


POVM Actuele Sterkte

Macrostabieliteit Buitenwaarts

Stappenplan, Inschatting herstelltijd, Materiaalmodel en Probabilistische uitwerking

POV

MACRO
STABILITEIT



Auteurs:

Anton van der Meer

Arno Rozing

Alexander van Duinen

Rob Brinkman

Datum: december 2020

Versie: 1.0

Project
1220518-005

Pagina's
1




Samenvatting

Momenteel zijn er veel dijkversterkingen binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma in voorbereiding waar het faalmechanisme macrostabiliteit van het buitentalud (in ieder geval rekenkundig) een probleem is. Er wordt echter vraagtekens gezet bij de berekende faalkansen en bij de dimensies van de voor macrostabiliteit buitenwaarts benodigde versterkingsoplossingen. Deze zijn gevoelsmatig overgedimensioneerd. Hierop anticiperend is in het voorjaar van 2020, in het kader van de Project Overstijgende Verkenning Macrostabiliteit een verkennende studie naar macrostabiliteit buitenwaarts uitgevoerd [5]. Dit rapport bouw voort op de verkennende studie en geeft de ingenieur handvaten om een probabilistische faalpadanalyse uit te voeren.

Een inschatting van de overstromingskans door macrostabiliteit buitenwaarts wordt verkregen door achtereenvolgens de kans op een afschuiving, de kans op een volgende belastingsituatie voordat de schade hersteld en de kans op een overstroming tijdens deze volgende belasting worden bepaald. De inschatting kan worden verkregen door achtereenvolgens: het opstellen van de faalpaden, het schematiseren van de doorsnede en toekennen van de materiaaleigenschappen en hydraulische randvoorwaarden, een inschatting te maken van de tijd tot herstel en het uitvoeren van de (of één integrale) probabilistische berekening(en). Het toe te passen materiaalmodel kan afgeleid worden uit de aanwezige sonderingen en boringen. De tijd tot herstel is de som van de ontdek-, respons- en hersteltijd en is onder andere afhankelijk van het watersysteem en het aantal gelijktijdige afschuivingen.

Een voorbeelduitwerking van de faalpadanalyse is in dit rapport opgenomen voor het scenario van een val na hoogwater. In de uitwerking is de onzekerheid van de doorlatendheid expliciet meegenomen. De onzekerheid in de doorlatendheid heeft een significante invloed op de berekende kans op de afschuiving indien de aanloop naar het hoogwater niet wordt meegenomen. Indien de aanloop naar het hoogwater wel wordt meegenomen is de invloed van de doorlatendheid zeer beperkt en de kans op de afschuiving significant lager. Als wordt aangenomen/aangetoond dat de doorlatendheid van de dijk niet significant verschilt tijdens de aanloop en de val van de waterstand is dus een significante optimalisatie te behalen en is de onzekerheid in de (moeilijk te bepalen) doorlatendheid van de dijk van minder belang. We bevelen aan dit met de analyse van langdurige meetreeksen van de waterspanningen in de dijk te analyseren.

Tot slot bevelen we aan het kwantitatief uitwerken van faalpaden gemeengoed maken door een eenvoudige implementatie van faalpaden (boomstructuur) in de Probabilistic Toolkit te faciliteren.

Versie	Datum	Auteur	Review	Goedkeuring
1.0	dec. 2020	A.W. van der Meer, A. Rozing, A. van Duinen & R. Brinkman	T. Stoutjesdijk	G. de Vries
		A.W. van der Meer 	T. Stoutjesdijk 	G. de Vries 

Status
definitief

Inhoud

Afkortingen	3
1 Inleiding	4
1.1 Aanleiding en doelen	4
1.2 Aanpak en leeswijzer	4
1.3 Positionering	4
2 Aanpak	5
2.1 Aanpak op hoofdlijnen	5
2.2 Stappenplan	5
3 Keuze materiaalmodel	9
3.1 Inleiding	9
3.2 Vochtgehalte, verzadigingsgraad, zuigspanning, capillaire spanning	10
3.3 Invloed van zuigspanning op effectieve spanning en schuifsterkte	10
3.4 Invloed vochtgehalte en zuigspanning op zwel- en krimpgedrag en doorlatendheid	11
3.5 Bevindingen onderzoek bij Oijen en Westervoort	12
3.6 Analyse beschikbare data van de bovenrivierengebied case	13
4 Inschatting herstellijd	19
4.1 Inleiding	19
4.2 Methode en aandachtspunten ter bepaling tijd van afschuiving tot herstel	20
4.3 Bepaling benodigde herstellijd als ontwerpparameter	24
4.4 Conclusie en aanbevelingen voor vervolg	25
5 Uitwerking case bovenrivierengebied	27
5.1 Case omschrijving	27
5.2 Uitwerking stappenplan	27
5.3 Vergelijking met semi-probabilistische aanpak WBI2017/OI2014	35
5.4 Gevoeligheid doorlatendheid en hydraulische randvoorwaarden	36
6 Conclusie, Aanbevelingen en Impact	39
6.1 Conclusie	39
6.2 Aanbevelingen	39
6.3 Impact	40
Referenties	41

Afkortingen

BOI2023	Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium. Instrumentarium dat in de toekomst gebruikt gaat worden voor het beoordelen en ontwerpen van primaire waterkeringen in Nederland.
DGF	D-Geo Flow, de eindige elementen software van Deltares waarmee grondwaterstroming (en piping) berekend kan worden. DGF kan via: https://www.deltares.nl/nl/software/d-geo-flow/ gedownload worden.
DGS	D-Geo Stability, software van Deltares voor glijvlakberekeningen. DGS kan via: https://www.deltares.nl/nl/software/d-stability-nl/ gedownload worden.
FORM	First Order Reliability Method, probabilistische level II methode om de faalkans te berekenen.
HWBP	Hoogwaterbeschermingsprogramma. Alliantie van Rijkswaterstaat en de 21 waterschappen in Nederland. Het HWBP financiert grotendeels de primaire dijkversterkingen in Nederland.
MC	Monte Carlo Sampling, probabilistische level III methode om de faalkans te berekenen.
MC-IS	Monte Carlo Importance Sampling, probabilistische level III methode om de faalkans te berekenen, waarbij er meer samples worden getrokken in het faaldomein.
NAP	Normaal Amsterdams Peil, referentieniveau voor de hoogteligging.
OCR	Overconsolidatie Ratio, de ratio tussen de maximale verticale effectieve spanning die de grond in het verleden heeft ondervonden en de huidig aanwezige verticale effectieve spanning.
OI2014	Ontwerp Instrumentarium. Instrumentarium dat gebruikt wordt voor het ontwerpen van primaire waterkeringen in Nederland. Wordt in de toekomst vervangen door het BOI2023.
POVM	Projectoverstijgende Verkenning Macrostabieleit. (Dijkversterkings-) Projectoverstijgende verkenning binnen het HWBP met als doel dijkversterkingen beter, sneller en goedkoper te maken met de focus om het faalmechanisme macrostabieleit. Documenten van de POVM zijn te vinden op https://www.povmacrostabieleit.nl/ .
POP	Pre Overburden Pressure. De maximale verticale effectieve spanning die de grond bovenop de huidig aanwezige effectieve spanning in het verleden heeft ondervonden.
PTK	Probabilistic Toolkit, software van Deltares waarmee onder andere faalkansanalyses eenvoudig uitgevoerd kunnen worden. De PTK kan via https://www.deltares.nl/nl/software/probabilistic-toolkit-ptk-2/ gedownload worden.
SHANSEP	Stress History and Normalized Soil Engineering Properties. Materiaalmodel van grond om ongedraineerd schuifsterkte te beschrijven.
STBU	Macrostabieleit buitenwaarts, indirect faalmechanisme van de dijk waarop ontworpen en beoordeeld moet worden volgens het WBI2017 en OI2014.
WBI2017	Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium. Instrumentarium dat gebruikt wordt voor het beoordelen van primaire waterkeringen in Nederland. Wordt in de toekomst vervangen door het BOI2023. Documenten van het WBI zijn te vinden op www.helpdeskwater.nl .

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en doelen

Momenteel zijn er veel dijkversterkingen binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) in voorbereiding waar het faalmechanisme macrostabiliteit van het buitentalud (in ieder geval rekenkundig) een probleem is. Er wordt echter vraagtekens gezet bij de berekende faalkansen en bij de dimensies van de voor macrostabiliteit buitenwaarts (STBU) benodigde versterkingsoplossingen. Deze zijn gevoelsmatig overgedimensioneerd. Hierop anticiperend is in het voorjaar van 2020, in het kader van de Project Overstijgende Verkenning Macrostabiliteit (POVM) een verkennende studie uitgevoerd [5]. Naar aanleiding van de verkennende studie zijn drie relevante aspecten geprioriteerd voor nadere uitwerking: de keuze van het materiaalmodel, een handreiking bij het inschatten van de hersteltijd en inzicht in het effect van de onzekerheid in de doorlatendheid. Daarnaast is er behoefte aan een werkwijzer voor de gehele methodiek.

1.2 Aanpak en leeswijzer

Dit rapport bestaat uit vier inhoudelijke hoofdstukken en een conclusie. In **Hoofdstuk 2** is de aanpak van de gehele methodiek uitgewerkt in een indicatief stappenplan. Met ervaringen die in ontwerpprojecten worden opgedaan kan dit stappenplan worden vervolmaakt. In **Hoofdstuk 3** is ingegaan op de keuze van het materiaalmodel. Dit hoofdstuk tracht de ingenieur achtergrond te bieden bij de keuzes voor het toe te passen materiaalmodel. In **Hoofdstuk 4** is ingegaan op de inschatting van de hersteltijd. In de methodiek is aanbevolen dat de ingenieur met de beheersorganisatie van het betreffende waterschap een inschatting maakt van de hersteltijd. Dit hoofdstuk is bedoeld om kader te geven bij deze stap. In **Hoofdstuk 5** is een uitwerking van de methodiek gepresenteerd, waarbij de onzekerheid in de doorlatendheid expliciet is meegenomen. Dit hoofdstuk heeft naast het inzicht geven in het effect van de doorlatendheid als doel om het stappenplan uit Hoofdstuk 2 te illustreren. In de conclusie, **Hoofdstuk 6**, is een korte samenvatting, een reflectie op de resultaten en aanbevelingen gegeven.

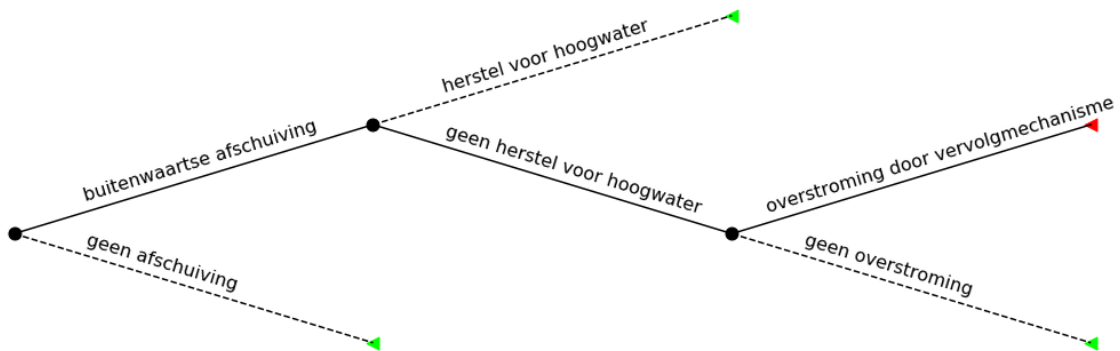
1.3 Positionering

Dit rapport is het tweede rapport over STBU van de POVM. De methode uit dit rapport kan gebruikt worden bij versterkingsprojecten wanneer de semi-probabilistische WBI2017- of OI2014-methode (in de toekomst BOI2023) tot een onbevredigend resultaat leidt. Bij beoordelingen van waterkeringen kan de methode gezien worden als *Toets op Maat*. Het stappenplan uit dit rapport moet gezien worden als indicatief aangezien deze nog slechts beperkt is toegepast in de praktijk. Vragen en opmerkingen over de aanpak zijn welkom. In de toekomst wordt de aanpak met de praktijkervaringen wellicht opgenomen in een werkwijzer.

2 Aanpak

2.1 Aanpak op hoofdlijnen

Voordat er een overstroming plaatsvindt moeten er globaal drie gebeurtenissen plaatsvinden. Eerst, een buitenwaartse afschuiving geïnitieerd door een val van de buitenwaterstand of extreme regenval. Ten tweede, een daar op volgende belastinggebeurtenis voordat de schade van de buitenwaartse afschuiving (met een (nood)maatregel) hersteld is. Ten derde, falen, een overstroming, tijdens de daar op volgende belastinggebeurtenis.



Figuur 2.1 Algemene gebeurtenissenboom macrostabiliteit buitenwaarts.

Het product van de kansen op deze (conditionele) gebeurtenissen is de overstromingskans.

$$P_{\text{overstroming STBU}} = P_{\text{afschuiving}} \cdot P_{\text{geen herstel}} \cdot P_{\text{overstroming}}$$

Waarin $P_{\text{afschuiving}}$ de kans op een buitenwaartse afschuiving, $P_{\text{geen herstel}}$ de kans op een volgende belasting voor herstel gegeven een buitenwaartse afschuiving en $P_{\text{overstroming}}$ de kans op een overstroming gegeven een buitenwaartse afschuiving die niet hersteld is. Een gedetailleerdere gebeurtenissenboom kan case specifiek worden opgesteld, zie hiervoor stap 1 in het stappenplan.

2.2 Stappenplan

In deze paragraaf is een kort een stappenplan opgenomen. Dit indicatief stappenplan kan gevolgd worden bij het uitvoeren van de probabilistische berekening met faalpaden. In Hoofdstuk 5 is het stappenplan geïllustreerd met een voorbeeld.

1. De eerste en tevens belangrijkste stap in het stappenplan is het **opstellen** van de scenario's die via een buitenwaartse afschuiving tot een overstroming kunnen leiden, de **faalpaden**. Globaal zijn dit de drie gebeurtenissen uit Figuur 2.1. De buitenwaartse afschuiving kan het gevolg zijn van een val na hoogwater, een val naar extreem laagwater of extreme neerslag. Voorafgaand aan de val na hoogwater kan er al schade zijn aan de dijk. Daarnaast moet een inschatting gemaakt worden van de relevante vervolgmechanismen tijdens een volgende hoogwater. Erosie van het buitentalud door golfaanval is waarschijnlijk relevant, erosie van het binnentalud door overslag kan relevant zijn bij kruinverlaging, macrostabiliteit en microstabiliteit bij een zanddijk wanneer de waterspanningen in de dijk significant toenemen door een afgeschoven bekleding. Bij het opstellen van de faalpaden is het belangrijk een inschatting te maken van de kans en het

gevolg van een gebeurtenis. Gebeurtenissen met een relatief grote kans en gevolg moeten meegenomen worden. Bij twijfel kan gekozen worden meerdere faalpaden uit te werken of om van grof naar fijn te werken (het meest relevant geachte faalpad eerst, etc.). Hoofdstuk 2.2 en Hoofdstuk 8 van [5] kunnen kader geven aan deze eerste stap.

De volgende stappen zijn gegroepeerd per (deel)gebeurtenis uit Figuur 2.1. Stappen 2 t/m 5 stappen zijn benodigd om de kans op een buitenwaartse afschuiving te bepalen.

2. Maak een **schematisatie** van de betreffende **doorsnede**. De schematisatie moet zowel in D-Geo Flow als in D-Geo Stability gemaakt worden. In de van grof naar fijn aanpak kan er ook voor gekozen worden om in eerste instantie de D-Geo Flow berekening achterwege te laten en een conservatieve inschatting van de waterspanningen te maken.
3. Bepaal de **grondeigenschappen** van de verschillende grondlagen in de schematisatie. Het gaat er hierbij om welke sterkte-eigenschappen en doorlatendheidseigenschappen toegekend worden aan de verschillende grondlagen. Daarnaast moet de keuze gemaakt worden welke eigenschappen als stochast en welke eigenschappen als determinist worden meegenomen. Variabelen waarvan de onzekerheid dominant is moeten als stochast worden meegenomen. Variabelen waarvan de onzekerheid niet dominant is kunnen als karakteristieke waarde worden meegenomen. Ten derde moet de correlatie tussen de stochasten worden bepaald. Het toekennen van te veel correlatie is conservatief in de probabilistische berekening. In Hoofdstuk 3 van dit rapport is ingegaan op het materiaalmodel voor de sterkte-eigenschappen.
4. Bepaal de **hydraulische randvoorwaarden**. Het betreft hier het verloop van de buitenwaterstand en eventueel neerslag. Voor val na hoogwater is dit de schematisatie van het verloop tot hoogwater, de hoogwaterstand en de schematisatie van de val. Tussen de verschillende stochasten moet de correlatie worden bepaald.
5. Voer de **probabilistische berekening** uit. De berekeningen kunnen 'handmatig' in stappen (optie 1) of integraal (optie 2) worden uitgevoerd of met een tussenvorm.
 - a. Met optie 1 bereken je eerst de freatische lijnen met D-Geo Flow voor verschillende scenario's van hydraulische randvoorwaarden en eventueel verschillende doorlatendheden. Vervolgens voer je per scenario een probabilistische stabiliteitsberekening uit. Resultaat is een fragility curve (curve van conditionele faalkansen). Deze fragility curve moet vervolgens over de kansverdeling van de scenario's worden geïntegreerd. In Hoofdstuk 6 van [5] is deze procedure uitgewerkt.
 - b. Met optie 2 koppel je D-Geo Flow en D-Geo Stability (in bijvoorbeeld de Probabilistic Toolkit) en voer je de berekening integraal uit. In dit geval is een berekening met de probabilistische methode FORM niet mogelijk en moet bijvoorbeeld Monte Carlo Importance Sampling worden gebruikt. Dit vergt enige ervaring met deze probabilistische methode.

In het geval er gerekend wordt met meerdere stochasten voor de hydraulische randvoorwaarden en een onzekere doorlatendheid heeft optie 2 de voorkeur. Met optie 1 loopt het aantal scenario's waarvoor de freatische lijn berekend moet worden in dat geval uit de hand.

16 december 2020, versie 1.0, definitief

Aangezien het moment tijdens de val waarop de stabiliteit het laagst is niet vooraf bekend is, moet de stabiliteitsanalyse op meerdere tijdstappen na het begin van de waterstandsval worden berekend.

Het resultaat van stap 5 is de kans op een buitenwaartse afschuiving.

De stappen 6 t/m 8 zijn benodigd om de kans op een volgende belasting voordat herstel is uitgevoerd te bepalen.

6. Bepaal de **kansverdeling** van de tijd tot het **opeenvolgend hoogwater**. Dit kan door in een reeks waterstandsmetingen de pieken te herkennen. De tijd tussen twee pieken is de tijd tussen twee hoogwaters. Corrigeer deze kansverdeling eventueel voor de tijd tussen het hoogwater en de afschuiving. De tijd tussen het hoogwater en de afschuiving kan uit stap 5 verkregen worden. Er kan ook gecorrigeerd worden voor het feit dat de dijk al enkele dagen voor de volgende hoogwaterpiek belast wordt. Deze correcties hebben meestal een beperkt effect op de kans die bepaald wordt in stap 8.
7. Bepaal de **kansverdeling** van de **hersteltijd**. In Hoofdstuk 4 wordt kader gegeven aan de inschatting van de hersteltijd. Voor de hersteltijd kan in eerste instantie ook een conservatieve schatting als determinist worden gehanteerd.
8. Bepaal de kans dat de hersteltijd langer is dan de tijd tot het volgende hoogwater. Het resultaat is de **kans op een volgende belasting voor herstel**. Dit kan met de grenstoestandsfunctie $Z = T_{opeenvolgende\ belasting} - T_{herstel}$. De kans op falen, $Z < 0$, kan met FORM, Monte Carlo of een andere probabilistische methode worden opgelost.

Het resultaat uit stap 8 is de kans op een volgend hoogwater (belasting) voordat de schade door de buitenwaartse afschuiving hersteld is.

De stap 9 is benodigd om de kans op falen, een overstroming, tijdens het eerst volgende hoogwater te bepalen.

9. Bepaal voor de in stap 1 herkende relevante **vervolgfaalmechanismen** de toegenomen **kans op falen** tijdens het volgende hoogwater. De kansen kunnen bepaald worden door grenstoestandsfuncties, Z-functies, voor de mechanismen op te stellen en de faalkans $Z < 0$ te bepalen. Combineer de toegenomen kans op falen tijdens het volgend hoogwater voor de verschillende mechanismen. Het resultaat is de kans op een overstroming tijdens het volgende hoogwater. Conservatief (bovengrensschatting) is om de kansen gewoon op te tellen. Een ondergrensschatting is te geven door de grootste faalkans te nemen.

Het resultaat uit stap 9 is de kans op een overstroming tijdens het opeenvolgend hoogwater.

In stap 10 komen alle dealkansen samen.

10. **Combineer** de drie **dealkansen** tot de kans op een overstroming door macrostabiliteit buitenwaarts. De kans op een afschuiving (stap 5), de kans op hoogwater voor herstel (stap 8) en de kans op falen tijdens het volgende hoogwater (stap 10). De stappen 5, 8 en 10 kunnen ook integraal in één berekening worden opgelost, dit vereist enige ervaring met MC-IS en de Probabilistic Toolkit (zie aanbevelingen, Hoofdstuk 6).

Stap 11 is de controle of faalpaden met grotere afschuiving niet significant bijdragen aan de overstromingskans.

11. **Controleer of alternatieve grotere afschuivingen** met een kleinere kans van optreden, maar grotere gevolgen een grotere bijdrage hebben aan de overstromingskans. Grotere afschuivingen zullen meestal een kleinere kans van optreden hebben dan de meest waarschijnlijke afschuiving. De controle kan uitgevoerd worden door een limiet te stellen aan het intredepunt van het glijvlak in D-Geo Stability. Wanneer de berekeningen netjes gekoppeld zijn in bijvoorbeeld de Probabilistic Toolkit, dan is dit een 'één druk op de knop actie'.

3 Keuze materiaalmodel

3.1 Inleiding

Bij het uitvoeren van grondmechanische analyses wordt in Nederland vrijwel altijd uitgegaan van volledig met water verzadigde grond of van volledig droge grond. Onder het freatisch vlak wordt de grond volledig met water verzadigd verondersteld. Boven het freatisch vlak wordt voor de beschrijving van de schuifsterkte van de grond uitgegaan van volledig droge grond. Ook voor waterkeringen is dat altijd de gangbare aanpak geweest. De WBI Schematiseringshandleiding Macrostabiliteit [4] volgt deze aanpak ook.

De werkelijkheid is echter dat boven het freatisch vlak de grond niet volledig droog is, maar dat daar ook vocht aanwezig is. De zone boven het freatisch vlak wordt de onverzadigde zone genoemd, hoewel in deze zone ook deels nog sprake kan zijn van volledige verzadiging. Wat de onverzadigde zone bijzonder maakt is de negatieve waterspanning in deze zone. De negatieve waterspanning geeft de grond een schijnbaar hogere effectieve spanning, wat ook resulteert in extra sterkte. Deze extra sterkte kan aanzienlijk zijn. Vanwege de variatie van het vochtgehalte in de tijd is deze extra sterkte echter ook variabel. Onder invloed van het variërende vochtgehalte en negatieve waterspanning zwelt en krimpt de klei in de onverzadigde zone voortdurend. Hierbij treedt structuurvorming of aggregaatvorming op: er ontstaat een systeem van kluiten (aggregaten) en scheuren.

Met name in West-Nederland ligt het gemiddelde niveau van het freatisch vlak vaak dicht bij het maaiveld. De onverzadigde zone speelt dan een beperkte rol in de analyse van macrostabiliteit. In Oost-Nederland kan het freatisch vlak behoorlijk diep liggen ten opzichte van het maaiveld. Het komt vaak voor dat de volledige dijk en de Holocene kleiige deklaag volledig boven het gemiddelde niveau van het freatisch vlak liggen. De gehele dijk en deklaag bevinden zich dan in de onverzadigde zone.

Sinds de introductie van het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte voor het analyseren van macrostabiliteit is er discussie over het toepassen van de ongedraineerde schuifsterkte voor kleiige grondlagen die boven het gemiddelde freatisch vlak liggen en dus initieel onverzadigd zijn. De nu gangbare manier van interpreteren van sonderingen en triaxiaalproeven voor het afleiden van schuifsterkte parameters uitgaande van ongedraineerd grondgedrag leidt vaak tot onverwachte of ongeloofwaardige resultaten. De invloed van de genoemde negatieve waterspanning speelt hierbij een rol. In de praktijk wordt daarom door waterkeringbeheerders meestal de gedraineerde schuifsterkte (met alleen hoek van inwendige wrijving) toegepast voor initieel onverzadigde kleiige grondlagen. Dat het om kleiig materiaal gaat, zou volgens de WBI Schematiseringshandleiding Macrostabiliteit een reden zijn om uit te gaan van ongedraineerd grondgedrag voor het beoordelen van macrostabiliteit. Omdat het echter om initieel onverzadigde grond gaat, is vaak de gedachte dat dit kleiige materiaal toch goed doorlatend kan zijn vanwege de eerder genoemde krimpscheuren en dat de aanname van gedraineerd grondgedrag daarom een verdedigbare keuze is. Het is in ieder geval een voorzichtig keuze.

In opdracht van Rijkswaterstaat en de POVM wordt onderzoek uitgevoerd om meer inzicht te krijgen in het grondgedrag in de onverzadigde zone om daarmee de bepaling van schuifsterkte parameters van de onverzadigde zone voor het beoordelen van en ontwerpen op macrostabiliteit van dijken te verbeteren. Voor dit onderzoek worden sinds najaar 2019 op de meetlocaties Oijen langs de Maas en Westervoort langs de IJssel metingen in het veld van het vochtgehalte, negatieve waterspanning en schuifsterkte uitgevoerd. In het laboratorium worden

proeven gedaan om de schuifsterkte te meten op grondmonsters en diverse andere proeven die bedoeld zijn om de veld- en laboratoriummetingen te kunnen interpreteren. Het onderzoek is voorafgegaan door een literatuurstudie [2].

In het voorliggende hoofdstuk wordt op basis van de genoemde literatuurstudie en de tot nu toe opgedane inzichten uit het onderzoek naar de schuifsterkte in de onverzadigde zone bij Oijen en Westervoort een inschatting gemaakt van de schuifsterkte in de onverzadigde zone van de in de bovenrivierengebied case van Hoofdstuk 5 beschouwde dijk (Paragraaf 3.6). Daarvoor wordt een voorschot genomen op de mogelijke uitkomst van het onderzoek naar de schuifsterkte in de onverzadigde zone. Dat kan in dit geval, omdat het hier gaat om gevoeligheidsberekeningen. De kennis over de onverzadigde zone is op dit moment nog onvoldoende om de tot nu te opgedane inzichten toe te passen bij het beoordelen en ontwerpen van waterkeringen.

3.2 Vochtgehalte, verzadigingsgraad, zuigspanning, capillaire spanning

In de onverzadigde zone neemt het vochtgehalte in de grond gemiddeld genomen in opwaartse richting af en neemt het gehalte lucht in de grond toe. De verzadigingsgraad, de verhouding van het volume water ten opzichte van het volume poriën, neemt daarmee ook in opwaartse richting af. In klei kan de grond tot enkele meters boven het freatisch vlak volledig met water verzadigd zijn. Dit is de capillaire zone. Het vochtgehalte in de onverzadigde zone varieert in de tijd onder invloed van neerslag, verdamping en grondwaterfluctuaties. Dit zorgt er ook voor dat het niveau van het freatisch vlak variabel is in de tijd.

Bij afnemend vochtgehalte en afnemende verzadigingsgraad neemt de negatieve waterspanning (zuigspanning) in de grond toe. Bij afnemend vochtgehalte bevindt het vocht zich rondom de gronddeeltjes. Dit vocht is deels door adhesiekrachten verbonden aan de gronddeeltjes. Daarnaast bevindt het vocht zich rond de contactpuntjes tussen de gronddeeltjes. Dit vocht rond deze contactpuntjes zorgt voor een aantrekkingskracht (capillaire spanning) tussen de gronddeeltjes. Bij een afnemende verzadigingsgraad is relatief steeds meer vocht gebonden aan de gronddeeltjes. Dat zorgt ervoor dat bij afnemend vochtgehalte de adhesiekrachten toenemen. Met name bij een lage verzadigingsgraad is daardoor slechts een deel van het vocht in staat om capillaire spanningen te veroorzaken.

Het vocht wat zich in de onverzadigde zone rond de contactpuntjes van de gronddeeltjes bevindt, veroorzaakt capillaire spanning. Dit geeft de grond een schijnbaar hogere effectieve spanning, wat ook resulteert in extra schuifsterkte. Deze extra sterkte kan aanzienlijk zijn. Vanwege de variatie van het vochtgehalte in de tijd is deze extra sterkte echter wisselend in grootte en ook niet altijd aanwezig. Onder invloed van het variërende vochtgehalte en zuigspanning zwelt en krimpt de klei in de onverzadigde zone voortdurend. Hierbij treedt structuurvorming of aggregaatvorming op: er ontstaan kluiten (aggregaten) en scheuren.

3.3 Invloed van zuigspanning op effectieve spanning en schuifsterkte

De schijnbaar hogere effectieve spanning en schuifsterkte in de onverzadigde zone wordt veroorzaakt door de capillaire spanning. Deze capillaire spanning heeft betrekking op dat deel van de zuigspanning wat wordt veroorzaakt door het vocht wat niet door adhesiekrachten gebonden is aan de gronddeeltjes. Om de twee componenten van de negatieve waterspanning te onderscheiden, wordt onderscheid gemaakt tussen macroporiën en microporiën. De aanname is dat het vocht in de microporiën volledig door adhesiekrachten aan de gronddeeltjes is gebonden. Het vocht in de macroporiën is niet aan de gronddeeltjes gebonden en veroorzaakt capillaire spanning. De verhouding van het vocht in de macroporiën ten opzichte van het totale poriënvolume is de effectieve verzadigingsgraad. Merk op dat de macroporiën niet de scheuren van gestructureerde grond betreffen, maar de grotere poriën in de aggregaten.

16 december 2020, versie 1.0, definitief

Uitgaande van het Mohr Coulomb-criterium en niet-associatief grondgedrag als beschrijving van de maximaal mobiliseerbare schuifsterkte is de bijdrage van de zuigspanning aan de schuifsterkte als volgt:

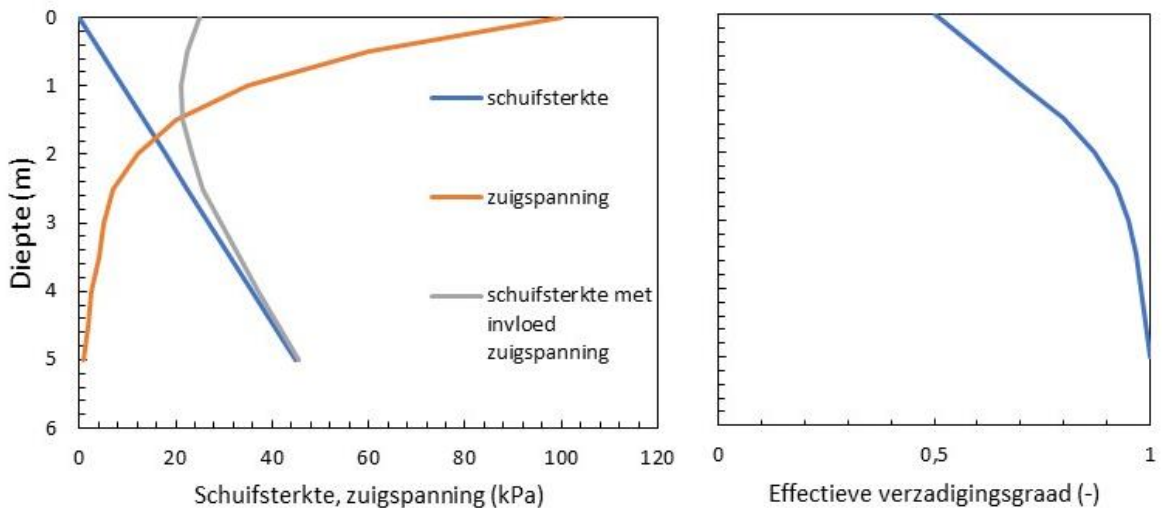
$$\tau = (\sigma + S_{rM} \cdot s) \cdot \sin(\varphi'_{cs}) \quad (1)$$

Hierin zijn:

- τ schuifsterkte (kPa),
- σ totaalspanning (kPa),
- S_{rM} effectieve verzadigingsgraad: verhouding van het vocht in de macroporiën en het totale poriënvolume (-),
- s totale negatieve waterspanning of zuigspanning (kPa),
- φ'_{cs} hoek van inwendige wrijving bij de 'critical state' (°).

Merk hierbij op dat deze beschrijving van de schuifsterkte uit gaat van gedraineerd grondgedrag.

Figuur 3.1 geeft een voorbeeld van het verloop van de zuigspanning, verzadigingsgraad en schuifsterkte in de diepte uitgaande van Formule (1). In de bovenste 3 meter is de verhoogde schuifsterkte zichtbaar, die het gevolg is van de zuigspanning.



Figuur 3.1 Voorbeeld van verloop van zuigspanning, verzadigingsgraad en schuifsterkte in de diepte uitgaande van Formule (1).

Ondiep in de grond kan de mate van structuurvorming sterk zijn. Daardoor kan het zijn dat de aggregaten nauwelijks samenhang hebben. Het is niet evident dat de zuigspanning een positieve bijdrage levert aan de mobiliseerbare schuifsterkte tussen de aggregaten in deze sterk gestructureerde zone.

3.4 Invloed vochtgehalte en zuigspanning op zwel- en krimpgedrag en doorlatendheid

Zoals aangegeven varieert het vochtgehalte in de onverzadigde zone in de tijd. De zuigspanning varieert hierdoor eveneens. Deze variaties in vochtgehalte en zuigspanning veroorzaken het zwellen en krimpen van de grond. Dit zwellen en krimpen leidt tot structuurvorming; er ontstaan kluiten (aggregaten) en scheuren. Als gevolg van de

krimpscheuren in de grond heeft de grond een hogere doorlatendheid. Wanneer het vochtgehalte weer toeneemt en de zuigspanning afneemt, treedt zwel van de grond op, waardoor krimp-scheuren weer geheel of gedeeltelijk verdwijnen. Scheurvorming kan deels onomkeerbaar zijn, omdat de volumevermindering door krimpen van de grond deels onomkeerbaar is. De mate waarin grond zwelt en krimpt neemt met de diepte af, doordat variaties in vochtgehalte en zuigspanning ook met de diepte afnemen. Doordat dijken vaak door de eeuwen heen zijn opgebouwd, kan het wel zijn dat dieper in een dijklichaam een sterke mate van structuurvorming aanwezig is uit een periode waarin die gestructureerde klei dichter aan het maaiveld lag. Wanneer er zuigspanning in de grond optreedt, kan worden aangenomen dat er sprake is van krimp van de grond en dat daardoor scheurvorming in de grond optreedt en de doorlatendheid toeneemt. Omgekeerd kan er echter niet van uit worden gegaan dat wanneer de zuigspanning verdwijnt ook de krimp-scheuren geheel verdwijnen en de grond slecht doorlatend wordt, aangezien ook oude scheuren aanwezig kunnen zijn.

De doorlatendheid van de grond is een belangrijke parameter bij de afweging of grond als gedraineerd of ongedraineerd materiaal wordt gemodelleerd voor het analyseren van taludstabiliteit. Bij een lage doorlatendheid ligt ongedraineerd gedrag voor de hand. Bij een hoge doorlatendheid is gedraineerd gedrag aannemelijk. Voor de onverzadigde zone van een kleidijk kan de doorlatendheid als relatief laag worden gezien wanneer de zuigspanning laag is en er geen krimp-scheuren zijn. Als er zuigspanning aanwezig is en er krimp-scheuren zijn, is de doorlatendheid hoger en zou gedraineerd gedrag mogelijk kunnen zijn. Het eerder gestelde dat in een dijklichaam structuurvorming vanuit het verleden aanwezig kan zijn, maakt dat de afweging over het materiaalgedrag niet eenduidig kan worden gemaakt.

3.5 Bevindingen onderzoek bij Oijen en Westervoort

Uit het verloop van de metingen van de zuigspanningen bij Oijen en Westervoort blijkt dat de zuigspanningen door het jaar heen aanzienlijk fluctueren [3]. In de wintermaanden en het voorjaar zijn de zuigspanningen relatief laag of afwezig. Opmerkelijk is dat de periode waarin de zuigspanningen geheel afwezig zijn, rond half maart, slechts enkele dagen duurt. Vrijwel de gehele winter is er dus wel enige zuigspanning (enkele kPa's) aanwezig. Aan het einde van het voorjaar en in de zomer zijn in de bovenste 1 à 2 meter zuigspanningen tot boven 80 kPa gemeten.

De schuifsterkte in de bovenste meters van de dijk en de ondergrond blijkt zeer hoge waarden te kunnen hebben. Voor het begin van de zomer is een schuifsterkte afgeleid van bijna 500 kPa. Aan het einde van de zomer is de maximale schuifsterkte lager (circa 300 kPa). Het effect van neerslag en verdamping op vochtgehalte en zuigspanning is dan echter tot dieper in de dijk doorgedrongen en daardoor is tot dieper in de dijk een verhoogde schuifsterkte aanwezig. De schuifsterkte in de winter met minimale waarden van de zuigspanning bedraagt circa 35 kPa. Deze schuifsterkte is in het hele dijklichaam en in de hele deklaag aanwezig. Deze schuifsterkte is substantieel hoger dan de schuifsterkte volgens Formule (1).

Opmerkelijk is dat de schuifsterkte zich niet zondermeer laat verklaren door de gemeten zuigspanningen. Uitgaande van de beschreven relatie tussen de schuifsterkte en de zuigspanning (Formule 1) is de schuifsterkte aanzienlijk hoger dan wat zou mogen worden verwacht op basis van de gemeten zuigspanningen. Dit geldt voor de laagste schuifsterkte in de winter en ook voor de heel hoge schuifsterkte in de zomer. Er zijn een aantal mogelijke oorzaken aan te wijzen voor deze discrepantie:

- De zuigspanning is in werkelijkheid hoger dan is gemeten,
- Dilatant materiaalgedrag speelt een rol bij de mobilisatie van de schuifsterkte,
- Blijvend effect van uitdroging en compactie van de klei in eerdere droge zomers,
- Effect van de verdichting van de klei bij aanleg van de dijk.

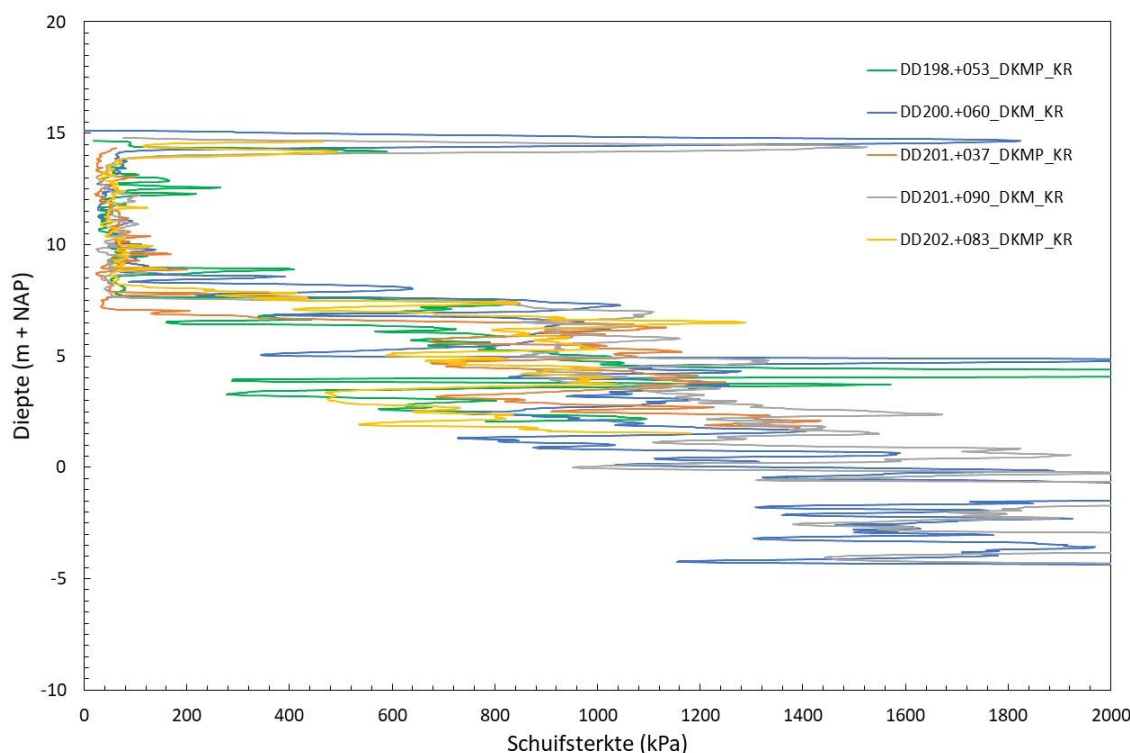
16 december 2020, versie 1.0, definitief

Deze aspecten worden in het onderzoek naar de sterkte van de onverzadigde zone onderzocht.

3.6 Analyse beschikbare data van de bovenrivierengebied case

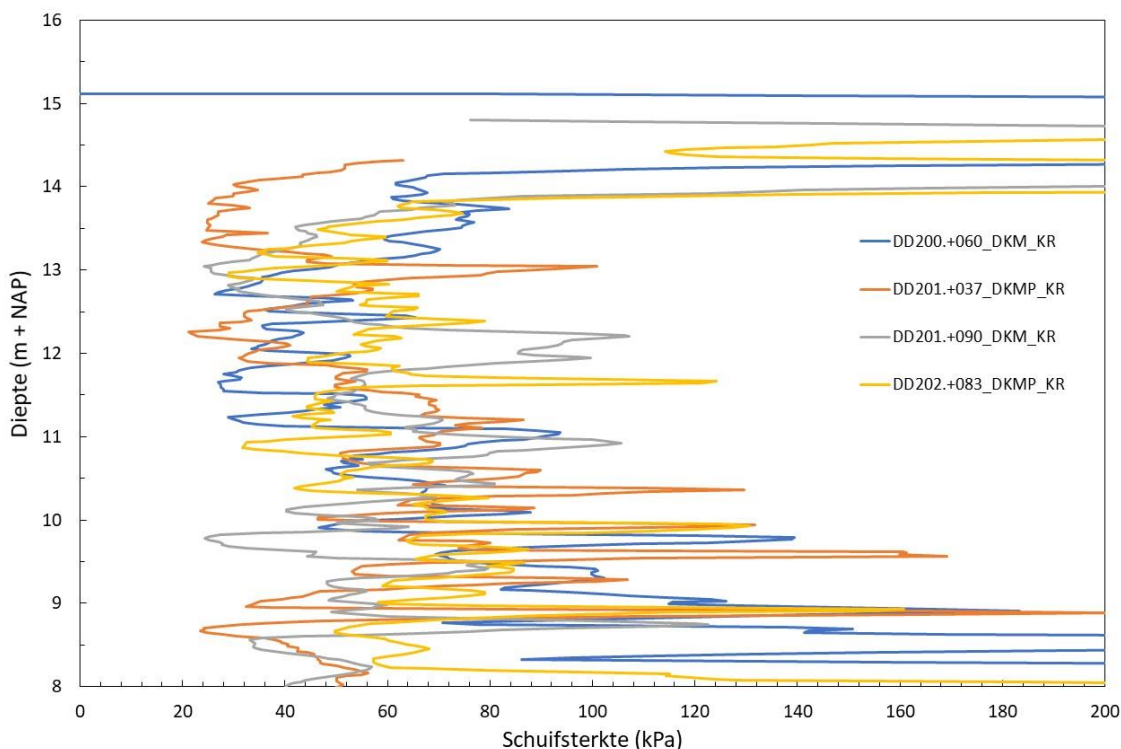
Voor het bepalen van de schuifsterkte van dijksmateriaal is gebruik gemaakt van sonderingen, boorbeschrijvingen, classificatietesten en triaxiaalproeven.

Voor de geselecteerde locatie voor het uitvoeren van de stabiliteitsanalyses zijn geen sonderingen in de kruin beschikbaar. Van de beschikbare sonderingen is een aantal sonderingen geanalyseerd, die op wat grotere afstand van de geselecteerde locatie liggen. Er zijn meerdere sonderingen geanalyseerd om inzicht te krijgen in de aanwezige variabiliteit van de sondeerweerstand. Op basis van de sondeerweerstand is de schuifsterkte afgeleid. Hierbij is uitgegaan van een correlatiefactor N_{kt} van 15, een volumegewicht van $18,5 \text{ kN/m}^3$ en een gemiddeld niveau van het freatisch vlak op NAP+6,5 m. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 3.2 en Figuur 3.3.



Figuur 3.2 Berekening van de schuifsterkte uit sondeerweerstand.

Figuur 3.2 laat zien dat in de bovenste 2 meter van de dijk zeer hoge schuifsterkte waarden uit de sonderingen worden afgeleid, tot 1900 kPa. Voor het sonderen is voorgeboord of voorgesondeerd. De hoge sondeerwaarden betreffen dus niet de wegverharding. Dieper in de dijk is de schuifsterkte aanzienlijk lager, zoals in meer detail is weergegeven in Figuur 3.3. Uit het sondeerbeeld in Figuur 3.2 volgt verder dat de onderkant van de Holocene klei deklaag tussen NAP+6 m en NAP+8 m ligt. Het binnendijkse maaiveld ligt op NAP+8,5 m à NAP+9,5 m. Daaruit volgt dat de Holocene klei deklaag circa 1 à 3 meter dik is.



Figuur 3.3 Berekening van de schuifsterkte uit sondeerweerstand, ingezoomd op het dijkmateriaal.

De hoge schuifsterkte waarden in de bovenste 2 meter van de dijk zijn ook opvallend in Figuur 3.3. Verder is in Figuur 3.3 te zien dat de schuifsterkte boven NAP+11 m gemiddeld iets lager is dan beneden NAP+11 m. Het is niet duidelijk waardoor dit verschil in schuifsterkte wordt veroorzaakt. Het binnendijkse maaiveld ligt op NAP+8,5 m à NAP+9,5 m, zoals eerder genoemd, zodat dit verschil in schuifsterkte wellicht moet worden toegeschreven aan verschillende dijkversterkingen. Boorfoto's die hier meer duidelijkheid over zouden kunnen geven, zijn niet beschikbaar.

De boorbeschrijvingen geven aan dat de dijk grotendeels uit kleiig materiaal bestaat; ook de bovenste 2 meter. De zeer hoge schuifsterkte waarden bovenin de dijk kunnen daarom waarschijnlijk deels worden toegeschreven aan de invloed van verdichting van de klei door het verkeer op de dijk en deels door compactie van de klei als gevolg van uitdroging door verdamping. De verdamping zorgt voor een afname van het watergehalte en daaraan gekoppeld een toename van de capillaire spanning. De toename van de capillaire spanning veroorzaakt een toename van de schuifsterkte. De sonderingen zijn uitgevoerd in twee series in 2016 en 2019 en beide series sonderingen zijn in het voorjaar uitgevoerd; de maanden april, mei en juni. Als gevolg van het doorgaans nog relatief beperkte neerslagtekort in die periode van het jaar is het mogelijk dat de invloed van de verdamping op de schuifsterkte nog relatief ondiep in het dijklichaam is doorgedrongen. Omdat de sonderingen op verschillende locaties en op verschillende tijdstippen zijn uitgevoerd, is het niet mogelijk om een goed beeld te krijgen van de invloed van verdamping en capillaire spanningen op de schuifsterkte. Op basis van het sondeerbeeld in Figuur 3.3 is ingeschat dat de schuifsterkte dieper dan NAP+13 m niet wordt beïnvloed door verdamping en wisselingen in watergehalte en capillaire spanningen.

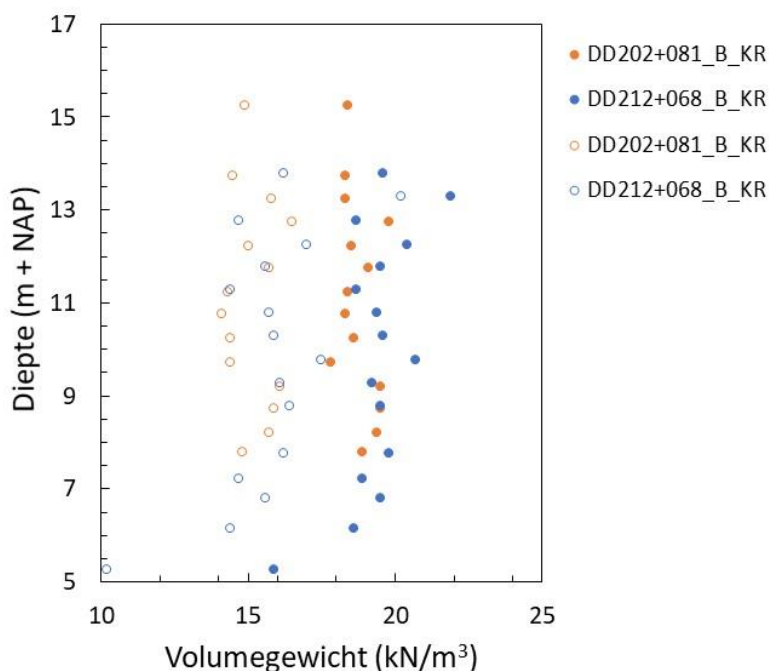
Tabel 3.1 geeft een samenvatting van enkele kenmerken van de boorbeschrijvingen.

16 december 2020, versie 1.0, definitief

Tabel 3.1 Enkele kenmerken uit de boorbeschrijvingen.

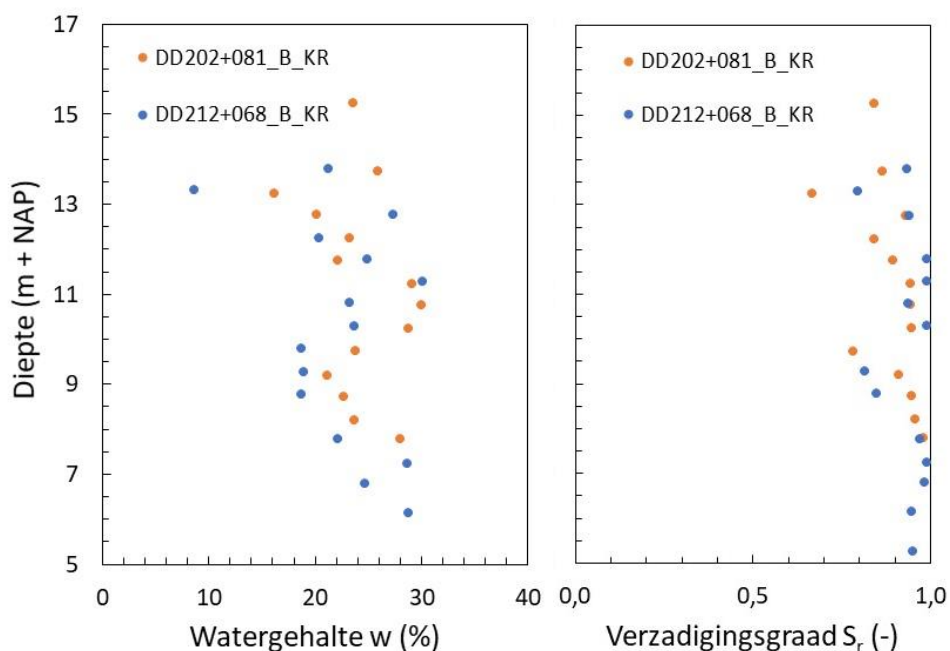
Boring	Datum	Bovenkant zand (NAP + m)	Grondwaterstand (NAP + m)	Overgang grijze naar bruine klei (NAP + m)	Verkleuring klei verder naar boven toe
DD196.+000_B_KR	20-5-2019	7,2	5,5	11,2	bruin-grijs
DD202+081_B_KR	14-4-2016	7,5	7,5	10,7	bruin-grijs, grijs-bruin en bruin
DD189.+090_B_KR	14-4-2016	8,1	7,5	8,1	hele boring afwisselend grijs, grijs-bruin, grijs met roest
DD212+068_B_KR	18-4-2016	2,35	6,5	2,35	hele boring afwisselend grijs, grijs-bruin, grijs met roest

Figuur 3.4 geeft profielen van de verzadigde of veldvochtige volumegewichten en droge volumegewichten. Figuur 3.4 geeft niet duidelijk een trend dat de verzadigde of veldvochtige volumegewichten in opwaartse richting dichter naar de droge volumegewichten toe gaan. Aangezien de boringen ook in april en mei zijn uitgevoerd (eveneens in 2016 en 2019), kan het relatief geringe neerslagtekort in deze maanden hier de verklaring voor zijn. Figuur 3.4 toont ook de hoge volumegewichten zoals ook toegepast in de berekening van de schuifsterkte uit de sondeerweerstand.



Figuur 3.4 Verzadigde of veldvochtige volumegewichten (dichte symbolen) en droge volumegewichten (open symbolen).

Het verloop van het watergehalte en de verzadigingsgraad in Figuur 3.5 geven een wisselend beeld over de diepte. Dit verklaart waarschijnlijk het wisselende beeld van de verkleuring zoals aangegeven in de boorbeschrijvingen en zoals samengevat in Tabel 3.1. In de bovenste meters van het dijklichaam lijkt vanaf NAP+12 m in opwaartse richting een afname van het watergehalte en de verzadigingsgraad zichtbaar. Dit komt overeen met het beeld van de berekende schuifsterkte uit de sondeerweerstand (zie Figuur 3.3).

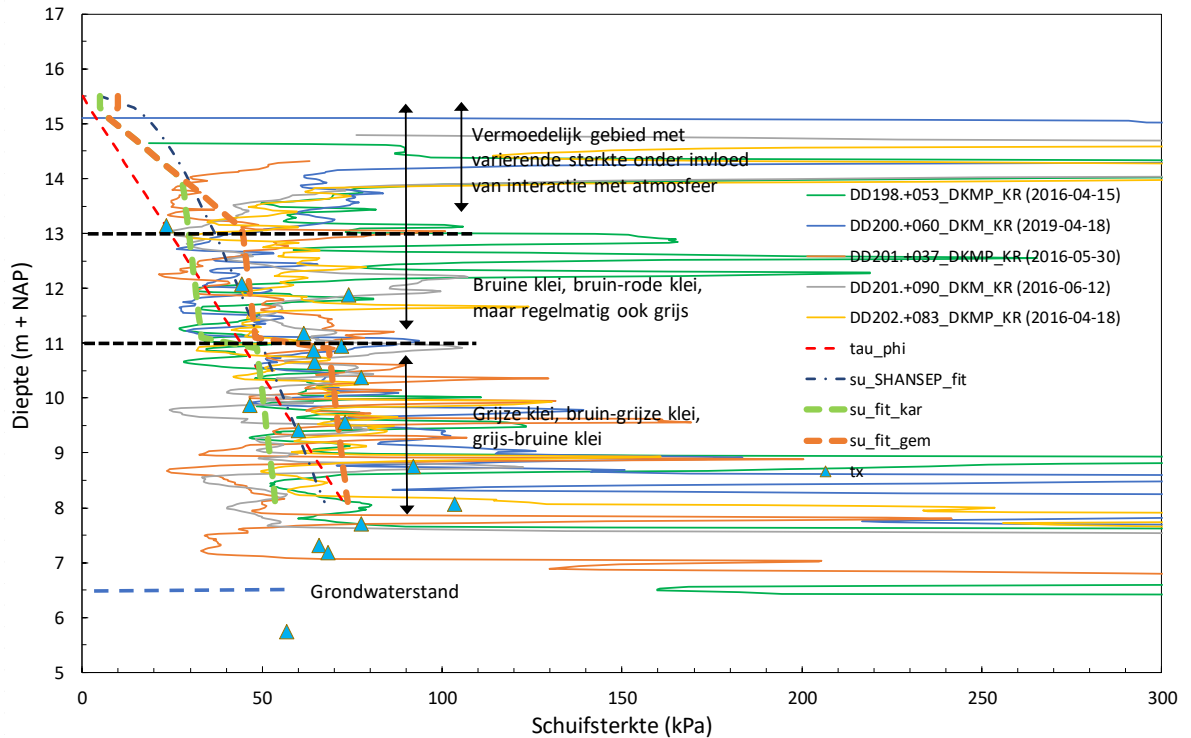


Figuur 3.5 Watergehaltes (links) en verzadigingsgraden (rechts).

Vanuit de bovenstaande analyse is samenvattend Figuur 3.6 opgesteld. Daarbij is er van uitgegaan, dat de uit de sonderingen afgeleide schuifsterkte representatief is voor de mobiliseerbare schuifsterkte bij het optreden van een taludinstabiliteit. Enkele beschikbare ongedraineerde triaxiaalproeven bevestigen de gekozen N_{kt} waarde van 15. Hierbij moet worden opgemerkt dat het grootste deel van de triaxiaalproeven beschikbaar is voor de zone onder NAP+11,0 m, waar de klei over het algemeen behoorlijk grijs van kleur is en de verzadigingsgraad nog regelmatig dicht bij 1,0 ligt. Voor de zone boven NAP+11 m is er onzekerheid of de grond goed doorlatend of niet goed doorlatend is en of het grondgedrag gedraineerd of ongedraineerd is. Met de modellering van de schuifsterkte zoals weergegeven in Figuur 3.6 wordt de trend van de uit de sonderingen afgeleide schuifsterkte gevolgd, zowel boven als beneden NAP+11 m.

In de bovenste meters van de dijk wordt de schuifsterkte uit de sonderingen niet volledig in rekening gebracht. De achtergrond hiervan is dat er van wordt uitgegaan dat grond geen of slechts geringe treksterkte kan mobiliseren. Verder is de klei in deze zone gestructureerd. Met name voor ondiepe schuifvlakken kan niet worden uitgesloten dat deze schuifvlakken deels de bestaande scheuren van de gestructureerde klei volgen, zodat daar relatief weinig schuifsterkte kan worden gemobiliseerd [2]. Op basis van deze overwegingen is een met de diepte toenemende mobiliseerbare schuifsterkte aangenomen, die aansluit op de uit de sonderingen afgeleide schuifsterkte op de diepte waar neerslag en verdamping geen invloed meer hebben op het zwel- en krimpgedrag van de klei (NAP+13,0 m).

16 december 2020, versie 1.0, definitief



Figuur 3.6 Schuifsterkte uit de sonderingen en triaxiaalproeven met modellering van de schuifsterkte met gedraineerde schuifsterkte (ϕ), het ongedraineerde SHANSEP model en gefitte schuifsterkte waarden.

Figuur 3.6 geeft de volgende modelleringen van de schuifsterkte:

- Gedraineerde schuifsterkte met hoek van inwendige wrijving, Vergelijking 1 zonder het effect van zuigspanning.
- Ongedraineerde schuifsterkte met SHANSEP model, met inschattingen voor de S en m en de POP gefit op de schuifsterkte uit de sondeerweerstand.
- Gefitte schuifsterkte (engineering judgement). Hierbij is rekening gehouden met structuurvorming (systeem van kluiten en scheuren) in de bovenste meters van de dijk, waardoor met name voor ondiepe schuifvlakken mogelijk een lagere schuifsterkte kan worden gemobiliseerd. Beneden NAP+13 m kan de schuifsterkte zoals afgeleid uit de sonderingen in rekening worden gebracht, omdat is ingeschat dat beneden dit niveau geen grote wisselingen van vochtgehalte en capillaire spanningen, en daardoor geen grote scheuren, aanwezig zijn die de schuifsterkte beïnvloeden. Ook is rekening gehouden met de eerder genoemde overgang in de schuifsterkte bij NAP+11 m.

Tenslotte wordt opgemerkt, dat in deze casus het profiel van de schuifsterkte gemiddeld genomen ook redelijk kan worden benaderd met de gedraineerde schuifsterkte met een hoek van inwendige wrijving (Formule 1) en met het ongedraineerde SHANSEP model. Met name in de bovenste meters van de dijk geeft het SHANSEP model mogelijk een overschatting van de schuifsterkte (houdt geen rekening met effect van trekspanningen en scheurvorming) en geeft de gedraineerde schuifsterkte met een hoek van inwendige wrijving een onderschatting.

4 Inschatting hersteltijd

4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk betreft een van de deelaspecten van dit onderzoek, het opstellen van een methode om de tijd vanaf het optreden van een buitenwaartse afschuiving tot herstel te kunnen inschatten. Dit is een noodzakelijk onderdeel van de bepaling van de *kans op een volgende belastinggebeurtenis (een hoogwater) binnen de tijd tot herstel van de buitenwaartse afschuiving*. Dit is van belang voor beoordeling en ontwerp van STBU. Binnen de huidige ontwerp en beoordelingssystematiek (WBI2017) wordt standaard uitgegaan van een kans van 0.1 (10%) dat na het optreden een buitenwaartse afschuiving de dijk niet is tijdig hersteld voordat een volgend hoogwater optreedt. In veel gevallen is dit een conservatieve aanname die veelal aanzienlijk kan worden geoptimaliseerd [5]. Anderzijds kan deze aanname te optimistisch zijn. Voor een realistische inschatting¹ van deze kans is inzicht in de tijd tot herstel nodig. Opgemerkt wordt dat in de eerder berekende cases [5] de kans op een volgende belasting zonder tijdig herstel, gelijk aan (voor case merengebied) of één à twee ordes van grootte kleiner is (voor case rivierengebied) dan de 10% conform het WBI2017. In de berekende case voor het kustgebied is geen rekening gehouden met de mogelijkheid tot herstel. Dit omdat na een val van hoogwater de kans op een volgend hoogwater groot is.

Daarnaast kan dit hoofdstuk ook worden gebruikt om de (minimaal) benodigde hersteltijd als ontwerpparameter vast te kunnen stellen of af te leiden, gegeven een vereiste overstromingskans of vereiste stabiliteitseis voor STBU. Dit kan optimalisatie van de ontwerpmaatregel geven, maar ook moet worden bedacht dat dit kan leiden tot een conservatiever ontwerp omdat de benodigde hersteltijd niet haalbaar is. Het is dus altijd goed om hier een idee van te hebben.

In dit hoofdstuk komen alle factoren aan de orde die bepalend zijn voor de tijd tot herstel na buitenwaartse afschuiving (STBU). Hiermee wordt de beheersorganisatie / calamiteitenorganisatie handvatten gegeven om de tijd tot herstel voor een dijktraject te kunnen bepalen of beter gezegd realistisch in te kunnen schatten waarbij de onzekerheid wordt meegenomen.

De tijd tot herstel na een buitenwaartse afschuiving is de som van de ontdek-, respons en hersteltijd:

- De ontdektijd is de tijd tussen het optreden van de buitenwaartse afschuiving(en) en het moment dat deze wordt gesignaleerd.
- De responstijd is de tijd tussen signalering van de afschuiving(en) en het moment dat met het aanbrengen van de (nood) maatregel wordt gestart.
- De hersteltijd is de tijd die nodig is om de (nood)maatregel(en) aan te brengen totdat de dijk de sterkte heeft bereikt van voor de afschuiving(en).

Door interviews met enkele dijkbeheerders is voor de betreffende waterschappen/ hoogheemraadschappen een eerste inschatting gemaakt van de tijd van afschuiving tot herstel

¹ Er wordt hier bewust gesproken over een realistische inschatting en niet over een veilige inschatting of in dit geval bovengrenswaarde. In afwijking van de (oude) overschrijdingskansnormering dient bij de overstromingskansnormering bij probabilistisch te worden uitgegaan van een beste (realistische) schatting gecombineerd met de onzekerheid hiervan (spreiding).

[1]. Hierbij dient te worden opgemerkt dat dit slechts een eerste inschatting van de betreffende dijkbeheerders is die richting geeft en gedachtenbepalend kan zijn.

Uit de interviews volgt dat het de hersteltijd zelf in het algemeen de meest onzeker factor is en daarnaast sterk afhankelijk is van de mate (de grootte en het aantal) van de afschuiving(en). De hersteltijd van een grote afschuiving zou een factor 10 meer tijd kunnen vergen dan een oppervlakkige afschuiving. Dit is dan ook de reden dat in de hier gepresenteerde methode de grootste nadruk wordt gelegd op de hersteltijd zelf. Deze blijkt veelal bepalend voor de totale tijd vanaf het optreden van de buitenwaartse afschuiving tot het herstel.

Onderliggende memo is tot stand gekomen in samenwerking met experts van de waterschappen die ook hun medewerking hebben verleend aan de eerste interviews [1], namelijk:

- Waterschap Rivierenland (representatief voor het bovenrivierengebied);
- Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (representatief voor meren- en kustgebied, met invloed van het getij);
- Waterschap Drents Overijsselse Delta (representatief voor bovenrivieren- en merengebied).

4.2 Methode en aandachtspunten ter bepaling tijd van afschuiving tot herstel

4.2.1 Opzet methode

Ter bepaling van de tijd tot herstel wordt in de volgende paragrafen een methode gegeven voor bepaling/inschatting van achtereenvolgens de ontdek-, respons-, en hersteltijd. Daarbij wordt vooral ingegaan op de aandachtspunten die bepalend zijn voor de betreffende tijden. Zoals eerder aangegeven zijn de respons- en hersteltijd afhankelijk van de grootte en het aantal afschuivingen. Hierdoor is onderscheid gemaakt in het aantal gelijktijdige afschuivingen tijdens een val van hoogwater voor het dijktraject. Op basis van karakteristieken van het dijktraject kan een inschatting van dit aantal worden gemaakt. Ook is onderscheid gemaakt in de grootte van de afschuiving. Een kleine of oppervlakkige afschuiving heeft wellicht een grote kans van optreden maar het herstel is eenvoudiger en kan aanmerkelijk sneller zijn uitgevoerd. Daarentegen kan de kans op een grote afschuiving kleiner zijn maar kan het herstel aanmerkelijk meer tijd vergen. Hierdoor is het soms nodig om beide gevallen te beschouwen ter bepaling van de veiligheid van het buitentalud. De hier gepresenteerde methode en aandachtspunten leidt voor een dijktraject tot de totale tijd vanaf het optreden van de buitenwaartse afschuiving tot herstel die dus afhankelijk is van het aantal en de grootte van de afschuivingen.

Het resultaat wordt in de vorm van een tabel weergegeven (Paragraaf 4.2.5), waarbij de matrix op basis van de overwegingen zoals weergegeven in de volgende paragrafen kan worden ingevuld.

Opmerkingen:

- Met 'herstel' wordt bedoeld op het aanbrengen van een (nood)maatregel waarmee de veiligheid of sterkte van de dijk voor STBI of andere vervolgmecanismen vergelijkbaar is met de situatie voor de afschuiving.
- Bepaling van de tijd vanaf het optreden van de afschuiving tot het uitgevoerde herstel is voor dijken met storm gedreven hydraulische belastingen weinig zinvol. Genoemde tijd tot herstel zal veelal groter zijn dan de tijd tot het eerst volgende hoogwater, waarvan de kans erg groot is dat dit binnen 12 uur zal optreden. Tijdens de storm kan namelijk geen inspectie plaatsvinden waardoor de ontdektijd al 12 tot 48 uur kan zijn. De kans op een opeenvolgend hoogwater zonder herstel is daarmee groot.

4.2.2 Ontdektijd:

De ontdektijd is de tijd tussen het optreden van de buitenwaartse afschuiving(en) en het moment dat deze wordt gesignaleerd. Voor een goede inschatting van de ontdektijd dient rekening te worden gehouden met de volgende aspecten:

- De ontdektijd is afhankelijk van de frequentie van dijkpatrouilles. Als de patrouilles elke 8 uur een ronde doen varieert de ontdektijd tussen 0 en 8 uur.
- s' Nachts zal een geringe afschuiving van het buitentalud minder makkelijk zichtbaar zijn dan overdag waardoor de ontdektijd toeneemt.
- Als met een voertuig wordt geïnspecteerd kunnen bepaalde schades (bijvoorbeeld een geringe afschuiving van het buitentalud) minder snel worden ontdekt.
- Na het hoogwater (tot circa 1 week erna) is er nog steeds kans op een afschuiving buitenwaarts maar zijn er in het algemeen minder inspecties waardoor de ontdektijd kan toenemen. Uit een inschatting van de geïnterviewde waterschappen volgt 0-12 uur.
- Meldingen van een afschuiving kunnen ook door externen worden doorgegeven, vooral in gebieden met meer bebouwing
- Dijkvakken waarbij waarnemingen met ernstige schades zijn (zwakke plekken) zullen in het algemeen vaker worden gemonitord. Hierdoor kan de ontdektijd geringer zijn.

Conclusies:

- De ontdektijd is ook afhankelijk van het watersysteem. Een afschuiving tijdens storm wordt bij een zeedijk vermoedelijk niet ontdekt. De kans op een opeenvolgend hoogwater zonder herstel is daarmee groot. Omdat deze situatie geen optimalisatie geeft hoeft deze niet te worden beschouwd.
- Uit de interviews met experts van de waterschappen volgt dat de ontdektijd tijdens (val van) het hoogwater en in de periode na de val (waarbij nog steeds een afschuiving kan optreden) varieert van 0 tot 12 uur. Hoewel verfijning/optimalisatie voor het eigen beheergebied/dijktraject mogelijk is, blijkt dit niet altijd nodig omdat de hersteltijd vaak aanmerkelijk groter is en daarmee dominant is ter bepaling van de totale tijd van optreden van de afschuiving tot herstel.

4.2.3 Responstijd

De responstijd is de tijd tussen signalering van de afschuiving(en) en het moment dat met het aanbrengen van de (nood) maatregel wordt gestart. Voor een goede inschatting van de responstijd dient rekening te worden gehouden met de volgende aspecten:

- De responstijd bestaat uit:
 - de tijd tussen het ontdekken van de schade en het informeren van de gebiedsbeheerder. In het algemeen is dit circa 15 minuten.
 - de tijd om de 'Digispectie'-app of een inspectieformulier in te vullen met alle relevante gegevens van de ontdekte schade (in dit geval een buitenwaartse afschuiving). In het algemeen is dit circa 15 minuten.
Eventueel zal een aanvullende inspectie van de schadelocatie door de waterkeringbeheerder nodig zijn om meer informatie te verzamelen.
 - de tijd voor het beoordelen van de urgentie van het schadegeval. In het algemeen is dit 0,5 tot 3 uur.
 - Het bepalen van de principe (nood)maatregel. In het algemeen is dit enkele uren.

- De responstijd is onder andere afhankelijk van het aantal gelijktijdige afschuivingen. Het verwachte aantal afschuivingen is afhankelijk van de ruimtelijke correlatie van de stabiliteit langs het dijktraject. Op basis van karakteristieken van het dijktraject kan een inschatting van dit aantal worden gemaakt (zoals gekwantificeerd in Paragraaf 6.4 van [5]). Bij meerdere afschuivingen zal de tijd voor met name het beoordelen van de urgentie en het bepalen van de maatregel meer tijd vergen. Omdat vooraf zonder het uitvoeren van analyses het aantal mogelijke afschuivingen niet zonder meer is in te schatten wordt voor het aantal afschuivingen uitgegaan van 1, 3, 10 en 30 stuks.
- Afhankelijk van de complexiteit en grootte van de schade dienen mogelijk waterkeringadviseurs te worden ingeschakeld om de maatregel uit te werken. Voor de grootte van de schade wordt onderscheid gemaakt in een oppervlakkige afschuiving intredend in het buitentalud en een grote afschuiving intredende in de kruin of binnentalud. Hiervoor wordt verwezen naar Bijlage A.

Opmerkingen:

Opgemerkt wordt dat het in principe niet lastig is om aan te geven wat als oppervlakkige of als grote afschuiving moet worden gezien. Hierbij gaat het niet om de absolute grootte van de afschuiving. Ter bepaling van de nodige hersteltijd is de absolute grootte echter wel van belang. Hoewel dit onderzoek is gericht op primaire waterkeringen zal de hersteltijd van een grote afschuiving van een primaire kering (stel een kerende hoogte van 6m) aanmerkelijk langer zijn dan voor een regionale kering (stel kerende hoogte 2m). Belangrijk is dus dat de hersteltijd afhankelijk is van het te beschouwen dijktraject.

Conclusies:

- Uit de interviews met experts van de waterschappen volgt dat de responstijd sterk afhankelijk is van het aantal afschuivingen en varieert van 0 tot 3 uur voor 1 afschuiving tot 0-30 uur voor 10 afschuivingen. Hoewel verfijning/optimalisatie voor het eigen beheergebied/dijktraject mogelijk is, is dit waarschijnlijk niet nodig als sprake is van 3 of meer afschuivingen omdat de hersteltijd vaak aanmerkelijk groter is en daarmee dominant is ter bepaling van de totale tijd van optreden van de afschuiving tot herstel.
- Inschatting van de geïnterviewde Waterschappen is dat zij er niet op zijn toegerust om bij zeer veel afschuivingen (stel 30 stuks) een responstijd in te schatten [1].

4.2.4 Hersteltijd

De hersteltijd is de tijd die nodig is om de (nood)maatregel(en) aan te brengen totdat de dijk de veiligheid /sterkte heeft bereikt vergelijkbaar met die van voor de afschuiving(en) teneinde overstroming te voorkomen als gevolg van binnenwaartse macrostabiliteit STBI en/of andere vervolgmechanismen. Voor een goede inschatting van de hersteltijd dient rekening te worden gehouden met de volgende aspecten:

- De hersteltijd is afhankelijk van het complexiteit en de grootte van de maatregel. De complexiteit van de te herstellen schade hangt hoofdzakelijk af van de grootte van de afschuiving. Zoals in de vorige paragraaf reeds behandeld wordt hierbij onderscheid gemaakt in een oppervlakkige afschuiving intredend in het buitentalud en een grote afschuiving intredend in de kruin of binnentalud. Hiervoor wordt verwezen naar Bijlage A.
- De hersteltijd is ook afhankelijk van het type (nood)maatregel. In dit memo wordt alleen een te herstellen schade als gevolg van een buitenwaartse afschuiving (macro-instabiliteit) behandeld. Het type (nood)maatregel dat kan worden toegepast is afhankelijk van de

16 december 2020, versie 1.0, definitief

situatie en grootte van de afschuiving. Op de wiki noodmaatregelen² zijn onder het faalmechanisme macro-instabiliteit buitenwaarts (STBU) diverse opties gegeven. Naar deze wiki wordt dan ook verwezen voor het bepalen van het type noodmaatregel. Voor een oppervlakkige afschuiving zijn bijvoorbeeld de volgende maatregelen gegeven:

- Talud onder water aanvullen met zandzakken (big bags).
- Bescherming kruin en buitentalud met geballast folie of geotextiel.
- Lokale afschuivingen opvullen.
- Bevorderen afvoer kwelwater.

Voor een grote afschuiving worden bijvoorbeeld de volgende maatregelen gegeven:

- Opvullen van afschuivingen aan het buitentalud.
- Herstel afgeschoven buitentalud.
- Beschermen restprofiel.

Naast het type maatregel is op de wiki tevens informatie te vinden over de dimensionering van de specifieke maatregel en zijn bij 'uitvoering' tevens kentallen gegeven waarmee de benodigde tijd voor het aanbrengen van de maatregel kan worden ingeschat. Opgemerkt wordt dat voor het type maatregel onderscheid is tussen een buiten- en binnenwaartse afschuiving. Het type maatregel bij eenzelfde grootte van de afschuiving van een binnen- of buitentalud kan verschillend zijn en daarmee ook de hersteltijd. Bij een binnenwaartse afschuiving zal het nood-herstel zodanig zijn uitgevoerd dat de kans op doorbraak als gevolg van STBI of andere vervolgmecanismen weer op orde is als vóór het optreden van hoogwater. Bij een buitenwaartse afschuiving zal het nodige herstel zodanig zijn dat niet STBU (is 'slechts' een indirect mechanisme), maar STBI weer op orde is (en dus weer vergelijkbaar is als voor het hoogwater en dit voor de periode tot een volgend hoogwater). Dit stelt minder eisen aan een STBU noodmaatregel in vergelijking met een STBI noodmaatregel. Als voorbeeld kan wellicht worden genoemd het aanbrengen van een geringe maatregel om verdere schade door golfslag of infiltratie van buitenwater te voorkomen waarmee het optreden van erosie of een binnenwaartse afschuiving kan worden voorkomen.

- De weersomstandigheden en bereikbaarheid (afhankelijk van het in te zetten materieel) van de locaties kunnen ook een rol spelen.
 - Bij meerdere gelijktijdige afschuivingen zal herstel mogelijk meer tijd vergen. Omdat vooraf zonder het uitvoeren van analyses het aantal mogelijke afschuivingen niet zonder meer is in te schatten wordt voor het aantal afschuivingen uitgegaan van 1, 3, 10 en 30 stuks.

Bij een gering aantal te treffen maatregelen op verschillende locaties in het dijktraject zal dit wellicht minder invloed hebben op de hersteltijd. Als echter sprake is van veel te herstellen locaties waardoor aannemers diverse noodmaatregelen moeten uitvoeren zal de hersteltijd in principe toenemen. Met name bij meerdere afschuivingen dient ook rekening te worden gehouden met beschikbaarheid van personeel (aannemers en waterschap).

Opmerkingen:

- De inschatting van de hersteltijd voor een dijktraject dient een realistische inschatting te zijn waarbij rekening te worden gehouden met de onzekerheid (spreiding). De onzekerheid is in het algemeen zeer groot. Hieruit volgt voor de adviespraktijk dat dit het beste kan worden ingeschat op basis van een ondergrens en bovengrens. Afhankelijk van het type maatregel blijkt uit de interviews [1] dat de ingeschatte hersteltijd van enkele (1 tot 3)

² <https://v-web002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen/index.php/Hoofdpagina>

oppervlakkige afschuivingen bijvoorbeeld kan variëren tussen uren tot dagen. In de probabilistische analyse voor bepaling van de kans op afschuiving binnen de hersteltijd is dit echter voldoende bruikbaar en wordt in dit geval gemodelleerd als een onder en bovengrens met een normale verdeling.

4.2.5 Tijd van afschuiving tot herstel

De tijd vanaf het moment van optreden van de buitenwaartse afschuiving tot het uitgevoerde herstel met een (nood) maatregel is de som van de ontdek-, respons en hersteltijd. Dit kan worden samengevat in onderstaande Tabel 2.

Tabel 2 Schatting van de tijd vanaf de buitenwaartse afschuiving tot (nood) herstel.

Groote buitenwaartse afschuiving	Aantal afschuivingen	Ontdektijd 1)	Responstijd	Hersteltijd 3)	Totaal
Oppervlakkige afschuiving (intredend in het buitentalud)	1	0 tot 12 uur	0 tot 3 uur	Te bepalen: (uren tot dagen)	Som Ontdek-, Respons en Hersteltijd
	3		0 tot 12 uur	Te bepalen: (uren tot dagen)	
	10		0 tot 30 uur	Te bepalen: (dagen tot weken)	
	30		n.t.b. 2)	n.t.b. 4)	
Volledige afschuiving (intredend in de kruin of het binnentalud)	1		0 tot 3 uur	Te bepalen: (dag tot maanden)	
	3		0 tot 12 uur	Te bepalen: (dagen tot maanden)	
	10		0-30 uur	Te bepalen: (weken tot maanden)	
	30		n.t.b. 2)	n.t.b. 4)	

1) Inschatting van de geïnterviewde Waterschappen is dat de ontdektijd varieert. Hoewel verfijning/optimalisatie voor het eigen beheergebied/dijktraject mogelijk is, blijkt dit niet altijd nodig omdat de hersteltijd vaak aanmerkelijk groter is en daarmee dominant ter bepaling van de totale tijd van optreden van de afschuiving tot herstel.

2) Inschatting van de geïnterviewde Waterschappen is dat zij er niet op zijn toegerust om bij een dergelijke hoeveelheid afschuivingen een responstijd in te schatten [1],

3) De hersteltijd is veelal bepalend is voor de totale tijd vanaf optreden van de afschuiving tot en met (nood)herstel en dient voor het betreffende dijktraject te worden ingeschat aan de hand van de aandachtspunten als weergegeven in Paragraaf 2.4.

4) Inschatting van de geïnterviewde Waterschappen is [1], dat te weinig capaciteit beschikbaar is om herstelmaatregelen uit te voeren voor het optreden van een volgend hoogwater, bij een dergelijke hoeveelheid afschuivingen.

Opgemerkt wordt dat een eerste inschatting van met name de hersteltijden in Tabel 5 van [1] is weergegeven. Let op, dit is dus slechts een inschatting gemaakt door de dijkbeheerders van drie waterschappen voor hun specifieke situatie. Het betreft Waterschap Rivierenland, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier en Waterschap Drents Overijsselse Delta.

4.3 Bepaling benodigde hersteltijd als ontwerpparameter

De hersteltijd kan ook als ontwerpparameter worden gehanteerd. Hiertoe dient dan in feite omgekeerd te worden geredeneerd. Gegeven de vereiste overstromingskans kan, gegeven de ontwerpmaatregel voor STBU, de benodigde kans op hoogwater voor herstel worden bepaald. Hiermee kan vervolgens de benodigde hersteltijd worden bepaald. Vervolgens kan worden onderzocht of er binnen de beheersorganisatie van het waterschap mogelijkheden worden gezien om principe noodmaatregelen te bepalen die binnen de benodigde hersteltijd gegarandeerd kunnen worden geëffectueerd.

Opgemerkt wordt dat dit optimalisatie van de ontwerpmaatregel kan geven. Of dit wenselijk is hangt af van het versterkingsproject. Als al maatregelen nodig zijn voor andere faalmechanismen is optimalisatie van het buitentalud door dit bijvoorbeeld steiler te maken mogelijk niet zinvol/wenselijk als daardoor extra eisen dienen te worden gesteld aan de calamiteitenorganisatie. Als echter door beperkte eisen te stellen aan de hersteltijd, buitendijkse maatregelen kunnen worden voorkomen, kan het wel een uitkomst zijn. Anderzijds

16 december 2020, versie 1.0, definitief

moet worden bedacht dat dit ook kan leiden tot een conservatiever ontwerp omdat de benodigde hersteltijd niet haalbaar blijkt en groter zal moeten zijn.

4.4 Conclusie en aanbevelingen voor vervolg

4.4.1 Conclusies

In dit hoofdstuk is een eenvoudige methode gegeven en zijn veel aandachtspunten gegeven om de tijdsduur van afschuiving tot herstel te bepalen. Deze bestaat uit het optellen van ontdek-respons- en hersteltijd. Voor ontdek- en responstijd kan vooralsnog worden uitgegaan van de gegeven inschattingen. Hoewel aanscherping mogelijk is, is dit niet altijd nodig. De hersteltijd is namelijk veelal dominant en dient voor het betreffende dijktraject te worden ingeschat aan de hand van de aandachtspunten zoals weergegeven in Hoofdstuk 4.2.4.

De onzekerheid van de hersteltijd is in het algemeen zeer groot. Hieruit volgt voor de adviespraktijk dat dit het beste kan worden ingeschat op basis van een ondergrens en bovengrens. In de probabilistische analyse voor bepaling van de kans op afschuiving binnen de hersteltijd wordt dit gemodelleerd als een onder- en bovengrens met een normale verdeling. Dit blijkt voldoende bruikbaar:

- Veelal is het niet noodzakelijk om de hersteltijd heel nauwkeurig in te schatten. De onzekerheid is sowieso groot en de hersteltijd is vaak aanmerkelijk groter en daarmee dominant.
- Uit verkennend onderzoek [5] volgde dat de kans op een op een volgende belasting zonder tijdig herstel gelijk aan (voor case merengebied) of één a twee ordes van grootte kleiner is (voor case rivierengebied) dan de 10% conform het WBI2017.
- Een afschuiving tijdens storm wordt bij een zeedijk vermoedelijk niet ontdekt. De kans op een opeenvolgend hoogwater (binnen de stormduur) zonder herstel is in dit scenario groot. De huidige norm (kans op afschuiven binnen de hersteltijd) van 0,1 (10%) zou daarmee in basis zelfs te optimistisch kunnen zijn. Echter is de (golf)belasting tijdens de opeenvolgende getijpiek niet noodzakelijkerwijs groot. De conditionele van 10% op een overstroming lijkt zodoende niet te optimistisch. Bovendien staat dat STBU bij Zeedijken over het algemeen minder speelt gezien de relatief flauwe buitentaluds met tussenbermen.

4.4.2 Aanbeveling

Uit het hoofdstuk volgt dat de onzekerheden van met name de hersteltijd erg groot zijn. Een realistischer inschatting en verkleining van de onzekerheid kan optimalisatie geven. Gebruik van empirie kan hierbij helpen door in de praktijk voor diverse schadegevallen bij afschuivingen na te gaan hoe lang bepaald herstelwerk (het uitvoeren van een noodmaatregel) duurde. In [1] zijn de ervaringen en inschattingen van 3 waterschappen gegeven. Aanbevolen wordt de ervaringen vanuit het buitenland (met name Duitsland en Engeland) te inventariseren en te verwerken. Daarbij wordt aanbevolen onderscheid te maken in een buiten- en binnenwaartse afschuiving (Paragraaf 4.2.4).

5 Uitwerking case bovenrivierengebied

In aanvulling op de verkennende studie macrostabiliteit is in dit hoofdstuk een probabilistische uitwerking van macrostabiliteit buitenwaarts uitgevoerd waarbij de doorlatendheid als stochast is meegenomen. Het doel van deze uitwerking is tweeledig, enerzijds om een voorbeeld te geven bij het stappenplan en anderzijds om het effect van de onzekerheid in de doorlatendheid te kwantificeren.

5.1 Case omschrijving

De case is gebaseerd op een case in het bovenrivierengebied. De onzekerheden (en verwachtingswaarden) van de sterkte-eigenschappen, doorlatendheden, erosieparameters zijn vrij geïnterpreteerd en komen niet noodzakelijkerwijs overeen met de originele case. Hetzelfde geldt voor keuzes die in de uitwerking in dit hoofdstuk zijn gemaakt. De case betreft een groene kleidijk met een laag voorland.

5.2 Uitwerking stappenplan

5.2.1 Opstellen faalpaden (stap 1)

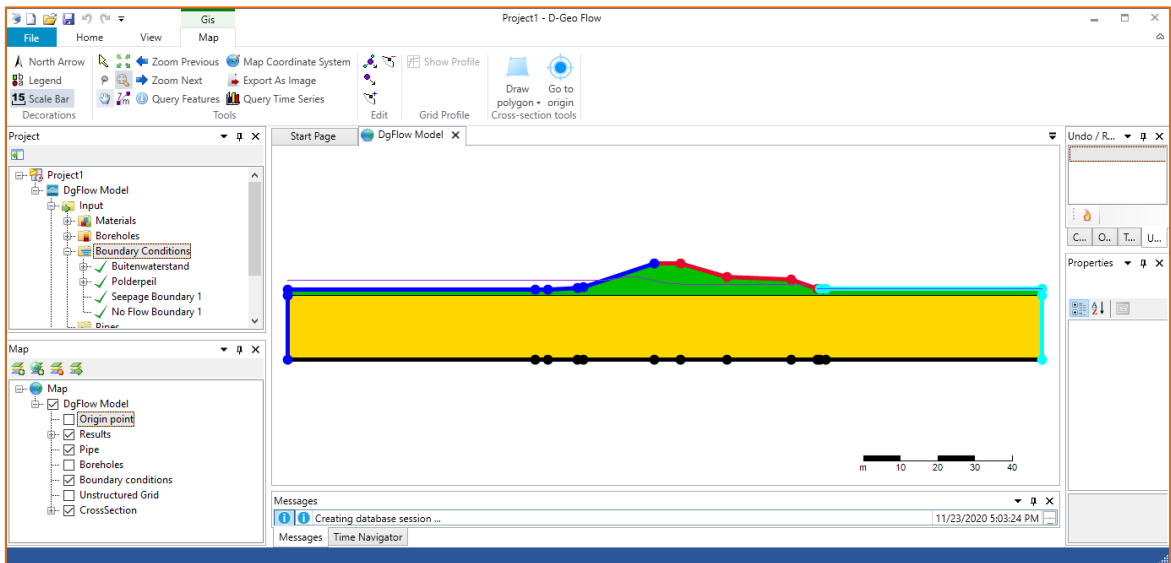
De beschouwde dijk betreft een dijk in het bovenrivierengebied. De dijk heeft een voorland met een beperkte hoogteligging (grofweg NAP+8.6 meter) ten opzichte van het jaarlijks hoogwater (grofweg NAP+10.5 meter). Negatieve randvoorwaarden voor STBU kunnen ontstaan door een val na hoogwater. Een val naar extreem laagwater is niet relevant vanwege de aanwezigheid van het voorland. Voor extreme neerslag wordt een additionele opbolling van 0.5 meter gehanteerd, dit scenario wordt niet ongunstiger geacht dan de val na hoogwater. Overeenkomstig met de studie in Hoofdstuk 4 van [5] is er geen correlatie tussen de neerslag en de hoogwaterpieken.

De dijk is een kleidijk. Het effect van een buitenwaartse afschuiving op de waterspanningen in de dijk tijdens het eerst volgende hoogwater is beperkt geacht (bij een zanddijk met een afgeschoven buitenbekleding hoeft dit niet het geval te zijn), zodoende is de kans op een binnenwaartse afschuiving niet toegenomen. Na de afschuiving is er geen sprake van een kruinverlaging, de kans op erosie van het binnentalud zal dus niet toegenomen zijn door de buitenwaartse afschuiving. Ten derde is de deklaag dermate dik (en de afschuiving niet dermate diep) dat een nieuw intredepunt voor piping niet waarschijnlijk is. Als vervolgmecanisme blijft over erosie van het afgeschoven buitentalud door golfaanval.

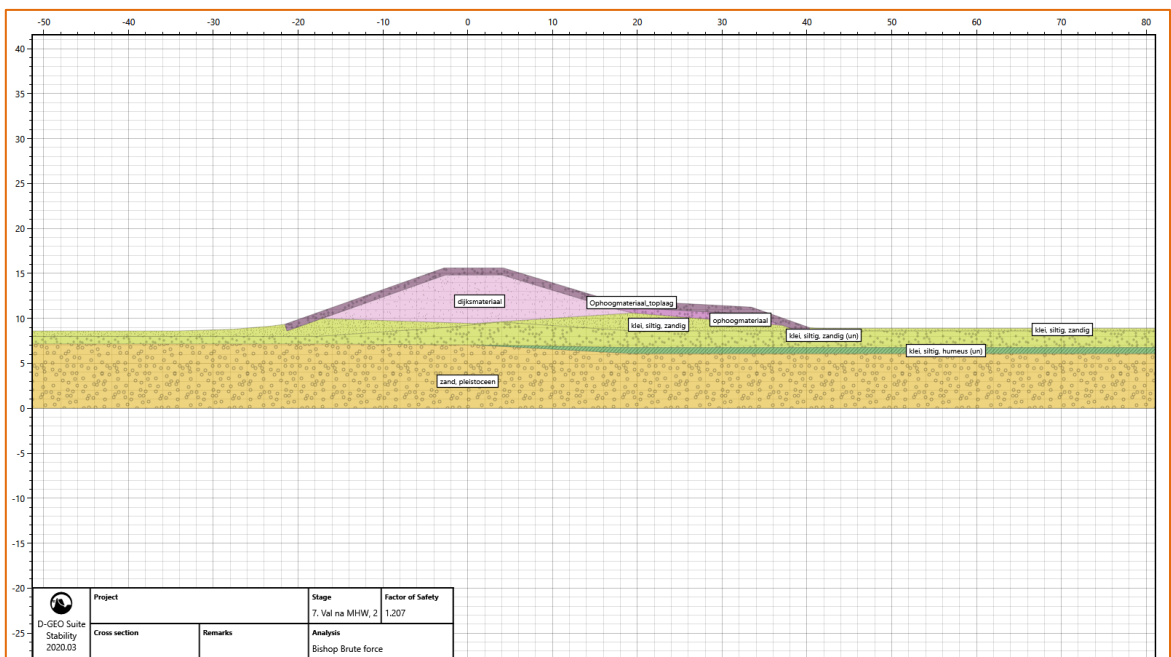
5.2.2 Kans op een buitenwaartse afschuiving (stappen 2 t/m 5)

5.2.2.1 Stap 2: Schematiseren doorsnede

Een schematisatie is opgesteld in zowel D-Geo Flow (DGF) als D-Geo Stability (DGS). De schematisatie is opgenomen in respectievelijk Figuur 5.1 en Figuur 5.2. In D-Geo Flow is geen onderscheid gemaakt tussen de deklaag en het dijksmateriaal. In DGS is het handig om voor elke tijdstap een aparte stage aan te maken.



Figuur 5.1 Schematisatie in D-Geo Flow.



Figuur 5.2 Schematisatie in D-Geo Stability.

5.2.2.2 Stap 3: Bepalen grondeigenschappen

In deze stap zijn de sterkte-eigenschappen en de doorlatendheidseigenschappen afgeleid. In Hoofdstuk 3 zijn de sonderingen en boringen behorende bij het betreffende dijkprofiel geanalyseerd. De grondeigenschappen laten zich redelijk goed beschrijven door de hoek van inwendige wrijving. De verdelingen voor de gedraineerde sterkte zijn aangehouden voor de grondlagen boven het dagelijks freatisch niveau. Voor het dijksmateriaal is dit, $\phi_{dijksmateriaal} = LogNormaal(\mu = 31, \sigma = 2)$, voor de deklaag $\phi_{deklaag} = LogNormaal(\mu = 30, \sigma = 2)$. Voor de deklaag onder de freatische lijn zijn de sterkte-eigenschappen beschreven met het SHANSEP model, $S = 0.33$, $m = 0.8$ en $POP = 25 \text{ kPa}$. De onzekerheid van de ongedraineerde sterkte-eigenschappen van de deklaag hebben in deze case een kleine (verwaarloosbare) invloed op de berekende kans op instabiliteit (iteratief bepaald) en zijn zodoende als determinist meegenomen. De doorlatendheidseigenschappen van de deklaag zijn beschreven met een

16 december 2020, versie 1.0, definitief

uniforme verdeling op het logaritme van de doorlatendheid, $\log_{10}(k) = Uniform(-3,1)$. Er is voor gekozen om een verdeling op het logaritme van de doorlatendheid te zetten. De doorlatendheden van 10^{-3} en 10^1 meter/dag worden als onder- en bovengrens van de doorlatendheid gezien. Voor de doorlatendheid van de Pleistocene zandlaag is $k = 50$ m/dag aangehouden. De onzekerheid van deze doorlatendheid is niet dominant in de probabilistische berekening.

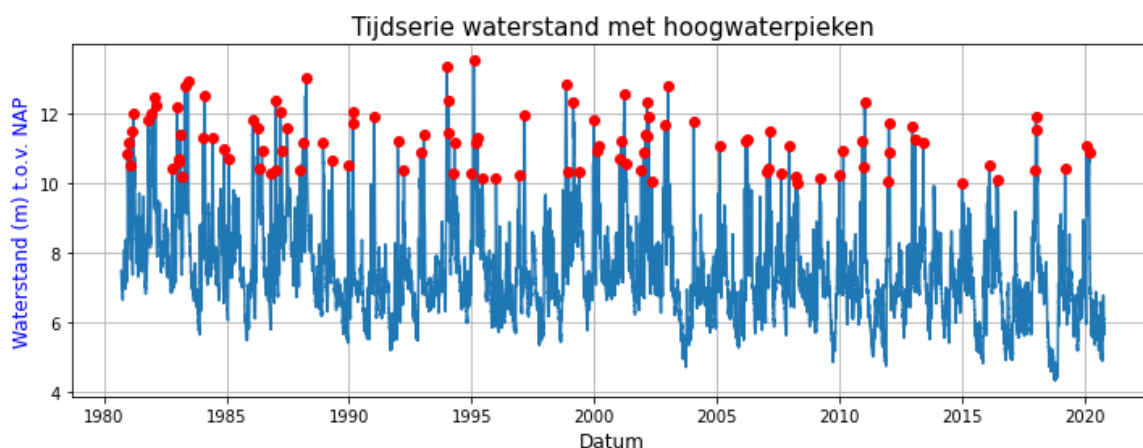
5.2.2.3 Stap 4: Bepalen hydraulische randvoorwaarden

De benodigde hydraulische randvoorwaarde is het verloop van de waterstand over de tijd. Het verloop is geschematiseerd als een aanloop, de hoogte van de hoogwaterstandspiek en een val na het hoogwater. De hoogte van de hoogwaterstand is verkregen met Hydra-NL, Tabel 5.1. Een Gumbel verdeling, $h = Gumbel(\beta = 0.31, \gamma = 11.82)$, is gefit door de Hydra-resultaten. Voor de duur van de hoogwaterpiek is vier dagen aangehouden.

Tabel 5.1 Hydra-NL, <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/applicaties-modellen/wbi-2017/>, uitkomsten.

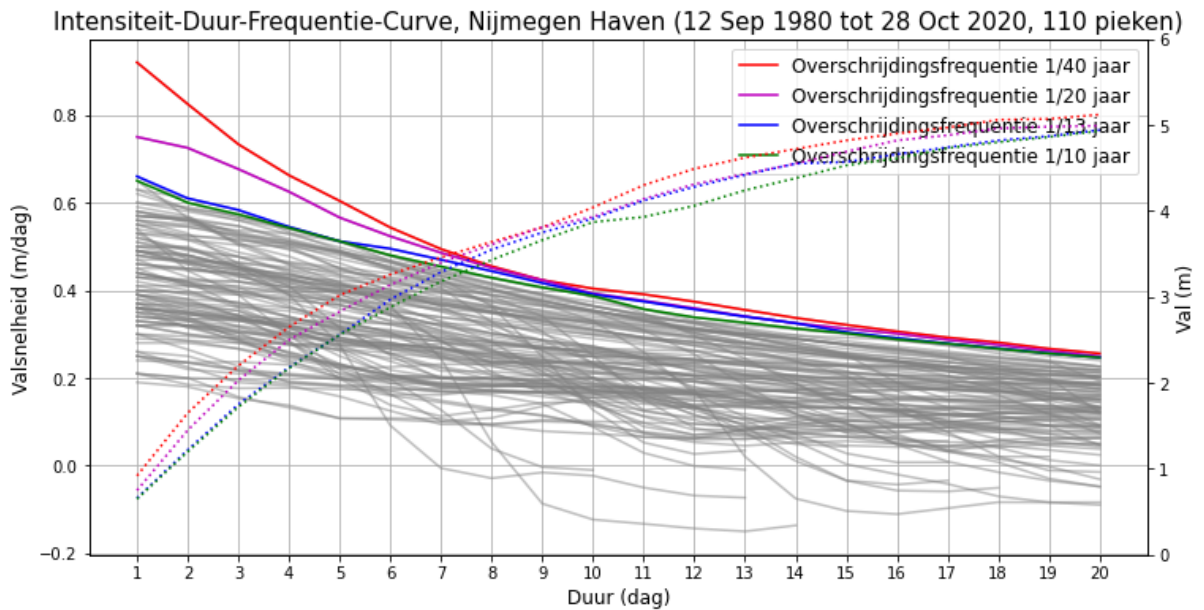
Terugkeertijd [jaar]	Waterstand [m] t.o.v. NAP
10	12.2
30	12.8
100	13.4
300	13.8
1 000	14.1
3 000	14.4
10 000	14.6
30 000	14.8
100 000	15.1

De val is afgeleid uit de lokale waterstandsmetingen van Rijkswaterstaat, Figuur 5.3. Dit is als volgt afgeleid: eerst zijn de pieken herkend in de waterstandsreeks, dit zijn alle pieken hoger dan een bepaald niveau en met minimaal een bepaalde prominentie (relatieve hoogte).

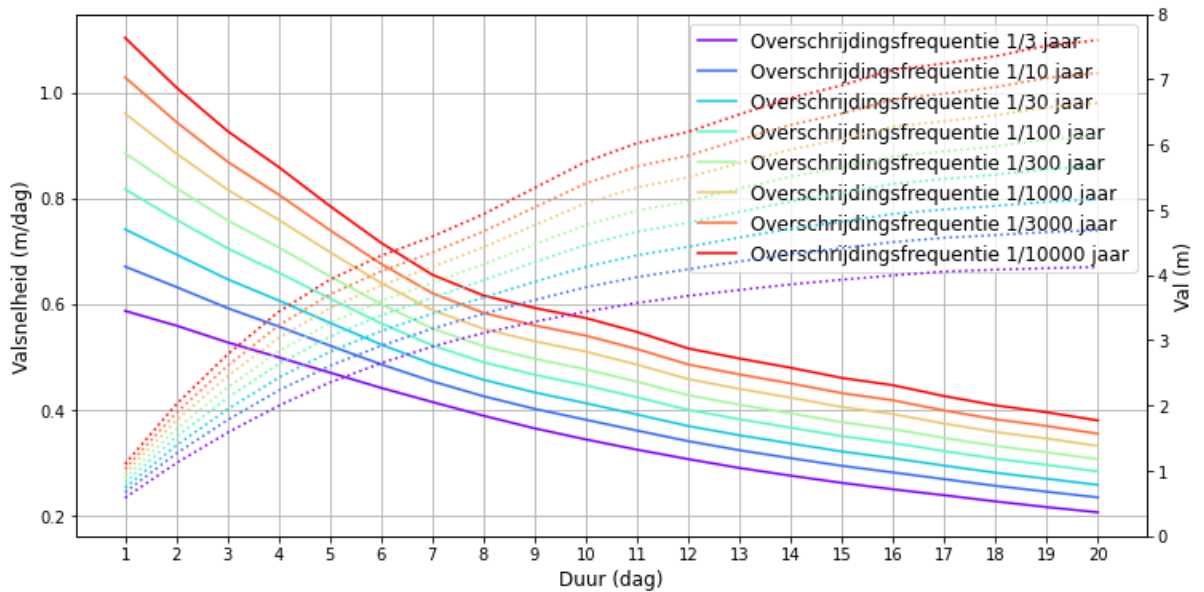


Figuur 5.3 RWS waterstandsmetingen, <https://waterinfo.rws.nl/#!/nav/index/>.

Na elke piek is de Intensiteit-Duur-Frequentie-Curve van de valsnelheid empirisch bepaald, Figuur 5.4. De empirische IDF-Curve is geparameteriseerd door per duur een Gumbelverdeling te fitten, Figuur 5.5 en Tabel 5.2.



Figuur 5.4 Empirische Intensiteit-Duur-Frequentie-Curve (IDF-Curve).



Figuur 5.5 Geparameteriseerde Intensiteit-Duur-Frequentie-Curve (IDF-Curve).

Tabel 5.2 Fit op IDF-curve.

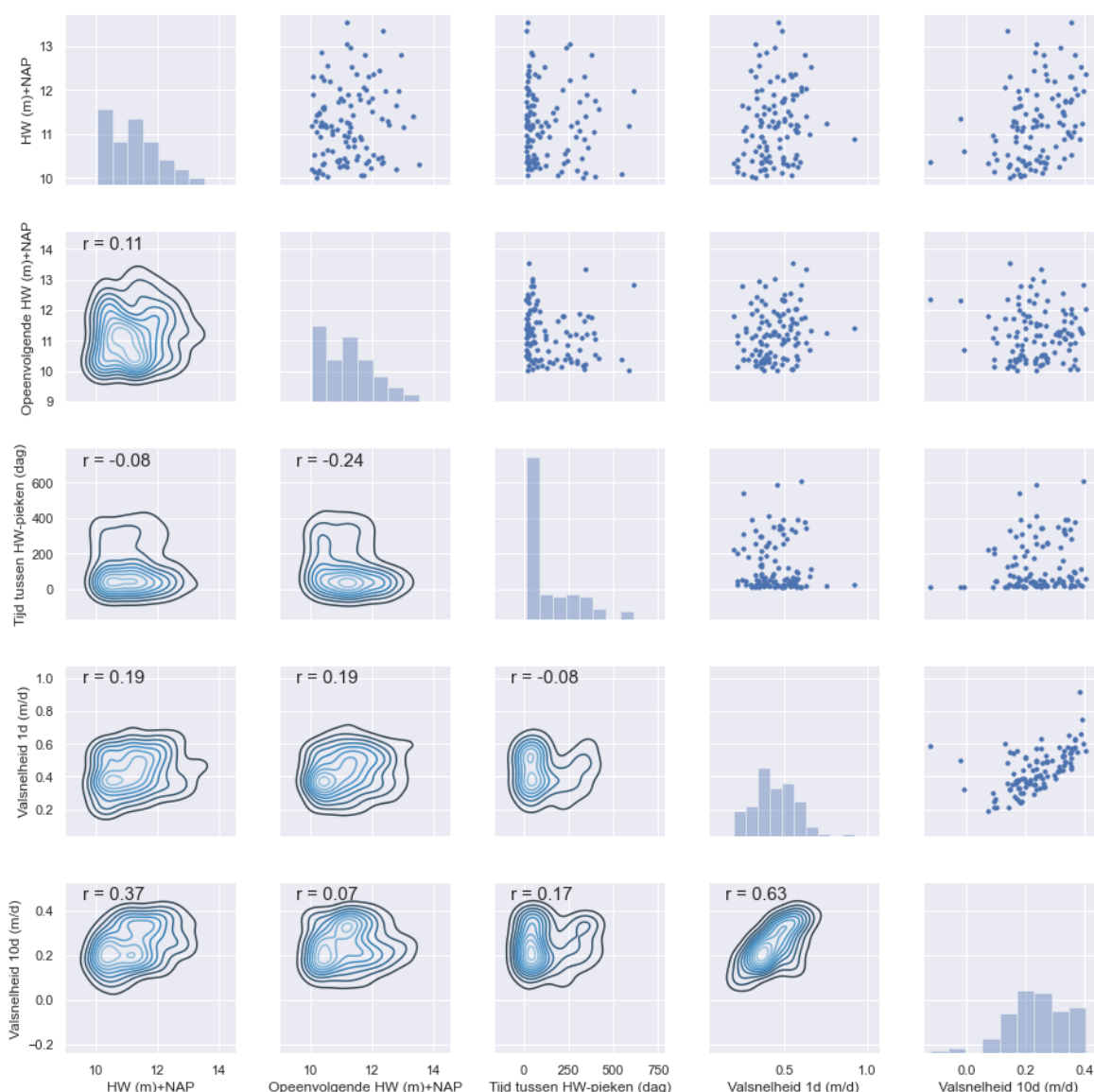
	Verdeling
Waterstandsval 1 dagen	Gumbel, $\beta = 0.06$, $\gamma = 0.53$
Waterstandsval 2 dagen	Gumbel, $\beta = 0.05$, $\gamma = 0.51$
Waterstandsval 3 dagen	Gumbel, $\beta = 0.05$, $\gamma = 0.48$
Waterstandsval 5 dagen	Gumbel, $\beta = 0.04$, $\gamma = 0.44$
Waterstandsval 10 dagen	Gumbel, $\beta = 0.03$, $\gamma = 0.32$

De aanloop naar het hoogwater is geschematiseerd met een lineair verloop van twee weken vanaf de hoogteligging van het voorland tot de piekwaterstand. In de gevoeligheidsstudie is tevens een berekening uitgevoerd waarbij de aanloop tot het hoogwater niet is

16 december 2020, versie 1.0, definitief

geschematiseerd. De waterspanningen zijn in dat geval volledig aangepast aan de piekwaterstand.

De correlaties tussen de verschillende parameters van de hydraulische randvoorwaarden zijn bepaald en opgenomen in Figuur 5.6. Merk op dat ook de randvoorwaarden voor de deelkans van stap 8 en 9 in dit figuur zijn meegenomen. De correlatie tussen de verschillende parameters is beperkt. De correlatie is in de uitwerking van deze case niet meegenomen. Wanneer het gehele faalpad in stap 10 integraal wordt opgelost kunnen correlaties tussen stochasten van de verschillende knopen worden meegenomen.



Figuur 5.6 Correlatie tussen parameters hydraulische belasting.

5.2.2.4 Stap 5: Uitvoeren berekening buitenwaartse afschuiving

In deze stap wordt de kans op een buitenwaartse afschuiving berekend op basis van de schematisatie en invoerstochasten uit de voorgaande stappen. De kans kan bepaald worden met bijvoorbeeld een eigen pythoncode of met de Probabilistic Toolkit. Voor dit rapport is de

berekening uitgevoerd met de PTK. In de PTK zijn D-Geo Flow en D-Geo Stability gekoppeld. DGF heeft als input de doorlatendheid, piekwaterstand en de valsnelheid in de tijd. De freatische lijn per tijdstap die volgt uit DGF is overgezet naar DGS die verder als input de stochasten van de sterkte-eigenschappen heeft. In DGS zijn meerdere stages berekend die allen behoren bij een verschillende tijdstap. De minimale stabiliteitsfactor van de tijdstappen wordt getoetst aan de grenswaarde van 1.0. De berekening is uitgevoerd met de Probabilistic Toolkit met Monte Carlo Importance Sampling. De betrouwbaarheidsindex is 5.04, dit komt overeen met een kans van optreden van de buitenwaartse afschuiving van $2E-7$ per jaar. De invloed van de verschillende stochasten en het illustratiepunt is gegeven in Tabel 5.3.

Tabel 5.3 Invloed van de verschillende stochasten inclusief de fysieke waarde van het illustratiepunt.

	α	Invloedscoëfficiënt	Fysieke waarde
Piekwaterstand	0.00	0%	NAP+11.9 m
Valsnelheid (u)	-0.21	4%	1.0**
Doorlatendheid (\log_{10})	0.00	0%	-1.0*
$\phi_{\text{dijkmateriaal}}$ (-)	0.55	31%	24.9
ϕ_{deklaag}	0.53	28%	26.0
Modelfactor Bishop	-0.61	37%	1.19***

* Is gelijk aan 0.1 m/dag.

** Is grofweg de valsnelheid die eens in de 10 jaar wordt overschreden (Figuur 5.5).

*** De deterministische modelfactor voor Bishop is 1.11.

Uit het illustratiepunt volgt dat het scenario met een relatief frequente waterstand en valsnelheid een grote invloed heeft op de faalkans. Faalkansupdatering zou in dit geval een uitkomst kunnen zijn, indien er met de vervolgmecanismen niet aan de eis wordt voldaan.

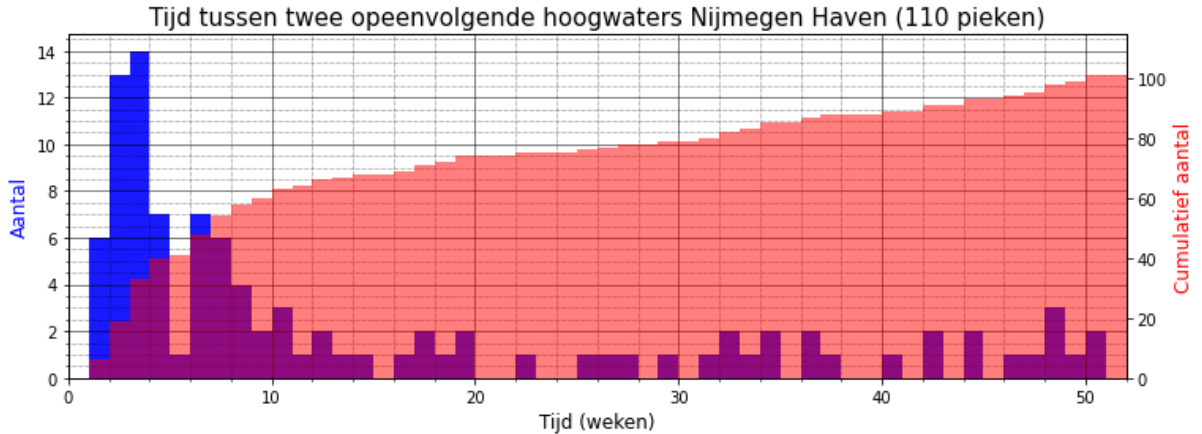
5.2.3 Kans op belasting voor herstel (stappen 6 t/m 8)

5.2.3.1 Stap 6: Bepalen van de hersteltijd

De hersteltijd is ingeschat in overleg met de beheersorganisatie als omschreven in Hoofdstuk 4 van dit rapport. De hersteltijd is ingeschat op één tot zeven dagen. Een uniforme verdeling is aangehouden.

5.2.3.2 Stap 7: Bepalen van de tijd tot het volgende hoogwater

De tijd tot het volgende hoogwater is bepaald op basis van de tijd tussen de opeenvolgende pieken uit de Rijkswaterstaat Waterdata, Figuur 5.3. De histogram is opgenomen in Figuur 5.7. De tijd is gecorrigeerd voor de tijd van de afschuiving na het initiële hoogwater en voor een verwachte start van het belastingevent van het volgende hoogwater. Een lognormale verdeling is gefit met $\mu = 138$ en $\sigma = 234$.



Figuur 5.7 Histogram van de tijd tussen twee opeenvolgende hoogwaters. Bepaald op basis van de Rijkswaterstaat Waterdata, als opgenomen Figuur 5.3.

5.2.3.3 Stap 8: Uitvoeren berekening kans op een volgende belasting voordat herstel is uitgevoerd

In deze stap wordt de grenstoestandsfunctie voor hoogwater vóór herstel opgelost. Dit kan met een eigen python script, gebruik makend van een python package als OpenTURNS of met de Probabilistic Toolkit (PTK). Voor dit rapport is gekozen voor de PTK.

De betrouwbaarheidsindex is 2.29, dit komt overeen met een kans van 1E-2 per jaar. De invloed van de verschillende stochasten en het illustratiepunt is gegeven in Tabel 5.4.

Tabel 5.4 Invloed van de verschillende stochasten inclusief de fysieke waarde van het illustratiepunt.

	α	Invloedscoëfficiënt	Fysieke waarde
T_{herstel}	-0.27	7%	5.4 dagen
$T_{\text{opeenvolgend hoogwater}}$	0.96	93%	5.4 dagen

5.2.4 Kans op een overstroming tijdens het opeenvolgend hoogwater (stap 9)

In stap 1 is erosie door golfaanval als het relevante vervolgmecanisme beschouwd. Een versimpelde grenstoestandsfunctie is gebruikt om de kans op erosie door golfaanval te beschouwen.

$$Z = \Delta V_{e,crit} - 466 \cdot c_e \cdot H_s^2 \cdot (H_s - 0.4)^2 \cdot \tan(\alpha) \cdot 3.6 \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-0.79 \cdot t}{H_s^2}\right)\right)$$

Waarin $\Delta V_{e,crit}$ het kritieke erosievolume (10 m³ is aangehouden voor deze case), α de helling van het buitentalud, t de tijd in uren, c_e de erosiecoëfficiënt (normaal verdeeld met een gemiddelde van 0.55 en een variatiecoëfficiënt van 0.25). H_s is de golfhoogte van het volgende hoogwater. In de bepaling van de kans op een opeenvolgend hoogwater is rekening gehouden met grofweg 2.75 hoogwaterpieken per jaar (110 in 40 jaar, zie Figuur 5.3). In Tabel 5.5 is de golfhoogte per frequentie in jaren berekend met Hydra-NL. Om de frequentie per hoogwater te krijgen moeten de frequenties door 2.75 gedeeld worden. Vervolgens is een Gumbelverdeling voor de golfhoogte gefit (Gumbel($\beta=0.09, \gamma=0.42$)).

Tabel 5.5 Hydra-NL, <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/applicaties-modellen/wbi-2017/>, uitkomsten.

Terugkeerfrequentie (per jaar)	Golfhoogte [m]
1/10	0.7
1/30	0.8
1/100	0.9
1/300	1.0
1/1 000	1.1
1/3 000	1.2
1/10 000	1.3
1/30 000	1.4
1/100 000	1.5

De kans kan bepaald worden op basis van de grenstoestandsfunctie met bijvoorbeeld FORM of Monte Carlo. Dit kan met een eigen python script, gebruik makend van een python package als OpenTURNS of met de Probabilistic Toolkit. Voor dit rapport is de analyse uitgevoerd met de Probabilistic Toolkit. De betrouwbaarheidsindex is 2.31, dit komt overeen met een kans van 1E-2 op een overstroming gegeven een niet hersteld buitenwaartse afschuiving.

Tabel 5.6 Invloed van de verschillende stochasten inclusief de fysieke waarde van het illustratiepunt.

	α	Invloedscoëfficiënt	Fysieke waarde
Golfhoogte (m)	-0.99	97%	0.8 m
Erosiecoëfficiënt c_e (-)	-0.17	3%	0.59

5.2.5 Integratie deelkansen (stap 10)

De deelkansen kunnen als in de onderstaande vergelijking vermenigvuldigd worden. De kans op geen herstel is immers de kans op geen herstel gegeven de afschuiving en de kans op een overstroming is de kans op een overstroming tijdens het opeenvolgend hoogwater gegeven een niet herstelde buitenwaartse afschuiving.

$$P_{\text{overstroming STBU}} = P_{\text{afschuiving}} \cdot P_{\text{geen herstel}} \cdot P_{\text{overstroming}}$$

De drie deelkansen en de kans op een overstroming door macrostabiliteit buitenwaarts zijn weergegeven in Tabel 5.7.

Tabel 5.7 Integratie van de deelkansen.

	Kans
Kans op de initiële buitenwaartse afschuiving (stap 5)	2E-7 per jaar
Kans op een opeenvolgend hoogwater voor herstel gegeven voorgaand (stap 8)	1E-2 per afschuiving
Kans op een overstroming tijdens het volgende hoogwater gegeven voorgaand (stap 10)	1E-2 per niet herstelde afschuiving
Kans op een overstroming door macrostabiliteit buitenwaarts (product van voorgaand)	2E-11 per jaar

Merk op dat de kans op een overstroming door STBU ook integraal in de Probabilistic Toolkit kan worden opgelost. De PTK biedt immers de mogelijkheid om meerdere grenstoestandsfuncties integraal op te lossen. Het voordeel van het integraal oplossen is dat er eenvoudig correlaties tussen de invoerstochasten van de verschillende grenstoestandsfuncties kunnen worden gelegd. Bijvoorbeeld tussen de valsnelheid en de tijd tot het volgende hoogwater of tussen de hoek van inwendige wrijving en de erosieparameters.

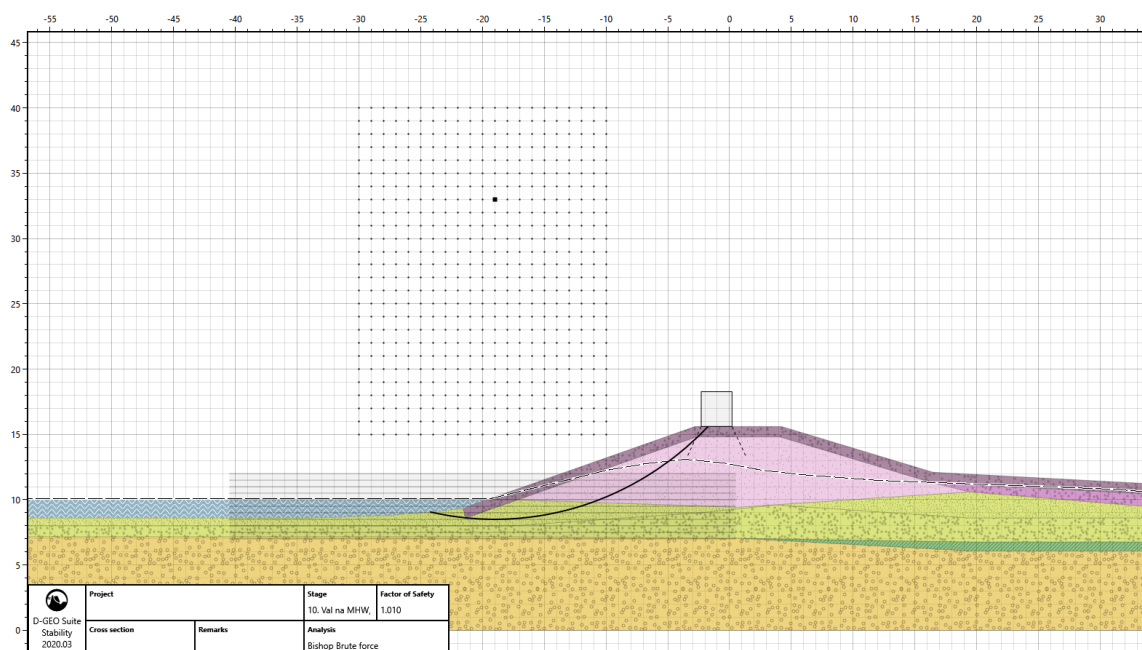
16 december 2020, versie 1.0, definitief

5.2.6 Beschouwen alternatief glijvlak (stap 11)

In de voorgaande stappen is het faalpad met het meest waarschijnlijke glijvlak (in de meeste en ook in het geval van deze case intredend in het buitentalud, ter hoogte van de buitenkruinlijn) en de vervolgemechanismen beschouwd. Het is mogelijk dat een groter glijvlak, intredend in de kruin van de dijk, met een grotere kans op overstroming tijdens het opeenvolgend hoogwater tot een grotere faalkans leidt. De kans op een grote afschuiving die halverwege de kruin intreedt is bepaald en is twee ordes van grootte kleiner dan de kans op de meest waarschijnlijke afschuiving ($P_f = 3E-9$, $\beta = 5.81$). Als de kans op een overstroming tijdens het volgende hoogwater gelijk zou zijn aan één (bovengrens), dan is de kans op een overstroming door het alternatieve grote glijvlak gelijk aan het faalpad van het meest waarschijnlijke glijvlak.

5.3 Vergelijking met semi-probabilistische aanpak WBI2017/OI2014

In de praktijk wordt doorgaans de semi-probabilistische aanpak, de gedetailleerde toets van het WBI2017, gehanteerd. In deze aanpak wordt de stabiliteitsfactor berekend met een deterministische berekening met karakteristieke waarden voor de sterkte-eigenschappen en een piekwaterstand gelijk aan de waterstand bij norm. De stabiliteitsfactor wordt vervolgens omgezet met een kalibratievergelijking naar een kans op instabiliteit. Deze kans wordt vermenigvuldigd met een 'kans op overstroming gegeven instabiliteit' van 10% tot de overstromingskans. Ter vergelijking met het resultaat van de probabilistische faalpadanalyse uit paragraaf 5.2 is in deze paragraaf de uitwerking gegeven volgens de semi-probabilistische aanpak. Als val na het optreden van hoogwater is een val van 4.5 meter in 10 dagen verondersteld (zie tevens de gevoeligheidsstudie in paragraaf 5.4). De freatische lijn is numeriek bepaald met D-Geo Flow.



Figuur 5.8 Semi-probabilistische stabiliteitsberekening met D-Geo Stability.

De berekende stabiliteitsfactor is 1.01, gedeeld door de modelfactor (Bishop) van 1.11 is dit een schadefactor (γ_n) van 0.91. Met de kalibratiestudie ($\beta = \frac{\gamma_n - 0.41}{0.15}$) betekent dit een betrouwbaarheidsindex van 3.33 en een faalkans van $4E-4$ per jaar.

De vergelijking tussen de probabilistische aanpak met faalpaden en de semi-probabilistische aanpak volgens het WBI2017/OI2014 is opgenomen in de onderstaande tabel. Geconcludeerd wordt dat de overstromingskans met de probabilistische aanpak met minimaal een factor 1000 geoptimaliseerd is ten opzichte van de huidige aanpak.

Tabel 5.8 Vergelijking semi-probabilistische WBI2017/OI2014 aanpak met de probabilistische aanpak uit dit rapport.

	Kans semi-probabilistisch	Kans faalpadanalyse
Kans op de buitenwaartse afschuiving	4E-4	2E-7 (1E-4*)
Kans op overstroming gegeven buitenwaartse afschuiving	1E-1	1E-4
Kans op een overstroming door macrostabiliteit buitenwaarts (product van voorgaand)	4E-5	2E-11 (1E-8*)

* Als de aanloop naar het hoogwater niet wordt meegenomen en een deterministische val van 4.5 meter in 10 dagen wordt aangehouden is de kans op een afschuiving significant groter 1E-4 in plaats van 2E-7. Dit is een eerlijkere vergelijking met de semi-probabilistische berekening (zie gevoeligheidsstudie paragraaf 5.4)

De eis voor macrostabiliteit is gegeven een trajectnorm van 1/10 000 per jaar grofweg gelijk aan 1E-7 per jaar. Het semi-probabilistische resultaat zit hier, met 4E-5 per jaar, één à twee ordes van grootte boven. Om aan de eis te voldoen is naar schatting een buitenberm van 5 à 10 meter benodigd. Op basis van de probabilistische aanpak is de berm niet nodig.

5.4 Gevoeligheid doorlatendheid en hydraulische randvoorwaarden

Voor de buitenwaartse afschuiving is de doorlatendheid als stochast beschouwd en is gevarieerd met de schematisatie van de hydraulische randvoorwaarden. De volgende variaties zijn beschouwd:

1. Het (wel of niet) schematiseren van de aanloop naar hoogwater. De aanloop naar het hoogwater is geschematiseerd als een toename van laagwater tot de piekwaterstand in twee weken en een duur van de piek van vier dagen. In het geval de aanloop niet geschematiseerd is, zijn de waterspanningen aangepast aan de hoogwaterstand, ofwel de waterspanningen tijdens het hoogwater zijn onafhankelijk van de doorlatendheid van het dijklichaam.
2. De val na hoogwater als stochast of determinist. Deterministisch wordt een val van 4.5 meter in 10 dagen aangehouden. Als stochast wordt de Intensiteit-Duur-Frequentie-Curve afgeleid.

In Paragraaf 5.1 is de variatie met aanloop naar hoogwater en met de valsnelheid als stochast uitgewerkt. Met dezelfde procedure is de kans op een buitenwaartse afschuiving uitgewerkt voor de combinaties in Tabel 5.9. De berekeningen voor de kans op de buitenwaartse afschuiving zijn integraal uitgevoerd met Monte Carlo Importance Sampling.

Tabel 5.9 Uitgewerkte variaties

Variatie	Aanloop tot hoogwater	Val van de waterstand
A	Geen	Determinist
B	Geen	Stochast (IDF)
C	Vanaf maaiveld	Stochast (IDF)

De resultaten van de drie variaties zijn opgenomen in Tabel 5.10, inclusief de invloed van de verschillende stochasten. Opvallend is dat de doorlatendheid in de eerste twee variaties een significante invloed heeft en in de derde variatie weinig invloed heeft. Dit is te verklaren omdat een lagere doorlatendheid positief (een lagere freatische lijn tijdens de hoogwaterpiek) en

16 december 2020, versie 1.0, definitief

negatief (de freatische lijn past zich trager aan tijdens de val na hoogwater) werkt voor de stabiliteit.

Tabel 5.10 Resultaten kans op een afschuiving.

Variatie	Kans op buitenwaartse afschuiving: P_f & β	Involed onzekerheid stochasten, α^2 (h,v,k, ϕ , γ_d)
A	$P_f = 1.5E-4$, $\beta = 3.62$	(6%,n.v.t.,21%,26%,47%)
B	$P_f = 1.4E-4$, $\beta = 3.63$	(5%,1%,22%,28%,45%)
C	$P_f = 2.3E-7$, $\beta = 5.04$	(0%,4%,0%,59%,37%)

Uit Tabel 5.10 volgt dat het wel of niet schematiseren van de aanloop naar het hoogwater een significant effect heeft op de kans op een afschuiving. De invloed van de onzekerheid in de doorlatendheid is voor de variaties zonder aanloop significant. Voor de variaties met aanloop is de onzekerheid in de doorlatendheid minder relevant omdat een lagere doorlatendheid zowel een positief als een negatief effect heeft op de stabiliteit van de dijk.

De schematisatie van de val heeft een beperkte invloed op de kans op een afschuiving. Dit komt mede door de beperkte variatie in de val. Daarnaast moet een snelle val optreden in combinatie met een hoge waterstand. Bij een lage waterstand in combinatie met een snelle val is de waterstand relatief snel tot op het voorland gevallen. De correlatie tussen de hoogte van de hoogwaterstand en de valsnelheid is beperkt.

6 Conclusie, Aanbevelingen en Impact

6.1 Conclusie

In dit rapport is zijn drie aspecten in de faalpaden aanpak voor macrostabiliteit buitenwaarts nader uitgewerkt. Daarnaast is een beknopt stappenplan uitgeschreven.

De analyse van het materiaalmodel in Hoofdstuk 3 laat zien hoe de ingenieur op basis van de sonderingen en boringen een gedegen keuze kan maken voor het materiaalmodel.

Uit de analyse van de tijd tot herstel (ontdektijd + responstijd + hersteltijd), Hoofdstuk 4, volgt dat de onzekerheden van met name de hersteltijd erg groot zijn. Een realistischer inschatting en verkleining van de onzekerheid kan optimalisatie geven. Gebruik van empirie kan hierbij helpen door in de praktijk voor diverse schadegevallen bij afschuivingen na te gaan hoe lang bepaald herstelwerk (het uitvoeren van een noodmaatregel) duurde. Ervaringen en inschattingen van drie waterschappen zijn gegeven. Aanbevolen wordt de ervaringen vanuit het buitenland (met name Duitsland en Engeland) te inventariseren en te verwerken.

Uit de probabilistische uitwerking met onzekerheid in de waterspanningen, Hoofdstuk 5, volgt dat het wel of niet schematiseren van de aanloop naar het hoogwater een groot effect heeft op de berekende faalkans. Als de aanloop naar het hoogwater wordt meegenomen is de invloed van de onzekerheid van de doorlatendheid zeer beperkt. Een lagere doorlatendheid werkt immers positief (een lagere freatische lijn tijdens de hoogwaterpiek) en negatief (de freatische lijn past zich trager aan tijdens de val na hoogwater) voor de stabiliteit. Wanneer deze aanloop niet wordt meegenomen heeft de onzekerheid van de waterspanningen een significante invloed, een lage doorlatendheid is negatief voor de stabiliteit.

6.2 Aanbevelingen

Wanneer de aanloop naar het hoogwater wordt meegenomen in de berekening van de freatische lijn is impliciet de aanname gedaan dat de doorlatendheid niet significant anders is tijdens toenemende en afnemende buitenwaterstand. In de voorgaande studie [5] is een theoretische analyse van de verandering van de doorlatendheid gedurende de hoogwatergolf uitgevoerd, hieruit is geen eenduidige conclusie gekomen. Ook uit een kwantitatieve studie van een beperkt aantal waterspanningsmeters en peilbuizen en beperkte meetduur is geen verandering van de doorlatendheid gedurende een hoogwatergolf herkend. Langdurende meetreeksen kunnen uitkomst bieden. Ook voor faalmechanismen als macrostabiliteit binnenwaarts en microstabiliteit is het gebrek aan data van waterspanningen tijdens een hoogwatergolf een gemis. We bevelen aan het maken van langdurende meetreeksen van waterspanningen en stijghoogten in de dijk te promoten, waterspanningsmeters en peilbuizen na afloop van een versterkingsproject te laten staan en in te zetten op het verdichten van het meetnet. Meten is weten.

In de voorgaande studie is de probabilistische berekening van het faalpad met een pythoncode uitgevoerd. De berekeningen van dit rapport zijn met de Probabilistic Toolkit (PTK) uitgevoerd, omdat deze toegankelijker wordt geacht voor gebruik in de praktijk. In de PTK kan de ingenieur relatief eenvoudig modellen (bijv. DGF en DGS) koppelen, stochasten definiëren en een probabilistische methode kiezen om de analyse mee uit te voeren. We bevelen aan het kwantitatief uitwerken van faalpaden gemeengoed maken door een eenvoudige implementatie

van faalpaden (boomstructuur) in de Probabilistic Toolkit te faciliteren. Methodisch en eventueel met templates voor specifieke toepassingen als macrostabiliteit buitenwaarts, macrostabiliteit binnenwaarts met erosie van het restprofiel door overslag.

6.3 Impact

De probabilistische aanpak met faalpaden uitgewerkt in dit rapport en het voorgaande rapport [5] geeft de ontwerper handvaten om in een van grof naar fijn aanpak de overstromingskans als gevolg van macrostabiliteit buitenwaarts beter in te schatten. Aangezien de gebeurtenissen die leiden tot een overstroming expliciet zijn gemaakt in de aanpak kan de discussie over de gemaakte keuzes in de berekening zuiver gevoerd worden indien de berekende faalkans en/of berekende bermen 'gevoelsmatig' te groot zijn. De probabilistische aanpak met faalpaden is dan ook voor zowel de ontwerper, beslissingsmaker, beheerder als voor het ontwerpproces een aanwinst. Naast het feit dat het pad tot een overstroming expliciet is gemaakt levert de aanpak voor de beschouwde cases direct al een optimalisatie van de overstromingskans. Voor de in dit rapport beschouwde case is de winst op de faalkans minimaal een factor 1000. Dit betekent in het geval van de case (en vaak in andere cases) het verschil tussen wel of niet voldoen aan de eis van macrostabiliteit buitenwaarts. Dit zal dus onnodige aanleg van buitenbermen voorkomen. In het geval van de case wordt een buitenberm van 5 à 10 meter voorkomen.

Tot slot wordt opgemerkt dat het project Wolferen-Sprok (Waterschap Rivierenland) de in dit rapport beschreven methodiek min of meer heeft toegepast ter optimalisatie van de buitenwaartse macrostabiliteit en dat deze aanpak momenteel ook binnen het beheergebied van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier wordt toegepast.



16 december 2020, versie 1.0, definitief

Referenties

- [1] Berg, Frans van den (2020). Aanneمة ontdek- en hersteltijd STBU. Deltares memo, kenmerk 11204873-002-GEO-0002, 15 april 2020
- [2] Deltares. (2019). Shear Strength of Initially Unsaturated Soil - Literature Study and Research Proposal. Deltares report 11202560-020-GEO-0001, January 16, 2019.
- [3] Deltares. (2020). Shear Strength of Initially Unsaturated Soil - Results measurements Oijen and Westervoort. 11204453-002-GEO-0001, Version 2.0, March 21, 2020, draft.
- [4] Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2019). Schematiseringshandleiding Macro stabiliteit, WBI 2017, versie 3.0.
- [5] POVM (2020). POVM Actuele Sterkte. Macro stabiliteit Buitenwaarts een verkennende studie. 24 april 2020, definitief.

A Grootte van de buitenwaartse afschuiving

Met betrekking tot de hersteltijd en vervolg gebeurtenissen is de omvang van de buitenwaartse afschuiving van belang. Het is noodzakelijk onderscheid te maken tussen afzonderlijke afschuivingen die een verschillend effect hebben op de vervolggebeurtenissen. Onderscheid kan gemaakt worden tussen een oppervlakkige afschuiving waarbij alleen de bekleding is aangetast en een afschuiving die het gehele dijklichaam, dus ook de kern (zand of klei), aantast of zelfs de dijkhoogte verlaagt. Een kleine of oppervlakkige afschuiving kan wellicht een grote kans van optreden hebben, maar het herstel zal eenvoudiger en aanmerkelijk sneller zijn uitgevoerd dan een grote afschuiving. Daarentegen kan de kans op een grote afschuiving kleiner zijn maar kan het herstel aanmerkelijk meer tijd vergen. Hierdoor is het soms nodig om beide gevallen te beschouwen ter bepaling van de veiligheid van het buitentalud. Er wordt geen onderscheid gemaakt tussen grote en kleine verplaatsingen van de afgeschoven grondmoot. De mate waarin de afgeschoven grondmoot verplaatst kan wel van belang zijn voor de vervolggebeurtenissen. Een volledige afschuiving met een kleine verplaatsing zal bijvoorbeeld tot een verwaarloosbare kruindaling leiden. Om praktische redenen (het is nl. lastig in te schatten hoeveel verplaatsing daadwerkelijk zal optreden) wordt dit in de methodiek niet in rekening gebracht. Dit is conservatief.

