Rode draden

Van Adviesteam Dijkontwerp
Datum 24 februari 2025
Versie RD12-1
Onderwerp Rode draad #12 – Faalpaden in de praktijk

1. Inleiding 2
   1.1 Algemeen 2
   1.2 Aanleiding voor deze Rode draad 2
   1.3 Leeswijzer 2
2. Het werken met faalpaden 4
   2.1 Context 4
   2.2 Ervaringen Adviesteam 5
   2.3 Aandachtspunten – wat moet echt 7
   2.4 Tips bij toepassing van faalpaden 8
3. Praktijkvoorbeeld 12
4. Referenties 16

Bijlagen

A Overzicht uit de praktijk
B Nadere toelichting methodes faalkansschatting en faalpaden

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

1.1 Algemeen

Het Adviesteam Dijkontwerp analyseert regelmatig de adviezen die het aan projecten geeft rondom het toepassen van de 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 twaalfde Rode draden-rapportage van het Adviesteam. In dit memo wordt ingegaan op de achtergrond en ervaringen met het toepassen van faalpaden bij veiligheidsbeschouwingen.

Reacties en feedback op deze twaalfde 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

1.2 Aanleiding voor deze Rode draad

Aanleiding voor deze twaalfde Rode draad zijn signalen uit de praktijk over de (on)mogelijkheden van het werken met faalpaden bij veiligheidsbeschouwingen, wat voor veel dijkwerkers relatief nieuw voelt. Een veel gehoord knelpunt is dat bij het werken met deze methode veel onduidelijk is en dat nader onderzoek nog nodig is. Met dit memo wil het Adviesteam laten zien dat faalpaden al breed worden toegepast in de praktijk en deze ervaringen delen.

Door het Kennisplatform Risicobenadering (KPR) en het Adviesteam Dijkontwerp is al eerder aandacht geschonken aan dit onderwerp ([1] en [2]). Ook is meer informatie over het werken met faalpaden te vinden in de BOI Handleiding overstromingskansanalyse – Algemeen [6] en in diverse publicaties van het programma Kennis voor Keringen, zie kader op de volgende pagina.

1.3 Leeswijzer

Deze Rode draad is als volgt opgebouwd. Hoofdstuk 2 bevat een korte schets van de context, ervaringen van het Adviesteam, aandachtspunten en tips bij het werken met faalpaden. Hoofdstuk 3 bevat een praktijkvoorbeeld. Bij de totstandkoming van deze Rode draad is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van verwijzingen naar projecten en bestaande referenties. Hiervoor is in hoofdstuk 4 een referentielijst opgenomen. Ter inspiratie is als bijlage A een lijst met projecten ingevoegd waarin gebruik is gemaakt van een werkwijze waarin faalpaden centraal staan. Voor meer informatie hierover wordt verwezen naar deze projecten. Bijlage B bevat een nadere toelichting op enkele toegepaste methodes voor het schatten van faalkansen in relatie tot faalpaden.

Onderzoek naar faalpaden in het programma Kennis voor Keringen

In het programma Kennis voor Keringen wordt kennis ontwikkeld gericht op het verkrijgen van een realistische overstromingskans. Faalpaden spelen hierbij een belangrijke rol. Binnen Kennis voor Keringen wordt daarom onderzoek gedaan naar het werken met faalpaden. Dit onderzoek is er onder andere op gericht om kennis te ontwikkelen ten behoeve van de identificatie van de relevante mechanismen vanuit het “verhaal van de kering”. Hierbij worden de bepalende factoren in beeld gebracht voor het al dan niet optreden van het betreffende mechanisme.

Daarnaast worden casussen/voorbeelden uitgewerkt waarbij een aanpak “van grof naar fijn” wordt uitgewerkt. Bij deze uitwerkingen staat de vraag “hoe fijn moet het zijn?” centraal. Voorbeelden van studies uitgevoerd door Kennis voor Keringen zijn:

- Drieluik “Werken met faalpaden”: een serie van drie studies waarbij een toelichting wordt gegeven op (i) de overstap naar de overstromingskans, (ii) het in rekening brengen van afhankelijkheden en correlaties en (iii) knopenkaarten om te helpen bij een eerste selectie van relevante mechanismen.
- Raamwerk tijdsafhankelijkheid: een studie waarbij voor relevante combinaties van watersystemen en archetypen in Nederland in beeld is gebracht wanneer het noodzakelijk is om tijdafhankelijke aspecten in sterkte en belastingen mee te nemen en wanneer niet.
- Raamwerk stabiliteitsverlies en dijkerosie: een studie waarbij beredeneerd vanuit de fysica (en niet de “oude” beoordelingssporen) in beeld is gebracht welke mechanismen waarschijnlijk zijn en wat daarbij de bepalende factoren zijn.

Uitgevoerde casestudies laten zien dat een faalpad-analyse van “grof naar fijn” vaak heel goed mogelijk is op basis van bestaande kennis en instrumenten en dat een heel gedetailleerde analyse lang niet altijd noodzakelijk is.

***Referenties**:*

11206817-005-GEO-0002_v1.0-Werken met faalpaden - Deel 1
11206817-005-GEO-0001_v1.0-Werken met faalpaden - Deel 2
11206817-006-GEO-0001_v1.0-Werken met faalpaden - Deel 3
KvK-Invloed van tijdsafhankelijkheid op het optreden van initiële-mechanismen
KvK-Raamwerk analyse overstromingskans bij dijken. Geotechnische stabiliteit & dijkerosie

Alle publicaties zijn te vinden op https://open.rijkswaterstaat.nl.

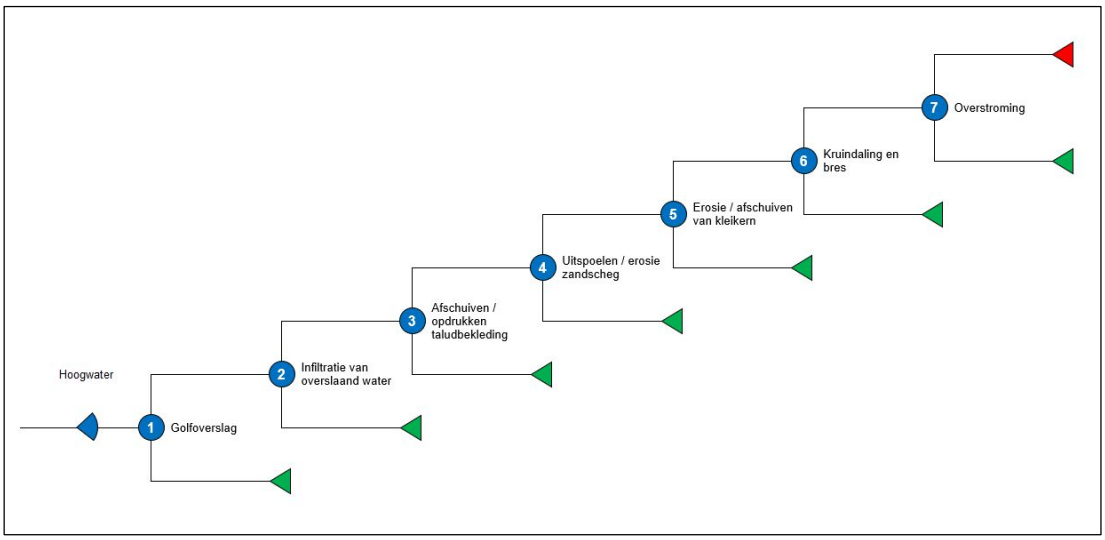
2. Het werken met faalpaden

2.1 Context

Bij het beoordelen of ontwerpen van waterkeringen staat het vaststellen van de kans op een overstroming centraal. Bij het bepalen van de kans op een overstroming is het expliciet maken van faalpaden behulpzaam. Faalpaden bestaan uit een serie opeenvolgende gebeurtenissen die op moeten treden voordat een overstroming het geval is. Een faalpad is daarmee één van de mogelijke ketens van gebeurtenissen die tot falen leidt. Het fysische faalproces en daarmee het denken in termen van gebeurtenissen die tot falen leiden was ook de basis van de leidraden ten tijde van de overschrijdingskansbenadering, zoals opgenomen in bijvoorbeeld [3]. Dit rapport is ook gebruikt voor het beschrijven van de faalmechanismen in het kader van de overstromingskansbenadering [4].

Het is niet altijd nodig om een faalpad te ontwikkelen en de kans op een vervolggebeurtenis te kwantificeren. In de praktijk volstaat in negen van tien gevallen een analyse van het initiële mechanisme. Voor een aantal veelvoorkomende situaties zijn al voorbeelden van standaard faalpaden beschikbaar. Desondanks is het opstellen van faalpaden voor specifieke situatie (bijvoorbeeld sterk afwijkende dijkgeometrieën en/of situatie met constructieve elementen in combinatie met een dijkopbouw) vaak maatwerk. In bijlage A is een overzicht gegeven van enkele projecten uit de adviespraktijk van het Adviesteam waar het verder uitwerken van faalpaden behulpzaam was is in het project.

In deze Rode draad staat het werken met een faalpad centraal. Daarnaast is ook het gebruik van foutenbomen een mogelijkheid. Dit wordt niet nader behandeld in deze Rode draad. Een nadere uiteenzetting van het gebruik van foutenbomen en faalpaden is bijvoorbeeld weergegeven in [11]. Door bijvoorbeeld het Army Corps of Engineers zijn voorbeelden en tools beschikbaar gesteld voor het werken met faalpaden, zie https://www.rmc.usace.army.mil/Software/RMC-Toolboxes/Risk-Calculations-Suite/. In programma Kennis voor Keringen wordt kennis ontwikkeld met betrekking tot het gebruik van faalpaden, zie ook het kader in het vorige hoofdstuk. Ter illustratie is in figuur 1 een voorbeeld van een faalpad weergeven, welke in hoofdstuk 3 verder is uitgewerkt.



Figuur 1 Voorbeeld faalpad initieel mechanisme opdrukken/afschuiven bekleding binnentalud

2.2 Ervaringen Adviesteam

Projecten zijn terughoudend bij toepassing in de praktijk
Het Adviesteam merkt bij verschillende projecten dat er een zekere terughoudendheid bestaat bij het toepassen van faalpaden in beoordelingen en het ontwerp.

Het belangrijkste bezwaar dat hierbij wordt aangedragen is dat er op dit moment niet voor alle gebeurtenissen in het faalpad voldoende nauwkeurige (reken)modellen beschikbaar zijn om de (conditionele) kans[1] op optreden van deze gebeurtenis te kunnen bepalen. Als dus met faalpaden een rekenkundig onderbouwde (precieze) kans moet worden bepaald, is dat veelal niet mogelijk.

Het Adviesteam deelt deze zorg. Maar dat is, in de ogen van het Adviesteam, geen reden om niet te werken met faalpaden. Feitelijk komt dit neer op het a priori aannemen dat de kans op vervolgmechanismen 1 is in faalkansschattingen. Dit kan leiden tot een onnodige opgave (of onrealistische faalkans) en/of een te zwaar ontwerp. Om tot een betere faalkansschatting te komen is het doorgaans ook niet nodig alle gebeurtenissen in het faalpad te kwantificeren; hier wordt in paragraaf 2.4 nader op ingegaan.

Faalpaden kunnen zeer behulpzaam zijn
De ervaring van het Adviesteam is dat het werken met faalpaden zeer behulpzaam kan zijn bij verschillende vraagstukken in de waterveiligheid:

- Bij het beoordelen (LBO2) helpt deze aanpak om te focussen op die locaties en (volgorde van) gebeurtenissen, die bepalend zijn voor waterveiligheid en daarmee de overstromingskans. Daarbij kan het helpen om op basis van kwalitatieve argumenten te onderbouwen dat een bepaalde situatie in (voldoende) mate aan de vereiste veiligheid voldoet en dus niet kwantitatief hoeft te worden beschouwd. Het werken met faalpaden kan helpen in het bewust selecteren en toepassen van geschikte tools om knopen in een faalpad uit te werken.

- Ook bij het maken van ontwerpkeuzes kan het denken in faalpaden zeer behulpzaam zijn. Deze keuzes kunnen gericht zijn op het elimineren van, of het voldoende klein maken van de kans op, één of meerdere van de gebeurtenissen uit de foutenboom/gebeurtenissenboom, waardoor de kans op overstroming voldoende klein wordt.

Omgang met faalpaden in projecten
Uit de adviesvragen die aan het Adviesteam zijn gesteld, kan worden opgemaakt dat er zeer wisselend met het gebruik van faalpaden wordt omgegaan. Het ene project focust zich alleen op het initiële mechanisme, terwijl andere projecten al stappen zetten in het gebruik van vervolggebeurtenissen na het optreden van het initiële mechanisme voor één of meerdere faalmechanismen en daarmee al (een deel van) de aanpak met faalpaden benutten.

[1] De opeenvolgende (vervolg)gebeurtenis zijn onderling afhankelijk van elkaar. Dit betekent dat de kansschatting een voorwaardelijke of conditionele kansschatting betreft: de kans op gebeurtenis x gegeven het optreden van de voorgaande gebeurtenissen.

In het merendeel van de projecten waarin uiteindelijk een faalpadanalyse is uitgevoerd, is daarvoor eerst een analyse voor het initiële mechanisme/gebeurtenis uitgevoerd. Nadat uit deze analyse een veel grotere faalkans / lagere veiligheidsfactor werd gevonden dan op voorhand werd verwacht, is naar vervolggebeurtenissen gekeken om een realistischer overstromingskans te bepalen.

Verder ziet het Adviesteam dat er in projecten nog wel eens gebruik gemaakt wordt van verouderde inzichten, die gedurende de veiligheidstoetsing volgens de overschrijdingskansbenadering in zwang waren en die bijvoorbeeld opgenomen zijn in het Technisch Rapport Actuele Sterkte [8]. Enkele van deze inzichten, bijvoorbeeld het gebruik van een restprofiel bij afschuiving, zijn in basis ook in een faalpadanalyse bruikbaar. Het is namelijk ook mogelijk om aan een restprofiel een voorwaardelijke kans toe te kennen, omdat het falen van het restprofiel ook niet zeker is.

De ervaring van het Adviesteam is dat faalpaden momenteel al veel gebruikt worden voor bepaalde situaties, wellicht zonder dat men zich daarvan altijd bewust is. Voorbeelden hiervan zijn:

- In de veiligheidsbeoordeling van waterkerende kunstwerken wordt al jarenlang gewerkt met foutenbomen waarin de gebeurtenissen die leiden tot overstroming systematisch worden afgelopen (zie de foutenbomen in de Handleiding overstromingskansanalyse – Kunstwerken [7] welke in basis zijn overgenomen uit de schematiseringshandleidingen LBO-1 en de handleidingen VNK2).

- In de beoordeling van indirecte mechanismen, zoals buitenwaartse macrostabiliteit (STBU), wordt vrijwel altijd al gekeken naar de kans op overstroming binnen de hersteltijd van de schade door het indirect mechanisme. In [5] is een illustratief voorbeeld hiervan opgenomen.

- In pipinganalyses (STPH) wordt al standaard gekeken naar de opeenvolging van opbarsten, heave en terugschrijdende erosie. Steeds vaker worden ook andere gebeurtenissen in het faalpad in ogenschouw genomen (veelal kwalitatief, voor duiding en comfort).

- Ook voor directe mechanismen, zoals dijkerosie buitentalud, dijkerosie kruin en binnentalud en geotechnische instabiliteit worden steeds vaker vervolggebeurtenissen in de beschouwing betrokken (zie ook KPR-factsheets en Adviesteam Rode draden). Ook een ‘op maat gemaakte' restprofiel benadering (à la TRAS [8]) is in projecten al eens afgeleid en gebruikt in de nadere veiligheidsanalyse.

- Beoordeling van niet waterkerende objecten (NWO’s) in waterkeringen, o.a. binnen POV K&L, en generieke aanpak bij waterschap Rivierenland.

- Omgang met dierlijke graverij in waterkeringen (STOWA / WSRL / Aa en Maas).

Op basis van al deze ervaringen heeft het Adviesteam in de volgende paragraaf een aantal aandachtspunten en tips voor het werken met faalpaden opgenomen.

2.3 Aandachtspunten – wat moet echt

Bij het opstellen van faalpaden geldt een aantal aandachtspunten zodat de overstromingskans correct kan worden bepaald. Zie bijvoorbeeld [5] en [6]. Het is belangrijk hierop te letten, omdat het Adviesteam vaak gebeurtenissenbomen ziet waarin van deze basisregels wordt afgeweken. De belangrijkste zijn:

- De volgorde van de gebeurtenissen volgt uit een beschrijving van het faalproces. Het faalpad is daarmee een bondige en systematische weergave van de stappen in het faalproces.

- Het startpunt is veelal een belasting en heeft een kans per jaar als eenheid (bijvoorbeeld de jaarlijkse kans op een waterstand binnen een specifiek interval). Daarna volgen de vervolggebeurtenissen (bijvoorbeeld een eerste afschuiving, gegeven een belasting). De kans op een vervolggebeurtenis is steeds voorwaardelijk (conditioneel) op de vorige gebeurtenissen en deze voorwaardelijke kansen hebben daardoor geen eenheid. Let er dus op dat niet per ongeluk jaarkansen met elkaar worden vermenigvuldigd. Die fout wordt in de praktijk vaak gemaakt.

- De takken in een gebeurtenissenboom mogen niet tegelijk kunnen optreden (disjunct) en moeten alomvattend zijn (mutually exclusive, collectively exhaustive). Dit betekent dat de kansen per knoop altijd tot 1 (100%) optellen, de takken van de gebeurtenissenboom elkaar niet kruisen en takken nooit teruggaan naar een eerder punt in de gebeurtenissenboom. Het voorgaande betekent ook dat de kansen van de eindpunten van een gebeurtenissenboom waarbij sprake is van overstroming kunnen worden gesommeerd. Het resultaat is de kans dat het betreffende initiële mechanisme (op enigerlei wijze) leidt tot overstroming.

- Let erop dat *de overschrijdingskans van* een bepaalde waterstand niet hetzelfde is als *de kans op* deze waterstand. In de praktijk wordt deze vergissing dikwijls gemaakt, zie paragraaf 2.4.

- Bij de uitwerking van de faalpaden kunnen lengte-effecten een rol spelen. Vaak wordt vanuit een ‘doorsnede’ (= minimaal grondvolume dat zou kunnen falen) een faalpad opgezet maar is de overstromingskans van een specifiek dijkvak benodigd. Om de faalkans van een dijkvak te bepalen, wordt het volgende aangeraden;
  1. Bepaal de kans op het initiële mechanisme voor de beschouwde doorsnede.
  2. Bepaal de kans dat er op die locatie vervolgens een overstroming optreedt door het volledige faalpad te beschouwen. Blijf dus kijken naar wat er zou gebeuren als het initiële mechanisme zou optreden in de beschouwde doorsnede.
  3. Bepaal voor welk deel van het dijkvak een soortgelijke faalkansschatting passend is vanwege gelijkenissen tussen doorsneden. Verschaal dan het berekeningsresultaat uit stap 2 naar een faalkans voor de betreffende lengte, uitgaande van het lengte-effect van het initiële mechanisme (bijvoorbeeld 50 m zoals voor STBI de gangbare ‘b-waarde’).
  4. Bepaal vervolgens of de faalkans voor de rest van het dijkvak genegeerd kan worden (omdat de beschouwde strekking veel minder betrouwbaar is dan de rest van het vak) of dat hier eigenlijk nog een aanvullende analyse nodig is (conform de stappen 1 t/m 3).

2.4 Tips bij toepassing van faalpaden

Bij het opstellen van faalpaden en kwantificeren van kansen is een aantal tips geformuleerd om het werken met faalpaden te vergemakkelijken. Zie bijvoorbeeld [5] en [6], de belangrijkste hieruit zijn:

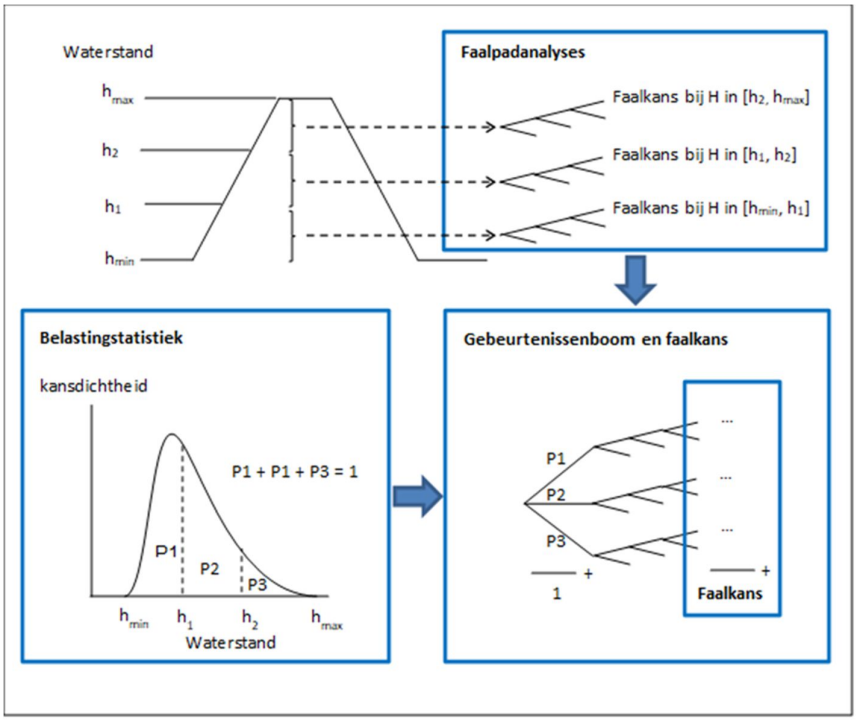
- Een vervolggebeurtenis kan verschillende deelprocessen ('smaller' gedefinieerde gebeurtenissen) omvatten. Het ontrafelen van gebeurtenissen kan behulpzaam zijn voor het begrip, of voor het maken van kansinschattingen. Het uitwerken van de submechanismen opbarsten, heave en terugschrijdende erosie bij het faalmechanisme piping in de bestaande leidraden is hier een mooi voorbeeld van. Hierbij is het van belang dat van iedere vervolggebeurtenis de conditionele kans redelijkerwijs kan worden ingeschat. Als dat niet het geval is, wordt aanbevolen om meerdere vervolggebeurtenissen (of deelprocessen binnen een gebeurtenis) met één gecombineerde kans te schatten.

- Richt de aandacht op de belangrijkste gebeurtenis(sen). Een veelgehoord misverstand is dat alle gebeurtenissen expliciet moeten worden geschematiseerd en gemodelleerd. Dit is echter lang niet altijd nodig; met gezond verstand kunnen gebeurtenissen op een rij worden gezet waarna de belangrijkste gebeurtenis kan worden aangewezen. Hierbij ligt het wel voor de hand om reeds bestaande inzichten en ervaringen ten aanzien van de kans op de initiële gebeurtenis wel te gebruiken, zoals bijvoorbeeld het optreden van een geotechnische instabiliteit van het binnentalud. Het gaat dus in eerste instantie om de redeneerlijn (gebeurtenissenboom of faalpad), waar nodig ondersteund met analyses en/of berekeningen.

- In algemene zin wordt aangeraden het niet moeilijker te maken dan nodig is voor respectievelijk scherp beoordelen of robuust ontwerpen. Hierbij helpt het om:
    - De complexiteit van een faalpad af te stemmen op het detailniveau van de informatie die voor besluitvorming benodigd is. Als op grond van een grove beoordeling direct duidelijk is dat met een combinatie van een beperkt aantal gebeurtenissen en kansen de overstromingskans verwaarloosbaar klein is, dan is het bepalen van een precieze conditionele kans of bijvoorbeeld middels een complexe probabilistische berekening, onnodig. Vaak is dan de beslisvraag al beantwoord.
    - Alleen die gebeurtenissen te onderscheiden die zinvol zijn, en alleen een nadere bepaling van voorwaardelijke kansen uit te voeren als dit relevant is voor het oordeel (veronderstel anders gewoon een waarde van 1 (100%) of 0 (0%) wat inhoudt dat de gebeurtenis 'zeker zal optreden' respectievelijk 'zeer zeker niet zal optreden'.

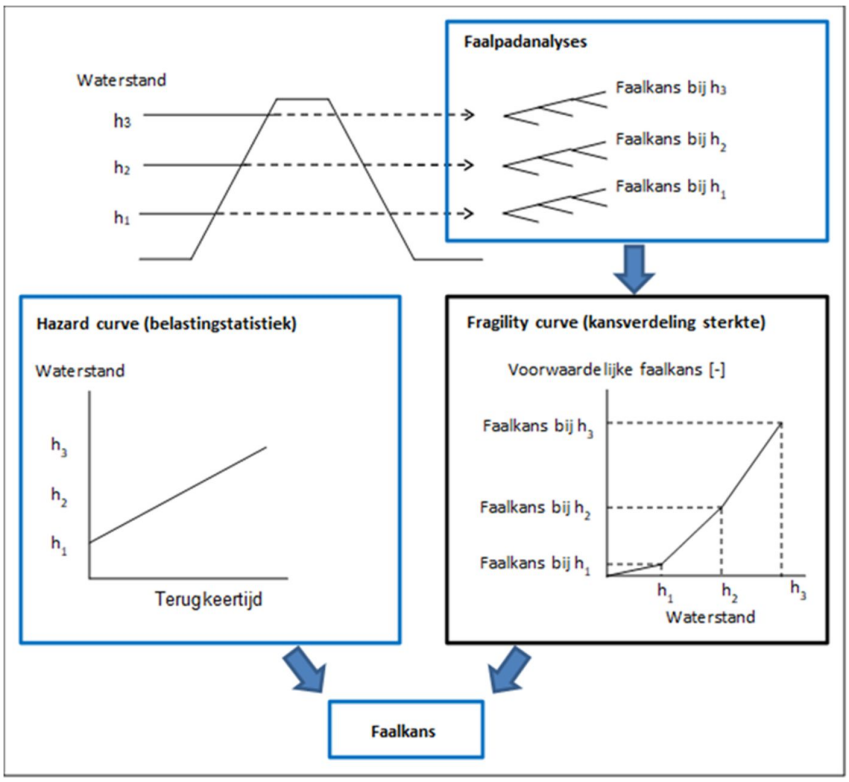
- Met behulp van faalpaden kan op verschillende manieren een faalkans worden berekend. Vaak is er een relatie tussen voorwaardelijke kansen en het belastingniveau, zoals een rivierwaterstand of overslagdebiet. Dan kan het behulpzaam zijn om verschillende faalpaden / gebeurtenissen-bomen op te stellen voor de verschillende belastingniveaus. Voor de faalkansberekening zien we in de praktijk twee mogelijkheden gebruikt worden: een vrij grove methode op basis van geschatte faalkansen voor belastingsintervallen (methode 1) en een methode op basis van geschatte faalkansen voor specifieke belastingniveaus (fragility points = methode 2).
    - Bij de eerste methode wordt de fragility curve bepaald op basis van intervallen in de belasting. Vervolgens wordt per interval de (voorwaardelijke) kans op falen bepaald voor het geval de waterstand binnen het interval ligt. De kans dat de belastingparameter

binnen het interval valt, kan bepaald worden uit de kansverdeling van de belasting. Vervolgens wordt de faalkans bepaald (geïntegreerd) door sommatie van het product van de kans op de belasting binnen de intervallen en de faalkans gegeven deze intervallen. Feitelijk wordt hierbij met een getrapte fragility curve gewerkt. Dit levert veelal een vrij grove benadering van de faalkans op. Door het interval te verkleinen en het aantal faalkansbepalingen te vergroten kan dit worden verbeterd, waarbij in de limiet hetzelfde resultaat als met de tweede methode kan worden verkregen. De methode is schematisch weergegeven in Figuur 2 en getalsmatig verder uitgewerkt in bijlage B.



Figuur 2 Ontwikkeling faalpaden met intervallen

- Bij de tweede methode worden de faalpadanalyses uitgevoerd voor specifieke belastingniveaus. Per belastingniveau wordt de (voorwaardelijke) faalkans bepaald (een zogenaamd fragility point). Door dit te verfijnen ontstaat een beeld van de relatie tussen het belastingniveau en de (voorwaardelijke) faalkans, weergegeven als een betrouwbaarheidsindex. Tussen de punten wordt dan vaak lineair geïnterpoleerd waardoor een fragility curve ontstaat. Door de geïnterpoleerde fragility curve te combineren met de kansdichtheidsfunctie van de belasting, kan door uitintegratie de kans op falen worden verkregen. De tweede methode is schematisch weergegeven in figuur 3 en is getalsmatig verder uitgewerkt in bijlage B.



Figuur 3 Faalkansberekening met interpolatie fragility punten

- Niet altijd is het nodig om een de faalkans voor een faalpad te kwantificeren. Een faalpadanalyse kan ook deels kwalitatief zijn. In tabel 1 is een voorbeeld gegeven van een opzet waarbij elkaar uitsluitende initiële gebeurtenissen zijn gedefinieerd, gevolgd door vervolggebeurtenissen. Aan de hand van een mix van te bepalen kansen en kwalitatieve kansinschattingen kan zo worden beoordeeld welke paden belangrijk zijn voor de overstromingskans.

Tabel 1 Voorbeeld kwalitatieve uitwerking faalpad

Overslagdebiet	P(overslag)	P(erosie toplaag | overslag)	P(erosie onderlaag | toplaag, overslag)	P(kruindaling | erosie onderlaag, toplaag, overslag)
[l/s/m]	[per jaar]	[-]	[-]	[-]
< 0,1	Te berekenen	Zeer klein	Zeer klein	Klein
1,0	Te berekenen	Klein	Klein	Groot
5,0	Te berekenen	Groot	Groot	Zeer groot
> 5,0	Te berekenen	Zeer groot	Zeer groot	Zeer groot

- De laatste tip is om niet te strikt vast te houden aan gebeurtenissenbomen als hulpmiddel om faalpaden te ordenen. Soms is een foutenboom handiger om de gebeurtenissen tot falen te ordenen. Ook in een foutenboom zijn namelijk faalpaden te herkennen. In paragraaf 3.3 van [6] wordt hier nader op ingegaan en in bijlage C van [7] is een voorbeeld opgenomen.

Tot slot: het samenspel van de sterkte van de dijk en de belastingen kan complex zijn. Dit kan tot gevolg hebben dat verschillende experts tot andere faalpaden komen. Aangeraden wordt om het opstellen van faalpaden in overleg te doen, zodat een gezamenlijk en gedragen beeld ontstaat en vooraf na te denken over het vereiste kwaliteitsniveau en kwaliteitsborging.

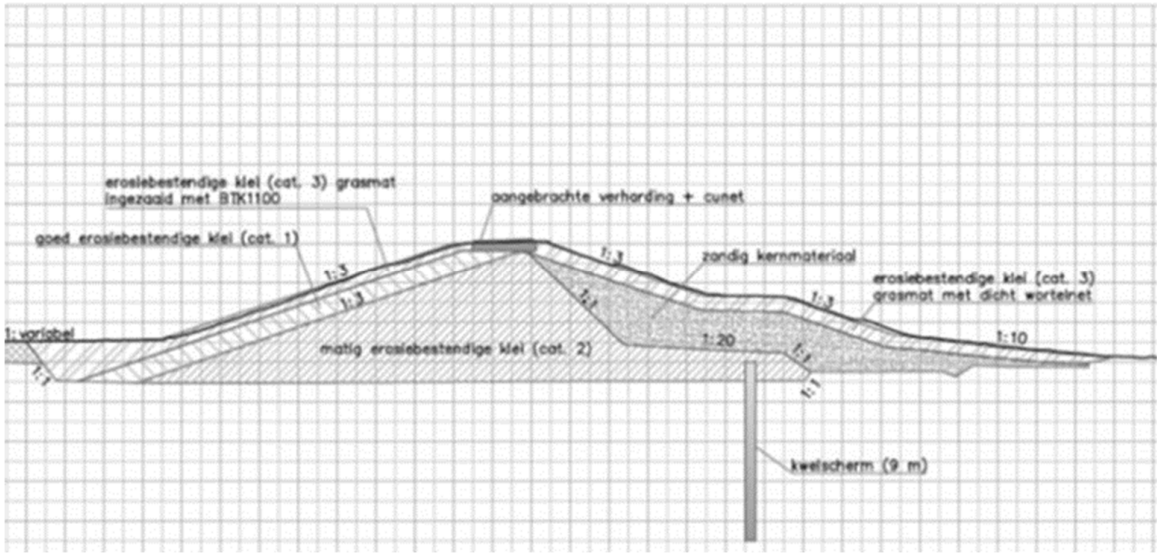
3. Praktijkvoorbeeld

Uit de adviesvragen die aan het Adviesteam zijn gesteld, kan worden opgemaakt dat er zeer wisselend met het gebruik van faalpaden wordt omgegaan. Het ene project focust zich alleen op het initiële mechanisme, terwijl andere projecten al faalpaden gebruiken om vervolggebeurtenissen mee te wegen. Voor voorbeelden van projecten waarin dit al gebeurt wordt verwezen naar bijlage A. Dit hoofdstuk haalt een van deze voorbeelden naar voren.

Het voorbeeld betreft de dijk langs Splitsingspunt Nederrijn-IJssel in de Hondbroeksche Pleij (48-1) waarvoor een deskundigen oordeel toets op maat (DOT) is uitgevoerd [9]. Dit voorbeeld is in 2022 toegelicht op de dijkwerkersdag [10].

Uit de beoordeling en voorverkenning is gebleken dat in de nabije toekomst een opgave voor het faalmechanisme micro instabiliteit (STMI) of grasafschuiving binnentalud (GABI) ontstaat. Welke van beide bepalend is in dit beeld werd in het destijds gehanteerde beoordelingsinstrument[2] bepaald door de grootte (0,1 l/s/m) van een significant overslagdebiet bij normcondities. Bij lage overslagdebieten werd dan STMI als bepalend beschouwd, bij hogere overslagdebieten GABI. Bij relatief lage overslagdebieten werd dan verondersteld dat de freatische lijn in de dijk opliep door enkel de indringing van water door de buitenzijde van de dijk.

Een representatieve doorsnede van de dijk is weergegeven in figuur 5. De dijk heeft een kleikern en is aan de binnenzijde voorzien van een zandscheg met kleibekleding. De verwachte mechanismen zullen zich naar verwachting manifesteren rondom de kleibekleding op de zandscheg. De dijk ligt op een deklaag van klei (niet weergegeven in de figuur).

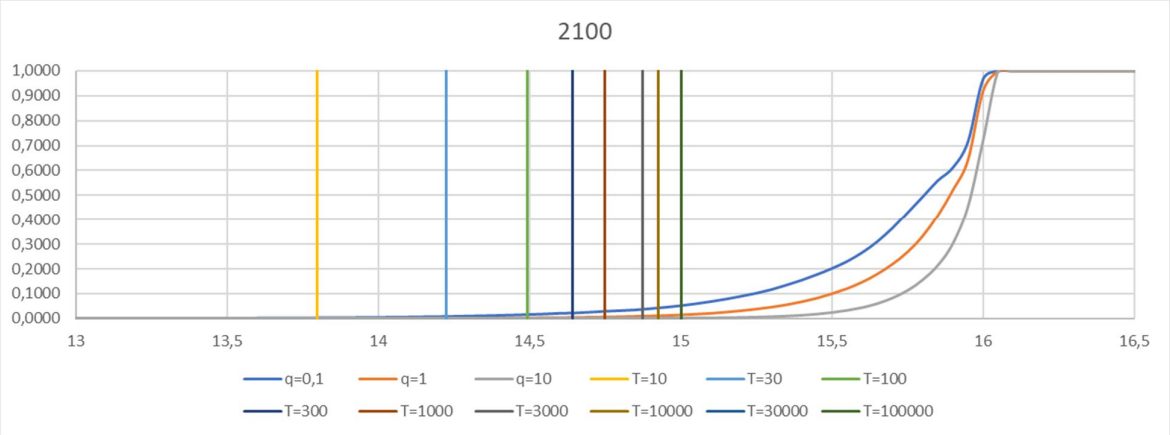


Figuur 4 Representatieve doorsnede dijk

[2] Opgemerkt wordt dat in het BOI instrumentarium hier inmiddels een andere invulling aan is gegeven. Dit maakt voor het voorbeeld niet uit; het veiligheidsbeeld uit schematisatie en modellering komt niet overeen met de verwachting

Opstellen gebeurtenissenboom

Omdat de waterstanden en het overslagdebiet bij aanvang bepalend zijn in het faalproces, is dit nader in beeld gebracht. In figuur 5 is de kans op een overslagdebiet van 0,1 / 1,0 en 10,0 l/s/m per buitenwaterstand bepaald met Hydra-NL (gekromde lijnen) weergegeven. Ook zijn hierin voor verschillende terugkeertijden de rivierwaterstanden (met verticale lijnen) weergegeven.



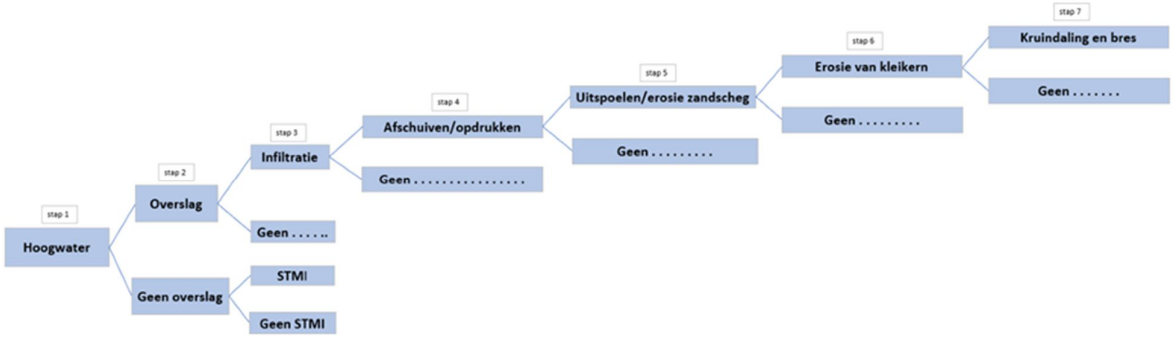
Figuur 5 Kans op overslag (voor q=0,1, 1 en 10 l/s/m) gegeven de waterstand (verticale as) voor verschillende buitenwaterstanden (horizontale as) voor zichtjaar 2100. De verticale lijnen geven de terugkeertijd van de waterstand op de horizontale as aan. Bijvoorbeeld: een waterstand van NAP+15 m heeft een terugkeertijd van 100.000 jaar en gegeven deze waterstand is de kans 0,05 [-] dat een overslagdebiet van 0,1 l/s/m wordt overschreden.

Vervolgens is de belasting en het faalproces nader beschreven en uitgewerkt in een aantal opeenvolgende vervolggebeurtenissen, die nodig zijn om tot een overstroming te komen:

1) Water stijgt op de rivier door hoge afvoeren
2) Golfoverslag treedt op a.g.v. storm (windgolven)[3]
3) Water infiltreert na overslag in bekleding binnentalud of stroomt af
4) Waterdruk zandscheg neemt toe totdat opdrukken/afschuiven v. deklaag optreedt
5) Uitspoelen en erosie van zandscheg bij blijvend overslagdebiet
6) Kleikern erodeert/vervormt/schuift af en ontstaat kruindaling
7) Kruindaling zorgt voor bres en daarmee overstroming

Dit is weergegeven in de gebeurtenissenboom / faalpad in figuur 6. Opgemerkt wordt dat dit faalpad overeenkomt (alleen andere weergave) met het in figuur 1 weergegeven faalpad.

[3] De kans op overloop is hierbij bij voorbaat als verwaarloosbaar klein beschouwd, zie ook Figuur 5



Figuur 6 Faalpad overstroming vanuit STMI en GABI

In Figuur 6 is goed te zien dat de mogelijkheden per stap de vorm hebben van wel/niet en elkaar dus uitsluiten. Verder hebben de mechanismen STMI (stap 3) en GABI (stap 4+5) een plek in dit proces. In een reguliere beoordeling wordt veelal alleen stap 3 en stap 4+5 beschouwd. De vervolggebeurtenissen zorgen voor een beter veiligheidsbeeld. Op basis van de hier aanwezige situatie wordt de kans op falen door STMI als verwaarloosbaar klein verondersteld. De kans op overslag is namelijk al zeer klein. Daarnaast bestaat een groot deel van het dijklichaam aan de buitenzijde uit een kleilichaam.

Opgemerkt wordt dat in het BOI faalpaden worden opgezet vanuit een initiële gebeurtenis en samen met vervolgmechanismen het faalmechanisme vormen. Omdat hier ook de belasting bij aanvang verder is gesplitst (waterstand en kans op overslag) is de gebeurtenissenboom wat breder. Dit maakt voor de werkwijze niet uit.

Kansinschattingen

Door de aanwezigheid van respectievelijk een kleikern en een slecht doorlatende deklaag is het in het geval van de Hondbroeksche Pleij niet aannemelijk dat water vanaf de buitenzijde of vanuit de zandige ondergrond de zandscheg binnendringt. Dit betekent dat het mechanisme microstabiliteit (STMI) ook niet aannemelijk is. De grootte van de overslag (als criterium) voor beide sporen is daardoor eigenlijk niet relevant (meer); de uitwerking van de gebeurtenissenboom kan zich dus toespitsen op het GABI proces. Indien met grote zekerheid voor één van de afzonderlijke stappen gesteld kan worden dat deze gebeurtenis niet kan optreden, dan kan eveneens gesteld worden dat GABI (het opdrukken/afschuiven van de bekleding en uitspoelen van het kernmateriaal) niet tot het falen van de gehele waterkering en dus tot een overstroming zal leiden. Op voorhand waren er echter verschillende onzekerheden in het proces tot falen aangemerkt (bijvoorbeeld de locatie van opdrukken/afschuiven van de bekledingslaag en de snelheid/grootte van het erosieproces). Daardoor was het op voorhand niet goed mogelijk om te stellen dat de kans op een overstroming als gevolg van het initiële mechanisme GABI verwaarloosbaar klein was. Daarom is breder gekeken en zijn alle stappen in het faalpad beschouwd. Door niet alleen voor de eerste stap, maar ook voor de daaropvolgende stappen voorwaardelijke kansen in te schatten (wat is de kans van optreden gegeven dat het voorgaande is opgetreden), is de kans van het gehele faalpad bepaald.

Voor iedere vervolggebeurtenis is vervolgens een overzicht gemaakt van de belastingcondities en toestand van de kering en een kwalitatieve onderbouwing van de (conditionele) kans. Hierbij zijn de

gebeurtenissen 1 en 2 samengevoegd en uitgewerkt in een aantal scenario's met een kans (per jaar) op een overslagdebiet. De gebeurtenissen 3 t/m 7 zijn conditioneel uitgewerkt. De overstromingskans is vervolgens berekend door de kansen te combineren (vermenigvuldigen) en over de scenario's te sommeren / integreren.

Hieruit volgde een (doorsnede) faalkans van orde grootte 1/100.000 per jaar. In de analyse is ook vooruit in de tijd gekeken. Voor zichtjaar 2100 (kruindaling van 20 cm, klimaatscenario W+) neemt de kans toe tot circa 1/34.000 per jaar. Dit wordt in z'n geheel veroorzaakt door de grotere kans op golfoverslag, omdat de vervolgmechanismen niet anders zijn ingeschat.

Reflectie
Dit voorbeeld laat zien dat aan de hand van een nadere beschrijving van een verwacht faalproces een inschatting van de overstromingskans te maken is, ook als niet alle gebeurtenissen modelmatig te kwantificeren zijn. Het voorbeeld laat tevens zien dat inzicht in de opbouw en samenstelling van de dijk en de optredende belastingen belangrijk zijn.

4. Referenties

[1] Rode draden nr. 3 – Werkwijze falen door macrostabiliteit, Adviesteam Dijkontwerp, versie 1, 3 juni 2021.

[2] Rode draden nr. 1, cumulatieve overbelastingbenadering GEKB en Faalpaden, Adviesteam Dijkontwerp, november 2019 t/m februari 2020, 02-04-2020

[3] Dijkdoorbraakprocessen. E.O.F. Calle, GeoDelft rapport kenmerk 720201/39. Delft, maart 2002

[4] Fenomenologische beschrijving, WBI 2017

[5] KPR Factsheet omgang met buitenwaartse macrostabiliteit, KPR, 2018.

[6] Handleiding Overstromingskansanalyse - Algemeen, Rijkswaterstaat, groene versie 2023, juli 2023

[7] Handleiding Overstromingskansanalyse – Kunstwerken, Rijkswaterstaat, groene versie 2023, juli 2023

[8] Technisch Rapport Actuele Sterkte (TRAS), ENW, 27 maart 2009

[9] Rapport voorverkenning Hondbroeksche Pleij- bekleding, 29 november 2021.

[10] Powerpoint presentatie dijkwerkersdag deel 2, Adviesteam Dijkontwerp, v2, 2022.

[11] Risk and uncertainty in dam safety, CEA Technologies Dam Safety Interest Group, Hartfort, D.N.D, Beacher, G.B., 2004

Bijlage A: Greep uit onze adviespraktijk

In onderstaande tabel is een greep uit de adviespraktijk van het Adviesteam opgenomen.

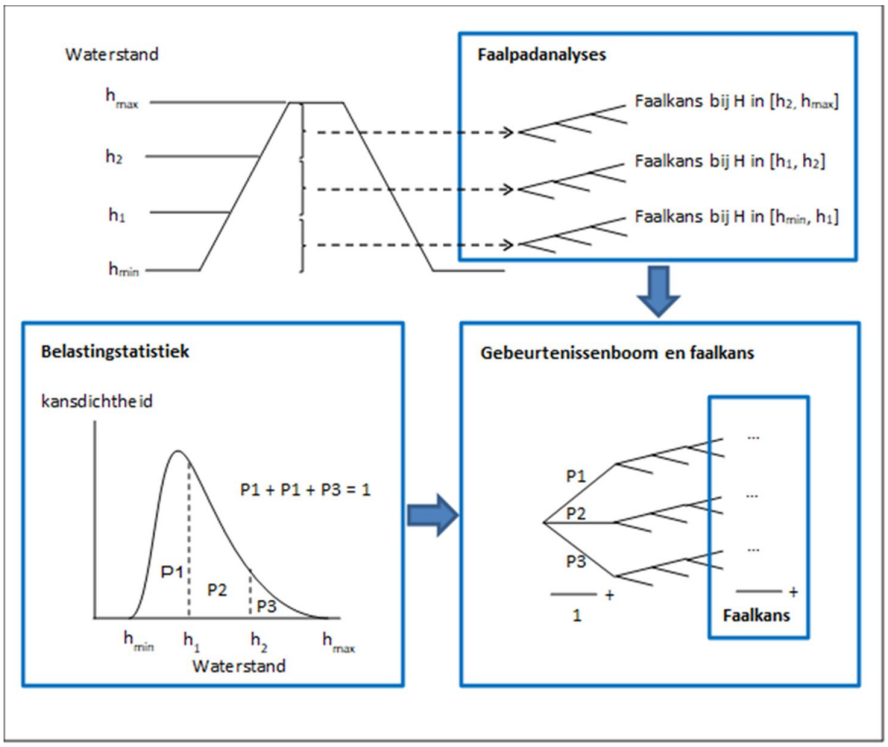
Beheerder	Faalmechanismen	Project(en)	Dijktraject	Jaar
WRIJ	GABI	Pannerdense waard - Westervoort (PanWes)	48-1	2021
HHNK	STBI - i.c.m. panden en overslag	Volendam	13-9	2023
HHNK	STBI	Durgerdam	13-9	2022 / 2023
HHNK	STBI	Monnickendam	13-9	2024
WSRL	STBI	Streefkerk - Fort Everdingen	16-3 en 16-4	2021
WSBD	STBI	Willemstad - Noordschans	34-2	2022 / 2023
WSAM	STBI	Cuijk – Ravenstein	36-2	2022
HDSR	GABI bij CUB/ICU en JAK	Sterke lekdijk	44-1 en 15-1	2023
WSVV	GEBU	Grebbedijk	45-1	2019
HDSR	GEKB	Sterke Lekdijk: Jaarsveld – Klaphek	15-1	2023
WDOD	STBU	Stadsdijken Zwolle	53-3	2019
WSRL	STBU	Wolferen - Sprok	43-4	2019
WSRL / WSAM	STBU	Meanderende Maas	36-3	niet bekend
WSRL	STBU	Streefkerk - Fort Everdingen	16-3 en 16-4	niet bekend
WSAM	NWO's	Meanderende Maas, omgang met bomen	36-3	2020
WSL	POV DGG	Meenemen sterkte kernmateriaal	algemeen	2021
WSZZ	Bekleding buitentalud	Teenconstructie	8-3	2021
HHNK	NWO's	Beoordeling NWO's	Gouwzee & Buiten IJ	2022
WSVV	STBK	Steenbekleding buitentalud	52-2	2023
HWBP	bekleding	Omgang met dierlijke graverij	algemeen	2023
WSL	Aanvaring kunstwerk	Ontwerp coupures	Algemeen	2024

Bijlage B: Nadere toelichting methodes faalkansschatting en faalpaden

Deze bijlage geeft een nadere uitwerking van twee vaak gebruikte methodes om de faalkans te bepalen. Voor de uitwerking is ook een fictief getalsmatig voorbeeld uitgewerkt. Het gehanteerde excelbestand is bij het Adviesteam Dijkontwerp opvraagbaar.

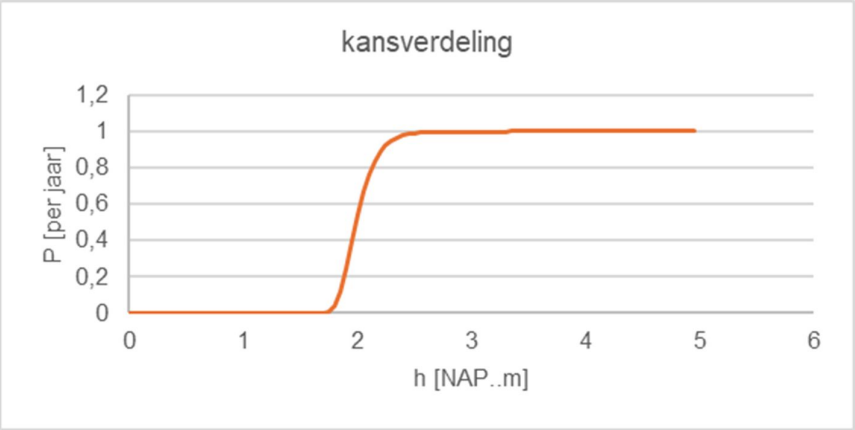
Methode intervallen (methode 1)

De stappen van deze methode zijn schematisch weergegeven in Figuur 7. De faalpaden zijn in deze methode per belastingsinterval uitgewerkt. Omdat de intervallen elkaar uitsluiten tellen de kansen op de verschillende faalpaden op tot 1. De faalpaden zijn dan ook met elkaar te verbinden in een enkele gebeurtenissenboom. De faalkans volgt uit de optelling van de kansen op de faalgebeurtenissen uit de gebeurtenissenboom.



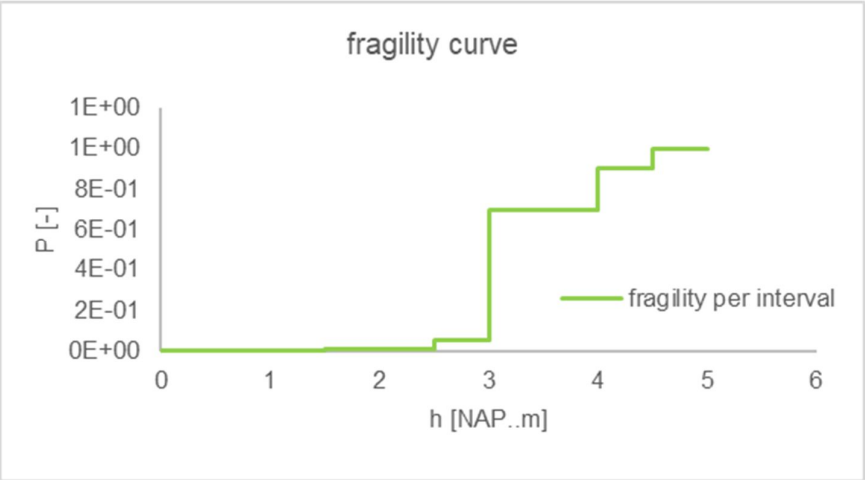
Figuur 7 Ontwikkeling faalpaden met belastingintervallen

Met deze methode is een voorbeeld uitgewerkt. De Gumbel(kans)verdeling van de waterstand is weergegeven in Figuur 8. Bij deze methode is vooral de kansverdeling relevant omdat de kans op een waterstand binnen het interval wordt bepaald uit het verschil tussen de overschrijdingskansen van de onder- en bovengrenzen van het interval.



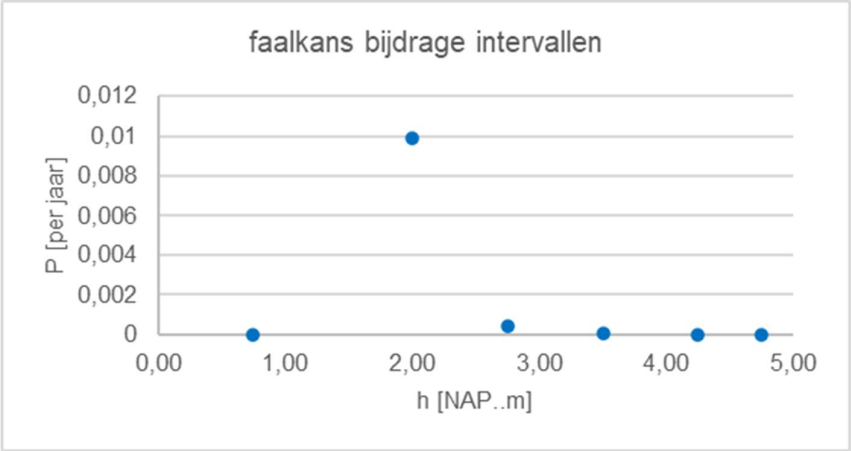
Figuur 8 Kansverdelingsfunctie (Gumbelverdeling met α = 1,94 en β = 0,12)

Vervolgens wordt voor het specifieke interval de voorwaardelijke kans op falen geschat. Deze kans wordt constant verondersteld binnen het interval. Feitelijk ontstaat daarmee een getrapte fragility curve, zoals weergegeven met de groene lijn in Figuur 9. Vaak wordt bij deze methode uitgegaan van de faalkans horend bij de belasting in het midden van het interval. In het kader van het voorbeeld van methode 2 is een gelineariseerde fragility curve aangenomen. De faalkansen in het midden van het interval zijn – omwille van het vergelijk - bepaald aan de hand van dezelfde relatie. In praktijk kan bijvoorbeeld een expliciete probabilistische som worden gebruikt om dit punt te bepalen.



Figuur 9 Getrapte fragility curve methode 1

De kans op een waterstand in een interval kan vervolgens worden vermenigvuldigd met de faalkans gegeven een waterstand binnen het interval. De totale faalkans wordt dan bepaald uit een sommatie van deze producten. In figuur 10 is de bijdrage per interval weergegeven.



Figuur 10 Weergave van de bijdrage aan faalkans per waterstand (h)

De totale faalkans komt voor dit fictieve voorbeeld op een kans van 5,3 x 10^{-3} per jaar. Een complicerende factor van het werken met intervallen is dat de faalkans binnen het interval significant kan oplopen. De breedte van het gekozen interval (ook wel bin genoemd) kan daarom van invloed zijn op de grootte van de totale faalkans. Het wordt dan ook aangeraden bij het toepassen van deze methode om de afhankelijkheid van de gekozen intervalgrootte te bepalen.

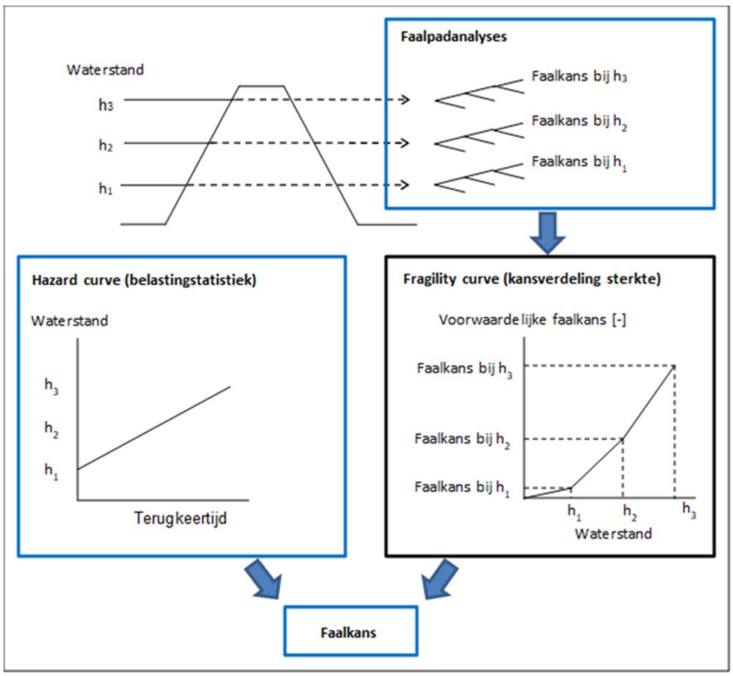
Uit de resultaten blijkt dat vooral het falen tussen de waterstanden NAP +1,5 m en NAP +2,5 m relevant is voor de totale faalkans.

Indien de voorwaardelijke kansen in de intervallen worden geschat aan de hand van de bovengrenzen van het betreffende interval (in plaats van het midden), neemt de voorwaardelijke faalkans toe van 5 x 10^{-3} naar 1 x 10^{-2}. De totale faalkans neemt dan extreem toe naar orde 1 x 10^{-2} per jaar. Dit is een teken dat het interval te groot is en verfijning wenselijk is.

Een ander aandachtspunt is te beoordelen of het meest linker en het meest rechter punt in figuur 10 een verwaarloosbare bijdrage hebben aan de faalkans. Op deze wijze wordt gecheckt of alle bijdragen in het bereik zijn meegenomen; de extreem lage en hoge waterstanden zullen namelijk niet van invloed zijn op de totale faalkans.

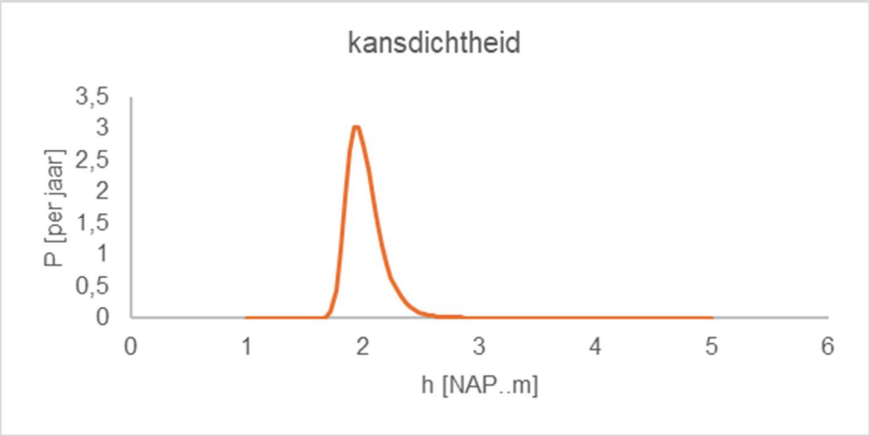
Methode belastingniveau (methode 2)

De stappen van deze methode zijn schematisch weergegeven in figuur 11. De faalpaden zijn bewust los weergegeven en niet verbonden tot een enkele gebeurtenissenboom. Het zijn namelijk faalpaden voor specifieke waterstanden – tussenliggende waterstanden zijn niet beschouwd. De faalpaden zijn dan ook niet allesomvattend ('collectively exhaustive'). Dit wordt afgedekt door een fragility curve te ontwikkelen door de punten (combinaties van waterstanden en kans op falen gegeven de waterstand). Binnen de afzonderlijke faalpaden sluiten de gebeurtenissen elkaar overigens wèl uit en zijn ze allesomvattend.



Figuur 11 Ontwikkeling faalpaden op basis van belastingniveau

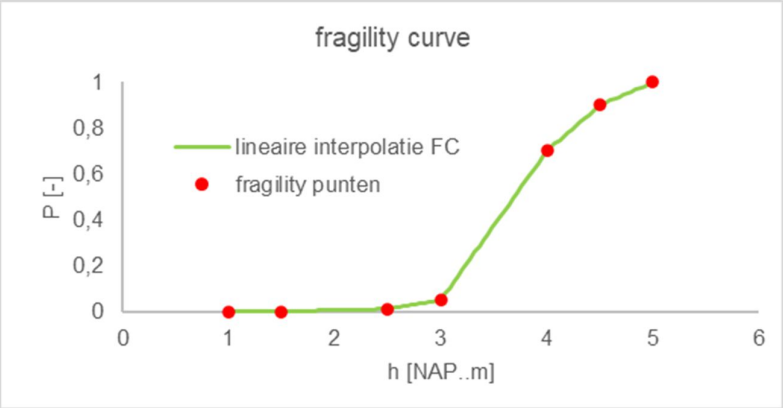
Ook hiervoor is een voorbeeld uitgewerkt. Hierbij is dezelfde (Gumbel)kansverdeling van de waterstand gebruikt als bij methode 1. Voor deze methode is de kansdichtheidsfunctie vooral relevant omdat deze wordt gebruikt bij de bepaling van de kans op falen gegeven een waterstand (uitintegratie). De kansdichtheidsfunctie is weergegeven in figuur 12.



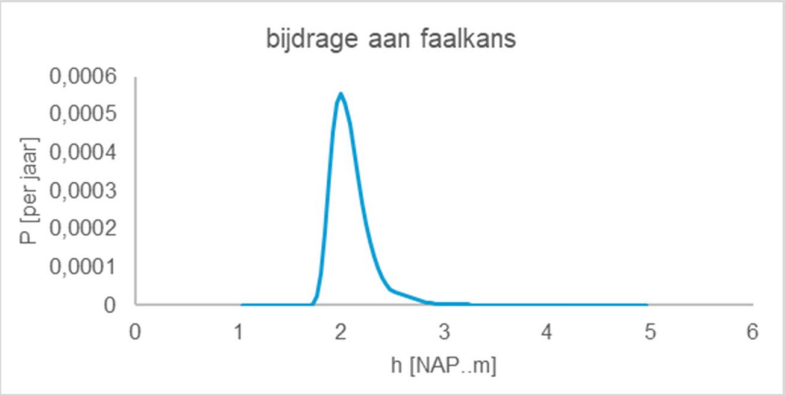
Figuur 12 Kansdichtheidsfunctie (Gumbelverdeling met α = 1,94 en β = 0,12)

Voor deze situatie is een aantal voorwaardelijke faalkansen geschat, gegeven een waterstand. In praktijk kunnen hier bijvoorbeeld probabilistische sommen voor worden gebruikt. Deze fragility punten zijn weergegeven in figuur 13. Middels een lineaire interpolatie is de fragility curve bepaald. In praktijk worden faalkansen ook vaak in de vorm van een betrouwbaarheidsindex β gepresenteerd. Dit geeft een andere vorm maar geeft principieel geen verschil.

Bij het lineariseren van de fragility curve wordt impliciet aangenomen dat het verloop continue is. Soms is de curve discontinu door bijvoorbeeld de invloed van opbarsten en/of overslag bij macrostabiliteit. Ook is het niet altijd zo dat een fragility curve binnen het onderzochte interval ook daadwerkelijk naar 1 convergeert. Bij macrostabiliteit komt het voor dat overloop optreedt terwijl de dijk blijft staan. Bij overschrijding van de kruinhoogte door de waterstand hoeft de faalkans dus niet gelijk aan 1 te zijn.



Figuur 13 Fragility punten, waarmee vervolgens een fragility curve is bepaald (in groen)



Figuur 14 Weergave van de bijdrage aan faalkans per waterstand (h)

De bijdrage van de belasting (h) aan de faalkans is weergegeven in figuur 14. Deze figuur laat het product van de kans op een waterstand en de kans op falen gegeven de waterstand zien. Deze bijdrage neemt af bij grotere waterstanden, omdat weliswaar de kans op falen gegeven die waterstand toeneemt, maar de kans op hogere waterstanden sterker afneemt. Per saldo leidt dit tot een kleinere bijdrage van de hogere waterstanden aan de faalkans. Bij lage waterstanden is de kans op de waterstand groot maar de kans op falen gegeven de waterstand weer relatief klein. Per saldo leidt dit tot een kleinere bijdrage van de lagere waterstanden aan de faalkans.

De waterstanden tussen circa NAP +1,5 m en +2 m dragen het meeste bij aan de totale faalkans. De totale faalkans is gelijk aan het oppervlak onder de kromme en komt voor dit fictieve voorbeeld op een kans van $5{,}2 \times 10^{-3}$ per jaar.

Deze methode heeft de voorkeur van het Adviesteam omdat het schatten van de voorwaardelijke faalkans sneller gaat en minder snel grote (onnodige) afwijkingen ontstaan.