Rode draden

Van	Adviesteam Dijkontwerp
Datum	18 oktober 2024
Versie	RD9-1
Onderwerp	Rode Draad #9: Berekeningsresultaat en ervaringskennis

Inhoud

1. Inleiding 2

2. Samenvatting aanbevelingen 3

3. Toelichting op aanbevelingen 4
   - 3.1 Aanbeveling 1: Bekijk altijd of de resultaten van modelberekeningen in lijn zijn met de a-priori verwachtingen daarover 4
   - 3.2 Aanbeveling 2: Controleer systematisch de modellering en de modelinvoer 5
   - 3.3 Aanbeveling 3: Voer probabilistische analyses uit 7
   - 3.4 Aanbeveling 4: Werk in bewezen-sterkteanalyses van grof naar fijn 13

Het Adviesteam Dijkontwerp geeft onafhankelijk technisch-inhoudelijk advies aan de alliantie Hoogwaterbescherming over de toepassing van de waterveiligheidsbenadering en de nieuwe kennis die hiermee samenhangt. Meer informatie over de adviezen van het Adviesteam Dijkontwerp vind je op de website www.adviesteamdijkontwerp.nl onder Werkwijze.

1. Inleiding

Het Adviesteam Dijkontwerp analyseert regelmatig de adviezen die het aan projecten geeft rondom het toepassen van overstromingskansbenadering en nieuwe kennis. De rode draden die hieruit volgen worden gerapporteerd en besproken met stakeholders, waarna ze breed worden gedeeld met geïnteresseerde dijkwerkers.

Het voorliggende memo is de negende Rode draden-rapportage van het Adviesteam. In dit memo wordt ingegaan op het belang van het spiegelen van de berekeningsresultaten aan verwachtingen die berusten op ervaringskennis. Daarbij gaat het hier specifiek over de resultaten van modelberekeningen die betrekking hebben op de kans op een overstroming of een andere ongewenste gebeurtenis (bijvoorbeeld een afschuiving of niet-sluiten). Er wordt in deze Rode draad bewust gesproken over de resultaten van modelberekeningen omdat kansinschattingen die berusten op deskundigenoordelen (expert elicitation, zoals DOT [1]) per definitie in lijn zullen zijn met de verwachting: ze zijn daar dan namelijk op gebaseerd.

Als er een wezenlijk verschil bestaat tussen het resultaat van een modelberekening en de a-priori verwachting daarover, dan is óf de berekening óf de verwachting fout (of beide). Het is dan van belang om te bepalen waar de fout zit en het gat tussen beide te dichten. Anders is de kans groot dat er ten onrechte wel/niet wordt besloten tot versterking. Ook kunnen er anders versterkingsmaatregelen worden ontworpen op basis van verkeerde veronderstellingen over datgene wat verbetering behoeft, waardoor ze minder doelmatig of effectief zijn dan beoogd.

De aanleiding van deze Rode draden-rapportage is dat het Adviesteam dikwijls constateert dat de resultaten van modelberekeningen voor ‘waar’ worden aangenomen, zonder ze te spiegelen aan verwachtingen op basis van ervaringskennis. Ook mist regelmatig een duiding van berekeningsresultaten die weinig voor de hand liggen, zoals berekende faalkansen voor macrostabiliteit die nauwelijks afhankelijk zijn van de hoogwaterbelasting. Ervaringen vanuit het beheer (bijvoorbeeld vertoond gedrag bij eerdere hoogwaters) worden dikwijls als minder ‘hard’ beschouwd dan de resultaten van modelberekeningen. Dat vindt het Adviesteam lang niet altijd terecht. Met deze Rode draden-rapportage hoopt het Adviesteam eraan bij te dragen dat ervaringskennis de plaats krijgt bij de beoordeling en het ontwerp van waterkeringen die ze verdient.

Deze Rode draad is als volgt opgebouwd. In hoofdstuk 2 zijn de aanbevelingen bondig weergegeven. In de daaropvolgende hoofdstukken worden deze aanbevelingen nader toegelicht en verduidelijkt met praktijkvoorbeelden.

Reacties en feedback op deze Rode draden-rapportage zijn van harte welkom. Uiteraard zijn wij ook bereikbaar voor nadere toelichting en ondersteuning bij projecten. U kunt ons bereiken via info@adviesteamdijkontwerp.nl.

2. Samenvatting aanbevelingen

1. Controleer *altijd* of de resultaten van modelberekeningen in lijn zijn met de a-priori verwachtingen daarover.

2. Als er sprake is van een wezenlijk verschil tussen het resultaat van een modelberekening en de a-priori verwachting daaromtrent, dan wordt aanbevolen om kritisch te beschouwen of de modelberekening aanleiding geeft om de verwachting bij te stellen. Als dit niet zo is, dan is het raadzaam om de modelberekening kritisch te beschouwen (inclusief tussenresultaten zoals berekende spanningen en glijvlakken). In dat geval worden de volgende stappen aanbevolen:
    - Stap 1: Controleer de geschiktheid van het gehanteerde model. Wordt het model toegepast binnen het toepassingsgebied? Zijn er metingen of proeven die de juistheid van het gebruikte model ondersteunen? Betreft de modeluitkomst wel echt de gebeurtenis waarover de verwachting gaat? Is bijvoorbeeld wel echt een overstromingskans berekend, of alleen de kans op de initiatie van het faalmechanisme?
    - Stap 2: Controleer de gebruikte invoer. Hierbij gaat het zowel over de geometrie, laagopbouw en geohydrologische condities, als de parameterwaarden daarbinnen (bijvoorbeeld materiaaleigenschappen, kans op niet-sluiten, belastingkenmerken). Voer gevoeligheidsanalyses uit. Welke keuzes kunnen het verschil met de verwachting verklaren? Zijn meetgegevens juist geïnterpreteerd? Is onzekerheid weg te nemen door aanvullende metingen of monitoring?
    - Stap 3: Kijk naar bewezen sterkte. Zijn onzekerheden te verkleinen op basis van ervaringen uit het verleden?

3. Voor het spiegelen van berekende faalkansen aan a-priori verwachtingen is het raadzaam om de resultaten van probabilistische analyses als vertrekpunt te gebruiken (al dan niet steekproefsgewijs). De redenen hiervoor zijn:
    a. De semi-probabilistische werkwijze is een benadering van de probabilistische, waarbij soms sprake is van forse onnauwkeurigheden. Dit komt doordat in semi-probabilistische berekeningen wordt gewerkt met rekenwaarden die zijn afgeleid voor landelijke toepassing en die daardoor relatief grof zijn.
    b. De geloofwaardigheid van de resultaten van probabilistische analyses is makkelijker te beoordelen dan de geloofwaardigheid van de resultaten van semi-probabilistische analyses.
    c. In probabilistische analyses kunnen de kansen op gebeurtenissen die volgen op een initiële gebeurtenis (bijvoorbeeld afschuiving) vaak makkelijker worden meegenomen dan in een semi-probabilistische analyse. Dit is zo omdat de kansen op vervolg-gebeurtenissen dikwijls afhankelijk zijn van het belastingniveau waarbij de initiële gebeurtenis (bijvoorbeeld afschuiving) optreedt.

4. Werk in bewezen-sterkteanalyses van grof naar fijn om onnodige complexiteit te voorkomen. Bewezen sterkte kan op diverse manieren worden meegenomen in betrouwbaarheidsanalyses. De nauwkeurige, maar relatief bewerkelijke methode uit de Handreiking Faalkansanalyse en Faalkans Updating [2] is niet de enige mogelijkheid.

3. Toelichting op aanbevelingen

In dit hoofdstuk wordt per aanbeveling uit hoofdstuk 2 een korte toelichting gegeven, met (geanonimiseerde) voorbeelden uit de adviespraktijk van het Adviesteam.

3.1 Aanbeveling 1: Bekijk altijd of de resultaten van modelberekeningen in lijn zijn met de a-priori verwachtingen daarover

Een betrouwbaarheidsanalyse start altijd vanuit een goede systeembeschrijving en een duidelijk beeld van de manier waarop het systeem (hier: een waterkering) kan falen. In het BOI en de ministeriële regeling staan dan ook niet voor niets begrippen als het verhaal van de kering en faalpaden centraal.

Voor het bepalen van kansen op ongewenste gebeurtenissen, of het ontwerp van verbetermaatregelen die die kansen tot een bepaald niveau moeten beperken, worden modellen gebruikt. Het gebruik van modellen vergt deskundigheid. Een model is namelijk per definitie een benadering van de werkelijkheid. Elk model heeft bovendien een geldigheidsgebied. En de invoer van modellen is lang niet altijd evident, bijvoorbeeld omdat het aantal metingen beperkt is en meetgegevens geïnterpreteerd moeten worden. Vaak moeten meetgegevens vertaald worden naar invoer die recht doet aan de vereenvoudigingen van de werkelijkheid in een model.

Er zullen altijd verwachtingen zijn over wat het resultaat van een analyse gaat zijn. Deze berusten in de praktijk vaak op:

- eerder uitgevoerde analyses voor soortgelijke situaties,
- in het verleden opgetreden, overleefde belastingen,
- in het verleden opgetreden schades,
- waargenomen deformaties,
- opgetreden wellen (al dan niet zandmeevoerend),
- metingen en waargenomen gedrag op ijklocaties,
- kennis van het faalproces in relatie tot enerzijds de opbouw van de dijk en de ondergrond en anderzijds de hoogte en duur van de belasting.

Wanneer het resultaat van een modelberekening substantieel afwijkt van de a-priori verwachting, dan is het raadzaam om de oorzaken van dit verschil boven water te krijgen. Modelberekeningen kunnen inzichten opleveren die aanleiding geven om de verwachting bij te stellen. Andersom is het echter ook goed mogelijk dat de modelberekeningen bijstelling behoeven. Het Adviesteam constateert dat dit laatste soms wordt nagelaten of op weerstand stuit. Dit is een gemiste kans. Het is namelijk essentieel dat de aard en omvang van een veiligheidstekort goed begrepen wordt. Dat is niet alleen van belang voor een goed oordeel over de noodzaak van versterking, maar ook voor het ontwerp van effectieve verbetermaatregelen.

Vaak worden berekeningsresultaten gezien als ‘hard’ en ervaringskennis als ‘zacht’. Van ‘hard bewijs’ is volgens het Adviesteam echter pas sprake als de berekeningsresultaten zijn begrepen en geloofwaardig zijn in het licht van alles wat nog meer bekend is dan het berekeningsresultaat.

In veel adviezen van het Adviesteam vormt de spanning tussen het resultaat van een uitgevoerde analyse en de verwachting de reden om kritisch te kijken naar bijvoorbeeld de veiligheidsopgave en de vraag of modellen wel juist zijn toegepast en of de modelinvoer geloofwaardig is. Enkele typische voorbeelden uit de adviespraktijk van het Adviesteam zijn:

1. berekende veiligheidsopgaven door indirecte mechanismen, zoals macrostabiliteit buitenwaarts (is de kans op hoogwater binnen de hersteltijd wel goed ingeschat?),
2. berekende stabiliteitsopgaven bij relatief brede dijken (zijn bijvoorbeeld vervolgprocessen wel beschouwd, zie ook [3]?),
3. opvallend grote berekende kansen op afschuivingen (kloppen de gemodelleerde laagopbouw, geohydrologische situatie en materiaaleigenschappen wel? Klopt het veronderstelde grondgedrag, bijvoorbeeld normaal geconsolideerd vs. contractant gedrag en het grondgedrag in de onverzadigde zone? Is nader grondonderzoek raadzaam? Is de grote faalkans aannemelijk in het licht van ervaringen vanuit het beheer?),
4. berekende bekledingsopgaven bij dijken waar nauwelijks sprake is van een strijklengte (is bijvoorbeeld rekening gehouden met de hoek van golfinval en de sterkte van onderlagen?),
5. berekende pipingopgaven bij grote voorlanden (is bijvoorbeeld het voorland wel goed geschematiseerd?).

3.2 Aanbeveling 2: Controleer systematisch de modellering en de modelinvoer

Als een berekeningsresultaat niet direct begrepen wordt, dan is het raadzaam om de berekening kritisch te evalueren. Dat kan als volgt systematisch worden gedaan:

1. Ga na of het gebruikte model het fysisch proces dat gemodelleerd moet worden goed beschrijft.
   - ✓ *Een recent praktijkvoorbeeld betreft het ontwerp van een heavescherm in de buitenteen van een dijk. De door het project gebruikte ontwerpmethode [4] is ontwikkeld voor heaveschermen in de binnenteen. Bij het toepassen van deze methode in de buitenteen, moest verder gekeken worden. Bij een heavescherm in de buitenteen kunnen immers ook andere faalprocessen optreden dan bij een heavescherm in de binnenteen. Een ander praktijkvoorbeeld betreft het ontwerp van een kunststof heavescherm. Deze was zodanig in het dwarsprofiel geplaatst, dat er een relatief grote kans op het bezwijken van het scherm door een afschuiving ontstond. Hier moet dan ook aandacht aan gegeven worden.*

2. Controleer of belangrijke gebeurtenissen in het proces tot overstroming zijn overgeslagen in de faalkansanalyse. Ze hebben dan impliciet een kans van één gekregen, wat mogelijk zeer conservatief is.
   - ✓ *Het Adviesteam ziet vaak dat wordt gewerkt met standaard-berekeningswijzen waarin alleen naar de initiatie van een faalmechanisme wordt gekeken, ook als dit evident zeer conservatief is. Om 'los te komen' van ingesleten patronen kan het helpen om het hele faalproces in woorden te beschrijven en de essentie ervan weer te geven in een faalpad of gebeurtenissenboom. Daaruit blijkt dan vaak vanzelf of het negeren van vervolggebeurtenissen zeer conservatief is of eigenlijk niet zoveel uitmaakt. Het Adviesteam is zich ervan bewust dat het nog vaak ontbreekt aan tools en richtlijnen om goed onderbouwde kansinschattingen voor vervolggebeurtenissen te maken. Echter: soms leidt het werken met evident voorzichtige schattingen voor de kans op*

vervolggebeurtenissen al tot een ander oordeel, bijvoorbeeld omdat het achterland relatief hoog ligt of omdat er na een eerste afschuiving nog een aanzienlijke kerende hoogte over blijft. Bovendien kan het in beeld brengen van het volledige faalpad comfort geven als er nét geen veiligheidsopgave is als alleen wordt gekeken naar de initiatie van een faalmechanisme.

3. Ga de gevoeligheid na van het berekeningsresultaat voor variaties in modelinvoer (bijvoorbeeld parameterwaardes) voor aspecten die niet goed bekend en dus onzeker zijn. Bekijk in hoeverre variaties binnen realistische bandbreedtes kunnen leiden tot een berekeningsresultaat dat wél strookt met de a-priori verwachting. Daaruit volgt of het verkleinen van de aanwezige onzekerheden kan leiden tot een geloofwaardig resultaat, of dat het probleem dieper zit. Ook volgt uit een gevoeligheidsanalyse welke parameters er het meest toe doen en dus een nadere beschouwing verdienen. Let in gevoeligheidsanalyses op de samenhang tussen variabelen en kijk -indien relevant- ook naar het gelijktijdig variëren van verschillende invoergegevens.
   - ✓ *Het Adviesteam ziet vaak dat parameters één voor één worden gevarieerd, maar dat een geloofwaardig resultaat verschillende veranderingen tegelijkertijd vergt. Het Adviesteam heeft ook de ervaring dat het behulpzaam kan zijn om te starten met een overzicht van (a) de belangrijkste onzekerheden met daarnaast (b) het conservatisme ten aanzien van de gehanteerde invoer, (c) het belang hiervan voor de uitkomsten en (d) de mogelijkheden om de onzekerheid te verkleinen. Een dergelijke kwalitatieve analyse kan soms al volstaan om te bepalen wat het beste gedaan kan worden om een scherper beeld te krijgen van de dijkveiligheid.*

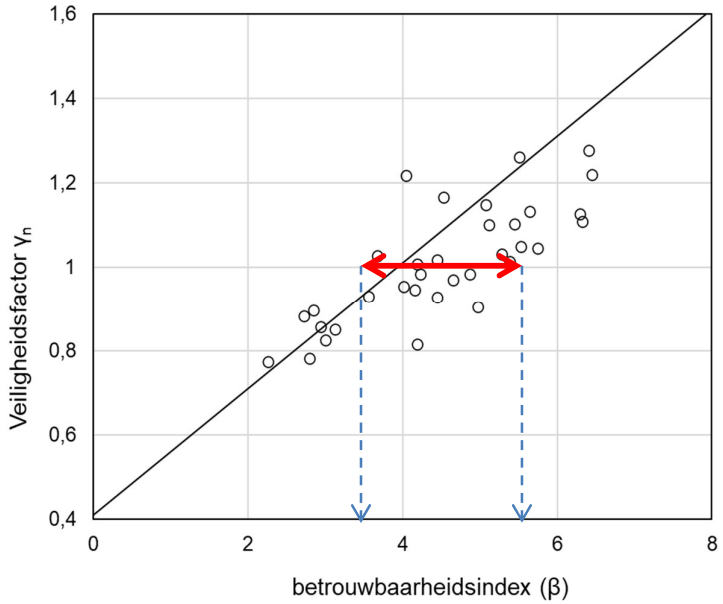
4. Ga na of onzekerheden over de schematiseringskeuzes en parameterwaardes die volgens de gevoeligheidsanalyse belangrijk zijn, zijn te verkleinen door een meer diepgaande analyse van de beschikbare gegevens of aanvullend (grond)onderzoek. Voer vervolgens gericht nadere analyses en/of aanvullend onderzoek uit.

5. Als nader onderzoek op praktische bezwaren stuit (bijvoorbeeld te duur, te tijdrovend) of niet tot een bevredigend resultaat leidt (resultaten zijn bijvoorbeeld nog steeds ongeloofwaardig), dan kan een bewezen sterkte-analyse mogelijk uitkomst bieden, zie aanbeveling 4. Het Adviesteam adviseert echter altijd om eerst de bovengenoemde aspecten te beschouwen omdat dit tot een veel beter begrip leidt van de waterkering en de oorzaken van het verschil tussen de aanvankelijk berekende sterkte en de verwachte sterkte. Bovendien is het uitgangspunt van elke bewezen sterkte-analyse dat het gebruikte model passend is en dat eventuele deterministische modelinvoer de werkelijkheid goed beschrijft. Als dit niet zo is, dan klopt ook het resultaat van de bewezen-sterkte analyse niet. Overigens geldt hetzelfde dan natuurlijk ook voor het berekeningsresultaat zonder bewezen sterkte.

3.3 Aanbeveling 3: Voer probabilistische analyses uit

A. De semi-probabilistische werkwijze is een (dikwijls grove) benadering van de probabilistische
In ontwerpverificaties en beoordelingen wordt nog vaak gewerkt met semi-probabilistische methodes. Er wordt dan gerekend met representatieve waarden en veiligheidsfactoren (ofwel: rekenwaarden) die zijn afgeleid van probabilistische analyses. In een probabilistische analyse kan de onnauwkeurigheid die ontstaat door het werken met relatief onnauwkeurige veiligheidsfactoren worden voorkomen.

De onnauwkeurigheid van de semi-probabilistische werkwijze is geïllustreerd in Figuur 1. De figuur toont de veiligheidsfactor γ_n voor macrostabiliteit binnenwaarts als functie van de vereiste betrouwbaarheidsindex (doorgetrokken zwarte lijn). De figuur toont ook de datapunten waarop deze relatie berust. De rode lijn geeft aan dat een dijk die net voldoet bij een veiligheidsfactor van 1,0 een betrouwbaarheidsindex kan hebben die gemakkelijk varieert van grofweg 3,5 tot 5,5. In termen van faalkansen is dit een range van 2×10^{-4} tot 2×10^{-8} per jaar (vier ordegroottes verschil).



Figuur 1. De veiligheidsfactor γ_n als functie van de betrouwbaarheidsindex voor macrostabiliteit [5].

Ondanks de relatief grote onnauwkeurigheid van semi-probabilistische methoden voor het bepalen van faalkansen, constateert het Adviesteam dat deze methoden op grote schaal voor dit doel worden gebruikt. Dit is opvallend, mede omdat semi-probabilistische methoden normaliter (in andere sectoren en landen) worden gebruikt om juist *niet* met faalkansschattingen te hoeven werken.

Het voordeel van de semi-probabilistische werkwijze is dat deze vaak minder bewerkelijk is dan de probabilistische. In een iteratief ontwerpproces is dit een belangrijk voordeel, zeker als de precieze faalkans er voor het ontwerp minder toe doet (bijvoorbeeld in het licht van 'robuust ontwerpen' of omdat de dimensies ook door andere functies worden bepaald). Voor een scherpe bepaling van de overstromingskans, zoals speelt bij beoordeling en scope-bepaling, is de semi-probabilistische methode echter minder geschikt.

Kortom: afhankelijk van de context en de betekenis van een nauwkeuriger resultaat, kan het raadzaam zijn om over te stappen op probabilistische methodes of om de nauwkeurigheid van semi-probabilistische methodes steekproefsgewijs te testen. De resultaten van zo'n steekproef zijn soms ook te gebruiken om een meer specifieke kalibratierelatie af te leiden. Dat is bijvoorbeeld in het project SAFE gedaan [6]. Zo kan de onnauwkeurigheid van de semi-probabilistische werkwijze ook worden verkleind.

B. De resultaten van probabilistische analyses zijn makkelijker te spiegelen aan ervaringskennis

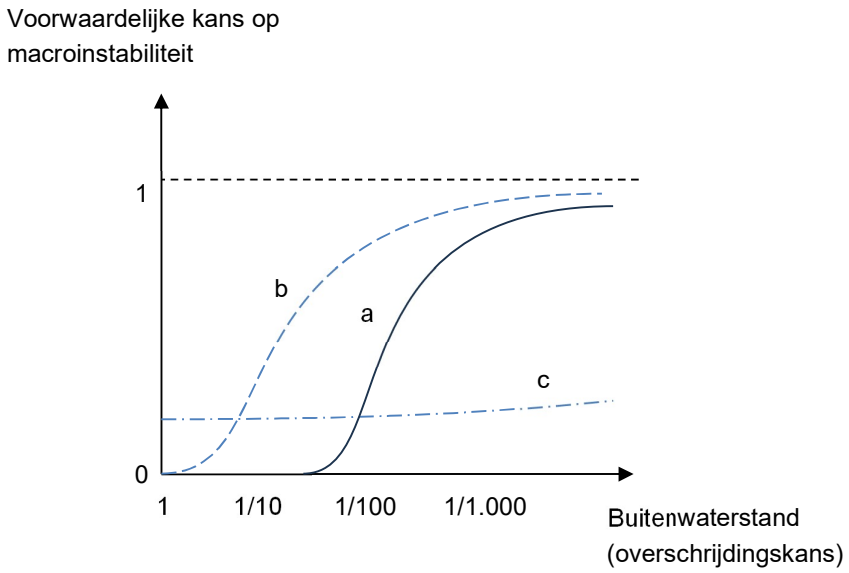
In semi-probabilistische analyses worden faalmechanismemodellen gevoed met rekenwaarden van onzekere grootheden, zoals de Waterstand Bij Norm (WBN) en de 5%-waarden van sterkteparameters. Het rekenen met relatief onwaarschijnlijke invoerparameters maakt het vaak lastig om berekeningsresultaten te spiegelen aan ervaringskennis. Zo is de WBN zelden eerder bereikt, en wordt gerekend met parameterwaarden van sterkte-eigenschappen die in werkelijkheid met een relatief grote kans (vaak 95% of meer) gunstiger zullen zijn. Ook als een berekening met bijvoorbeeld de verwachtingswaarden (gemiddelden) van sterkte-eigenschappen en een vaker gekeerde waterstand een resultaat oplevert dat strookt met de verwachting ('de dijk faalt niet'), dan wil dit nog niet zeggen dat het resultaat van de semi-probabilistische analyse (met rekenwaarden) geloofwaardig is. Het geeft hooguit aan of de gehanteerde verwachtingswaarden kunnen kloppen. Bij het schematiseren hoort echter ook het beschrijven van onzekerheden en variaties rond gemiddelden. Of die redelijk zijn ingeschat is met een berekening met verwachtingswaarden onmogelijk te controleren.

In probabilistische analyses worden faalkansen bepaald door sterkte- en belastingmodellen te voeden met kansverdelingen van onzekere invoerparameters.[1] De tussen- en eindresultaten van dergelijke analyses zijn een stuk eenvoudiger te spiegelen aan ervaringskennis, bijvoorbeeld:

- Is het plausibel dat de kans dat de dijk op een hele specifieke plek (de beschouwde 'doorsnede') faalt gelijk is aan 1/100 per jaar? Of dat de overstromingskans van een dijktraject bijvoorbeeld 1/10 per jaar is?
- Is de meest waarschijnlijke combinatie van parameterwaarden waarbij de dijk faalt geloofwaardig (deze combinatie wordt ook wel het 'ontwerppunt', 'design point' of 'illustratiepunt' genoemd)?
- Meer specifiek: is het belastingniveau in het ontwerppunt geloofwaardig of is een overstroming bij dit belastingniveau eigenlijk praktisch uitgesloten?
- Is de relatie tussen de berekende faalkans en bijvoorbeeld de buitenwaterstand begrijpelijk?

Ten aanzien van dit laatste punt: de ervaringskennis beperkt zich vaak tot de minder extreme condities. In een probabilistische analyse kan worden gekeken naar de kans op overstroming bij uiteenlopende belastingen, dus ook belastingen die eerder zijn voorgekomen. Dit kan bruikbare inzichten opleveren over de sterktemodellering omdat die in de basis niet verandert bij hogere belastingniveaus. Zo verandert bijvoorbeeld de ondergrondopbouw niet als de belasting toeneemt. De relatie tussen de faalkans en de belasting (bijvoorbeeld waterstand, verkeerslast, golfhoogte) wordt ook wel een fragility curve genoemd. In Figuur 2 zijn schematische voorbeelden van fragilty curves gegeven.

[1] Een alternatieve methode om faalkansen te bepalen is het systematisch analyseren van de kansschattingen van deskundigen (expert elicitation). Voor het duiden van de resultaten van expert elicitation geldt hetzelfde als wat hier staat beschreven.



Figuur 2. Drie voorbeelden van fragility curves voor instabiliteit (niet: overstroming). De doorgetrokken lijn (a) is een curve die niet direct 'verdacht' is. De twee blauwe, gestreepte fragility curves roepen vragen op. Curve b toont een faalkans die bij frequent voorkomende waterstanden al relatief groot is en curve c toont een faalkans die nauwelijks varieert met de buitenwaterstand.

Doorgaans is het aannemelijk dat de faalkans klein is bij belastingen die eerder zijn voorgekomen en dat de faalkans toeneemt naarmate de belasting hoger wordt. Zo mag bij primaire waterkeringen vaak worden verwacht dat de kans op een grote afschuiving klein is bij lage waterstanden, maar potentieel groot is bij waterstanden die buiten het ervaringsgebied liggen.

Als de vorm van een fragility curve afwijkt van de verwachting, dan is dat reden voor een nadere beschouwing. Dan is namelijk óf de verwachting óf de som fout. Het achterhalen van de oorzaken van eventuele 'rarigheden' is van belang omdat bij elke oorzaak een ander handelingsperspectief past. Ter illustratie:

1. Als de faalkans bij een lage belasting *in de huidige situatie* onrealistisch groot is (zoals bij curve b in Figuur 2), dan doen het gehanteerde model en/of de gehanteerde modelinvoer onvoldoende recht aan de realiteit. Dit werkt dan door in zowel de beoordeling als het ontwerp van verbetermaatregelen. In dit geval is het raadzaam om nader te kijken naar het gebruikte model, de kwaliteit en interpretatie van de gebruikte data, de consistentie met metingen en ervaringskennis.
2. Als de faalkans bij een lage belasting *voor een toekomstig zichtjaar* opvallend groot is (zoals bij curve b in Figuur 2), dan is het raadzaam om ook eens de huidige situatie te beschouwen (zie 1) en vervolgens de veronderstelde mate van eventuele veroudering/degradatie te controleren.
3. Een vlakke fragility curve (zoals curve c in Figuur 2) kan verschillende oorzaken hebben:
    a. De onzekerheid over de sterkte van de ondergrond is mogelijk zodanig fors dat deze het effect van een hoger belastingniveau totaal overschaduwt. In dat geval is het de vraag of de gehanteerde schematisering een voldoende basis biedt voor het ontwerp van verbetermaatregelen. De onzekerheid over de sterkte is wellicht te reduceren door te kijken naar de kwaliteit en interpretatie van de gebruikte data, en door

ervaringskennis/'ankers in de realiteit' een plek te geven in de analyse (in de vorm van 'bewezen sterkte' of juist 'bewezen zwakte').

b. De belastingvariabele waarop is ingezoomd in de stabiliteitsanalyses is mogelijk niet de dominante belasting. In dat geval concentreren we ons dus op de verkeerde oorzaak van falen bij de keuze voor en uitwerking van verbetermaatregelen. Hierdoor blijven effectieve maatregelen mogelijk buiten beeld, zoals bijvoorbeeld het beperken van de verkeerslast. Het is dan raadzaam om de gevoeligheid voor verschillende belastingvariabelen of belastingsituaties te beschouwen bij de beoordeling en het ontwerp. Langs de horizontale as van een fragility curve hoeft ook niet per se een buitenwaterstand te staan: het kan bijvoorbeeld ook een verkeerslast, overslagdebiet of golfhoogte zijn. Ook kan de faalkans een functie zijn van meer dan één belastingvariabele.

   ✓ *In stabiliteitsanalyses wordt vaak standaard aangenomen dat de buitenwaterstand de dominante belastingvariabele is. Soms is dit echter een andere variabele, zoals de verkeerslast. Binnen de context van een overstromingskansanalyse kan het dan van belang zijn om te kijken naar de kans op hoogwater binnen de hersteltijd. Immers, als een afschuiving vermoedelijk niet het gevolg is van hoogwater, dan is de kans op hoogwater in geval van een afschuiving relatief klein. Het meenemen van de kans op tijdig herstel kan dan van grote invloed zijn op het beeld van de overstromingskans.*

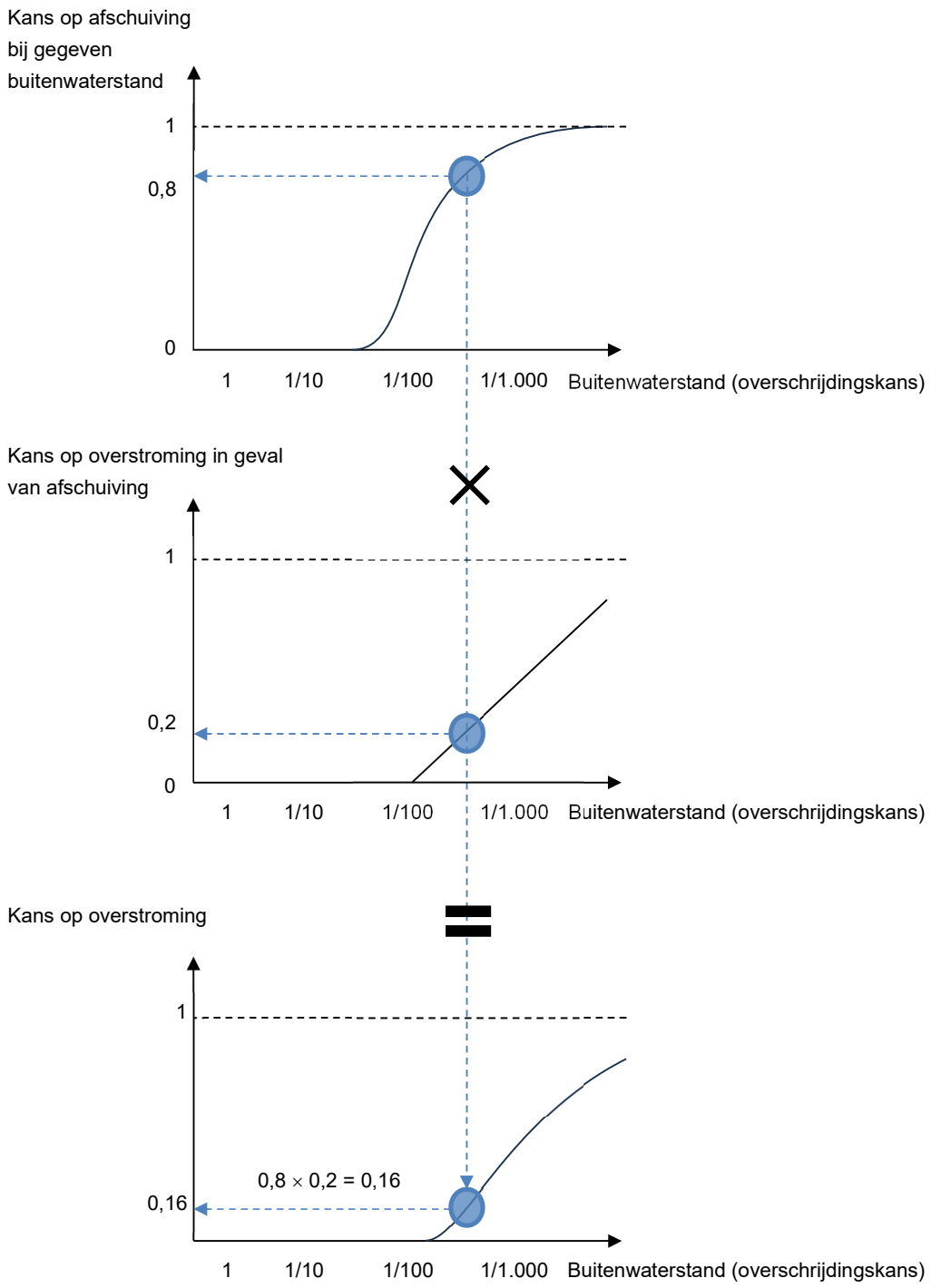
Het Adviesteam komt regelmatig schematiseringen voor geotechnische faalmechanismen tegen die impliceren dat de kans op een ongewenste gebeurtenis (bijvoorbeeld een afschuiving) nauwelijks afhankelijk is van de buitenwaterstand. Dit wordt vaak pas duidelijk als er voor de duiding van het resultaat van de semi-probabilistische berekening ook een fragility curve wordt opgesteld. Dan blijkt vaak dat de duiding die eerder werd gegeven aan het resultaat van de semi-probabilistische berekening niet klopt, zoals bijvoorbeeld: 'een berekende faalkans van 1/1000 per jaar is goed mogelijk want een 1/1000-jaar waterstand is nog nooit voorgekomen'. Als de fragility curve vlak loopt, dan is de berekende faalkans echter 1/1000 *bij elke waterstand*. Een dergelijk resultaat vergt een duiding die het aannemelijk maakt dat de faalkans onafhankelijk is van de waterstand, en dat een faalkans van 1/1000 bij waterstanden die al regelmatig zijn voorgekomen geloofwaardig is.

✓ *Een vlakke fragility curve kan ook een artefact zijn van een modellering die onvoldoende recht doet aan de realiteit. Het Adviesteam constateert dat fragility curves voor macrostabiliteit dikwijls worden bepaald uitgaande van de schematisatie uit de semi-probabilistische analyse bij de Waterstand Bij Norm. Deze schematisatie doet echter niet altijd voldoende recht aan de omstandigheden bij lagere waterstanden. Het is dus raadzaam om goed te kijken naar de aspecten die bij lagere waterstanden anders geschematiseerd moeten worden, zoals zuigspanningen in de onverzadigde zone.*

C. In een probabilistische analyse kunnen de kansen op vervolggebeurtenissen makkelijker worden meegenomen

De normen uit de Omgevingswet (voorheen: Waterwet) hebben geen betrekking op de kans op een afschuiving/schade, maar op de kans op overstroming leidend tot substantiële schade en/of slachtoffers. Vaak moet er nog meer gebeuren na de initiatie van een faalmechanisme voordat er sprake is van een overstroming. De kans op een overstroming door bijvoorbeeld macroinstabiliteit kan dus veel kleiner zijn

dan de kans op alleen macroinstabiliteit. Dit is in een semi-probabilistische aanpak vaak moeilijk mee te nemen, omdat daarin slechts naar één buitenwaterstand wordt gekeken, terwijl de kans op een vervolggebeurtenis afhankelijk is van het belastingniveau. Zo zal de kans op overstroming na een kruindaling groter zijn als de kruindaling zich voordoet bij een hogere buitenwaterstand. In een probabilistische analyse kunnen dit soort afhankelijkheden relatief eenvoudig worden meegenomen. Dit kan worden gedaan door *per belastingniveau* de kans op het initiële mechanisme te vermenigvuldigen met de kans dat er vervolgens een overstroming optreedt door vervolggebeurtenissen *bij het betreffende belastingniveau*. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 3.



Figuur 3. De kans op een overstroming als functie van de buitenwaterstand is te verkrijgen door per buitenwaterstand de kans op een afschuiving te vermenigvuldigen met de bijbehorende voorwaardelijke overstromingskans.

3.4 Aanbeveling 4: Werk in bewezen-sterkteanalyses van grof naar fijn

Van ‘bewezen sterkte’ is sprake als een kering heeft aangetoond een bepaalde belasting veilig te kunnen keren. Naast ‘bewezen sterkte’ kan er uiteraard ook sprake zijn van ‘bewezen zwakte’. Een praktijkvoorbeeld is een pipingberekening die aangeeft dat de kans op piping extreem klein is op een locatie waar een zandmeevoerende wel direct achter de dijk is geconstateerd. Het is in dit soort gevallen raadzaam om de modelresultaten niet direct voor ‘waar’ aan te nemen, iets wat beheerders in de praktijk ook niet snel doen. Het tegenovergestelde is in de praktijk echter minder vanzelfsprekend. Daarom richt de tekst in deze Rode draad zich op bewezen sterkte.

Een bewezen-sterkteanalyse kan nuttig zijn als de conditie van de kering ten tijde van de overleefde belasting(en) niet substantieel anders is dan wat in de beoordeling of het ontwerp centraal staat. Ofwel: er moet uit observaties iets relevants te leren zijn. Het in rekening brengen van bewezen sterkte kan een grote invloed hebben op het beeld van de faalkans van een kering als de faalkans in hoge mate wordt bepaald door reduceerbare kennisonzekerheid. De fragility curve loopt in dat geval relatief vlak (zie geval c in Figuur 2). Het effect van bewezen sterkte kan ook substantieel zijn als de reduceerbare kennisonzekerheid minder groot is maar als de kering in het verleden zeldzaam zware belastingen heeft overleefd. Kortom: als (1) de berekende faalkans weinig afhankelijk is van het belastingniveau en/of (2) de kering in het verleden een relatief hoge, zeldzame belasting heeft gekeerd, dan is de verwachte impact van bewezen sterkte potentieel groot. In andere gevallen is de verwachte impact beperkt.

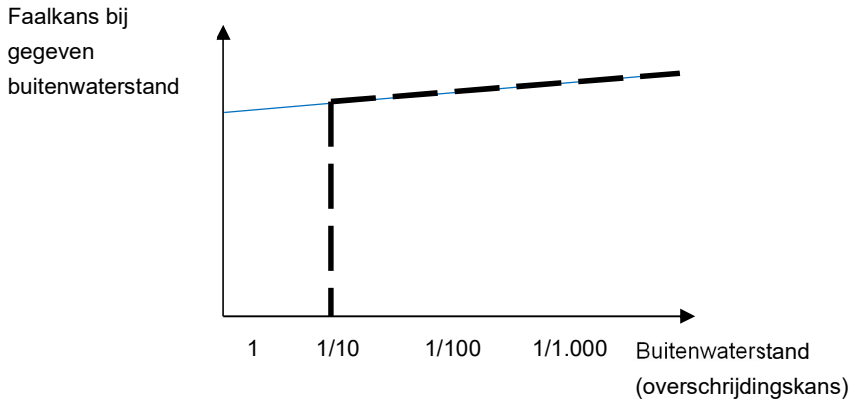
Bij een bewezen sterkte-analyse wordt al snel gedacht aan een relatief complexe probabilistische analyse. Een analyse van bewezen sterkte wordt daarom soms (onterecht) gezien als een ‘statistische truc’. Dat is ongelukkig want het *concept* ‘bewezen sterkte’ is in de basis heel begrijpelijk, zelfs voor leken. In het dagelijks leven nemen mensen zeer veel beslissingen onder onzekerheid waarbij kansinschattingen niet zijn gebaseerd op modelberekeningen maar op ervaringskennis. Bewezen sterkte kan op diverse manieren in rekening worden gebracht. De geavanceerde methode uit de Handreiking Faalkansanalyse en Faalkans Updating [2] is een bekend voorbeeld. Er zijn echter ook eenvoudigere (grovere) of zelfs nog meer geavanceerde aanpakken denkbaar.

Om onnodige complexiteit te voorkomen wordt aanbevolen om bewezen sterkte ‘van grof naar fijn’ mee te nemen in faalkansanalyses, en alleen te verfijnen als een nauwkeuriger antwoord meerwaarde heeft. Ter illustratie (op volgorde van complexiteit):

1. Soms kan op basis van berekeningen bij vaker overleefde belastingen een geïnformeerde schatting worden gegeven van de sterkte die minimaal aanwezig zou moeten zijn.
   - ✓ *Een voorbeeld hiervan is de bepaling van de minimale sterkte van een veenlaag die zeer bepalend is voor de stabiliteit bij de beoordeling van een groot aantal kilometers regionale keringen. Uit de statistische bewerkingen van proevenverzamelingen ‘volgens het boekje’ volgde nauwelijks sterkte. Vervolgens is gekeken welke sterkte minimaal aanwezig zou moeten zijn om te kunnen verklaren dat dijken op deze veenlaag blijven staan onder condities die vaker voorkomen. Daartoe is de stabiliteit berekend van een aantal dijkprofielen waarin het weerstandsmoment hoofdzakelijk door de sterkte van de veenlaag wordt bepaald. In deze berekeningen is de sterkte van de veenlaag gevarieerd, is voor de overige sterkteparameters gerekend met verwachtingswaarden in plaats van rekenwaarden en is een lage belasting aangehouden. Deze grove analyse leidde al tot een minimale sterkte die van grote invloed was op de versterkingsopgave. Bij regionale keringen en primaire keringen met*

relatief lage normen (norm van bijvoorbeeld 1/100 per jaar) is de potentiële invloed van dit type analyse op de opgave groter dan bij streng genormeerde primaire keringen (norm van bijvoorbeeld 1/10.000 per jaar). De aanpak kan echter ook bij streng genormeerde primaire keringen van pas komen als uit proeven of de literatuur een ongeloofwaardig lage sterkte volgt. De aanscherping is dan op zichzelf wellicht onvoldoende om overal tot een ander oordeel te komen, maar ze kan wel bijdragen aan een begrijpelijker oordeel, en (al dan niet in combinatie met andere punten uit dit memo) van invloed zijn op de aard en omvang van de opgave.

2. Als eenvoudige, conservatieve benadering kunnen de faalkansen uit de fragility cure gelijk aan nul worden gesteld bij belastingen waarbij falen praktisch onmogelijk wordt geacht in het licht van bewezen sterkte. De fragility curve wordt verder niet aangepast, zie Figuur 4. Het resultaat hiervan is een bovengrensschatting van wat uit een Bayesiaanse ('nette') bewezen-sterkteanalyse kan komen.
   - ✓ *Het Adviesteam heeft vaker geadviseerd om eerst eens de fragility curve af te kappen bij waterstanden die vrijwel zeker gekeerd moeten kunnen worden. Zo is snel een voorzichtige schatting van het effect van een 'nette' bewezen-sterkteanalyse te maken. Bij een perfect vlakke fragility curve is het eindresultaat helemaal eenvoudig te berekenen: afkappen bij bijv. een 1/x-jaar buitenwaterstand leidt dan tot een faalkans die een factor x kleiner is. Als uit deze analyse al een voldoende kleine faalkans volgt, is verdere verfijning onnodig.*



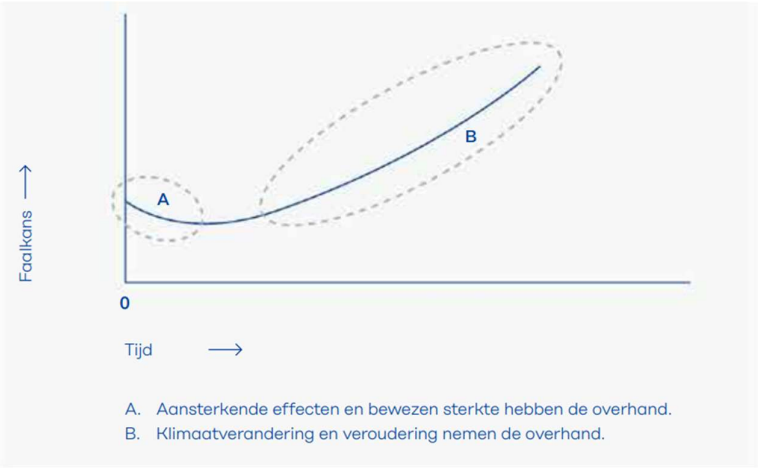
Figuur 4. Principe-schets van het afkappen van een fragility curve. De oorspronkelijk berekende fragilty curve is weergegeven door een blauwe, doorgetrokken lijn. De afgekapte fragility curve is weergegeven door een zwarte, dikgedrukte stippellijn, waarbij is aangenomen dat een 1/10-waterstand praktisch zeker veilig gekeerd kan worden (zodat de faalkans verwaarloosbaar is).

3. Voer een Bayesiaanse bewezen-sterkteanalyse uit. Een nette methode daarvoor is uitgewerkt in de Handreiking Faalkansanalyse en Faalkans Updating [2]. Met deze methode kunnen zowel extreme gebeurtenissen uit het verleden als 'dagelijkse' omstandigheden als overleefde belastingsituaties worden meegenomen. De neiging bestaat vaak om direct naar extreme belastingen uit het verleden te kijken. Bij relatief vlakke fragility curves is het echter raadzaam om eerst de faalkans voor komend jaar te bepalen, gegeven dat de kering een frequent voorkomende belasting *op dit moment* veilig kan keren. Dat is relatief weinig werk (de fragility curve voor de overleefde situatie die nodig is binnen de aanpak uit de Handreiking [2] is dan

praktisch identiek aan de fragility curve voor de te beoordelen situatie) maar kan al veel effect hebben op het beeld van de faalkans. Bezie hierna pas of het meerwaarde heeft om te kijken naar relatief hoge belastingen uit het verleden, toen de kering mogelijk in een andere conditie verkeerde.

- ✓ *Het Adviesteam ziet vaak dat men een bewezen sterkte-analyse niet kansrijk acht omdat de Waterstand Bij Norm niet eerder is voorgekomen. Dat is een misvatting. Ook het feit dat de kering momenteel blijft staan kan namelijk al belangrijke informatie opleveren over de sterkte die blijkbaar aanwezig is, met name als de fragility curve relatief vlak loopt. Verder ziet het Adviesteam vaak dat in bewezen-sterkteanalyses wordt gezocht naar extreme belastingen uit het verre verleden. Bij vlakke fragility curves en degradatie kan dit ertoe leiden dat een bewezen-sterkteanalyse volgens de methode uit de Handreiking Faalkansanalyse en Faalkans Updating [2] niet of nauwelijks tot bijstelling van de faalkans leidt. Dit is op zich een logisch resultaat van deze methode: als de faalkans nauwelijks afhankelijk is van de buitenwaterstand, dan valt er ook nauwelijks iets te leren van het feit dat de kering in een betere conditie een hoogwaterstand kon keren. Een meer informatieve gebeurtenis is dan dat de kering (in huidige staat) de niet zo bijzondere belasting 'van gisteren' heeft gekeerd. Kortom: bedenk goed wat binnen de context van de modellering van het bewezen-sterktevraagstuk een informatieve overleefde situatie is en neem niet direct aan dat dit een extreme gebeurtenis is van decennia geleden.*

4. De faalkans voor een toekomstig zichtjaar wordt mogelijk zwaar onderschat als gebruik wordt gemaakt van de methode uit de Handreiking Faalkansanalyse en Faalkans Updating [2] bij vlakke fragility curves en een in de tijd toenemende faalkans door degradatie of klimaatverandering. Een scherper oordeel is dan te verkrijgen door het verloop van de faalkans in de tijd te bepalen, rekening houdend met het feit dat kennisonzekerheden in de tijd gecorreleerd zijn. Dit betekent dat de werkelijke waarde onbekend (en dus onzeker) is, maar in de tijd niet varieert. Door deze correlatie in de tijd neemt de jaarlijkse faalkans aanvankelijk af (denk bijvoorbeeld aan de faalkans van een stuwdam direct na het vullen van het stuwmeer tot de top). Vervolgens neemt de faalkans echter weer toe door degradatie of bijvoorbeeld zeespiegelstijging. Het resulterende faalkansverloop wordt ook wel een badkuipkromme genoemd, zie Figuur 5. In de ENW-publicatie Grondslagen voor Hoogwaterbescherming [7] staat de badkuipkromme nader toegelicht. 'Onder de motorkap' van bijvoorbeeld de Eurocodes en de rekenregels uit de Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken voor ontwerpverificaties voor hoogwaterbelastingen op basis van de Consequence Classes uit NEN-EN1990 [8] speelt het principe van de badkuipkromme een belangrijke rol. Zo is de kans op het bezwijken van een constructie door de eigen-gewichtsbelasting in een periode 50 jaar bijna net zo groot als de kans daarop direct na oplevering, wat impliceert dat de faalkans in het 50^{e} jaar heel veel kleiner is dan in het eerste jaar. Dit type analyse is bij weten van het Adviesteam echter nog nooit in HWBP-projecten uitgevoerd. Het Adviesteam is graag bereid om hierbij te assisteren, al wordt wel benadrukt dat het hier gaat over de allerlaatste stap van een lange reeks verfijningen. Het is dan ook de vraag of dit soort analyses in de praktijk daadwerkelijk nodig zijn. Maar het geeft in ieder geval comfort om te weten dat de vele voorgaande verfijningen nog altijd een conservatieve faalkansschatting opleveren voor een toekomstig zichtjaar in geval van vlakke fragility curves en een in de tijd toenemende faalkans door degradatie of klimaatverandering.



Figuur 6.2 Illustratie van de badkuipkromme: in de eerste levensjaren daalt de overstromingskans, daarna neemt deze toe door klimaatverandering en veroudering. In werkelijkheid is het verloop grilliger omdat de belastingen in bijvoorbeeld zomer en winter verschillend zijn.

Figuur 5. Badkuipkromme (bron: [7], paragraaf 6.2, figuur 6.2).

Referenties

[1] Rijkswaterstaat, Deltares, Unie van Waterschappen juni 2020, Handreiking DOT – Groene Versie, Deskundigen Oordeel Toets op Maat, definitief versie 1.0.

[2] Deltares, 2017, 22 september 2017, Handreiking Faalkansanalyse en Faalkans Updating, 11200575-014-GEO-0001, Versie 3, definitief.

[3] Adviesteam Dijkontwerp, 3 juni 2021, Rode draden nr. 3 – Werkwijze falen door macrostabiliteit.

[4] De Innovatieversneller (DIV), 2024, Publicatie Heaveschermen, versie 0.31.

[5] Deltares, 28 april 2017 Derivation of the semiprobabilistic safety assessment rule for inner slope stability, 1230086-009-GEO-0030.

[6] Kwakman et al., juni 2024, Aanscherping vereiste veiligheidsfactoren voor macrostabiliteit bij dijkversterking SAFE, Water, jaargang 1, nummer 3, pag. 46-50.

[7] Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW), november 2017, Grondslagen voor Hoogwaterbescherming.

[8] Rijkswaterstaat, november 2018, Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken – Ontwerpverificaties voor de hoogwatersituatie, Groene versie.