezen sterkte aanpak voor toetsen en ontwerpen binnen een termijn relevant voor het project Markermeerdijken?

3.3 Aanpak algemeen

Ter inschatting van de verwachte impact (onderzoeksvraag 1) is in deze verkenning, deels ingegeven door de zeer korte doorlooptijd van enkele weken, gekozen voor een proof-of-concept analyse van een (anonieme) representatieve dijkdoorsnede van een "typische zuidelijke Markermeerdijk" (zie paragraaf 3.5). Hiermee is het mogelijk om uitspraken te doen over de orde van grootte van verandering van de faalkans.

Er zijn twee verschillende methoden toegepast, een methode "fragility curves" en een geavanceerde "Monte Carlo" methode. De methode "fragility curves" is in principe alleen geschikt is voor het bijstellen van de faalkans van een bestaande dijk, dus voor toetsen. De methode "Monte Carlo" levert ook informatie over de kansverdelingen van de onderliggende parameters. Daarmee kan deze methode in principe ook voor ontwerpen worden toegepast.



Figuur 3.4: Componenten in de proof-of-concept bewezen sterkte analyse(s)

3.4 Methoden

3.4.1 Methodebeschrijving algemeen

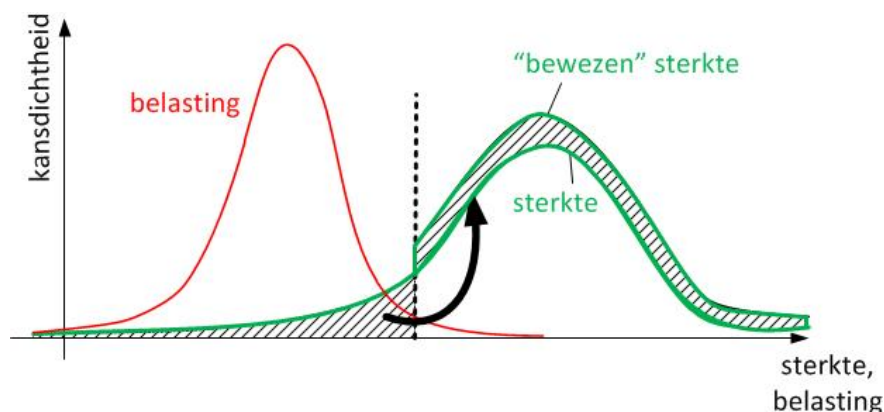
In deze verkenning worden volledig probabilistische 'bewezen sterkte methoden' toegepast (zie bijvoorbeeld Schweckendiek en Vrouwenvelder, 2014) in tegenstelling tot de tot op heden in de praktijk gangbare deterministische methoden zoals beschreven in het Technisch Rapport Actuele Sterkte van Dijken (ENW, 2009). De basis voor alle methoden vormt de stelling van Bayes, toegepast voor faalkansen:

$$P(F|\varepsilon) = \frac{P(F \cap \varepsilon)}{P(\varepsilon)} = \frac{P(\text{falen} \cap \text{observatie})}{P(\text{observatie})} \quad (1)$$

Voor bewezen sterkte analyses gaat het over het algemeen om de kans op *falen* in de toekomst waarbij rekening wordt gehouden met overleefde belastingen in het verleden (*observatie*). Kenmerkend voor de probabilistische methode is:

1. De vertaling van de overleefde condities naar de te toetsen condities gaat uiteindelijk via de parameters (sterkte, effecten van belasting) en het mechanismemodel.
2. De overleefde condities hoeven dan ook niet direct vergelijkbaar te zijn met de "ontwerpbelasting".
3. Bij een probabilistische inverse analyse hoeft geen arbitraire keuze te worden gemaakt ten aanzien van de "bij te stellen" parameters, wat bij deterministische inverse analyses vaak problematisch is.

Het basisprincipe van probabilistische bewezen sterkte is geïllustreerd in figuur 3.5. De faalkans wordt bepaald door de kansverdeling van de belasting (rood) en de kansverdeling van de sterkte (groene lijn onder). Als de sterkte-eigenschappen constant in de tijd zijn en een belasting met zekerheid is overleefd (zwarte stippellijn), dan is aangetoond dat de kans dat de sterkte kleiner is dan de geobserveerde belasting nul is. De kansmassa wordt herverdeeld.



Figuur 3.5: Illustratie bewezen sterkte analyse. De kansverdeling van de sterkte (PDF) is het equivalent van een fragility curve (CDF).

Let wel, de situatie in figuur 3.5 geeft een bijzonder geval weer. De methoden kunnen ook werken met meetfouten en met situaties waar een deel van de sterkte wel verandert in de tijd. In zulke gevallen blijft er doorgaans ook nog een kans dat de sterkte in de toekomst kleiner is dan de geobserveerde belasting in het verleden.

De in deze verkenning toegepaste methoden worden toegelicht in bijlage 1 en (Schweckendiek en van der Krogt, 2015). Achtereenvolgens gaat het daarbij om 'bewezen sterkte met Monte Carlo simulatie' en 'bewezen sterkte met fragility curves'.

3.4.2 Toepassing methoden

Opgemerkt wordt dat de methode fragility curves in principe alleen van toepassing is voor bestaande situaties, en dus in principe alleen gebruikt kan worden voor toetsen. Monte Carlo (de geavanceerde methode) is geschikt voor zowel bestaande situaties als voor doorvertaling naar versterkingsontwerpen via de bijgestelde kansverdelingen (al dan niet vertaald naar bijgestelde karakteristieke waarden) van grondeigenschappen zolang deze onaangetast blijven. Deze methode kan daarmee zowel voor toetsen als ontwerpen gebruikt worden.

3.5 Schematisatie Markermeerdijk

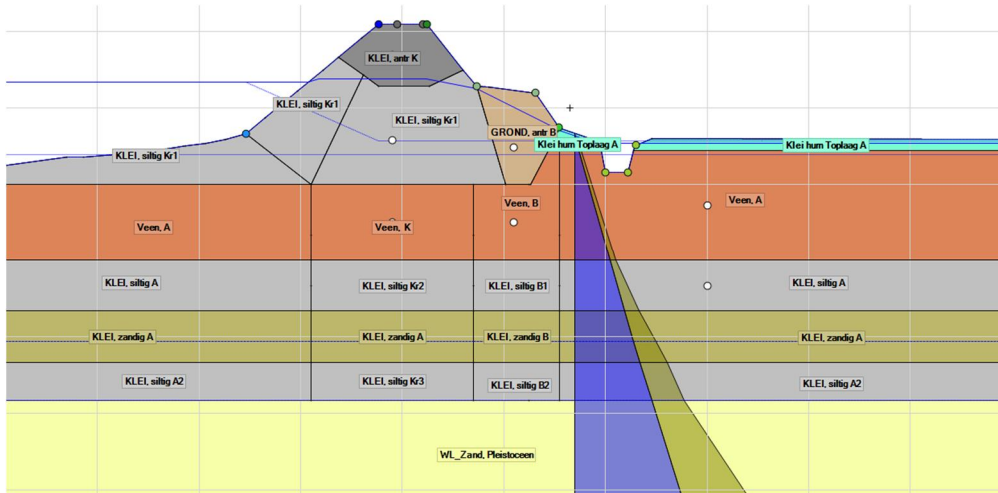
3.5.1 Algemeen

Voor deze proof-of-concept studie is, mede vanwege de korte doorlooptijd, gekozen voor het rekenen met een anonieme representatieve dijkdoorsnede van een typische (zuidelijke) Markermeerdijk binnen het beheergebied van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier.

De geometrie en parameters zijn dus niet afkomstig van een concreet Markermeerdijk profiel, maar lijken sterk op de geometrie, laagopbouw en parameters van (zuidelijke) Markermeerdijken. Hieronder worden de hoofdkenmerken van de gekozen schematisatie(s) samengevat. Een gedetailleerde beschrijving is in bijlage 1 (zie ook Schweckendiek en van der Krogt, 2015) opgenomen.

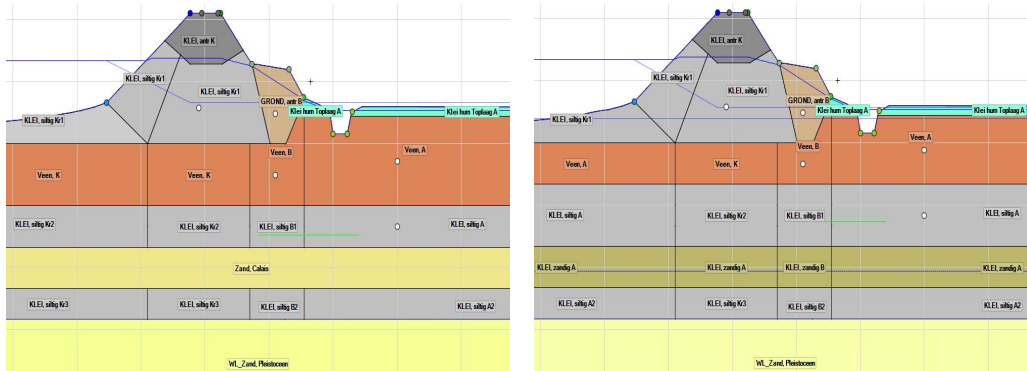
3.5.2 Doorsnede, bodemopbouw

Figuur 3.6 toont de doorsnede en laagopbouw van de gekozen basisschematisatie. Het betreft een kleidijk op een relatief dikke veenlaag (circa 5 m) met daaronder siltige en zandige kleilagen tot het pleistocene zand (watervoerende laag).



Figuur 3.6a: Schematisatie 1 (basis); tussenlaag klei, zandig.

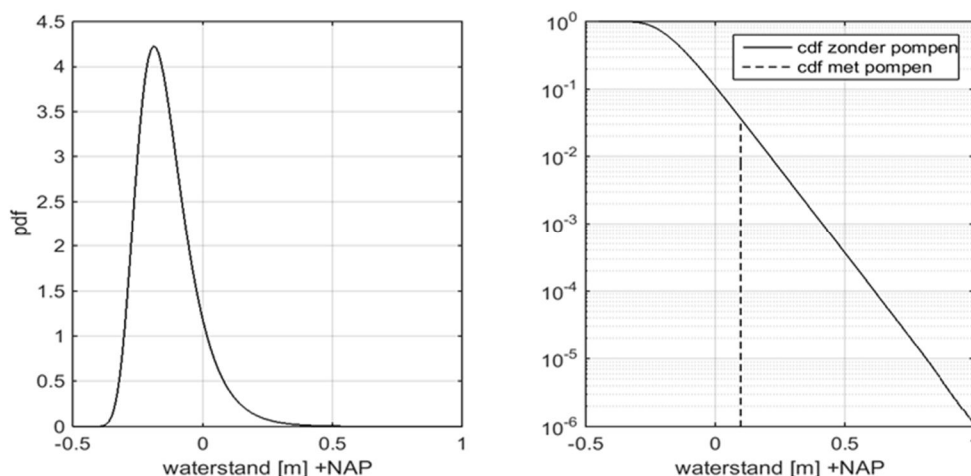
Naast deze basisschematisatie zijn nog twee varianten gemaakt: één met een dunner veenpakket (zoals te vinden in de noordelijke gedeelte), en een tweede met een tussenzandlaag ter plaatse van de zandige kleilaag (dit kan lokaal voorkomen).



Figuur3.6b: Schematisatie 2 (tussenlaag zand, links) en 3 (dunnere veenlaag, rechts)

3.5.3 Hydraulische randvoorwaarden

De in deze verkenning toegepaste kansverdeling van de waterstand is weergegeven in Figuur 3.7. De Gumbel verdeling is gefit op jaarlijkse maxima van het daggemiddelde (winter)meerpeil tussen 1975 en 2012. Deze kansverdeling komt niet exact overeen met de laatste inzichten uit Hydraulische Randvoorwaarden berekeningen maar wordt geacht qua ligging en spreiding voldoende representatief te zijn voor de condities bij de Markermeerdijken voor de doelen van deze verkenning.



Figuur 3.7: Kansverdeling van de toegepaste waterstandsverdeling (Gumbel verdeling gefit op jaarlijkse maxima van het daggemiddelde meerpeil; location parameter $a = -0.085$, scale parameter $b = 0.160$)

Voor berekeningen met het effect van meerpeilverlaging door pompen is deze verdeling "afgekapt" bij 0.10 m+NAP door in de Monte Carlo simulaties alle realisaties boven deze waarde terug te zetten naar 0.10 m+NAP (zie stippellijn in de overschrijdingslijn in het rechter figuur). Dat veronderstelt impliciet een perfecte werking van het pompenstelsel; de onzekerheid in de effectiviteit en beschikbaarheid van de pompen op het moment van de vraag is niet meegenomen.

3.5.4 Sterkteparameters

Voor de parameters is gebruik gemaakt van de laatste inzichten uit het Dijken op veen 2 project (Zwanenburg, 2014), waarbij de parameterwaarden als afgeronde gebiedsgemiddelden kunnen worden opgevat. Voor de invoerparameters en bronverwijzingen wordt verwezen naar bijlage B uit (Schweckendiek, dec 2015).

Het werken met Dijken op Veen 2 uitgangspunten heeft twee belangrijke implicaties:

1. Er wordt gerekend met ongedraineerde schuifsterkte (de toets en referentieontwerpen zijn met gedraineerde schuifsterkte uitgevoerd).
2. De inschatting van de grondsterkte (met name veen) is conform de meest recente inschattingen.

Dit vertrekpunt leidt tot hogere berekende stabiliteit dan in de oorspronkelijke toetsing, ook al zijn de gedraineerde en ongedraineerde resultaten niet een op een te vergelijken. De hoofdreden voor de keuze om ongedraineerd en met de laatste inzichten te werken was om een zo goed mogelijk beeld te geven van het effect van een bewezen sterkte analyse op een bestaande dijk in een mogelijke toekomstige (her)toetsing. Voor het WTI-2017 wordt er immers van uitgegaan dat stabiliteitsanalyses ongedraineerd voorgeschreven zullen worden.

Tijdens de vergadering van ENW-Techniek d.d. 13 november werd nog gesuggereerd dat het dijk materiaal boven de (dagelijkse) freatische lijn eerder gedraineerd reageert. Dat is mogelijk inderdaad een realistischer modellering van de lokale schuifsterkte, maar het effect op de stabiliteit is klein zoals aangetoond in bijlage D van (Schweckendiek en van der Krogt, 2015). De conclusies worden hierdoor dan ook niet aangetast.

3.5.5 Waterspanningen

De algemene kenmerken van de Markermeerdijken in termen van waterspanningen en hun respons op de buitenwaterstand zijn:

- Het dijklichaam heeft een zeer lage doorlatendheid.
- Er is een opbolling van het freatisch vlak aanwezig die in het algemeen hoger ligt (de top) dan de hoogste buitenwaterstand en die hoofdzakelijk door neerslag wordt bepaald.
- De watervoerende zandlaag is relatief diep gelegen en het slappe lagenpakket heeft een lage doorlatendheid.

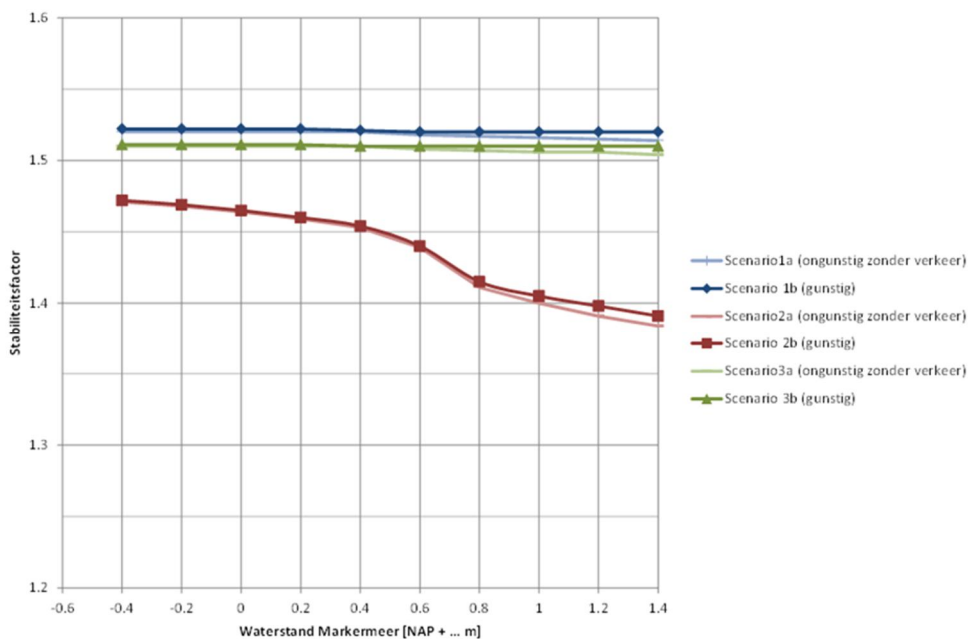
De gedetailleerde waterspanning schematisatie en parameters zijn vermeld in bijlage B van (Schweckendiek en van der Krogt, 2015).

Voor de waterspanningen wordt in de analyses (zie paragraaf 3.7 en verder) met twee scenario's gerekend, zowel voor de observatie als voor de toets. Hierin worden een aantal parameters gunstig ofwel ongunstig geschematiseerd:

- freatisch vlak (opbolling),
- stijghoogte respons,
- indringingslengte.

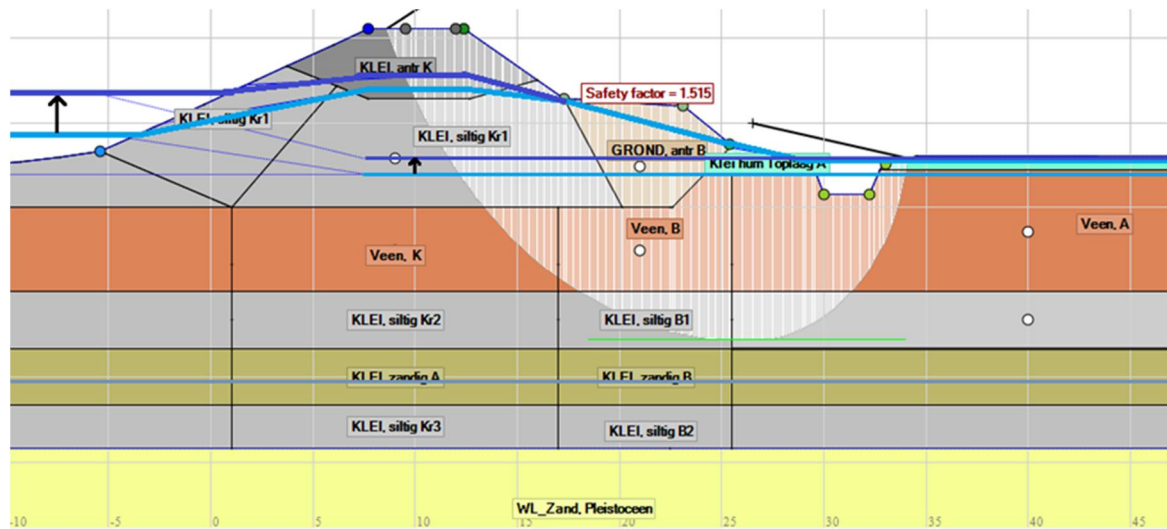
3.6 Gevoeligheid voor buitenwaterstand

Voor alle drie bodemscenario's (zie paragraaf 3.5.2) en voor de waterspanningschematisaties zijn de stabiliteitsfactoren berekend met gemiddelde waarden van alle sterkte parameters. Het resultaat is weergegeven in figuur 3.8.



Figuur 3.8: Stabiliteitsfactoren berekend met gemiddelde waarden van de sterkteparameters voor alle beschouwde scenario's als functie van de waterstand

Uit beschouwing van de stabiliteitsfactoren wordt duidelijk dat de dijk in de scenario's zonder tussenzandlaag nauwelijks reageert op de buitenwaterstand. Ook met tussenzandlaag (een fenomeen dat lokaal voor kan komen) is de gevoeligheid beperkt.



Figuur 3.9 Illustratie van een typisch kritiek glijvlak met de relevante freatische lijnen en stijghoogtes bij dagelijkse omstandigheden (licht blauw) en bij het ontwerppeil (donkerblauw)

De verklaring voor de beperkte respons van de buitenwaterstand (bij de voor de zuidelijke Markermeerdijken representatieve schematisatie 1) is geïllustreerd in figuur 3.9. Verhoging van het buitenwater zorgt maar voor weinig extra stijging van de al bij dagelijkse omstandigheden hoge freatische lijn. Tevens is het slappe lagen pakket zo dik en ondoorlatend dat de lagen waar de kritieke glijvlakken doorheen gaan, niet of nauwelijks worden beïnvloed door verhoging van de stijghoogtes in de watervoerende zandlaag (geringe indringing). Daarbij speelt ook een rol dat er een dikke, ondoorlatende sliblaag ligt op de bodem van het Markermeer. Dit beeld is in de diverse expert bijeenkomsten herkend en onderschreven door experts met lokale ervaring.

In het algemeen heeft bewezen sterkte een grote invloed als de onzekerheid ten aanzien van de sterkte groot is ten opzichte van de onzekerheid ten aanzien van de belasting. Dit is waarschijnlijk het geval bij de Markermeerdijken. De kleine invloed van de buitenwaterstand op de waterspanningen wordt hierbij nog verder afgezwakt door de relatief lage invloed van de waterspanningen op de ongedraineerde schuifsterkte (vergeleken met gedraineerde schuifsterkte).

3.7 Analyses overleefde belasting

3.7.1 Overwegingen keuze belastingsituatie

In deze verkenning wordt het overleven van het hoogwater van 1998 gebruikt in de bewezen sterkte analyses. Het meerpeil was toen voor een relatief lange periode verhoogd. Een lange belastingduur is doorgaans voorwaarde voor significante belastingeffecten in kleidijken omdat het water tijd nodig heeft om het dijklichaam te doorstromen en te verzadigen.

Een vaak geuit argument in relatie tot bewezen sterkte bij de Markermeerdijken is de observatie dat dezelfde dijken voor afsluiting van de Zuiderzee veel hogere waterstanden hebben gekeerd, zoals bekend van 1926. Zuiderzeestormen waren in vergelijking met de huidige hydraulische randvoorwaarden echter van zeer korte duur waardoor ze minder relevant zijn voor macrostabiliteit.

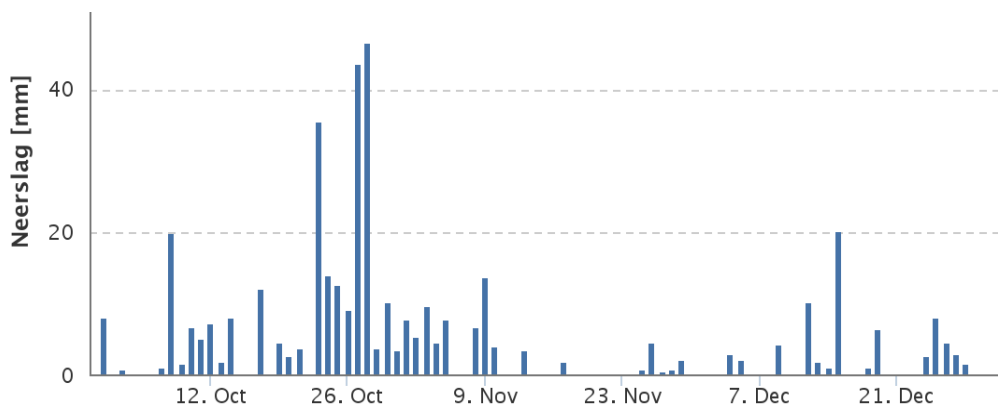
Ook omdat de hoge buitenwaterstand in 1998 recent heeft plaatsgevonden en er daardoor sprake is van minder onzekerheden (denk hierbij aan bijvoorbeeld veranderingen van het dwarsprofiel sinds de observatie en autonome bodemdaling) is de keuze hierop gevallen.

Gezien de lage gevoeligheid van de dijken voor de buitenwaterstand is het zeer waarschijnlijk dat ook niet hoogwater-gerelateerde overleefde belastingen nog een significant effect op de faalkans kunnen hebben, bijvoorbeeld extreme neerslag. Ook combinaties van neerslag en verkeersbelastingen kunnen relevant zijn. Analyse van dergelijke condities was vanwege de doorlooptijd in deze verkenning niet mogelijk maar wordt voor eventuele vervolgstudies aanbevolen.

3.7.2 Waterstanden en neerslag 1998

In 1998 was er een significante verhoging van het meerpeil (zie figuur 3.3). Voor deze proof-of-concept verkenning is gerekend met een overleefde waterstand van +0.2 m NAP.

Tegelijk is er het najaar 1998 binnen een aantal weken in de omgeving van het IJsselmeergebied ruim 400 mm neerslag gevallen (zie figuur 3.10). Dat houdt in dat de kans op aanwezigheid van een vrij hoge freatische lijn in de dijk ten tijde van het hoogwater groot was.



Figuur 3.10: Neerslaggegevens voor weerstation Marknesse (oktober t/m december 1998)

3.8 Bewezen sterkte met fragility curves

Met de eerder beschreven fragility curves is de methode zoals in 3.4.3 beschreven toegepast, in combinatie met het omgaan met scenario's voor de waterspanningen zoals die zijn weergegeven in Bijlage 1 (uit: Schweckendiek en van der Krogt, 2015). De in deze bijlage getoonde figuren bevatten gevoeligheidsanalyses voor verschillende combinaties van de (waterspanning) scenario kansen.

Voor een vergelijking van de effecten van pompen en bewezen sterkte (op basis van de proof-of-concept resultaten) zijn in tabel 3.1 alle resultaten samengevat, waarbij de a-posteriori getallen gebaseerd zijn op het ongunstige scenario voor de toetssituatie ($P(A) = 100\%$) en een 50% kans op het gunstige en ongunstige scenario tijdens de observatie ($P(A_{obs})=50\%$). Dat houdt in dat er voor de toetssituatie naar het meest conservatieve scenario wordt gekeken en voor de observatie naar een gemiddelde tussen de twee waterspanning scenario's.

Faalkans op jaarbasis (β)	Schematisatie 1 (basis)		Schematisatie 2 (tussenzandlaag)	
	niet pompen	wel pompen	niet pompen	wel pompen
a-priori	8e-5 (3.8)	8e-5 (3.8)	3e-4 (3.5)	3e-4 (3.5)
met bewezen sterkte	8e-7 (4.8)	8e-7 (4.8)	5e-7 (4.9)	<1e-8 (>5.5)

Tabel 3.1: Faalkansen op jaarbasis voor de schematisaties 1 en 2 zonder en met bewezen sterkte informatie en zonder tegenover met meerpeilverlaging door pompen (alle gevallen met bewezen sterkte ter illustratie voor $P(A)=100\%$ en $P(A_{obs})=50\%$).

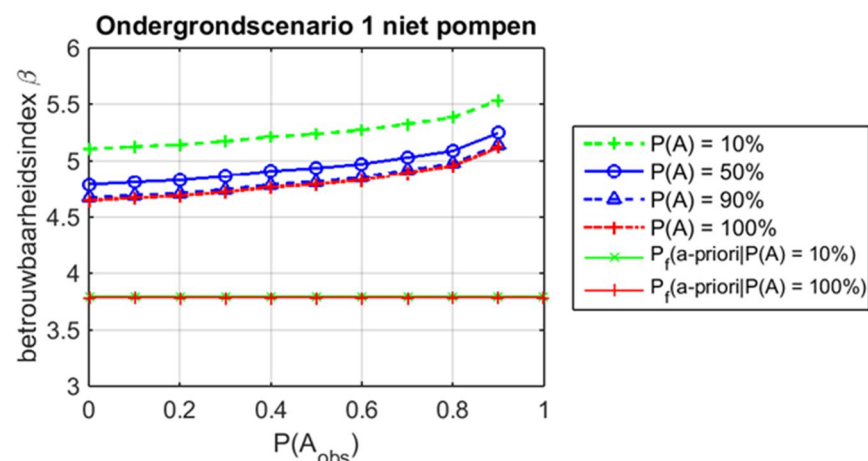
Voor beide schematisaties is er een duidelijk effect van bewezen sterkte te zien. Alleen voor de tussenzandlaag (een lokaal fenomeen dat incidenteel voorkomt) is er een verschil te zien tussen pompen en niet pompen, dat is echter in het bereik van toch al zeer kleine kansen.

Onderstaand een toelichting voor de verschillende schematisaties. In de figuren staat op de horizontale as de kans op het waterspanningsscenario tijdens de observatie. Bij $P(A_{obs})=1$ zijn we zeker dat het ongunstige scenario van toepassing was, terwijl we bij $P(A_{obs})=0$ zeker zijn dat het gunstige scenario van toepassing was. De verschillende lijnen staan voor verschillende kansen op de waterspanningsscenario's in de toekomst. Op de verticale as staat de a-posteriori betrouwbaarheidsindex na meenemen van de bewezen sterkte informatie. Om de getalswaarden van de betrouwbaarheidsindex in perspectief te kunnen plaatsen: de faalkansen voor het faalmechanisme macrostabiliteit in het Ontwerpinstrumentarium¹ (OI2014) voor de Markermeerdijken in het beheersgebied van HHNK (trajecten 13-6 t/m 13-8) ligt grof tussen de $\beta = 4.4$ en $\beta = 4.6$.

3.8.1

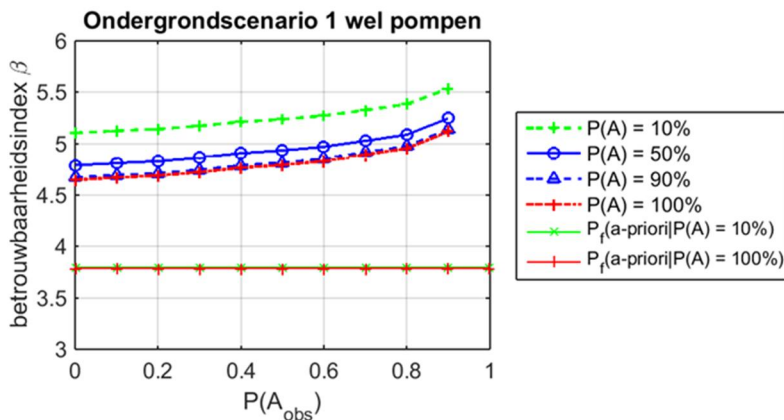
Schematisatie 1 (basis)

Bij schematisatie 1 is er een duidelijk effect van het toepassen van bewezen sterkte op de faalkans (orde factor 100). Het effect van bewezen sterkte toont nauwelijks verschil tussen een situatie zonder pompen (figuur 3.11) en met pompen (figuur 3.12). Dat is gezien de ongevoeligheid voor de waterstand ook verklaarbaar.



Figuur 3.11: A-posteriori betrouwbaarheidsindices voor bodemopbouw schematisatie 1 voor de situatie zonder pompen. $P(A)$ is de kans op een ongunstige waterspanningrespons in de toetssituatie, $P(A_{obs})$ is de kans op een ongunstige waterspanningrespons tijdens de observatie.

¹ RWS (2015). Handreiking ontwerpen met overstromingskansen - Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskans-normen, versie OI2014v3, juli 2015.



Figuur 3.12: A-posteriori betrouwbaarheidsindices voor bodemopbouw schematisatie 1 voor de situatie met pompen. $P(A)$ is de kans op een ongunstige waterspanningrespons in de toetssituatie, $P(A_{obs})$ is de kans op een ongunstige waterspanningrespons tijdens de observatie.

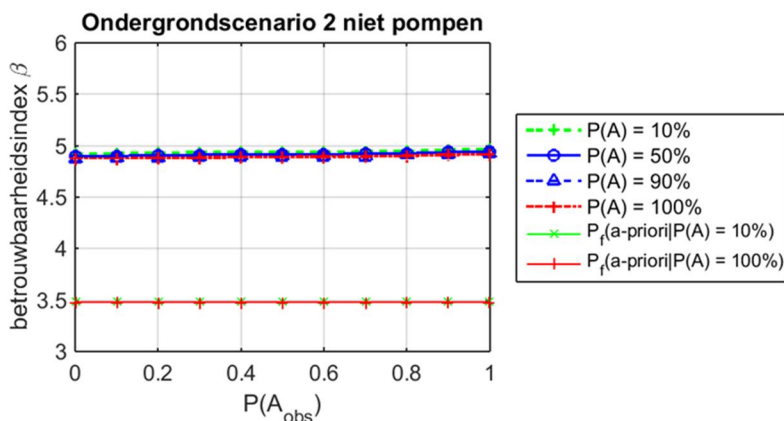
Er bestaat nog de mogelijkheid dat het effect onderschat wordt door het werken in termen van (kritieke) waterstanden bij zeer vlakke fragility curves. Dus voor dijken die extreem ongevoelig zijn voor de buitenwaterstand kan de gebruikte methode tot een onderschatting van het bewezen sterkte effect leiden. Hiervoor is het in vervolgstudies aan te raden om met andere sterktevariabelen te werken (bijvoorbeeld direct met de stabiliteitsfactor).

3.8.2

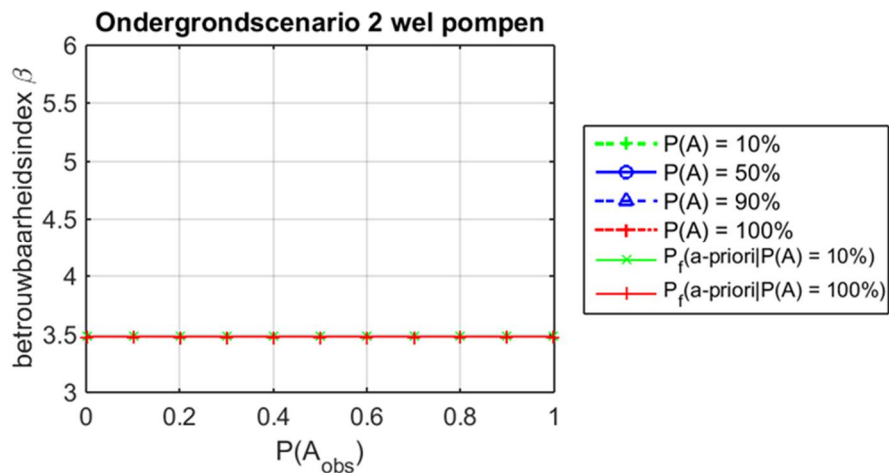
Schematisatie 2 (tussenzandlaag)

Ook bij schematisatie 2 is er een duidelijk effect waarneembaar (factor orde 100 of meer). Er is hier wel een verschil te zien tussen pompen en niet pompen door de hogere gevoeligheid voor de waterstand (zie figuur 3.13 en 3.14).

De a-posteriori kansen voor wel pompen zijn lager dan behorende bij een betrouwbaarheidsindex van 5.5. Hierbij is op te merken dat deze schematisatie met tussenzandlaag als een lokaal fenomeen wordt gezien. Ook de kans dat de tussenzandlaag daadwerkelijk in contact staat met het Markermeer wordt als laag ingeschat. Bovendien is het mogelijk deze tussenzandlagen met nader (grond)onderzoek in kaart te brengen of uit te sluiten.



Figuur 3.13: A-posteriori betrouwbaarheidsindices voor bodemopbouw schematisatie 1 voor de situatie zonder pompen. $P(A)$ is de kans op een ongunstige waterspanningrespons in de toetssituatie, $P(A_{obs})$ is de kans op een ongunstige waterspanningrespons tijdens de observatie.



Figuur 3.14: A-posteriori betrouwbaarheidsindices voor bodemopbouw schematisatie 1 voor de situatie met pompen. $P(A)$ is de kans op een ongunstige waterspanningrespons in de toetsituatie, $P(A_{obs})$ is de kans op een ongunstige waterspanningrespons tijdens de observatie.

3.9 Bewezen sterkte Monte Carlo

De methode Monte Carlo zoals beschreven in 3.4.2 heeft twee belangrijke voordelen:

1. De methode is in de limiet exact (dat wil zeggen bij voldoende realisaties).
2. Er kunnen ook bijgestelde kansverdelingen van de onderliggende parameters worden verkregen.

In het tijdsbestek van deze verkenning zijn enkel een aantal tests gedaan met deze methode. Noemenswaardige resultaten ten aanzien van de parameterverdelingen zijn binnen dit onderzoek niet verkregen. Wel is aangetoond dat de methode werkend te krijgen is. Dat was ook het doel van dit deel van het onderzoek.

3.10 Conclusies en aanbevelingen

3.10.1 Kansrijkheid impact

De belangrijkste conclusies ten aanzien van de verwachte impact van bewezen sterkte op de macrostabiliteit voor de Markermeerdijken zijn:

1. Het effect van bewezen sterkte op de in deze proof-of-concept studie geanalyseerde schematisaties van een "typische zuidelijke Markermeerdijk" is significant.
2. Bewezen sterkte kan tot verkleining van de veiligheidsopgave ten aanzien van macrostabiliteit leiden, mede gezien het feit dat de berekende a-priori faalkansen gebaseerd op recente inzichten van Dijken op Veen 2 al betrekkelijk laag zijn. Voor een kwantitatieve inschatting van het effect op de versterkingsopgave is een gedetailleerde analyse van meerdere dijksecties nodig.
3. Het effect van pompen voor de als meest representatief geachte schematisatie 1 is verwaarloosbaar omdat de stabiliteit van de dijk nauwelijks gevoelig is voor de buitenwaterstand. Voor tussenzandbanen (lokaal fenomeen), waarbij de stabiliteit gevoeliger is voor de waterstand, is het effect iets groter.
4. Extra observaties kunnen worden toegevoegd en zullen het effect van bewezen sterkte vergroten. Naast Zuiderzeestormen (waarvan de informatiewaarde door de korte belastingduur als beperkt wordt verwacht) kan worden gedacht aan extreme neerslag gebeurtenissen of verkeersbelastingen. Ook via

proefbelastingen kunnen in principe extra observaties worden gecreëerd die het effect zullen vergroten.

Bovenstaande conclusies zullen anders zijn indien een dijkvak gevoelig is voor opdrijven. Het effect van bewezen sterkte zal dan afhankelijk zijn of er tijdens de observatie (aantoonbaar) wel of geen sprake was van opdrijven.

Nogmaals wordt benadrukt dat bovenstaande conclusies gebaseerd zijn op het faalmechanisme macrostabiliteit. Op de opgave voor de overige faalmechanismen kan geen conclusie getrokken worden.

3.10.2 *Kansrijkheid operationaliseren methode 'fragility curves'*

De werking van de methode met fragility curves met het faalmechanisme macrostabiliteit is in deze verkenning middels een proof-of-concept aangetoond. De methode is geschikt voor (het toetsen van) bestaande dijken. De methode is wellicht beperkt toepasbaar in ontwerpsituaties in het updaten van scenariokansen van bodemschematiseringen. Belangrijk is dat in tegenstelling tot eerdere methodes ook de onzekerheid in de overleefde belasting(effecten) via scenario's (en scenariokansen) kan worden meegenomen. Met enige beperkingen kan de methode nu al worden toegepast om faalkansen bij te stellen op grond van bewezen sterkte informatie.

Activiteiten

Voor de operationalisering worden de volgende hoofdactiviteiten voorzien:

1. **Onzekerheden waterspanningen:** Voor een betere modellering van de onzekerheden in de waterspanningrespons is het nodig om een stochastische modellering van de ligging van het freatisch vlak, de stijghoogterespons en van de indringingslengte te implementeren.
2. **Scenario's:** Voor het uiteindelijke gebruik van de methode is het nodig om het werken met een groter (liefst willekeurig) aantal scenario's (zowel bodemopbouw als onzekerheden in de observatie) te implementeren en te testen.
3. **Verificatie:** Ter verificatie van de implementatie van de methode met fragility curves zijn benchmark analyses met de methode Monte Carlo uit te voeren.
4. **Robuustheid:** De methode is voor verschillende uiteenlopende schematisaties te testen op robuustheid.
5. **Acceptatie:** Voor de acceptatie van de methode zal een advies van het ENW (werkgroepen Techniek, Rivieren/Meren en Veiligheid) nodig zijn. Voor de praktische toepasbaarheid wordt aanbevolen om een klankbordgroep van gebruikers in te stellen en nauw te betrekken bij de vorderingen.
6. **Ontwerpen:** Gedurende het onderzoek worden regelmatig tussenresultaten en nieuwe inzichten afgetapt die gebruikt kunnen worden in het ontwerpproces.

Naast het uitvoeren van deze activiteiten, is het noodzakelijk nog tijd in te plannen na afloop van het ontwikkelen van de methodiek voor het daadwerkelijk uitvoeren van een nadere veiligheidsbeoordeling. Hiermee is naar verwachting nog enkele maanden gemoeid.

Product

Het beoogde eindproduct van de beschreven activiteiten is een werkwijze om nadere veiligheidsanalyses uit te voeren voor bestaande dijken middels de doorontwikkelde

methode fragility curves. De hiervoor te ontwikkelen tools zullen na 6 maanden nog niet voldoende gebruikersvriendelijk zijn om ze uitsluitend door partijen te laten gebruiken die de veiligheidsanalyses uitvoeren. Toepassing zal samen met de ontwikkelaars plaats moeten vinden.

Doorlooptijd

Voor toepassing voor de Markermeerdijken is de relevante vraag of een methode medio 2016 beschikbaar kan zijn. De tijdsraming in figuur 3.15 is dan ook afgestemd op een periode van 6 maanden en beschrijft de activiteiten op hoofdlijnen. Er wordt opgemerkt dat het verbeterd modelleren van de onzekerheden in waterspanningen met nadruk wordt aanbevolen met zicht op eenvoudigere toepassing van de methode en een betere duiding van de resultaten; tegelijkertijd is denkbaar terug te vallen op het werken met discrete scenario's zoals gedemonstreerd in deze verkenning. Daarom is er na 3 maanden een go-no go moment voor dit onderdeel voorzien.

MAAND	1	2	3	4	5	6
ACTIVITEIT	Jan-16	Feb-16	Mar-16	Apr-16	May-16	Jun-16
Onzekerheden waterspanningen						
implementeren	█	█	█			
testen				go-no go		
Scenario's						
implementeren update scenariokansen (bodem)	█	█	█			
uitbreiding scenariokansen observatie				█	█	
testen uitbreidingen						
Verificatie & robuustheid						
opstellen test cases (gericht op Markermeer condities)	█	█	█	█	█	█
Monte Carlo analyses (Directional/importance Sampling)						
analyse tests en rapportage						
Opstellen "handleiding"						
Acceptatietraject ENW						
ENW begeleidingsgroep						
Informer plan met gedetailleerde methodebeschrijving		methode				
Informer test resultaten en tussentijdse inzichten				tests		
Adviesvraag methode en handleiding						advies
Eventueel parallel traject voor gebruik in ontwerpen						aftappen van methodeontwikkeling

Figuur 3.15: Tijdsraming operationaliseren methode fragility curves voor de Markermeerdijken

Zoals in Figuur 3.15 aangegeven is het mogelijk om voor eventuele verkenningen t.a.v. de toepassing van bewezen sterkte informatie in het ontwerpen van dijkversterkingen tussentijds nieuwe inzichten af te tappen.

Het uitvoeren van een nadere veiligheidsbeoordeling zelf o.b.v. de door te ontwikkelen methode is nadrukkelijk niet inbegrepen in de inschatting van de doorlooptijd in Figuur 5.1. Deze kan pas na afloop plaatsvinden, waarbij opstellen van de benodigde dijkschematisaties in een parallel traject goed denkbaar is.

Acceptatietraject ENW

Voor acceptatie van de methode door ENW is de doorlooptijd vrij kort. Daarom wordt zoals in de planning aangegeven een nauwe betrokkenheid van een ENW begeleidingsgroep (ca. 2 á 3 experts) voorzien die ook tussen formele werkgroepvergaderingen in geïnformeerd en geraadpleegd worden (klankbord). Tevens zijn er drie contactmomenten voor formele terugkoppeling voorzien: (a) aan

het begin over de gedetailleerde methodebeschrijving en het plan van aanpak, (b) tussentijds over de uitwerking en resultaten van tests en (c) aan het einde over de uiteindelijke acceptatie. Qua samenstelling van de begeleidingsgroep en een eventuele adviesgroep lijkt een mix van werkgroepen Techniek (geotechnische modellering) en Veiligheid (probabilistische methode en inpassing overstromingskansbenadering) voor de hand liggend.

Bovenstaand voorstel voor het acceptatietraject met ENW is gebaseerd op eigen inzicht van de werkprocessen, het ENW zelf heeft over de haalbaarheid van het tijdspad nog geen uitspraken gedaan.

Gedurende het traject om de methode fragility curves te operationaliseren, kan tussentijds informatie worden afgetapt ten behoeve van het ontwerp. Daarnaast is het noodzakelijk (na afloop van de tijdsraming in figuur 3.15) tijd in te plannen na afloop van het ontwikkelen van de methodiek voor het daadwerkelijk uitvoeren van een nadere veiligheidsbeoordeling.

Conclusie kansrijkheid operationaliseren methode fragility curves

Het uitvoeren van de beschreven activiteiten in 6 á 8 maanden is haalbaar, tegelijk betreft het een ontwikkelproject met de bijbehorende risico's in doorlooptijd. De acceptatie van het product hangt af van de beoordeling door ENW en de haalbaarheid voor ENW van het geschetste tijdspad.

3.10.3 *Kansrijkheid methode 'Monte Carlo' (toetsen en ontwerpen)*

De ontwikkelbehoefte bij deze methode is duidelijk groter dan bij de methode met fragility curves. Hierbij is te denken aan bijvoorbeeld:

1. een robuuste koppeling tussen Monte Carlo simulaties en D-Geostability met ongedraineerde stabiliteitsanalyses,
2. het implementeren en testen van het updaten van de kansverdelingen van individuele parameters,
3. het testen op robuustheid voor verschillende condities,
4. het verbeteren van de rekentijden (nu orde dagen), bijvoorbeeld door gebruik van geavanceerde simulatietechnieken.

Ook de acceptatie van meenemen van bewezen sterkte informatie in ontwerpen zal meer vergen dan voor (her-toetsen), omdat deze toepassing volledig nieuw is. Een robuuste implementatie en acceptatie van deze methode vergt dan ook een langere ontwikkeltijd dan 6 maanden. Een eerste inschatting komt uit op twee tot drie jaar, waarbij er een risico is op uitloop, omdat het voor de eerste keer is (wereldwijd) dat deze methode wordt toegepast bij ontwerpen.

3.10.4 *Overkoepelende conclusie operationaliseren*

In termen van operationaliseren lijkt (her-)toetsen met de methode fragility curves haalbaar in een termijn van 6 á 8 maanden. In beperkte mate zal de methode fragility curves ook bruikbaar zijn voor het aanpassen van ontwerpuitgangspunten. Het inzetbaar maken van de methode met Monte Carlo simulatie voor ontwerpen zal een langere ontwikkeltermijn vergen (voor macrostabiliteit), waarschijnlijk twee tot drie jaar of meer. Om op kortere termijn in een ontwerppraktijk met bewezen sterkte te kunnen werken, zijn er grofweg de volgende opties:

1. Ontwerpverificatie met de eenvoudige methode: ontwerp beoordelen met de methode 'fragility curves', waarbij de invloeden van bijvoorbeeld ontworpen bermen conservatief worden meegenomen in de updating procedure. Vervolgens ontwerp bijstellen en herhalen.

2. Ontwerp opstellen volgens gangbare praktijk; daarbij de ontwerpuitgangspunten zodanig met onderbouwing via bewezen sterkte afwegingen corrigeren dat er geen sprake meer is van evidente strijdigheid met opgetreden belastingsituaties. De belangrijkste bij te stellen uitgangspunten kunnen mede gekozen worden op basis van de inzichten uit het bewezen-sterkteonderzoek. Voordeel is dat een dergelijke methode relatief eenvoudig te operationaliseren is. Nadeel is dat de potentie van bewezen sterkte niet volledig wordt benut. Door de onzekerheid die gepaard gaat met de benaderingen/keuzes, zal namelijk enige veilige marge in acht genomen moeten worden.
3. Ontwikkelen van verschillende scenario's voor onzekerheden in de schematisatie van de ondergrond. Bepalen bij welke scenario's sprake zal zijn van een verwaarloosbare faalkans, vervolgens ontwerpen op basis van de gangbare ontwerp praktijk. Nadeel is dat de winst relatief beperkt blijft, doordat de relaties tussen scenario's buiten beschouwing blijven. Maar ook hier geldt dat het in ieder geval de goede richting op werkt.
4. Toepassing geavanceerde reliability updating methode: update kansverdelingen sterkte-parameters. Theoretisch ideaal, maar met een minimale ontwikkeltijd van 2 tot 3 jaar. Tevens is er een relatief groot risico op niet-tijdigheid vanwege de complexiteit.

Afhankelijk van hoe snel de doorontwikkeling verloopt, zal een ambitieuzere optie in de praktijk gebracht kunnen worden. Een no-regretactie daarbij is het in kaart brengen van zoveel mogelijk scenario's (combinaties) van sterkte/parameterwaarden, belastingen en schematisaties (zie ook de scenario's in bijlage 1).

3.10.5 *Aanbevelingen en aandachtspunten voor het vervolg*

Voor de doorontwikkeling van de methode lijkt het cruciaal om ook de onzekerheden in waterspanningen expliciet via kansverdelingen te modelleren (stijghoogterespons, indringingslengte en freatisch vlak). Dat zal een veel betere schatting van de faalkans geven en tegelijk veel denkwerk in discrete scenario's overbodig maken. Ook bestaat dan de mogelijkheid deze kansverdelingen te updaten (als de onzekerheid reduceerbaar wordt geacht).

De belangrijkste aanbevelingen voor eventuele vervolgstudies ten aanzien van bewezen sterkte voor macrostabiliteit bij de Markermeerdijken zijn:

1. Beschouw ook andere belastingcondities dan het hoogwater van 1998, zoals condities met bekende hevige neerslag (hoog freatisch vlak in de dijk) of hoge verkeersbelastingen. Er kunnen met de methode meerdere overleefde belastingen tegelijk worden meegenomen, waardoor het effect op de faalkans wordt versterkt.
2. Neem expliciet de kansen op verschillende bodemopbouw scenario's mee en stel deze bij met de bewezen sterkte informatie.
3. Breng alle onzekerheden omtrent de overleefde belastingsituatie in kaart zoals in de tussentijd opgetreden bodemdaling, veranderingen van het dijkprofiel etc.
4. Ga na of rekenen met verkeersbelasting in de toets situatie werkelijk noodzakelijk is. In deze proof-of-concept studie is de verkeersbelasting buiten beschouwing gelaten op aanraden van de eerste expert sessie.
5. Analyseer meer representatieve dijkvakken om het effect voor andere condities te verkennen.

Tenslotte wordt opgemerkt dat het meenemen van overleefde belastingen ook voor andere dijken een gunstiger beeld van de veiligheid kan geven. Het lijkt zinvol om

op korte termijn de potentie voor het Hoogwaterbeschermingsprogramma te verkennen door ook elders in het land een reeks van uiteenlopende representatieve dijken te analyseren.

4 Synthese, conclusies en reflectie

4.1 Synthese

In september 2015 is het onderzoek "Pompen Markermeerdijken HWBP-2" afgerond (RWS, 2015). Dit onderzoek heeft inzicht gegeven in de effecten en kosten van pompen om de waterstand in het Markermeer bij extreme omstandigheden te verlagen. Het onderzoek heeft ook inzicht gegeven in het effect van lagere waterstanden op de benodigde dijkontwerpen volgens het VOPP ((Voorlopig Ontwerp Projectplan, het meest recente Voorkeursalternatief van HHNK).

Op basis van fase 1 van de pompenstudie is geconcludeerd dat de kosten voor pompen aanzienlijk groter zijn dan de baten voor het HWBP2-project Markermeerdijken, uitgaande van het VOPP.

Er zijn echter in het rapport zelf al, mede op basis van commentaar van de begeleidingscommissie, de nodige kanttekeningen gemaakt bij deze conclusie:

- Bewezen sterkte is niet meegenomen, wat volgens het ENW een substantiële reductie van de kosten en dijkversterkingsopgave kan opleveren, al dan niet in combinatie met pompen.
- De resultaten van Dijken op Veen (inclusief gevoeligheidsanalyse van de gebruikte geotechnische modellen), eventuele effecten van de nieuwe normering en kansen van het eventueel toepassen van Plaxis zijn nog niet meegenomen.
- Er is uitgegaan van aanpassing van het meest recente ontwerp, het Voorlopig Ontwerp projectplan (VOPP) en niet van het hertoetsen van de huidige dijk.

In voorliggende studie zijn daarom de volgende onderzoeksvragen geformuleerd:

1. In hoeverre is de in de pompenstudie gevonden relatie tussen hydraulische belasting en het effect op het dijkontwerp juist ingeschat?
2. In hoeverre kan 'bewezen sterkte' binnen afzienbare termijn (orde grootte 6 maanden) worden geoperationaliseerd, en leidt dat in combinatie met pompen tot een verkleining van de opgave. Uitgangspunt daarbij is een methode die kwantitatief, reproduceerbaar en toetsbaar is, zodanig dat de waterkeringbeheerder op een binnen de huidige systematiek passende wijze kan aantonen dat de kering veilig is.
3. Op basis van de voorgaande deelvragen is de hoofdvraag: In hoeverre leiden de nieuwe inzichten in de geotechnische modellen, de doorwerking van de hydraulische belasting op het dijkontwerp en 'bewezen sterkte' tot andere conclusies over de effectiviteit van pompen op de Houtribdijk.

Om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden, zijn de volgende deelonderzoeken en activiteiten uitgevoerd:

1. Geotechniek, modellen en doorwerking hydraulische randvoorwaarde op het dijkontwerp:
 - a. Aftappen laatste stand van zaken Dijken op Veen, inclusief gevoeligheidsanalyse geotechnische modellen en effect op opgave dijken.
 - b. Herbeoordelen impactanalyse nieuwe normering.
 - c. Afronden Notitie 'kansrijkheid Plaxis'.
2. Bewezen sterkte: opstellen advies over de kansrijkheid van het operationaliseren van 'bewezen sterkte' voor de Markermeerdijken in combinatie met pompen.

3. Op basis van 1 en 2: beoordeling of conclusies van de pompenstudie Markermeerdijken nog steeds geldig zijn of aangepast moeten worden.
4. Kwaliteitsborging.

Wat betreft dat laatste: voor elk deelproduct zijn de gebruikelijke interne kwaliteitsprocedures doorlopen. Naast kwaliteitsprocedures van opdrachtnemende bureaus is ook door opdrachtgevers van RWS en HHNK getoetst. Daarnaast heeft ir. Joop Weijers bijgedragen aan de kwaliteitsborging van het grondmechanisch onderzoek. Tevens heeft een expertgroep meegekeken bij het ontwikkelen van de methodiek voor 'bewezen sterkte' (zie het voorwoord voor de samenstelling van de expertgroep). Tot slot is ook het advies van het Expertise-Netwerk Waterveiligheid (ENW) een belangrijke kwaliteitstoets voor het onderzoek.

In hoofdstuk 2 zijn de resultaten van Dijken op Veen, de impactanalyse voor de nieuwe normering en Plaxis beschreven.

- Voor **Dijken op Veen** is het belangrijkste resultaat dat nieuwe parameterinstellingen in beeld zijn gebracht middels een gevoeligheidsanalyse. Hieruit bleek onder meer dat de winst op de veiligheidsopgave van de nieuwe parameterinstellingen beperkt is. De resultaten zijn tevens direct gebruikt bij het onderzoek naar bewezen sterkte.
- De impactanalyse voor de **nieuwe normering**, met name het effect van het nieuwe ontwerpinstrumentarium (OI2014, versie 3) heeft bij gebrek aan nieuwe rekenresultaten nog geen nieuwe inzichten opgeleverd ten opzichte van de vorige versie van het OI.
- Tot slot is in hoofdstuk 2 het mogelijke gebruik van **Plaxis** voor de HWBP2-project geanalyseerd. Daaruit blijkt dat toepassing van Plaxis voor het toetsen en ontwerpen van de 33 km afgekeurde Markermeerdijken niet realistisch is bij gebrek aan voldoende monitoringgegevens en een veiligheidsfilosofie. Voor het analyseren van vervormingen op kritische locaties (bij het ontwerp en tijdens de bouw) en het lokaal verifiëren van de resultaten van 'bewezen sterkte' kan Plaxis wel een waardevolle bijdrage leveren.

In hoofdstuk 3 zijn de resultaten van het onderzoek naar bewezen sterkte beschreven. Uit dit onderzoek komen 3 belangrijke resultaten:

1. Het blijkt kansrijk om met gebruikmaking van 'bewezen sterkte' binnen 6 tot 8 maanden een methode te operationaliseren die kwantificeerbaar, reproduceerbaar en toetsbaar is en die gebruikt kan worden voor een nadere veiligheidsanalyse van de stabiliteit van de Markermeerdijken.
2. Toepassing van de methode leidt naar verwachting tot een kleinere veiligheidsopgave voor het belangrijkste faalmechanisme macrostabiliteit van de Markermeerdijken.
3. Uit het onderzoek naar 'bewezen sterkte' wordt bevestigd dat het effect van buitenwaterstanden op de veiligheidsopgave van de Markermeerdijken klein is. Ook zonder pompen is het effect van 'bewezen sterkte' aantoonbaar.

4.2 Conclusies onderzoek

Op basis van dit onderzoek en het onderzoek uit fase 1 van de pompenstudie, kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

1. In fase 1 van het pompenonderzoek is geconcludeerd dat het effect van de buitenwaterstand op de opgave voor de dijken beperkt is (ten opzichte van het VOPP). In dit onderzoek wordt bevestigd dat een lagere buitenwaterstand van het Markermeer weinig invloed heeft op de stabiliteitsopgave voor de Markermeerdijken tussen Hoorn en Amsterdam. Dit betekent tevens dat pompen weinig effect zullen hebben op de veiligheidsopgave. Op basis van dit

gegeven, en de kosten van de pompen (minimaal 150 miljoen euro) kan worden geconcludeerd dat het niet zinvol is om projectbudget van het HWBP2-project Markermeerdijken te besteden aan pompen op de Houtribdijk. De kosten voor de pompen zijn aanzienlijk hoger dan de besparingen op het dijkontwerp. Zie voor een verdere toelichting ook paragraaf 4.3.1.

2. Het is mogelijk gebleken om een methode te ontwikkelen om 'bewezen sterkte' toepasbaar te maken voor het uitvoeren van een nadere veiligheidsanalyse van de Markermeerdijken voor het onderdeel macrostabiliteit. Deze methode levert resultaten op die kwantificeerbaar, reproduceerbaar en toetsbaar zijn. Voor deze methode is breed draagvlak bij de geotechnische experts en ENW.
3. Het is mogelijk deze methode voor 'bewezen sterkte' binnen 6 tot 8 maanden te operationaliseren. In termen van operationaliseren lijkt het uitvoeren van een nadere veiligheidsbeoordeling met de methode fragility curves zeker haalbaar. Het bruikbaar maken van de methode met Monte Carlo simulatie voor ontwerpen zal een langere termijn voor ontwikkeling vergen (voor macrostabiliteit), waarschijnlijk twee tot drie jaar.
4. Op basis van de methode voor bewezen sterkte kan worden geconcludeerd dat 'bewezen sterkte' kan leiden tot een reductie van de veiligheidsopgave voor de Markermeerdijken, zonder dat hiervoor pompen op de Houtribdijk nodig zijn. Hoe groot de reductie precies is, is nu nog niet te zeggen, maar geadviseerd wordt om dit in de planfase verder uit te werken.

4.3 Reflectie

In het onderzoek zijn een aantal opvallende zaken naar voren gekomen. In onderstaande reflectie wordt hier verder op ingegaan. Achtereenvolgens betreft dit:

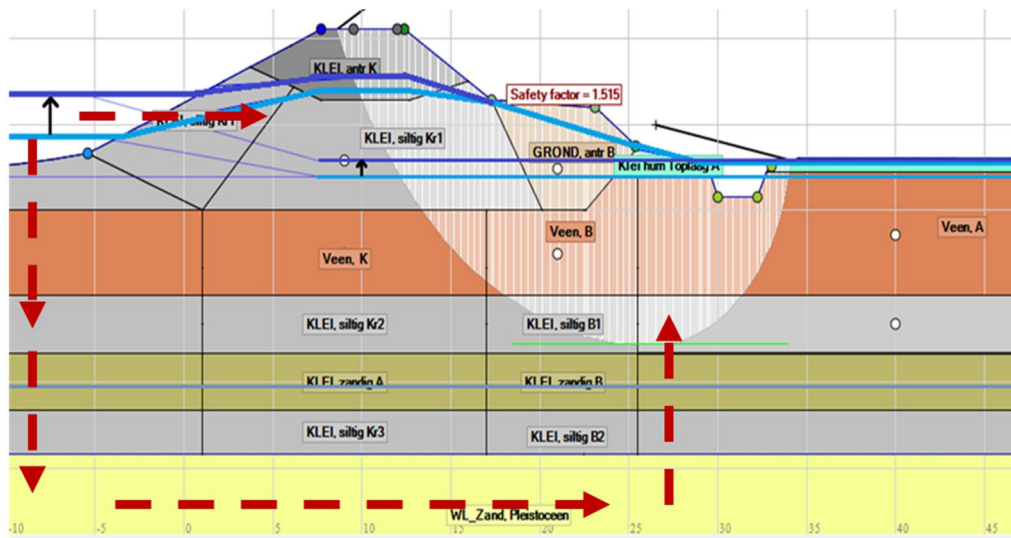
- De positieve invloed van bewezen sterkte.
- De beperkte invloed van de buitenwaterstand.

4.3.1 *Beperkte invloed buitenwaterstanden*

Uit beschouwing van de stabiliteitsfactoren is duidelijk geworden dat de dijk in de scenario's zonder tussenzandlaag nauwelijks reageert op de buitenwaterstand. Ook met tussenzandlaag (een fenomeen dat lokaal voor kan komen) is de gevoeligheid beperkt.

De verklaring hiervoor is dat verhoging van het buitenwater maar voor weinig extra stijging van de van nature al hoge freatische lijn zorgt. Dit wordt mede veroorzaakt door de samenstelling van het dijkmateriaal, waar in verschillende ophooggrondes veel klei in is verwerkt. Tevens is het slappe lagen pakket zo dik en ondoorlatend dat de kritieke glijvlakken, die doorgaans door de kleilaag onder het veen gaan, niet of nauwelijks worden beïnvloed door verhoging van de stijghoogtes in de watervoerende zandlaag (geringe indringing).

De verklaring voor de beperkte respons van de buitenwaterstand voor de zuidelijke Markermeerdijken representatieve schematisatie 1 is geïllustreerd in figuur 4.1.



Figuur 4.1: Illustratie van een typisch kritiek glijvlak met de relevante freatische lijnen en stijghoogtes bij dagelijkse omstandigheden (licht blauw) en bij het ontwerppeil (donkerblauw)

Verhoging van het buitenwater zorgt maar voor weinig extra stijging van de al bij dagelijkse omstandigheden hoge freatische lijn. Tevens is het slappe lagen pakket zo dik en ondoorlatend dat de lagen waar de kritieke glijvlakken doorheen gaan, niet of nauwelijks worden beïnvloed door verhoging van de stijghoogtes in de watervoerende zandlaag (geringe indringing). Bij locaties waar een tussenzandlaag aanwezig is (schematisatie 2), is er meestal wel een verbinding met het buitenwater mogelijk, maar wordt de invloed beperkt door een dikke, vrijwel ondoorlatende sliblaag op de bodem van het Markermeer. Dit beeld is in de diverse expert bijeenkomsten herkend en onderschreven door experts met lokale ervaring.

In het algemeen heeft het toepasbaar maken van bewezen sterkte een grote invloed als de onzekerheid ten aanzien van de sterkte groot is ten opzichte van de onzekerheid ten aanzien van de belasting. Dit is waarschijnlijk het geval bij de Markermeerdijken. De kleine invloed van de buitenwaterstand op de waterspanningen wordt hierbij nog verder afgezwakt door de relatief lage invloed van de waterspanningen op de ongedraineerde schuifsterkte (vergeleken met gedraineerde schuifsterkte).

4.3.2 Positieve invloed bewezen sterkte

De positieve invloed van bewezen sterkte op het beeld van de opgave/de omvang van versterkingen bij de Markermeerdijken is als volgt te verklaren. In het algemeen heeft bewezen sterkte een grote invloed als het belang van de onzekerheid ten aanzien van de sterkte groot is ten opzichte van de onzekerheid ten aanzien van de belasting. Dit is het geval ten aanzien van de macrostabiliteit bij de Markermeerdijken. Dit heeft de volgende oorzaken:

- De ondergrond reageert hier ongedraineerd: de afhankelijkheid van de buitenwaterstand is kleiner dan bij gedraineerd grondgedrag (zie voor een toelichting bijlage 4).D
- De onzekerheden ten aanzien van de werkelijke waarden van de sterkte-eigenschappen (su-ratio, grensspanning) zijn bij de Markermeerdijken groot. Dat wordt ook wel geïllustreerd door de forse inspanning die via het Dijken op veen traject in de afgelopen jaren is geleverd om sterkte-eigenschappen beter te bepalen.

- De ondergrondopbouw van de Markermeerdijken is vaak dusdanig dat de waterspanningen (in het relevante gebied) en de freatische lijn beperkt afhankelijk zijn van de buitenwaterstand.
- De onzekerheid ten aanzien van de jaarextremen van de buitenwaterstand op het Markermeer is relatief klein (decimeringhoogte slechts orde 20 tot 30cm).

Omdat de omstandigheden bij andere dijken anders (kunnen) zijn, laten de conclusies van de proof-of-concept-studie zich niet gemakkelijk veralgemeniseren. Per geval zal het effect van bewezen sterkte moeten worden beoordeeld.

Uitsluiten van 'bewezen sterkte'

Voor het mogen toepassen van 'bewezen sterkte' is het noodzakelijk dat de omstandigheden waarin een historisch hoogwater veilig is gekeerd, en die dus het bewijs vormen voor de werkelijke sterkte van een kering, nog steeds dezelfde zijn. Het gaat dan onder meer om de volgende aspecten:

- De dijk moet in het verleden een (extreme) waterstand zonder schade overleefd hebben.
- De dijk zelf alsmede het invloedsgebied van de dijk mag sinds het historisch opgetreden hoogwater geen veranderingen hebben ondergaan die de stabiliteit mogelijk in ongunstige zin hebben beïnvloed. Hierbij valt onder andere te denken aan:
 - Dijkversterking,
 - bebouwing,
 - bodemdaling,
 - polderpeilverlaging,
 - veranderende intreeweestand,
 - veranderende sterkte van de dijk of de ondergrond als gevolg van veroudering of oxidatie(bijvoorbeeld bij veen).
- De in het verleden opgetreden extreme waterstand moet vergelijkbaar zijn met de nu geldende maatgevende waterstand. Datzelfde geldt ook voor eventuele andere belastingen (o.a. wegverkeer, neerslag).

Het HWBP2-project Markermeerdijken wordt wellicht het eerste dijkversterkingsproject waar 'bewezen sterkte' kan worden toegepast. Tot nu toe strandden alle pogingen hiertoe op het niet kunnen kwantificeren van het effect, en/of het feit dat de omstandigheden sinds het optreden van historisch hoge waterstanden ingrijpend waren veranderd. Met de methode 'fragility curves' is wetenschappelijk gezien een doorbraak bereikt waarmee het effect wel kan worden gekwantificeerd. Het overstappen naar ongedraineerd rekenen en de voor Dijken op veen bepaalde parameters zorgen dat de proof-of-concept studie positieve resultaten laat zien. Daarnaast telt ook mee dat veel van de omstandigheden bij de Markermeerdijken sinds het ontstaan van het Markermeer (in 1976) stabiel zijn.

4.4

Aanbevelingen en aandachtspunten voor het vervolg

Eén van de hoofdconclusies van dit onderzoek is dat het kansrijk is om de methode voor 'bewezen sterkte' met fragility curves voor het faalmechanisme macro stabiliteit te operationaliseren. Aanbevolen wordt om dit de komende tijd op te pakken. Tevens wordt aanbevolen om te verkennen in hoeverre ook de geavanceerde methode (Monte Carlo) op tijd ontwikkeld kan worden om meerwaarde te hebben binnen het project voor het optimaliseren van het ontwerp, met name op knelpuntlocaties. Als dit niet lukt, wordt geadviseerd bij het ontwerp gebruik te maken van de leerervaring die wordt opgedaan bij het toepassen van de fragility curves. Daarvoor zijn er grofweg de volgende opties:

1. Ontwerpverificatie met de eenvoudige methode: ontwerp beoordelen met de methode 'fragility curves', waarbij de invloeden van bijvoorbeeld ontworpen bermen conservatief worden meegenomen in de updating procedure. Vervolgens ontwerp bijstellen en herhalen.
2. Ontwerp opstellen volgens gangbare praktijk; daarbij de ontwerputgangspunten zodanig corrigeren met de onderbouwing via bewezen sterkte afwegingen, dat er geen sprake meer is van evidente strijdigheid met opgetreden belastingsituaties. De belangrijkste bij te stellen uitgangspunten kunnen mede gekozen worden op basis van de inzichten uit het bewezen-sterkteonderzoek. Voordeel is dat een dergelijke methode relatief eenvoudig te operationaliseren is. Nadeel is dat de potentie van bewezen sterkte niet volledig wordt benut. Door de onzekerheid die gepaard gaat met de benaderingen/keuzes, zal namelijk enige veilige marge in acht genomen moeten worden.
3. Ontwikkelen van verschillende scenario's voor onzekerheden in de schematisatie van de ondergrond. Bepalen bij welke scenario's sprake zal zijn van een verwaarloosbare faalkans, vervolgens ontwerpen op basis van de gangbare ontwerp-praktijk. Nadeel is dat de winst relatief beperkt blijft, doordat de relaties tussen de scenario's buiten beschouwing blijven. Maar ook hier geldt dat het in ieder geval de goede richting op werkt.
4. Toepassing geavanceerde reliability updating methode: update kansverdelingen sterkte-parameters. Theoretisch ideaal, maar met een minimale ontwikkeltijd van 2 tot 3 jaar. Tevens is er een relatief groot risico op niet-tijdigheid vanwege de complexiteit.

Afhankelijk van hoe snel de doorontwikkeling verloopt, zal een ambitieuzere optie in de praktijk gebracht kunnen worden voor trajecten met een opgave voor macrostabiliteit.

De belangrijkste aanbevelingen voor eventuele vervolgstudies ten aanzien van bewezen sterkte voor macrostabiliteit bij de Markermeerdijken zijn:

1. Beschouw ook andere belastingcondities dan het hoogwater van 1998 zoals condities met bekende hevige neerslag (hoog freatisch vlak in de dijk) of hoge verkeersbelastingen.
2. Neem expliciet de kansen op verschillende bodemopbouwscenario's mee en stel deze bij met de bewezen sterkte informatie.
3. Ga na of rekenen met verkeersbelasting in de toetssituatie werkelijk noodzakelijk is. In deze proof-of-concept studie is de verkeersbelasting buiten beschouwing gelaten op aanraden van de eerste expertsessie.
4. Analyseer meer representatieve dijkvakken om het effect voor andere condities te verkennen.

Tenslotte wordt opgemerkt dat het meenemen van overleefde belastingen ook voor andere dijken een gunstiger beeld van de veiligheid kan geven. Het lijkt zinvol om op korte termijn de potentie voor het Hoogwaterbeschermingsprogramma te verkennen door ook elders in het land een reeks van uiteenlopende representatieve dijken te analyseren. Op basis van meerdere pilots zou het mogelijk moeten zijn binnen enkele jaren een breed geaccepteerde methode voor bewezen sterkte te ontwikkelen, die na goedkeuring door ENW opgenomen kan worden in het Ontwerp-Instrumentarium.

Voor het analyseren van vervormingen op kwetsbare locaties, met name bij aanwezigheid van funderingen nabij het verwachte glijvlak, en bij het gebruik van constructieve elementen als damwanden in het ontwerp kan Plaxis worden ingezet.

Op dergelijke locaties is het aan te bevelen om de glijcirkelmodellen te valideren. Hiervoor is het wel zaak voldoende monitoringgegevens te hebben. Geadviseerd wordt om aan het begin van de volgende fase te bepalen voor welke locaties Plaxis ingezet gaat worden, te analyseren welke invoergegevens daarvoor nodig zijn en indien noodzakelijk daar dan een gericht monitoringprogramma voor op te stellen.

Literatuur

- Blaakman et al., 1999; Achtergronden Hydraulische Belastingen Dijken IJsselmeergebied. Deelrapport 2: Meerpeilstatistiek. E.J. Blaakman, H. Buiteveld, H.C. van Twuiver, A. van Agthoven. RIZA rapport 99.039. Rijkswaterstaat-RIZA. Lelystad, 25 maart 1999.
- CROW, 2010; Standaardsystematiek voor kostenramingen SSK-2010, CROW-publicatie 137, feb 2010.
- Deltares, 2012; Kramer, N en J. Beckers, Toelevering aan het CPB; Norm van de Afsluitdijk, 2012.
- Deltaprogramma IJsselmeergebied, 2012; Kennisdocument strategieontwikkeling IJsselmeergebied, september 2012.
- ENW, 2009; Technisch rapport Actuele Sterkte van Dijken. Expertise Netwerk Waterveiligheid.
- ENW, 2012; Technisch rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken. Expertise Netwerk Waterveiligheid.
- Fugro/Deltares, aug 2015; Markermeerdijk Hoorn – Edam - Amsterdam, Uitgangspunten en afwegingen bij toepassing werkwijze Dijken op Veen, 1214-0007-040R20v2, 4 augustus 2015,
- Fugro, aug. 2015; Achtergrondrapport betreffende versterking Markermeerdijk Hoorn-Amsterdam; resultaten gevoeligheidsanalyse Dijken op Veen, 31 Augustus 2015.
- HHNK, feb 2015; Voorlopig Ontwerp Project Plan, februari 2015.
- HHNK, mei 2015; Vergelijk ontwerpmethoden Markermeerdijken, 8 mei 2015.
- HHNK, nov. 2015; Kwaliteitsborging Verkenning Plaxis, Beoordeling rapportage door externe reviews, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, 2 november 2015.
- IVW, 2006; Inspectie VenW Primaire waterkeringen getoetst; Landelijke rapportage toetsing 2006. Inspectie Verkeer en Waterstaat 43, September 2006.
- KNMI, 2014; KNMI '14-Klimaatscenario's voor Nederland, Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie, 2014.
- IenM, 2009; Ministerie van Infrastructuur en Milieu (min I&M), Het Nationaal Waterplan 2009-2015, 2009.
- IenM, 2014; Ministerie van Infrastructuur en Milieu (min I&M), Herziening Nationaal Waterplan, september 2014.
- IenM, dec 2014; Ministerie van Infrastructuur en Milieu (min I&M), Ontwerp Nationaal Waterplan 2, december 2014.

Min. IenM, 2014; Deltaprogramma 2015, Werk aan de delta, de beslissingen om Nederland veilig en leefbaar te houden, september 2014.

Rijkswaterstaat, DONAR, Data Opslag Natte Rijkswaterstaat.

RWS, mei 2015; Rijkswaterstaat, Notitie Peilbeheer en hydraulische randvoorwaarden Markermeer, 18-5-2015.

RWS, juni 2015; Rijkswaterstaat, Plan van aanpak onderzoek pompen Markermeerdijken HWBP2, juni 2015.

RWS, september 2015; Syntheserapport pompen Markermeerdijken HWBP2, Rijkswaterstaat WVL; Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, 15 september 2015.

Schweckendiek, T., Vrouwenvelder, A. C. W. M., & Calle, E. O. F. (2014). Updating piping reliability with field performance observations. *Structural Safety*, 47, 13–23.

Schweckendiek, T. (2014). On Reducing Piping Uncertainties - A Bayesian Decision Approach. Department of Hydraulic Engineering. Delft University of Technology, Delft.

Schweckendiek en van der Krogt, 2015; Schweckendiek T, M. van der Krogt; Verkenning bewezen sterkte Markermeerdijken, Deltares rapport 1221189-000-GEO-0004, december 2015.

SOTA-Engineering, 2015; Pater W.H., Eindige Elementen stabiliteitsanalyse Markermeerdijk, SOTA-Engineering B.V., 31 augustus 2015

Van den Ham, G.A. (2014) Ongedraineerde sterkte uit sonderingen ten behoeve van ontwerp Markermeerdijk. Procedures voor het bepalen van de rekenwaarde. Deltares rapport 1208254-022-GEO-0002.

VenW, 2004; Ministerie van Verkeer en Waterstaat, De veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland. Voorschrift Toetsen op Veiligheid voor de tweede toetsronde 2001-2006 (VTV).

WL, 1998; WL|Delft Hydraulics, Onafhankelijk Onderzoek Markermeer, mei 1998.

Zwanenburg, C. (2014) Dijken op Veen II. DoV werkwijze voor bepaling macrostabiliteit Markermeerdijk. Deltares rapport 1208254-032-GEO-0001.

Zwaneveld, P., 2014; Economisch optimale waterveiligheid in het IJsselmeergebied, CPB Notitie, 14 januari 2014.

Bijlagen

Bijlage 1: Methoden 'bewezen sterkte'

(Zie ook rapportage Schweckendiek en van der Krogt, 2015).

B1.1 Bewezen sterkte met Monte Carlo simulatie

Reliability updating met Monte Carlo simulatie is een zeer intuïtieve methode omdat de stelling van Bayes direct kan worden toegepast door de a-posteriori faalkans (faalkans rekening houdende met de geobserveerde overleefde situatie) te schatten met:

$$P(F|\varepsilon) \approx \frac{\sum(SF < 1 \cap SF_{obs} > 1)}{\sum(SF_{obs} > 1)} \quad (2)$$

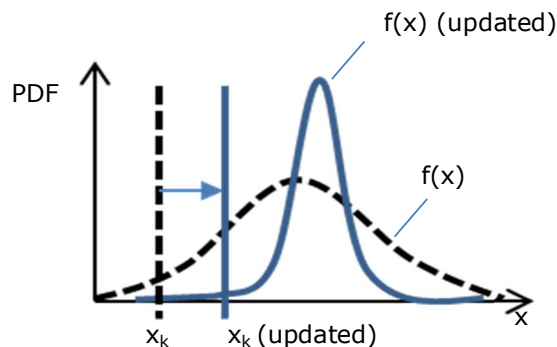
met SF : stabiliteitsfactor toekomst (toets)
 SF_{obs} : stabiliteitsfactor observatie (overleefde situatie).

Dat betekent dat SF wordt berekend met de onderliggende kansverdelingen en parameters horende bij onze inschatting van de onzekerheden voor de toetsituatie en SF_{obs} met de kansverdelingen en parameters voor de observatie.

De crux hierbij is dat de realisaties van de in de tijd constante variabelen (time-invariant) volledig gecorreleerd moeten zijn. Met andere woorden, de eigenschappen die niet veranderen in de tijd maar waarvan we de waarde niet precies kennen krijgen in de simulaties van SF en SF_{obs} dezelfde waarde. We nemen bijvoorbeeld doorgaans aan dat de grondeigenschappen constant zijn in de tijd, althans in de periode tussen observatie en toets. Voorbeelden van onzekerheden die echte variabiliteit in de tijd representeren zijn het freatisch vlak in de dijk t.g.v. regenval of het polderpeil. Voor deze variabelen worden dan ook ongecorrleerde realisaties gebruikt. Zie voor nadere uitleg Schweckendiek (2014).

Berekenen van de a-posteriori faalkans behelst dus simpelweg tellen hoeveel realisaties tegelijk falen in de toekomst terwijl er voor dezelfde parametercombinaties geen falen optrad tijdens de observatie. De realisaties die niet stroken met de observatie worden er bij wijze van spreken uitgefilterd.

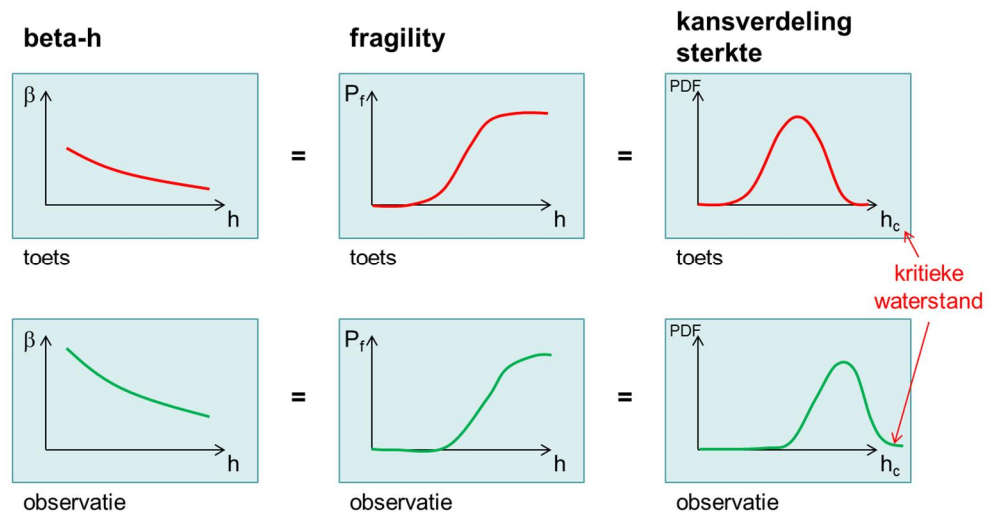
Naast het bijstellen van de faalkans met de informatie van de observatie is het bij deze methode ook mogelijk de (gezamenlijke) a-posteriori kansverdeling van de onderliggende variabelen te verkrijgen. Deze zou mogelijk ook in ontwerpen gebruikt kunnen worden als de betreffende eigenschappen (bijvoorbeeld de sterkte eigenschappen) niet door de versterkingsingrepen worden aangetast (zie illustratie voor de marginale verdeling van één variabele in figuur B1.1).



Figuur B1.1 Illustratie updaten kansverdeling van een sterkte variabele $f(x)$ (bv. ongedraineerde schuifsterkte) en de bijbehorende karakteristieke waarde (x_k)

B1.2 Bewezen sterkte met fragility curves

In de praktijk van faalkansanalyses voor macrostabiliteit is de toepassing van simulatiemethodes (bv. Monte Carlo) tijdrovend en relatief moeilijk te beheersen qua interpretatie van de resultaten. Ook is het variëren van de waterstand en de resulterende waterspanningen in de gebruikte modellen nog niet volledig geautomatiseerd. Daarom worden er vaak conditionele faalkansen berekend voor gegeven waterstanden, al dan niet vertaald in een (conditionele) betrouwbaarheidsindex β . Dat kan zowel voor de toetsituatie (toekomst) worden gedaan als voor de condities tijdens te observatie. Interpolatie tussen te berekende betrouwbaarheidsindices resulteert in een benadering van de fragility curve zoals geïllustreerd in figuur B1.2.



Figuur B1.2: Illustratie equivalentie "beta-h relaties", fragility curves en kansverdeling van de kritieke waterstand (waarbij de dijk instabiel wordt)

De berekende fragility curves (of beta-h relaties) zijn een op een te vertalen in de kansverdeling van de kritieke waterstand, de waterstand waarbij de dijk instabiel wordt (sterkte term).

De stappen in deze methode zijn:

1. Schematiseren toekomst (toets) en observatie
2. Faalkansanalyses voor gegeven waterstanden (fragility curves, beta-h relaties)
3. Monte-Carlo simulatie van de waterstanden en kritieke waterstanden
4. Toepassen Bayes. De a-posteriori faalkans wordt dan:

$$P(F|\varepsilon) = P(h_c < h | h_{c,obs} > h_{obs}) = \frac{\sum h > h_c \cap h_{c,obs} > h_{obs}}{\sum h_{c,obs} > h_{obs}} \quad (3)$$

met h waterstand in de toekomst (toets)
 h_{obs} waterstand overleefd (observatie)
 h_c kritieke waterstand (toets)
 $h_{c,obs}$ kritieke waterstand tijdens observatie

De methode met fragility curves werkt dus in essentie precies als de methode met Monte Carlo simulatie (zie 0), alleen met een overall sterkte verdeling die gebaseerd is op alle onderliggende onzekerheden. In stap 3 is wederom belangrijk dat de realisaties of trekkingen van beide kritieke waterstanden uit de fragility curves volledig gecorreleerd zijn, net als bij de Monte Carlo methode voor de individuele sterkteparameters. Daarmee wordt impliciet aangenomen dat alle onderliggende parameters volledig gecorreleerd zijn in de tijd (en de onzekerheid dus reduceerbaar is). Parameters die juist wel variabel in de tijd zijn moeten in deze methode dan ook in de verschillende schematisaties worden verwerkt waarmee vervolgens de fragility curves worden gegenereerd (bv. freatisch vlak).

Opgemerkt wordt dat in tegenstelling tot de volledige Monte Carlo methode de methode fragility curves in principe alleen van toepassing is voor bestaande situaties (toets).

B1.3 Omgaan met onzekerheden in scenario's

Er zijn een aantal onzekerheden beter of (vooralsnog) alleen met scenario's kunnen worden gemodelleerd:

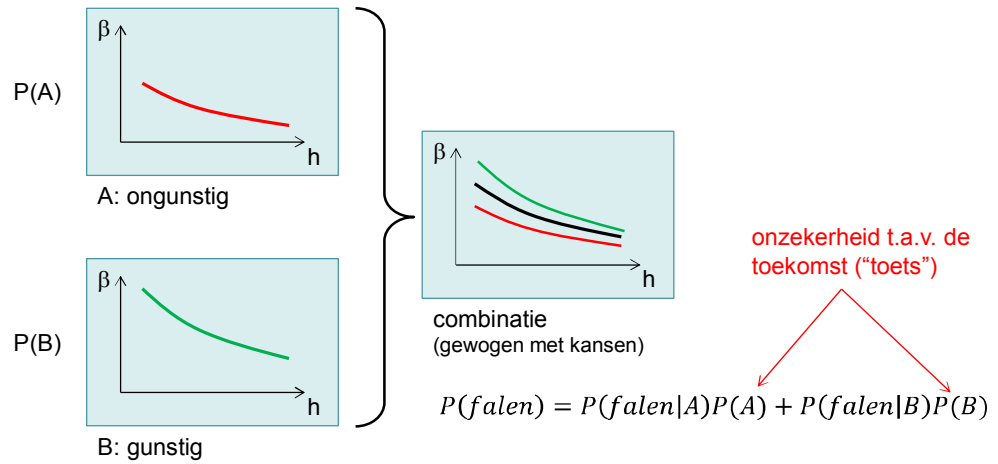
1. De waterspanningrespons in en onder de dijk kan met het beschikbare instrumentarium alleen deterministisch worden gemodelleerd (cq. freatisch vlak, stijghoogterespons in watervoerende lagen en indringingslengte).
2. De onzekerheid in de bodemopbouw (bijvoorbeeld aanwezig van tussenzandlagen of grote veranderingen in laagdiktes) is beter te vatten in scenario's dan in continue verdelingen.

Het omgaan met bodemscenario's is analoog met de bekende theorie van schematiseringonzekerheden (ENW, 2012) en het updaten van de scenariokansen is betrekkelijk eenvoudig (Schweckendiek en Vrouwenvelder, 2014). De uitleg in onderstaande paragrafen is dan ook beperkt tot het nieuwe element in probabilistische bewezen sterkte analyses – het omgaan met waterspanning scenario's.

A-priori faalkans

Stel we hebben twee scenario's voor de toetscondities (toekomst), een ongunstig (conservatief) scenario *A* en gunstig (optimistisch) scenario *B*, met bijbehorende kansen $P(A)$ en $P(B)$. De a-priori faalkans is dan de met de scenariokansen gewogen som van de conditionele faalkansen per scenario (zie ook illustratie met fragility curves in figuur B1.3:

$$P(F) = P(F|A)P(A) + P(F|B)P(B) \quad (4)$$



Figuur B1.3: A-priori fragility curves (beta-h) voor twee waterspanningsscenario's (A en B) en combinatie van de fragility curves en faalkansen

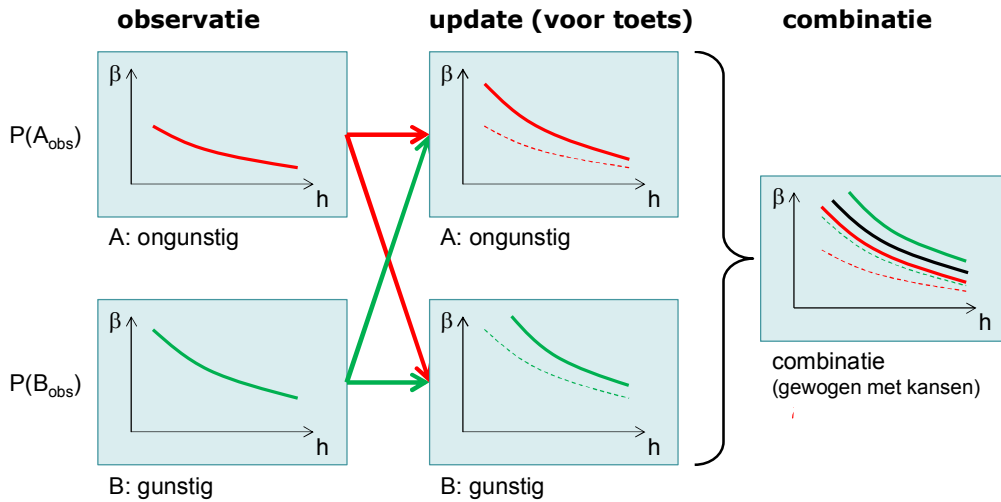
De uitbreiding naar meer scenario's is triviaal. Let wel: Het modelleren in scenario's zou niet nodig zijn als de onzekerheden in de waterspanningen al impliciet in de fragility curves gemodelleerd waren, hetgeen daarom een zeer wenselijke stap voor toekomstige ontwikkelingen is.

Onzekerheden in observatie en a-posteriori faalkans

Net als voor de waterspanningrespons in de toetsituatie kunnen ook onzekerheden omtrent de waterspanningrespons tijdens de observatie (of andere condities zoals de verkeersbelasting) in discrete scenario's worden gemodelleerd. Stel we hebben ook voor de observatie twee scenario's, een ongunstig scenario A_{obs} en gunstig (optimistisch) scenario B_{obs} , met bijbehorende kansen $P(A_{obs})$ en $P(B_{obs})$. Dat betekent dat we een onzekerheid in de overleefde belasting(effecten) hebben, vergelijkbaar met een meetfout. We brengen dus met kans $P(A_{obs})$ belastingeffecten horend bij scenario A_{obs} in rekening en met kans $P(B_{obs})$ belastingeffecten horend bij scenario B_{obs} . Dit doen we voor elk scenario van te toetscondities afzonderlijk, bijvoorbeeld voor scenario A:

$$P(F | A, \epsilon_A) = \frac{P(F|A, \epsilon_A)P(\epsilon_A) + P(F|A, \epsilon_B)P(\epsilon_B)}{P(\epsilon_A) + P(\epsilon_B)} \tag{5}$$

met $\epsilon_A = \{h_{c,obs} > h_{obs} | A_{obs}\}$.



Figuur B1.4: Illustratie van het werken met scenario's voor de waterspanningrespons zowel voor de observatie als voor de toetscondities in een bewezen sterkte analyse

In een Monte Carlo analyse (zowel met fragility curves als met de volledige Monte Carlo aanpak) wordt dit praktisch ingevuld door de realisaties van de kritieke waterstanden tijdens de observatie $h_{c,obs}$ naar rato (cq. met $P(A_{obs})$, $P(B_{obs})$) te trekken.

De a-posteriori faalkans over beide scenario's is wederom het gewogen gemiddelde:

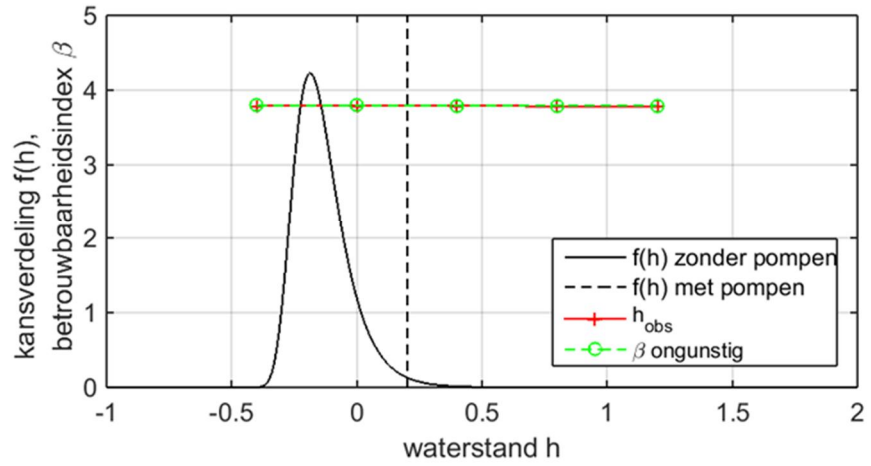
$$P(F) = P(F | A, \varepsilon_A)P(A) + P(F | B, \varepsilon_B)P(B) \quad (6)$$

Zie bijlage A van (Schweckendiek en van der Krogt, 2015) voor details.

B1.4: Analyses faalkans a-priori

Figuur B1.5 en B1.6 bevatten de beta-h relaties en de kansverdelingen van de waterstand met en zonder pompen voor respectievelijk schematisatie 1 en 2. Alle uitkomsten voor schematisatie 3 lijken erg op schematisatie 1, de resultaten zijn dan ook enkel weergegeven in bijlage C van (Schweckendiek en van der Krogt, 2015).

Voor de bodemopbouw van schematisatie 1 wordt het eerder met stabiliteitsfactoren verkregen beeld bevestigd. De conditionele faalkans wordt nauwelijks beïnvloed door de buitenwaterstand vanwege de in paragraaf 3.6 genoemde redenen.

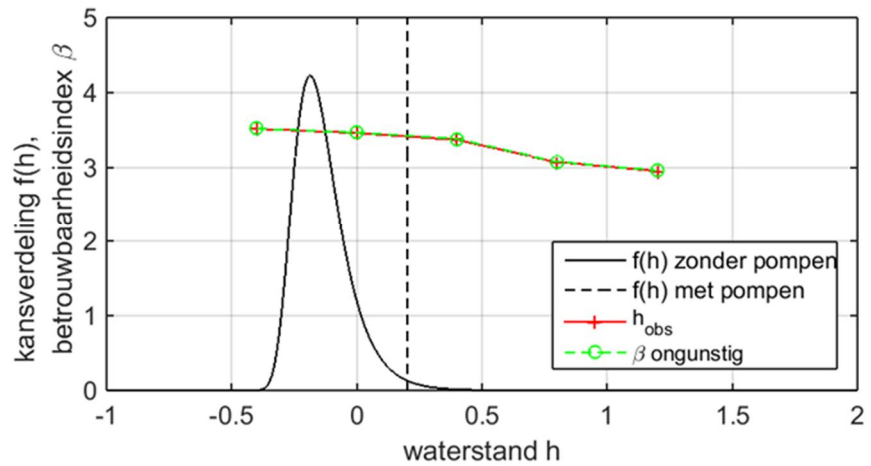


Figuur B1.5: Beta-h relaties voor de waterspanningsscenario's gunstig en ongunstig voor bodemopbouw schematisatie 1, incl. kansverdelingen van de waterstand met en zonder pompen.

Faalkans a-priori op jaarbasis (β)	schematisatie 1 ongunstig	schematisatie 1 gunstig
niet pompen	8e-5 (3.8)	7e-5 (3.8)
wel pompen	8e-5 (3.8)	7e-5 (3.8)

Tabel B1.1: Faalkansen op jaarbasis voor de waterspanningsscenario's gunstig en ongunstig voor bodemopbouw schematisatie 1

Voor bodemopbouw van schematisatie 2 neemt de betrouwbaarheid wel geleidelijk af met de waterstand, ook al is de daling beperkt.



Figuur B1.6: Beta-h relaties voor de waterspanningsscenario's gunstig en ongunstig voor bodemopbouw schematisatie 2, incl. kansverdelingen van de waterstand met en zonder pompen.

Faalkans a-priori op jaarbasis (β)	schematisatie 2 ongunstig	schematisatie 2 gunstig
niet pompen	3e-4 (3.5)	2e-4 (3.5)
wel pompen	3e-4 (3.5)	2e-4 (3.5)

Tabel B1.2: Faalkansen op jaarbasis voor de waterspanningsscenario's gunstig en ongunstig voor bodemopbouw schematisatie 2

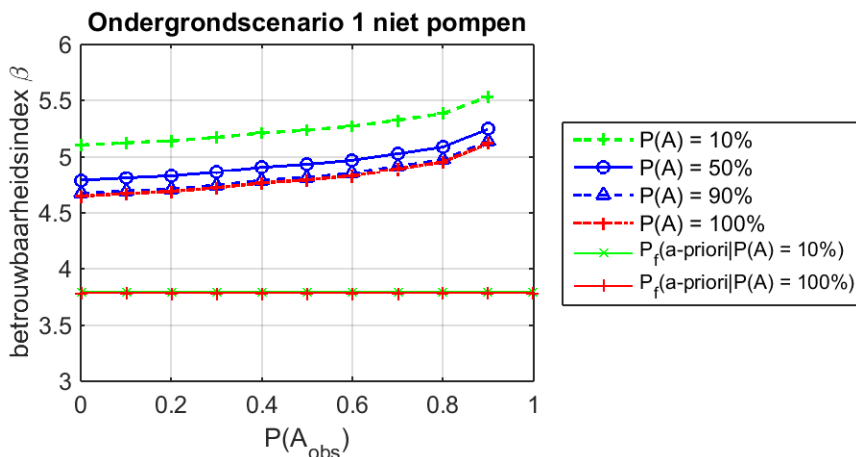
Analyseresultaten Bewezen sterkte met fragility curves

De hieronder getoonde figuren bevatten gevoeligheidsanalyses voor verschillende combinaties van de (waterspanning) scenario kansen voor zowel de toetsituatie ($P(A)$ en $P(B)$) als voor de observatie ($P(A_{obs})$ en $P(B_{obs})$). Een kanttekening bij de resultaten is dat met het aantal gebruikte Monte Carlo realisaties alleen betrouwbaarheidsindices tot 5.5 betrouwbaar berekend konden worden.

In de figuren hieronder staat op de horizontale as de kans op het waterspanningsscenario tijdens de observatie. Bij $P(A_{obs})=1$ zijn we zeker dat het ongunstige scenario van toepassing was, terwijl we bij $P(A_{obs})=0$ zeker zijn dat het gunstige scenario van toepassing was. De verschillende lijnen staan voor verschillende kansen op de waterspanningsscenario's in de toekomst. Op de verticale as staat de a-posteriori betrouwbaarheidsindex na meenemen van de bewezen sterkte informatie. Om de getalswaarden van de betrouwbaarheidsindex in perspectief te kunnen plaatsen: de faalkanseis voor het faalmechanisme macrostabiliteit in het Ontwerpinstrumentarium² (OI2014) voor de Markermeerdijken in het beheersgebied van HHNK (trajecten 13-6 t/m 13-8) ligt grof tussen de $\beta = 4.4$ en $\beta = 4.6$.

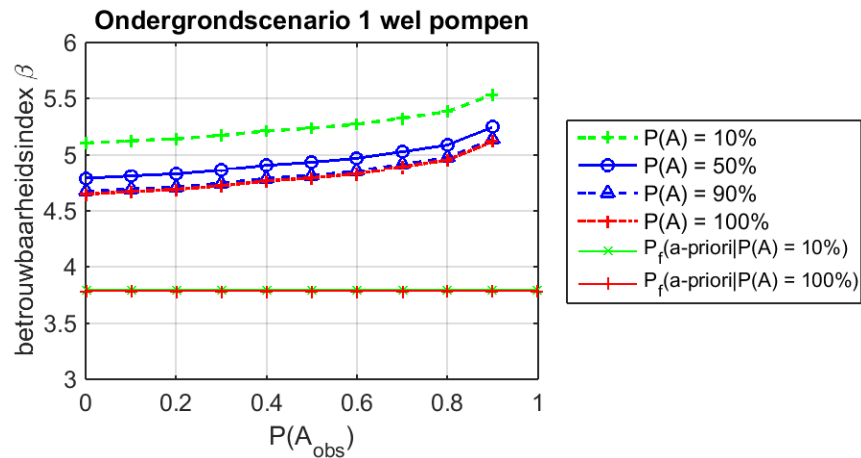
Schematisatie 1 (basis)

Bij schematisatie 1 is het effect van het toepassen van bewezen sterkte op de faalkans groot (orde factor 100). Het effect van bewezen sterkte toont nauwelijks verschil tussen een situatie zonder pompen (figuur B1.7) en met pompen (figuur B1.8). Dat is gezien de ongevoeligheid voor de waterstand ook plausibel.



Figuur B1.7: A-posteriori betrouwbaarheidsindices voor bodemopbouw schematisatie 1 voor de situatie zonder pompen. $P(A)$ is de kans op een ongunstige waterspanningrespons in de toetsituatie, $P(A_{obs})$ is de kans op een ongunstige waterspanningrespons tijdens de observatie.

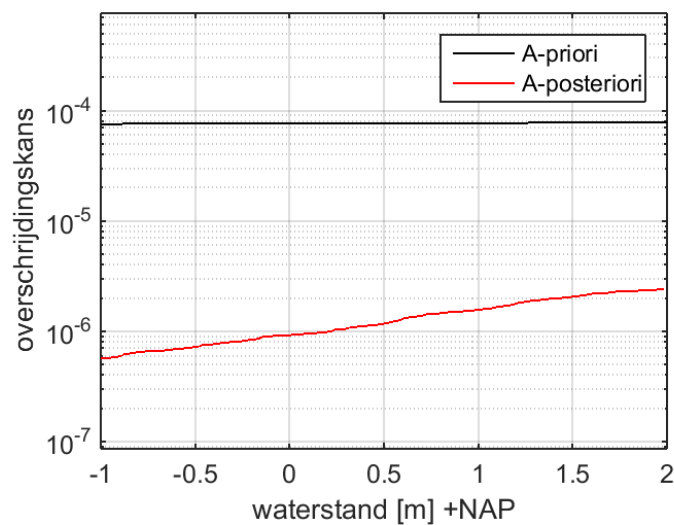
² RWS (2015). Handreiking ontwerpen met overstromingskansen - Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskans-normen, versie OI2014v3, juli 2015.



Figuur B1.8: A-posteriori betrouwbaarheidsindices voor bodemopbouw schematisatie 1 voor de situatie met pompen. $P(A)$ is de kans op een ongunstige waterspanningrespons in de toetsituatie, $P(A_{obs})$ is de kans op een ongunstige waterspanningrespons tijdens de observatie.

Het is mogelijk dat het effect onderschat wordt door het werken in termen van (kritieke) waterstanden bij zeer vlakke fragility curves. Dus voor dijken die extreem ongevoelig zijn voor de buitenwaterstand kan de gebruikte methode tot een onderschatting van het bewezen sterkte effect leiden. Hiervoor is het in vervolgstudies aan te raden om met andere sterktevariabelen te werken (bijvoorbeeld direct met de stabiliteitsfactor).

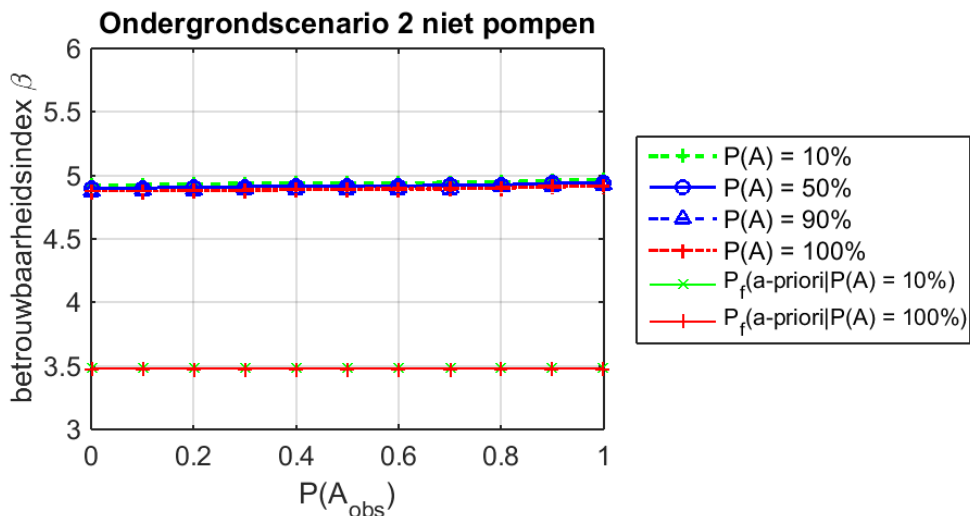
Figuur B1.9 toont de fragility curves voor en na meenemen van bewezen sterkte voor een specifieke combinatie van de scenario-kansen ter illustratie. Terwijl de a-priori curve (zwart) bijna vlak is, laat de a-posteriori curve een lichte helling zien (iets grotere faalkansen bij hogere waterstanden). De helling is echter nog steeds gering (minder dan een orde-grootte verschil over de beschouwde range).



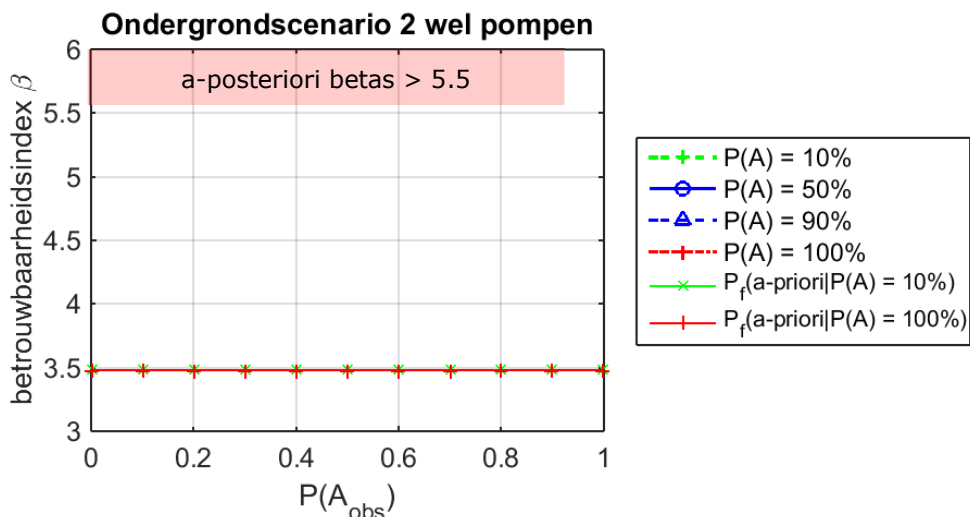
Figuur B1.9: A-priori en a-posteriori fragility curve voor bodemopbouw schematisatie 1 voor de situatie zonder pompen met $P(A) = 100\%$ en $P(A_{obs}) = 50\%$.

Schematisatie 2 (tussenzandlaag)

Ook bij schematisatie 2 is het effect groot (factor orde 100 of meer). Er is hier wel een verschil te zien tussen pompen en niet pompen door de hogere gevoeligheid voor de waterstand. De a-posteriori kansen voor wel pompen zijn lager dan behorende bij een betrouwbaarheidsindex van 5.5. Hierbij is op te merken dat deze schematisatie met tussenzandlaag als een lokaal fenomeen wordt gezien. Ook de kans dat de tussenzandlaag daadwerkelijk in contact staat met het Markermeer wordt als zeer laag ingeschat. Bovendien is het mogelijk deze tussenzandlagen met nader (grond)onderzoek in kaart te brengen of uit te sluiten.



Figuur B1.10: A-posteriori betrouwbaarheidsindices voor bodemopbouw schematisatie 1 voor de situatie zonder pompen. $P(A)$ is de kans op een ongunstige waterspanningrespons in de toetssituatie, $P(A_{obs})$ is de kans op een ongunstige waterspanningrespons tijdens de observatie.



Figuur B1.11: A-posteriori betrouwbaarheidsindices voor bodemopbouw schematisatie 1 voor de situatie met pompen. $P(A)$ is de kans op een ongunstige waterspanningrespons in de toetssituatie, $P(A_{obs})$ is de kans op een ongunstige waterspanningrespons tijdens de observatie. De a-posteriori kansen hebben niet kunnen worden berekend omdat de betrouwbaarheidsindex groter bleek te zijn dan 5.5.

Bijlage 2: Advies ENW september 2015 (fase 1 pompenonderzoek)

Ministerie van Infrastructuur en Milieu
T.a.v. de Directeur-Generaal Ruimte en Water
de heer drs. P.R. Heij
Postbus 20901
2500 EX DEN HAAG



Contactpersoon ir. D.P. de Bake	Telefoonnummer 06 30 38 91 43
Datum 4 september 2015	Bijlage(n)
Ons kenmerk ENW-15-13	Uw kenmerk IENM/BSK-2015/124020
Onderwerp Advies onderzoek pompen t.b.v. de Markermeerdijk	Afschrift aan

Geachte heer Heij,

In uw brief van 16 juli 2015, met kenmerk IENM/BSK-2015/124020, heeft u het ENW gevraagd om advies over de effecten van peilverlaging door pompen op de noodzaak tot en de mate van versterking van de Noord-Hollandse Markermeerdijk. In opdracht van DGRW heeft Rijkswaterstaat WVL in samenwerking met het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier een onderzoek naar de effectiviteit en de effecten van peilverlaging uitgevoerd, met als onderzoeksvragen:

1. In hoeverre kan met pompen op de Houtribdijk de hydraulische belasting (MHW) van het Markermeer significant verlaagd worden (met 30 tot 90 cm).
 - a. Welke pompcapaciteit is nodig?
 - b. Wat is het effect op het MHW?
 - c. Wat zijn de kosten voor de pompen (gehele levenscyclus, inclusief onder andere beheer en onderhoud en energiekosten)?
2. Wat is het effect van een MHW-verlaging op het ontwerp van de Markermeerdijken?
 - a. Kan daarmee een minder ingrijpend ontwerp worden gerealiseerd?
 - b. Wat zijn de financiële baten (primair van de Markermeerdijken tussen Hoorn en Amsterdam, maar wellicht ook elders langs het Markermeer).

De resultaten van dit onderzoek zijn gerapporteerd in een reeks rapporten (zie referenties). Dit advies is gebaseerd op een gedetailleerde review van het syntheserapport. Op enkele aspecten is informatie uit andere achtergrondrapporten benut, maar een volledige beschouwing en review van al het achtergrondmateriaal is niet uitgevoerd. De concrete vragen die u in deze gesteld heeft worden hieronder beantwoord en voorzien van een advies.

Algemeen

Het ENW heeft waardering voor het werk dat in korte tijd is verricht. Het ENW is van mening dat met de uitgevoerde studies en de synthese daarvan door Rijkswaterstaat [ref. 8] een beter inzicht is ontstaan in het effect van pompen op de maatgevende waterstand in het Markermeer.

De consequenties van diverse uitgangspunten voor het dijkontwerp zijn onderzocht. Zo heeft het Hoogheemraadschap gekeken naar de gevolgen van de nieuwe normering, het toepassen van de kennis uit Dijken op Veen en de mogelijkheden rondom bewezen sterkte. Dit heeft echter nog niet geleid tot een eenduidig beeld van de stabiliteit van de dijken en de benodigde dijkversterking. Daardoor zijn de onzekerheden in de kosten van de dijkversterking nog aanzienlijk (expert schatting orde tientallen procenten). Het ENW onderschrijft in dit kader het voornemen van het Hoogheemraadschap om tot verdere optimalisatie van het ontwerp te komen in de anderhalf jaar die nog resteert voor de planstudie.

Geotechnische optimalisaties zijn naar de mening van het ENW zonder meer aan te bevelen, aangezien er ook met pompen een dijkversterkingsopgave lijkt te blijven bestaan. Over hoe groot die resterende opgave is, kan het ENW op basis van de beschikbare informatie geen uitspraak doen. Het ENW adviseert om in elk geval de geotechnische inzichten vanuit Dijken op Veen, de nieuwe normering en bijbehorende optimalisatie van de faalkansbegroting nader en in samenhang te bekijken. In dit licht verwijst het ENW naar het advies over normering waarin is aangegeven dat het verkennen van het effect van nieuwe inzichten in projecten in de planfase wenselijk is .

De belangrijkste factor die onderscheidend zou kunnen werken tussen de geplande dijkversterking en de pompenoptie betreft "bewezen sterkte". Het ENW acht het mogelijk dat in rekening brengen van bewezen sterkte in combinatie met pompen tot een substantiële reductie van de dijkversterkingsopgave leidt.

Aanwijzing hiervoor is het feit dat de huidige Markermeerdijken in 1998 reeds gedurende een week een waterstand van NAP + 0,2 m hebben doorstaan. Dit is ook de waterstand die bij de optie met pompen als maatgevend zou gelden. Bij hogere waterstanden die zonder pompen kunnen optreden zal de invloed van reststerkte op het ontwerp veel minder zijn.

Of pompen in combinatie met bewezen sterkte vanuit een oogpunt van kosteneffectiviteit daadwerkelijk een kansrijke optie is moet door experts op dit gebied op basis van een verkennende analyse kunnen worden aangegeven. Opgemerkt wordt dat de situatie in 1998 een eenmalige gebeurtenis is en dat op basis daarvan vooralsnog niet valt te concluderen dat de kering in de toekomst onder vergelijkbare omstandigheden niet zal falen. Daarom wordt aanbevolen om een volledig probabilistische bewezen sterkte aanpak te volgen, in lijn met de aanbeveling van de studie door Fugro voor het Hoogheemraadschap. Het ENW acht de stand der techniek zodanig dat een dergelijke verkennende analyse binnen enkele maanden haalbaar is, mits de daarbij nodige experts beschikbaar zijn.

Samenvattend acht het ENW het mogelijk om in enkele maanden een volgende stap te maken waardoor de onzekerheden in de versterkingsopgave met en zonder pompen sterk worden gereduceerd. Met deze inzichten, met name op het gebied van bewezen sterkte, is het naar verwachting mogelijk om het dijkontwerp significant te optimaliseren en om een meer volledige afweging van de strategie met pompen te maken.

In dit kader wordt aanbevolen om de strategieën met en zonder pompen te vergelijken op basis van een bredere afweging van kosten en baten, waarin naast de (nog) benodigde dijkversterking ook aspecten zoals LNC-waarden en besparingen

op andere toekomstige dijkversterkingen rondom het Markermeer en eventueel het IJsselmeer worden meegenomen.

Het ENW beveelt aan om – los van het project Markermeerdijken – structureel meer kennis te ontwikkelen op het gebied van bewezen sterkte, dijken op veen, en onzekerheden in macrostabiliteit en de effecten van nieuwe normering en de gehanteerde faalkansbegroting. De hier gesignaleerde problemen komen op veel meer plaatsen voor dan alleen bij de Markermeerdijken. Het ENW adviseert daarom om in enkele representatieve projecten verkenningen uit te voeren. Daarnaast beveelt het ENW aan om verdiepende kennisontwikkeling op dit gebied op te nemen in de Kennisagenda..

Antwoord op de specifieke vragen

1. Zijn alle aspecten die van belang zijn om het effect van een door middel van pompen beheerst Markermeerpeil op het dijkontwerp te kunnen beoordelen meegenomen?

De gevolgde redeneerlijn (te realiseren peilverlaging > benodigde pompcapaciteit > kosten pompen > effect op dijkontwerp > kostenbesparing op dijkversterking > kosteneffectiviteit) is in principe logisch en dit betekent dat de belangrijkste aspecten zijn bekeken. Op de gehanteerde uitgangspunten en uitwerking heeft het ENW echter de nodige op- en aanmerkingen (zie ook de antwoorden op de volgende vragen).

VOPP als referentie

Zoals ook al aangegeven door de leden van de Adviesgroep, kunnen vraagtekens worden gezet bij de keuze van het VOPP als referentie. Vanuit praktisch oogpunt is die keuze evenwel begrijpelijk, omdat dit het enige beschikbare, uitgewerkte ontwerp is.

2. Kunt u de in het onderzoek gebruikte methoden onderschrijven?

De gebruikte methoden passen in een verkenning op hoofdlijnen. Echter, het ENW kan de gebruikte methoden niet op alle punten onderschrijven. Per deelaspect wordt dit hieronder nader toegelicht.

Meerpeilstatistiek

Voor het berekenen van de meerpeilstatistiek is gebruik gemaakt van het probabilistische model DEZY. Dit model is ontwikkeld in het kader van het project Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer IJsselmeergebied (ISWP). Het ENW is gevraagd om met deze studie mee te kijken om aan het einde (voorzien in 2018) over de onderdelen te adviseren.

Het DEZY-model is ten behoeve van de hier beschouwde studie uitgebreid met het Markermeer en Noordzeekanaal. Omdat het op dit moment om een nog niet volledig getoetste methode gaat, kan het ENW toepassing ervan voor de meerpeilstatistiek niet zonder meer onderschrijven. Voor een eerste verkenning van de mogelijkheden van peilverlaging geeft de benadering echter voldoende inzicht.

Weliswaar is nog een aantal verbeteringen van dit model denkbaar, zoals het meenemen van de invloed van de peilverlaging op de scheefstand (in het syntheserapport al aangemerkt als verbeterpunt) en op de mogelijke resonantie in de scheefstand (geschatte tijdschaal enkele uren), maar de invloed daarvan op de stabiliteit van de dijk zal gering zijn. Het valt dan ook niet te verwachten dat dit tot andere conclusies zal leiden ten aanzien van de kosteneffectiviteit van pompen.

De conclusies van het syntheserapport lijken uitsluitend te zijn gebaseerd op de hoogste waterstanden. Met het oog op de belangrijke rol van geotechnische faalmechanismen zou de gehele kansverdeling van de waterstand, inclusief onzekerheden daarin, in een probabilistische beschouwing moeten worden meegenomen.

Pompen

Wat in de documentatie wordt aangeduid als 'pompen' zijn volgens de door Rijkswaterstaat verschaft informatie in feite pompstations met een aantal kleinere pompen, elk met een capaciteit van ca. 20 m³/s. Rijkswaterstaat acht de kans dat deze pompenstelsels integraal falen zo klein, dat deze buiten beschouwing kan blijven. Het gaat hier echter om zeer zeldzame gebeurtenissen en techniek is net als natuur nu eenmaal behept met onzekerheden. Wanneer pompen als optie in het ontwerpproces wordt meegenomen, adviseert het ENW het standpunt van Rijkswaterstaat nader te onderbouwen. Als pompen lang stil staan kan hun bedrijfszekerheid immers moeilijker worden gegarandeerd. Ze zullen dan ook regelmatig moeten worden ingezet of proefdraaien, zonder dat de maatgevende omstandigheden zich voordoen.

Bij pompen is de inzetfrequentie en draaiduur ten opzichte van de investering relevant voor de economische rentabiliteit. Op deze aspecten wordt niet ingegaan. Een punt van aandacht daarbij is de snelle economische veroudering van het systeem mede in het licht van technische ontwikkelingen (zie de pompen in de Philipsdam, die al na enkele decennia aan vervanging toe zijn).

Dijkontwerp

Het VOPP is gebaseerd op de oude normering en de bijbehorende uitgangspunten voor het ontwerp. In lijn met andere adviezen beveelt het ENW aan de consequenties van de nieuwe normering op het definitieve ontwerp in beeld te brengen en daadwerkelijk over te stappen als daar voldoende aanleiding voor is. Zie hiervoor ook de ENW-adviezen over de nieuwe normering (ENW-15-10), het Ontwerpinstrumentarium 2014 versie 3 (ENW-15-11) en Dijken op Veen/ongedraineerd rekenen.

Afweging van kosten en baten

Zie het antwoord op vraag 4.

3. Zijn de conclusies met betrekking tot het effect van pompen op de MHW's en het effect van een MHW-verlaging op het dijkontwerp goed onderbouwd?

De uitgevoerde verkenningen geven naar verwachting een robuust beeld van het effect van pompen op de maatgevende waterstanden. Het ENW adviseert wel het effect van pompen op andere toekomstige dijkversterkingen langs het Markermeer nader uit te werken in de komende maanden, omdat dit een relevant onderdeel in de beleidsafweging kan zijn. Ook dient op termijn de betrouwbaarheid van het pompensysteem meegenomen te worden – ook in de kansverdeling van optredende waterstanden in het Markermeer.

Het effect van waterstandsverlaging op dijkontwerp is in korte tijd met beschikbare methoden verkend, met het VOPP als referentieontwerp. Echter, er is nog geen eenduidig beeld van de stabiliteit van de dijken en de benodigde dijkversterking. Daarmee zijn de onzekerheden in de kosten van de dijkversterking nog aanzienlijk. De invloeden van dijken op veen en nieuwe normering lijken op grond van de

aangereikte informatie relatief beperkt (orde 10 – 20%). De effecten van een andere faalkansbegroting en bewezen sterkte zijn nog in beperkte mate uitgewerkt en verdienen nadere aandacht. Met name bewezen sterkte zou een substantiële invloed kunnen hebben op het veiligheidsoordeel van de dijken. Bij nadere verkenning van bewezen sterkte wordt aanbevolen om gebruik te maken van een volledig probabilistische aanpak.

4. Zijn de kosten en baten van de inzet van pompen op een verantwoorde wijze vergeleken met de kosten en baten van een versterking van de dijken zonder de inzet van pompen?

In de synthesestudie is ervoor gekozen om, via een KEA, de kosten die nodig zijn voor het verlagen van het maatgevende meerpeil (met 30, resp. 60 en 90 cm) te vergelijken met de baten (in termen van besparingen op dijkversterking) die deze verlaging oplevert ten opzichte van het VOPP van het project Markermeerdijken. Het betreft hier dus kosten en baten voor het Rijk en het Hoogheemraadschap. Met deze beperkte scope leidt de KEA tot een negatief saldo tussen de 50 - 200 miljoen euro, wat zonder bijkomende argumenten zou leiden tot afwijzing van de optie pompen.

In het syntheserapport zijn de kosten van pompen en dijkversterking met bandbreedtes weergegeven. Het ENW constateert dat er met name in de schattingen van de kosten van dijkversterking substantiële onzekerheden zitten (orde tientallen procenten). Een belangrijke onzekerheid die onderscheidend kan werken tussen de opties pompen en dijkversterking betreft de bewezen sterkte. Zoals eerder aangegeven lijkt een nadere verkenning hiervan gewenst.

Ten behoeve van de afweging kunnen strategieën met en zonder pompen vergeleken worden op basis van kosten van pompen en dijkversterking, effecten op LNC-waarden, en mogelijke effecten op reductie van andere toekomstige dijkversterkingen rondom het Markermeer, en andere relevant effecten. Een samenvattend overzicht van deze voor de beleidsafweging relevante aspecten van de diverse alternatieven is nog niet opgenomen in de rapportages. In bijlage 1 is een aantal mogelijke baten (en kosten) opgenomen van pompen die in de nadere uitwerking aandacht zouden kunnen krijgen.

Indien de optie met pompen zou worden verkozen, adviseert het ENW om op langere termijn een meer uitgebreide systeemstudie uit te voeren waarin de effecten op het hele IJsselmeergebied worden meegenomen.

5. De invloed van pompen op het ontwerp van de Markermeerdijken is onderzocht met de huidige normering en zonder rekening te houden met dijken op veen. In een vervolgstap zal het hoogheemraadschap de invloed van de nieuwe normering en dijken op veen in beeld brengen. Kunt u deze werkwijze om tot een conclusie te komen over de effectiviteit van de inzet van pompen om de dijkversterkingsopgave te beperken onderschrijven?

Het ENW is van mening dat het voor een goede besluitvorming inderdaad noodzakelijk is om de effecten van de nieuwe normering en Dijken op Veen in beeld te brengen, waarbij wordt aangetekend dat het ontwerpinstrumentarium nog niet is uitgekristalliseerd en er dus gedetailleerd zal moeten worden ontworpen. Dit is in lijn met de ENW-adviezen over normering (ENW-15-10) en OI2014v3 (ENW-15-11) van begin september 2015. In het normeringsadvies wordt aangegeven dat het verkennen van het effect van nieuwe inzichten in projecten in de planfase wenselijk is.

6. Welke overwegingen zouden in dit geval in een afweging tussen peilbeheersing met pompen of dijkversterking een rol moeten spelen?

Deze vraag is grotendeels al beantwoord in het voorgaande advies. De belangrijkste aanbeveling betreft het meenemen van bewezen sterkte. Daarnaast acht het ENW het verstandig om enkele aanvullende zaken beter in beeld te brengen. Daarbij gaat het onder meer om het meenemen van nieuwe inzichten (dijken op veen, normering) op de dijkversterking, de betrouwbaarheid van pompen, en het effect van pompen op andere dijkversterkingen.

Slotopmerking

Dit advies is in zeer korte tijd tot stand gekomen en is voornamelijk gebaseerd op het syntheserapport [ref. 8] en voor deelaspecten op de beschikbare geotechnische rapportage. Daarbij is de problematiek beschouwd vanuit de techniek en de daarmee samenhangende kosten en baten. Het ENW realiseert zich dat bij de uiteindelijke afweging van de pompenvariant ook andere invalshoeken van belang zijn en adviseert dan ook deze technische informatie te integreren in een bredere beleidsanalyse.

Ik vertrouw erop u zo voldoende te hebben geadviseerd.

Hoogachtend,

Ir. G. Verwolf

Voorzitter van het Expertise Netwerk Waterveiligheid

Referenties

1. Rijkswaterstaat-WVL en Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier. Plan van aanpak pompen Markermeerdijken, versie 0.9, 17 juni 2015.
2. HKV Lijn in Water. Probabilistisch model frequentielijnen IJsselmeergebied. Hoofdrapport van model DEZY. PR3013.10, mei 2015.
3. HKV Lijn in Water. Overzicht resultaten rekenstap 2 met model DEZY. Memo PR3051.10, 26 juni 2015.
4. Royal Haskoning DHV. Effect pompen in Houtribdijk op ontwerp Markermeerdijken. Rapport RDCAB5488R001F02, 9 juli 2015.
5. Effect pompen Markermeer op versterkingsopgave. 27 juni 2015
6. Royal Haskoning DHV. Vooruitblik gevolgen plaatsen pompen in Houtribdijk op ontwerp Houtribdijk. Memo 9X4628-1 07_NOOI 2_n185729_f, 30 juni 2015.
7. Rijkswaterstaat. Peilbeheer en hydraulische randvoorwaarden van het Markermeer. Notitie t.b.v. HWBP2-project Markermeerdijken, versie 1.0, 18 mei 2015.
8. Rijkswaterstaat en Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier. Syntheserapport pompen Markermeerdijken HWBP2, versie 10 augustus 2015.
9. Technisch Achtergronddocument Markermeerdijken Hoorn – Amsterdam nr 15.8713 dd 1 mei 2015 versie 2 status concept. Opgesteld door HHNK
10. Vergelijk ontwerpmethoden Markermeerdijken Effectanalyse OI2014, nr AB5488-111-124, dd 8 mei 2014, versie 0.8 status definitief, opgesteld door HHSK, RHDHV en Arcadis

Bijlage 3: Literatuur 'Bewezen sterkte'

Voor bewezen sterkte analyses gaat het over het algemeen om falen in de toekomst waarbij rekening wordt gehouden met overleefde belastingen in het verleden (observatie). Voor hoogwaterveiligheid zijn in Nederland verschillende methodes ontwikkeld om 'bewezen sterkte' toe te passen.

B3.1 Kort overzicht van methodes:

1. *Deterministische methodes zoals beschreven in het TR Actuele Sterkte van Dijken (ENW, 2009)*

'De deterministische methode 'Bewezen Sterkte' is een geavanceerde toetsmethode. Deze methode komt erop neer dat de berekende stabiliteitsfactor van een dijk bij de maatgevende hoogwaterstand opgevaardeerd wordt op grond van het overleefd hebben van een historische hoogwaterstand.

De berekende stabiliteitsfactor wordt gecorrigeerd op grond van voorkennis omtrent het gedrag van de dijk bij in het verleden aantoonbaar opgetreden hoge waterstanden. De methode gaat ervan uit dat de schijnbare tegenstelling tussen overleven van een historisch hoogwater en een voor die situatie berekende stabiliteitsfactor met een waarde kleiner dan 1,0 geheel te wijten is aan een te conservatieve inschatting van de schuifsterkte eigenschappen.'

2. *Bayesian networks in levee system reliability - making use of proven strength. (Kathryn Roscoe, 2015)*

'In deze methode worden modelresultaten voor faalkansen verbeterd door intuïtie en observaties mee te tellen. Door gebruik te maken van observaties en deze toe te voegen aan het Bayesian network kunnen verwachte faalkansen bijgesteld worden. De impact hiervan kan erg groot zijn. Observaties geven inzicht in systemen en modellen.'

3. *Volledig probabilistische reliability updating methodes (zie bv. Schweckendiek en Vrouwenvelder, 2014)*

Zie hoofdstuk 3 en bijlage 1 dit rapport.

4. *Probabilistische inverse analyse Bewezen sterkte (Verkenning Bewezen Sterkte Markermeerdijken, Timo Schweckendiek, Mark van der Krogt, 2015)*

Zie hoofdstuk 3 en bijlage 1 dit rapport.

5. *POV-Macro stabiliteit, Hoogwaterbeschermingsprogramma (Inhoudelijk Plan van aanpak deelonderzoek 'Beter benutten actuele sterkte')*

'Hypothese of doelstelling is dat met bestaande rekentechnieken en in de POV-M te ontwikkelen technieken in combinatie met gerichte monitoring (waaronder aanvullend terrein- en laboratoriumonderzoek), de actuele sterkte van dijken, met betrekking tot het faalmechanisme macrostabiliteit, beter kan worden bepaald. Met deze te ontwikkelen werkwijze wordt meer recht gedaan aan de werkelijke sterkte van dijken.

Doel van het onderzoek is om de onzekerheden te verkleinen. Er bestaat namelijk een grote kans dat de opgave verkleind kan worden of dat de dijkversterking kan worden versimpeld qua techniek. Om de doelstelling te bereiken zijn een aantal stappen voorzien waarbij veelal onderscheid kan worden gemaakt in stappen die de sterkte of de belastingen betreffen:

1. Verkleinen onzekerheden in ondergrond opbouw, parameters en waterspanningen en opwaarderen van de sterkteparameters.

2. Toepassen beter berekeningsmodel (Eindige Elementen Methode / geavanceerder fysisch model) ter opwaardering van de macrostabiliteit.
3. Toepassen bewezen sterkte technieken.
4. Proefbelasten van de waterkering in combinatie met bewezen sterkte technieken.
5. Ontwerpen van een alternatieve principe dijkversterkingsmaatregel, voor dijktrajecten die met stappen 1 t/m 4 niet kunnen worden goedgekeurd.'

B3.2 Overzicht van principes waarmee 'bewezen sterkte' kan of moet uitsluiten

Technisch Rapport Actuele Sterkte van Dijken (ENW, 2009):

'In theorie kan een dijk ten aanzien van de binnenwaartse macrostabiliteit zondermeer op basis van bewezen sterkte worden goedgekeurd indien:

- Het verloop van het historisch opgetreden hoogwater het toet hoogwater geheel omhult (dus hoger was en langer heeft geduurd).
- De dijk het historisch opgetreden hoogwater zonder noemenswaardige schade heeft gekeerd.
- De dijk zelf alsmede het invloed gebied van de dijk sinds het historisch opgetreden hoogwater geen veranderingen hebben ondergaan die de stabiliteit mogelijk in ongunstige zin hebben beïnvloed. Hierbij valt onder andere te denken aan bodemdaling, polderpeilverlaging, veranderende intreeweerstand enz.
- Al deze gegevens met voldoende betrouwbaarheid kunnen worden vastgesteld.

In de praktijk zal deze theoretisch optimale situatie vrijwel niet voorkomen. Het is eigenlijk uitgesloten dat zonder nadere analyses aangetoond kan worden dat de sterkte van een dijk voldoet op basis van bewezen sterkte. Er zullen altijd wel één of meerdere tegenvallers aan het licht komen. Het is mogelijk wel aannemelijk te maken dat de sterkte van een dijk voldoet op basis van bewezen sterkte. Zowel de kennis als een besluit van ENW ontbreken over de scheidslijnen tussen aantoonbaar, aannemelijk en onvoldoende gegevens. Om deze reden wordt ervan uitgegaan dat bewezen sterkte aantoonbaar moet zijn.

Indien bewezen sterkte niet aantoonbaar is zal een nadere (rekenkundige) analyse noodzakelijk zijn.'

Oude Zuiderzeedijken hebben een goede staat van dienst, Dienst weg- en waterbouwkunde, 2001

'Over bewezen sterkte kan alleen iets gezegd worden als voldoende informatie bekend is over de toestand van de dijk toen en nu en over de ooit opgetreden extreme waterstand en de huidige maatgevende waterstand. Met bewezen sterkte wordt bedoeld de sterkte die de dijk bewezen heeft te hebben. Het bewijs kan bijvoorbeeld geleverd worden door een proefbelasting die de dijk ooit heeft ondergaan en die vergelijkbaar is met de belasting waarop de dijken nu berekend moeten worden zonder dat de dijk noemenswaardige schade opliep. De dijk heeft dan bewezen sterk genoeg te zijn.

Om iets te kunnen zeggen over de bewezen sterkte van een dijk moet aan drie voorwaarden worden voldaan:

- De dijk moet in het verleden een extreme waterstand zonder schade overleefd hebben. Als de dijk geen extreme waterstand heeft meegemaakt of deze niet zonder schade heeft overleefd heeft de dijk niet bewezen sterk te zijn.
- De dijk moet er nu nog net zo bijliggen als tijdens de overleefde extreme waterstand. Indien de dijk sinds de overleefde extreme waterstand is aangepast

is geen sprake meer van dezelfde dijk als tijdens de extreme waterstand en heeft de huidige dijk niet bewezen sterk te zijn.

- De in het verleden opgetreden extreme waterstand moet vergelijkbaar zijn met de nu geldende maatgevende waterstand. Indien de in het verleden opgetreden extreme waterstand anders is dan de huidige maatgevende waterstand heeft de dijk niet bewezen sterk genoeg te zijn om aan de nu geldende wettelijke veiligheidseis te voldoen.'

B3.3 Nadere uitwerking methode POV-Macrostabieleit, Hoogwaterbeschermingsprogramma (uit 'Inhoudelijk Plan van aanpak deelonderzoek 'Beter benutten actuele sterkte')

Onderstaand zijn de te doorlopen stappen in de POV-Macrostabieleit uitgewerkt.

'Stap 1: Verkleinen onzekerheden in ondergrond opbouw, parameters en waterspanningen en opwaarderen van de sterkteparameters.

- Schematisatie ondergrond:
Verwachting is dat de ondergrondopbouw, onder andere door het vermeende zijdelingse wegpersen van de slappe lagen onder de dijk, gunstiger is dan tot op heden is aangehouden. Als meer stevig materiaal ter plaatse van de binnenteen aanwezig is, is dit een gunstig uitgangspunt voor macrostabieleit.
- Parameters:
Verwachting is dat de parameters van de ondergrond (met name de sterkte) hoger zijn dan tot op heden is aangehouden. Ook dient rekening te worden gehouden met zowel gedraineerd als ongedraineerd materiaalgedrag (als dit in 2017 wordt ingevoerd wordt dit de norm).
Met gericht laboratoriumonderzoek worden onzekerheden in de parameters van de ondergrond geminimaliseerd. Hierbij wordt naast het uitvoeren van ko-CRS, tri axiaal- en DSS-proeven (ook in de binnenteen van de dijk) ook gedacht aan het uitvoeren van sterkteproeven op grote grondmonsters met het doel het vaststellen (verkleinen) van de invloed van schaaffecten op de rekenwaarde van de sterkte-eigenschappen (in ieder geval voor veen). Uit de triaxiaalproeven serie op grote veenmonsters uit Uitdam (en voor de stadswallen te Gorkum) bleek namelijk dat de spreiding in resultaten duidelijk kleiner was dan bij conventionele proeven. Dit kan worden verklaard door herverdeling over sterkere en zwakkere delen in het monster. Langs een werkelijk optredend glijvlak treedt er eveneens uitmiddeling langs sterke en zwakke delen van het glijvlak op. Dit wekt de indruk dat het gebruiken van de spreiding die in conventionele proeven wordt gevonden bij het bepalen van een karakteristieke ondergrenswaarde een conservatieve benadering is, voor veen. De indruk bestaat dat dit ook voor grote DSS proeven geldt. Dit dient echter te worden nagegaan.
Verwachting is ook dat door de spanningsrotatie de sterkte van met name het materiaal nabij de binnenteen, in de richting loodrecht op de dijk, groter is dan evenwijdig aan de dijk (zie ook stap 2). Dit omdat de grond in de richting loodrecht op de dijk meer is voorbelast dan parallel aan de dijk. Met de DSS proeven (klein en groot) kan deze invloed (worden onderzocht) door proeven af te schuiven in de richting loodrecht op en evenwijdig aan de dijk. (Hiervoor is het nodig dat van de grondmonsters wordt geregistreerd in welke richting ten opzichte van de dijk deze zijn gestoken).
Ter bepaling van de ongedraineerd materiaal parameters wordt ook gedacht aan het uitvoeren van in situ metingen als sonderingen, bol-sonde en field-vane metingen.
- Waterspanningen:

Verwachting is dat het freatisch vlak in deze (over het algemeen) kleidijken nauwelijks verandert als gevolg van de hoogte en tijdsduur van de buitenwaterstand. Hetzelfde geldt voor de stijghoogte in de watervoerende zandlagen omdat de rivier waarschijnlijk niet insnijdt in deze zandlagen en de stijghoogte vanwege kwel onder normale omstandigheden zeer laag is. Deze hypothese dient te worden bevestigd. Dit aantonen vereist een gericht monitoringsprogramma waarmee de waterspanningen in (met name het freatisch vlak) en onder de dijk (met name de stijghoogte in watervoerende zandlagen) worden gemeten en in relatie worden gebracht met de hoogte en tijdsduur van de buitenwaterstand en de hoeveelheid en intensiteit van (hevige) neerslag. Hierbij wordt opgemerkt dat de Stormvloedkering in de Hollandse IJssel met enige regelmaat gesloten wordt. Monitoring van de waterspanningen tijdens deze gebeurtenissen is van belang.

Hypothese is dat door bovengenoemd onderzoek de onzekerheden van stabiliteit-bepalende parameters wordt verkleind. Deze stap betreft dus met name het verminderen van de onzekerheden van de sterkte waardoor in principe gunstiger parameters mogen worden verwacht.

Stap 2: Toepassen beter berekeningsmodel (Eindige Elementen Methode / geavanceerder fysisch model) ter opwaardering van de macrostabiliteit.

Door gebruik te maken van een berekeningsmodel waarbij de voorgeschiedenis van de dijk beter kan worden gemodelleerd (o.a. rotatie van de hoofdspansingen als gevolg van het wegpersen van het slappere materiaal), kan naar verwachting winst worden geboekt. Door rotatie van de hoofdspansingen wordt verwacht dat een hogere sterkte optreedt. De hypothese is dat een beter berekeningsmodel (EEM: Soft soil) beter aansluit bij de werkelijkheid. Hierdoor mag worden aangenomen dat de sterkte en daarmee de macrostabiliteit kan worden opgewaardeerd. In het berekeningsmodel zal ook met ongedraineerde sterkte worden gerekend. Dit kan leiden tot verkleining van de scope en tot een minder zware dijkversterking.

Stap 3: Toepassen bewezen sterkte technieken

Het is goed mogelijk dat de voorgaande stappen niet overal tot een verkleining van de scope leidt. Dit ondanks het feit dat zowel het model, de ondergrondopbouw, de waterspanningen en de sterkteparameters zo optimaal mogelijk zijn benut. Dit wordt dan veroorzaakt door nog steeds relatief grote onzekerheden waarvan sprake is bij voorgenoemde aspecten. Het kan uiteraard ook zo zijn dat de dijk werkelijk niet veilig genoeg is. Voor de dijkvakken waar de stappen 1 en 2 nog niet tot een dusdanige opwaardering leidt dat hiermee dijkversterking kan worden voorkomen wordt met stap 3 vervolgd.

In het Technisch Rapport Actuele Sterkte (TRAS) zijn rekenmethodieken beschreven die verdere ontwikkeling nodig hebben. Het betreft de actuele sterkte methode, waarbij tevens probabilistische stabiliteitsanalyses gemaakt worden. Hiermee kan naar verwachting de sterkte van de waterkering verder worden opgewaardeerd. Het gegeven dat de meeste dijktrajecten zonder problemen (historische) situaties overleefden wordt hierbij gebruikt. Hierbij wordt gedacht aan de stormvloedramp van 1953, hoge waterstanden bij sluitingen van de Algerakering bij Capelle a/d IJssel en extreme neerslagsituaties.

Ook bij het toepassen van deze actuele sterkte methoden zullen stabiliteitsberekeningen met ongedraineerde sterkteparameters moeten worden uitgevoerd. Voordeel bij het rekenen met ongedraineerd materiaalgedrag is overigens dat de veranderingen van de waterspanningen in het model minder invloed hebben.

Van belang hierbij is dat voldoende en betrouwbare gegevens aanwezig zijn van belastingsituaties, al dan niet uit het verleden, die gelijkwaardig zijn aan de huidige

maatgevende belasting waarmee gerekend wordt en die door de genoemde dijken zonder problemen zijn overleefd:

- De situatie van 1953 is al eerder genoemd. De waterstand tijdens de stormvloedramp was hoger (maar kortdurender) dan het huidige MHW. Belangrijk is de inventarisatie van benodigde gegevens (met name historische) en de betrouwbaarheid daarvan. De invloed van de buitenwaterstand op de waterspanningen in en onder de dijk dient hierbij te worden geanalyseerd. Monitoring van deze waterspanningen is hierbij erg belangrijk. Tevens zal in de analyse de invloed van doorbraak mee worden genomen.
- Ook treden regelmatig hoge waterstanden op bij sluitingen van de Algera-kering (Stormvloedkering in de Hollandse IJssel bij Capelle a/d IJssel). Hoewel deze waterstanden naar verwachting lager zullen zijn dan het huidige MHW kan monitoring hiervan en de invloed hiervan op de waterspanningen in en onder de dijk, belangrijke informatie geven. Verwachting is dat MHW weinig invloed heeft op de hoogte van de freatische lijn (de dijken zijn van klei) en de stijghoogte in het watervoerende zandpakket onder de dijk. Deze situatie lijkt daarmee dus op de situatie tijdens dagelijkse omstandigheden.
- Gezien bovengenoemde heeft extreme neerslag waarschijnlijk grotere invloed op de macrostabiliteit dan het optreden van MHW. Hevige neerslag is meerdere malen opgetreden zonder dat daarbij doorgaande deformaties of afschuivingen zijn opgetreden. Monitoring van neerslag in relatie tot de hoogte van het freatische vlak in de dijk en waterspanningsverloop in de verticaal (zie ook stap 1) kan in dit verband belangrijke informatie opleveren. Hierbij dient te worden opgemerkt dat de definitie van 'extreme (norm) neerslag' veelal wordt geïnterpreteerd als een 7-daagse neerslagsom van 155 mm. Deze hoeveelheid is niet rechtstreeks gekoppeld aan een bepaalde kans van voorkomen. Om deze link te kunnen leggen zal overlegd worden met het KNMI.

De strategie die hierbij gehanteerd wordt, is dat van grof naar fijn gewerkt wordt, waarbij met steeds geavanceerdere technieken wordt geprobeerd de toetsnorm te halen. Zodra blijkt, dat op een zeker moment verdere analyse met een meer geavanceerd rekenmodel weinig of geen kans van slagen heeft, wordt gestopt en geconcludeerd dat de strategie niet tot het gewenste resultaat zal leiden. Deze stap betreft niet alleen het verminderen van de onzekerheden van de sterkte maar ook de belastingen.

Stap 4: Proefbelasten van de waterkering in combinatie met bewezen sterkte technieken

Verwacht wordt dat niet voor alle dijkvakken de opgave kan worden beperkt. Dit wordt dan mogelijk veroorzaakt doordat voor het ontwerp dient te worden uitgegaan van een verkeersbelasting op de kruin van de dijk. Dit terwijl de aanwezigheid van een dergelijke belasting ten tijde van de overleefde 'historische' situatie niet aanwezig is geweest. Door het daadwerkelijk aanbrengen van een dergelijke belasting op de dijk kan een situatie worden gecreëerd die slechter is dan de situatie tijdens MHW (en/of ontwerppeil met een planperiode van 50 jaar of minder). Als de dijk tijdens deze proefbelasting geen doorgaande vervormingen of (begin van) afschuiving vertoont, kan met voldoende zekerheid worden gesteld dat dijkversterking niet nodig is.

Verwachting is dat de aan te brengen belasting in veel gevallen gering kan zijn. 'Gering' zou daarbij kunnen worden gekwantificeerd als 'ter grootte van de verkeersbelasting'. Gedachte daarbij is dat de dijk deze belasting zonder meer zou moeten kunnen weerstaan omdat deze immers meermaals is opgetreden. Indien uit de analyses volgt dat een grotere belasting nodig is zal moeten worden bezien in

hoeverre HHSK het verantwoord vindt om deze belasting aan te brengen. Hoewel onder de geconditioneerde omstandigheden geen sprake is van een inundatierisico bestaat een kleine kans dat door optredende deformatie mogelijk schade aan de waterkering kan optreden. Opgemerkt wordt dat in deze stap met name de onzekerheden van de belastingen worden verminderd.

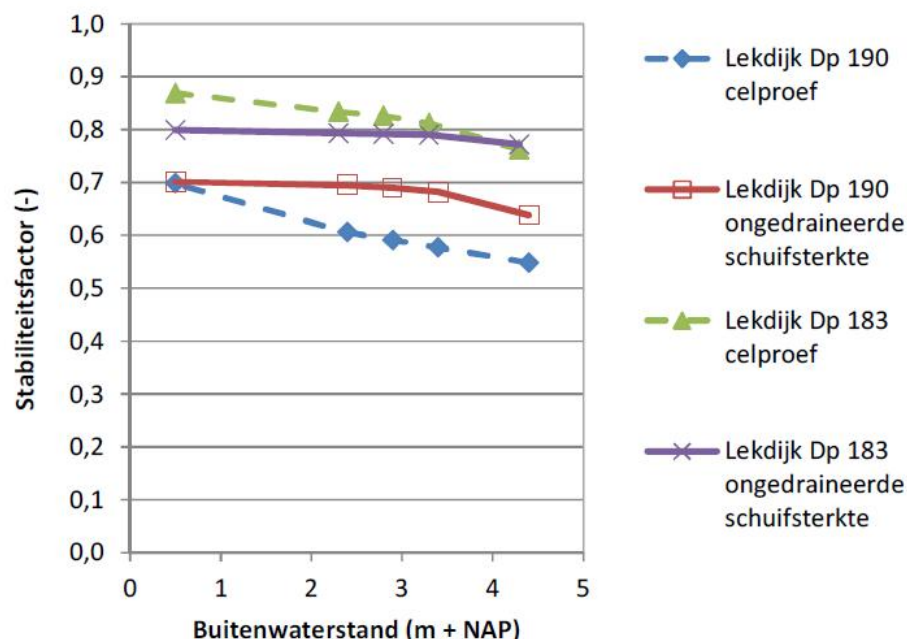
Stap 5: Ontwerpen van een alternatieve principe dijkversterkingsmaatregel, voor dijktrajecten die met stappen 1 t/m 4 niet kunnen worden goedgekeurd

Als laatste stap zal gekeken worden of met een alternatieve dijkversterkingsmaatregel de dijk kan worden versterkt zodanig dat ingrijpende versterking (met constructies zoals bijvoorbeeld verankerde damwanden of diepwanden) onnodig is. Hierbij wordt dan gedacht aan bijvoorbeeld het aanbrengen van een kwelscherm of kleikist waarmee indringing van het freatisch vlak in de dijk kern wordt voorkomen. Hierdoor wordt een nadelige belastingsituatie bij MHW verkleind.'

Bijlage 4: Het effect van ongedraineerd grondgedrag op macrostabiliteit

(bron: notitie Alexander van Duinen (Deltares) d.d. 11 juli 2014, Ongedraineerde schuifsterkte bij toetspeil macrostabiliteit in WTI 2017 - informatie voor Besluitvormingsproces)

Een interessant punt bij ongedraineerd grondgedrag is dat de macrostabiliteit minder gevoelig is voor veranderingen in de buitenwaterstand en de waterspanningen. Bij een belasting van een dijk door hoog water zijn de veranderingen van de spanningen in de grond zodanig dat de grensspanning niet wordt beïnvloedt. Daardoor is het effect van hoog water op de mobiliseerbare schuifsterkte van klei- en veenlagen gering. Dit effect kan worden verklaard vanuit het materiaalmodel. Dit effect leidt tot een vlakkere relatie tussen de berekende stabiliteitsfactor en de buitenwaterstand. Alleen in situaties waar de schuifsterkte op het afschuifvlak wordt gedomineerd door de schuifsterkte van zand in de dijk of in de diepe zandlaag, wordt de macrostabiliteit van een talud ongunstig beïnvloedt door een hoge buitenwaterstand. Dit aspect komt niet tot uitdrukking in semi-probabilistische analyses, omdat wordt getoetst bij één buitenwaterstand (toetspeil), maar wel in probabilistische analyses, waar de stabiliteit wordt berekend rekening houdend met het optreden van verschillende buitenwaterstanden.



Figuur B4.1 Effect van de buitenwaterstand op de stabiliteitsfactor bij de Lekdijk.

Het effect van de buitenwaterstand en de waterspanningen op de schuifsterkte en de stabiliteitsfactor is onderzocht voor twee locaties waar lokaal grondonderzoek beschikbaar is (zie Figuur B4.1). Hiervoor zijn stabiliteitsanalyses uitgevoerd met buitenwaterstanden tussen de dagelijkse waterstand en een waterstand van 1,0 meter boven het Toetspeil 2006. Voor de analyses met ongedraineerde schuifsterkte is de berekende stabiliteitsfactor vrijwel constant bij buitenwaterstanden tot het Toetspeil 2006. Bij extreem hoge buitenwaterstanden is de invloed van de buitenwaterstand op de stabiliteitsfactor groter. Bij de effectieve spanningsanalyses met gedraineerde schuifsterkte parameters neemt de stabiliteitsfactor sterker af bij een toenemende hoogte van de buitenwaterstand. De gevoeligheid van de

macrostabiliteit van een dijk voor de buitenwaterstand kan wellicht in de toekomst naast de stabiliteitsfactor een criterium zijn in de beoordeling van de veiligheidstoestand van een dijk. In de faalkans is het effect van de buitenwaterstand op de mobiliseerbare schuifsterkte verdisconteerd.

Samenvattend komt uit de resultaten van de consequentie-analyse het volgende beeld naar voren:

- Gemiddeld genomen zijn de stabiliteitsfactoren voor de huidige werkwijze met effectieve spanningsanalyses en voor analyses met het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte ongeveer gelijk. Het gaat vooral om verschuivingen in de stabiliteitsfactoren. De winst hiervan is dat onterecht goedkeuren of afkeuren terug wordt gedrongen.
- Per situatie zijn grote verschillen in berekende stabiliteitsfactoren voor beide typen analyses mogelijk. Hierbij is er geen relatie gevonden met dijkringingen of dijkgeometrie.
- De stabiliteitsfactor wordt met het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte veel minder beïnvloedt door de buitenwaterstand. Dit kan naast de stabiliteitsfactor een belangrijk punt zijn bij de beoordeling van de veiligheidstoestand van een dijk.

Bijlage 5: ENW-advies december 2015 en reflectie

In deze bijlage is het advies over de onderzoeksresultaten opgenomen van ENW uit december 2015. Het ENW-advies is gebaseerd op een concept van 15 november 2015 van voorliggend rapport.

Vanwege die reden is na het advies een reflectie op dit ENW-advies en het vorige advies van september 2015 opgenomen. Deze reflectie gaat in op de wijze waarop de aanbevelingen van ENW zijn verwerkt in de eindversie van dit rapport.

Ministerie van Infrastructuur en Milieu
T.a.v. de Directeur-Generaal Ruimte en Water
de heer drs. P.R. Heij
Postbus 20901
2500 EX DEN HAAG



Contactpersoon
ir. D.P. de Bake

Telefoonnummer
06 30 38 91 43

Datum
7 december 2015

Bijlage(n)

Ons kenmerk
ENW-15-24

Uw kenmerk
IENM/BSK-20 15/203954

Onderwerp
Advies vervolgonderzoek pompen t.b.v. de
Markermeerdijken

Afschrift aan
DGRW, Lapperre

Geachte heer Heij,

In uw brief van 19 oktober 2015, met kenmerk IENM/BSK-2015/203954, vraagt u om nader advies met betrekking tot de gevolgen van peilverlaging op het Markermeer -door pompen in de Houtribdijk- voor de versterking van de Noord-Hollandse Markermeerdijk. Operationaliseren van het concept van 'bewezen sterkte', in ons eerdere advies (ENW-15-13) als mogelijk kansrijk benoemd, speelt hierbij een belangrijke rol.

De volgende concrete vragen met betrekking tot het onlangs door een projectteam uitgevoerde verkennende onderzoek liggen voor:

1. Onderschrijft u de conclusie over de effectiviteit van pompen op de Houtribdijk op het verminderen van de dijkversterkingsopgave, rekening houdende met de nieuwe inzichten m.b.t. dijken op veen, 'bewezen sterkte' en impact nieuwe normering?

2. Onderschrijft u de conclusie over het binnen 6 maanden operationaliseren van 'bewezen sterkte', zodanig dat de methode kwantitatief, reproduceerbaar en toetsbaar is, en de keringbeheerder op een binnen de huidige systematiek passende wijze kan aantonen dat de kering veilig is?

In algemene zin staat het ENW achter de standpunten van het projectteam. Bij de beantwoording van de twee vragen komen een aantal opmerkingen en aanbevelingen aan bod.

Het projectteam heeft in zeer korte tijd onderzoek verricht en daarover gerapporteerd. Het ENW heeft hiervoor grote waardering. Voorliggend advies is gebaseerd op het concept van het hoofdrapport *Kansrijkheid pompen en bewezen sterkte Markermeerdijken HWBP2* van 15 november 2015 en de daarbij horende bijlagen (veelal concept), waaronder versie 4 van het Deltaresrapport *Verkenning Bewezen Sterkte Markermeerdijken*. Dit advies is inhoudelijk voorbereid door leden van de ENW-werkgroepen Rivieren, Veiligheid en Techniek. Na de speciaal voor dit onderwerp ingelaste ENW-Kerngroepvergadering van 2 december 2015 is dit advies afgerond.

Vanwege de beperkte beschikbare tijd is afgeweken van de standaardprocedure voor ENW-advies. Het advies is niet plenair besproken in de betrokken werkgroepen. Het ENW heeft echter in de beschikbare tijd geen reden gevonden om de uitkomsten niet te vertrouwen.

Om de rapportage toegankelijker en begrijpelijker te krijgen, is wat het ENW betreft nog een redactionele slag nodig. Dit is nodig voor de externe kwaliteitscontrole en voor degenen die in de praktijk met de methode moeten gaan werken.

Met het oog op de resultaten van het onderzoek en de perspectieven die dat biedt, nemen we de vrijheid uw vragen in omgekeerde volgorde te beantwoorden.

1. Bewezen sterkte

Het ENW kan zich vinden in de conclusies die worden getrokken over bewezen sterkte in de Deltaresrapportage *Verkenning Bewezen Sterkte Markermeerdijken* (versie 4) en het hoofdrapport *Kansrijkheid pompen en bewezen sterkte Markermeerdijken HWBP2 (versie 15 november)*. Het concept bewezen sterkte lijkt inderdaad kansrijk. Onderscheid moet daarbij worden gemaakt tussen de toepassing op de korte termijn (komende maanden) bij het project Markermeerdijken en een bredere toepassing op de middellange termijn (komende jaren) voor heel Nederland.

Het ENW acht het realistisch dat de zogenaamde 'grove methode', op basis van fragility-curves, in een periode van ongeveer zes maanden wordt geoperationaliseerd ten behoeve van het project Markermeerdijken. Het is daarbij nodig om voldoende externe expertise (binnen- en buitenland) in te zetten voor onafhankelijke kwaliteitscontrole en 'second opinion'. Het ENW raadt aan om al tijdens de ontwikkeling van de 'grove methode' te worden geïnformeerd om, zodra de methode gereed is, zo snel mogelijk tot een onafhankelijk advies te kunnen komen.

Om het concept bewezen sterkte voor de Markermeerdijken te operationaliseren moeten naast het Markermeerpeil ook andere bepalende faalmechanismen en factoren, zoals bodemopbouw, neerslag, polderpeil, maaiveldniveau,

profielaanpassingen en verkeersbelasting, worden geïdentificeerd. Het effect van die factoren op de macrostabiliteit van de Markermeerdijken moet worden begrepen en gekwantificeerd.

Indien de grove methode tijdig beschikbaar komt en toepasbaar is kan de versterkingsopgave van de Markermeerdijken opnieuw worden gezien. De grove methode is in principe bruikbaar op bestaande waterkeringen en niet (direct) op ontwerpen van versterkte waterkeringen, vanwege het simpele feit dat versterkte keringen nooit eerder zijn belast. Het verdient daarom aanbeveling om in de loop van het komende onderzoek ook te verkennen hoe de resultaten van het bewezen-sterkteonderzoek bij het ontwerp van versterkingen kunnen worden toegepast.

De mogelijke reductie in dijkversterkingskosten bij de Markermeerdijk in combinatie met de kansrijkheid van de grove methode voor bewezen sterkte rechtvaardigt ons inziens de inspanning en de tijd die nodig is voor de verdere uitwerking en operationalisering van de grove methode. Dit moet leiden tot een methode die kwantitatief, reproduceerbaar, toetsbaar en praktisch bruikbaar is voor het Hoogheemraadschap. Vroegtijdige betrokkenheid van eindgebruikers en onafhankelijke kwaliteitsborging is aan te bevelen.

Ingrepen in de dijk, zoals het deels afgraven van voorland (bijvoorbeeld bij het aanleggen van een oeverdijk) of het verwijderen van een afdichtende sliblaag, kunnen leiden tot wezenlijke veranderingen in de situatie. De geringe doorlatendheid van de bodem is cruciaal voor de bevindingen met betrekking tot de invloed van het meerpeil op de macrostabiliteit van de dijk en daarmee van grote invloed op de mogelijke effecten van bewezen sterkte. Bij de verdere planontwikkeling beveelt het ENW dan ook aan om specifiek aandacht te besteden aan de effecten en risico's die samenhangen met ingrepen aan de bestaande dijk en de directe omgeving.

2. Effectiviteit van pompen

Op basis van de huidige studies lijkt de buitenwaterstand nauwelijks invloed te hebben op het voor de Markermeerdijken dominante mechanisme macrostabiliteit binnenwaarts. De bijdrage van pompen op de Houtribdijk aan het verminderen van de versterkingsopgave lijkt vanuit het perspectief van de macrostabiliteit van de beschouwde profielen van de Markermeerdijk dan ook beperkt effectief.

De oorzaak van de beperkte invloed die de waterstand heeft op de macrostabiliteit lijkt voornamelijk te liggen in de grote weerstand die de toestroming van grondwater vanuit het Markermeer ondervindt en in de grote onzekerheden omtrent de sterkteparameters. Dat de waterstand weinig invloed heeft op de macrostabiliteit vertaalt zich in fragility-curves die vrijwel horizontaal lopen.

Het ENW beveelt aan om op korte termijn een beknopte financiële onderbouwing op te stellen voor de keuze om peilbeheersing in het Markermeer door pompen buiten beschouwing te laten. In deze onderbouwing kan zowel de optie met als zonder pompen op hoofdlijnen worden vergeleken op basis van indicatoren zoals de effecten op de dijkversterking, zowel wat betreft macrostabiliteit als andere faalmechanismen en de kosten, met eventuele bandbreedtes. Het mogelijke effect van bewezen sterkte kan daarbij met behulp van scenario's worden meegenomen.

Doorontwikkeling methode bewezen sterkte

De volledige uitwerking van de geavanceerde methode zal aanmerkelijk meer tijd vergen dan zes maanden en dus wellicht niet meer inzetbaar zijn bij de versterking van de Markermeerdijken. Dit neemt niet weg dat het ENW grote waarde hecht aan de doorontwikkeling van de geavanceerde methode. Deze levert op basis van zogenaamde Monte Carlo-analyses informatie over de kansverdelingen van de onderliggende parameters. Het ENW beveelt aan om daarbij pilot-experimenten op ware schaal (veldproeven e.d.) uit te voeren, om empirische sterkte-informatie te vergaren en de methode te testen.

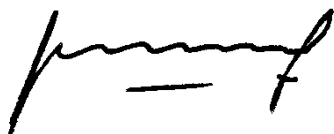
Tussentijdse resultaten van de ontwikkeling van de geavanceerde methode kunnen mogelijk op hotspots/knelpunten binnen het project Markermeerdijken van pas komen. Ook kan de geavanceerde methode een nadere onderbouwing leveren van de grove methode.

De benadering en specifiek de geavanceerde methode lijken uitzicht te bieden op toepassing op veel meer plaatsen in het land. Het onderwerp zou wat het ENW betreft dan ook een prominente plaats moeten krijgen op de kennisagenda.

Aanbevolen wordt om de ontwikkelingen op het gebied van bewezen sterkte uiteindelijk een plaats te geven binnen het Ontwerpinstrumentarium en later in het Beoordelingsinstrumentarium. De koppeling tussen bewezen sterkte en geotechnische parameters staat daarbij centraal. Wellicht kunnen, als de methode voldoende doorontwikkeld is, tussentijdse resultaten al worden verwerkt in de update van het WBI 2017 in het jaar 2019 (probabilistisch beoordelingsinstrumentarium).

Ik vertrouw erop u zo voldoende te hebben geadviseerd.

Hoogachtend,



Ir. G. Verwolf

Voorzitter van het Expertise Netwerk Waterveiligheid

Reflectie ENW-advies fase 1 en 2

Het ENW heeft in haar advies van september 2015 geadviseerd om verder onderzoek te doen naar 'bewezen sterkte', en in elk geval de geotechnische inzichten vanuit Dijken op Veen en de nieuwe normering in samenhang te bekijken. In dit onderzoek is dat gedaan, en met name 'bewezen sterkte' lijkt positieve resultaten op te leveren. De impact van nieuwe normering heeft in deze studie geen nieuwe inzichten opgeleverd, maar blijft ook de komende jaren een aandachtspunt. Een aantal aspecten uit het ENW-advies zijn in deze studie niet onderzocht. Het gaat daarbij om het optimaliseren van de faalkansbegroting en een bredere afweging van kosten en baten, waarin naast de (nog) benodigde dijkversterking ook aspecten zoals LNC-waarden en besparingen op andere toekomstige dijkversterking en rondom het Markermeer en eventueel het IJsselmeer worden meegenomen.

Gezien de resultaten van deze studie zijn deze beide aspecten niet van invloed op de conclusies ten aanzien van wel of niet pompen op de Houtribdijk. De invloed van het Markermeerpeil op de veiligheidsopgave blijkt dusdanig klein te zijn, dat investeren in pompen voor dit project niet rendabel is. Daarom zijn ze in deze studie niet verder onderzocht. In onderstaand intermezzo wordt de invloed van het Markermeerpeil op de veiligheidsopgave, zoals onderzocht in fase 1 toegelicht.

Intermezzo: resultaten fase 1 pompenstudie

Op basis van de effecten voor de 8 representatieve locaties zijn kostenbesparingen berekend ten opzichte van het voorlopig ontwerp, dat op ongeveer 300 miljoen euro is geraamd. De kostenbesparingen variëren tussen de 10 miljoen (ondergrens bij een MHW-daling van -0,3 m) en 150 miljoen euro (bovengrens bij een MHW-daling van 0,9 m). De ondergrens van de besparing bij een MHW-daling van 0,6 m bedraagt ongeveer 40 miljoen euro, de bovengrens 100 miljoen euro. Zie ook onderstaande tabel.

Tabel 6.1: Onder- en bovengrens van besparingen (in M€, incl. BTW) op de investeringskosten bij diverse varianten (gehele traject Hoorn-Amsterdam)

Locatie	Variant	Ondergrens besparing investeringskosten in M€ (incl. BTW)	Bovengrens besparing investeringskosten in M€ (incl. BTW)
MMD Hoorn-Amsterdam	ontwerppeil -0,3	9	48
	ontwerppeil -0,6	36	96
	ontwerppeil -0,9	65	148

Voor een verlaging van het ontwerppeil met -0,60 m bedragen de totale kosten van pompen op de Houtribdijk en Afsluitdijk tezamen 300 miljoen euro (uitgaande van een SSK-raming). Bij een kostenkental van 25 M€ per 100 m³/s ontstaat een investering van totaal 150 M€. De operationele kosten zijn ten opzichte van de investeringskosten klein (0,6% per jaar). Omdat de pompen naar verwachting gemiddeld slechts enkele weken per jaar draaien, zullen ook de energiekosten waarschijnlijk kleiner zijn dan 1 miljoen euro per jaar.

Een MHW-daling van het Markermeer heeft niet alleen effect op de Markermeerdijken tussen Hoorn en Amsterdam. Ook bij de andere dijktrajecten langs het Markermeer die de komende 50 jaar moeten worden aangepakt kunnen voordelen optreden. Het gaat om de volgende trajecten:

- Houtribdijk (wordt momenteel aangepakt)
- Markermeerdijken Zuiderzeeland
 - a. Oostvaardersdijk (Lelystad-Almere)
 - b. Randmeerdijken (Almere-Nijkerkerbrug)
- Randmeerdijken Noord-Holland (Nijkerk-Oranjesluizen)
- Markermeerdijken Hoorn-Enkhuizen.
- Marken

Voor al deze trajecten geldt dat de hydraulische belasting wind gedomineerd is: West, Zuid, Noord en daartussenin, dit zijn veelvoorkomende windrichtingen in Nederland. Bij de Markermeerdijken tussen Hoorn en Amsterdam is de windbelasting juist uit het oosten, en die is zelden boven 7 à 8 Beaufort. Dit traject is daarom meerpeil gedomineerd.

Voor de wind gedomineerde overige trajecten rondom het Markermeer geldt, dat de hydraulische belasting maar beperkt beïnvloed wordt door het meerpeil. Het gaat vooral om golfloop en scheefstand. Dit betekent ook dat pompen, met hun effect op het meerpeil, weinig invloed hebben. Op het moment dat er storm in de weersvoorspellingen zit, is dat maximaal 7 dagen vooruit. Dat is ook de tijd die beschikbaar is om het meerpeil te verlagen met pompen. Een pomp van 100 m³/s kan het Markermeer 1 cm per dag doen dalen. Om 30 cm meerpeildaling in een week te realiseren is dan ruim 400 m³/s aan pompcapaciteit nodig. En voor 60 cm is 850 m³/s nodig. En dan nog bestaat de kans dat de storm pas op het laatste moment gezien wordt in de weersvoorspelling. Voor een betrouwbare situatie zou daarom het meerpeil continu verlaagd moeten worden met 30 of 60 cm. Dat heeft echter veel negatieve effecten op andere functies, en leidt tot ongewenste situaties met onder andere paalrot en klink, waardoor huizen op en achter de dijk gaan verzakken.

Pompen werken dus niet goed op de wind gedomineerde overige trajecten rondom het Markermeer. Eventuele dijkversterkingen bij deze trajecten worden niet minder door met pompen de MHW te verlagen. Alleen verlagen van het gemiddeld meerpeil helpt, maar dat is vanwege neveneffecten op andere functies ongewenst.

Op basis van de resultaten van het onderzoek uit fase 1 en 2 kan het volgende geconcludeerd worden:

- De kosten voor pompen die leiden tot een MHW-daling van 60 cm bedragen conform een SSK-raming 300 miljoen euro. Als absolute ondergrens wordt 150 miljoen euro gehanteerd.
- De bovengrens van de baten bij een MHW-daling van ongeveer 60 cm bedragen ongeveer 100 miljoen euro. Deze bovengrens hoort bij een situatie waarin de buitenwaterstand relatief veel invloed heeft. Uit deze studie blijkt, dat de invloed van de buitenwaterstand erg klein is. Daaruit kan geconcludeerd worden dat de baten waarschijnlijk eerder in de buurt van de ondergrens liggen, in dit geval ongeveer 36 miljoen euro.
- Voor het HWBP2-project Markermeerdijken betekent dit, dat de kosten in het investeren in de pompen aanzienlijk groter zijn dan de besparing in het dijkontwerp. Uitgaande van de SSK-raming is dit verschil $300 - 36 = 264$ miljoen euro, en uitgaande van de absolute ondergrens van de kostenraming $150 - 36 = 114$ miljoen euro.

- Om tot een positieve balans te komen, zijn elders baten nodig. Daarvoor zijn er twee mogelijkheden:
 - o Besparingen in de dijkversterkingen elders rondom het Markermeer. Deze blijken er conform de resultaten van fase 1 van het pompenonderzoek niet of nauwelijks te zijn (RWS, sep 2015).
 - o Kleinere risico's achter de dijken, dankzij de 60 cm lagere MHW op het Markermeer.

Theoretisch kan deze laatste optie iets opleveren. Dat kan het best uitgelegd worden aan de hand van een voorbeeld, in dit geval de dijk tussen Huizen en Amsterdam. Voor deze dijk worden de normen niet strenger, de dijk voldoet met andere woorden nu al aan de nieuwe normen. Door een MHW-daling van het Markermeer, wordt de kans dat de dijk doorbreekt kleiner, en zullen ook de effecten als gevolg van een overstroming kleiner worden. Dit levert dus geld op. Maar om dit te kunnen bereiken, moet wel eerst geïnvesteerd worden in de pompen op de Houtribdijk. Hiervoor is geen budget in de waterveiligheidsbegroting, en de kans is erg klein dat dit geld er wel komt. Het gaat immers om het creëren van extra veiligheid bovenop de norm waar al aan voldaan wordt, terwijl er veel dijken zijn die nog niet aan de normen voldoen. Die zullen dus een hogere prioriteit krijgen, en hieraan wordt waarschijnlijk tot 2050 gewerkt.

Samengevat kan geconcludeerd worden dat een bredere afweging van kosten en baten, waarin naast de (nog) benodigde dijkversterking ook besparingen op andere toekomstige dijkversterkingen rondom het Markermeer en eventueel het IJsselmeer worden meegenomen, geen nieuwe inzichten opleveren met betrekking tot de conclusie over de kosten en baten van pompen voor het HWBP2-project Markermeerdijken. Projectbudget inzetten op pompen is voor het project aanzienlijk duurder dan de kostenbesparingen die dit oplevert in het dijkontwerp.

Wat betreft de LNC-waarden (Landschap, Natuur en Cultuur, zie het ENW-advies van september 2015) moet onderscheid worden gemaakt in de LNC-waarden langs de randen van het Markermeer en LNC-waarden van het meer zelf. LNC-waarden langs de randen van het Markermeer worden niet beïnvloed, want het peil (al of niet beïnvloed door pompen) heeft een beperkte invloed op het dijkontwerp. Het beschermen van de LNC-waarden van de dijk gaat via de reguliere juridische procedures. Indien er grote zorgen zijn over aantasting van de LNC-waarden, is het verstandiger een deel van het budget voor de pompen (de kosten daarvan zijn minimaal 150 miljoen euro) te steken in bijvoorbeeld innovatieve oplossingen om aantasting in het landschap te voorkomen, dat is aanzienlijk effectiever.

Naar de natuurwaarden van het meer zelf is onderzoek gedaan in het Deltaprogramma. Daaruit bleek dat er vanuit ecologisch oogpunt nadelen zijn aan pompen. Die zorgen voor minder peilfluctuatie, terwijl vanuit ecologisch perspectief meer dynamiek gewenst wordt. Zie voor meer informatie hierover de Deltabeslissing IJsselmeer (Deltaprogramma, 2014).

Over de mogelijke inzet van pompen buiten het kader van het project, wordt in deze studie geen uitspraak gedaan. Dat valt buiten de scope van het onderzoek. Hiervoor is in het kader van het Deltaprogramma het project Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer IJsselmeergebied gestart. In het Nationaal Waterplan 2 zijn in ieder geval tot 2050 geen pompen voorzien op de Houtribdijk.

