

Van	Adviesteam Dijkontwerp
Door	Han Knoeff, Jan-Kees Bossenbroek, Ruben Jongejan, Cor Bisschop, Marieke de Visser
Betrokken	
Review	Adviesteam Dijkontwerp
Kopie aan	HWBP Kennis en Innovatie, Programma BOI, Programma Kennis voor Keringen, KKP en andere geïnteresseerden
Datum	3 juni 2021
Versie	1
Onderwerp	Adviesteam Dijkontwerp: Rode draden nr. 3 - Werkwijze falen door macrostabiliteit

1. Inleiding

Het Adviesteam Dijkontwerp analyseert regelmatig de adviezen die zij aan projecten geeft rondom het toepassen van de overstromingskansbenadering en nieuwe kennis. De Rode draden die hieruit volgen worden gerapporteerd en besproken met stakeholders. Ook onderwerpen die het Adviesteam van belang vindt om breed te delen, worden via een Rode draden rapportage uitgebracht. Het voorliggende memo is de derde Rode draden van het Adviesteam en gaat in op de werkwijze rondom falen door macrostabiliteit.

Sinds de wijziging van de Waterwet in januari 2017 moeten waterkeringen zodanig ontworpen worden dat de kans op een overstroming met substantiële schade en slachtoffers kleiner is dan de maximaal toelaatbare overstromingskans [1]. Voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts betekent dit dat een optredend glijvlak zoveel schade aan de dijk moet toe brengen dat dit, direct of indirect, leidt tot een overstroming. In deze Rode draden wordt een algemene werkwijze hiervoor gepresenteerd.

Deze memo vervangt de in 2018 door het KPR uitgebrachte factsheet 'Relevant glijvlak' [7]

Reacties en feedback op deze werkwijze zijn van harte welkom via info@adviesteamdijkontwerp.nl. Uiteraard zijn wij ook bereikbaar voor nadere toelichting.

1.1 Doel

Deze Rode draden biedt een werkwijze om een ontwerpverificatie uit te voeren voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts en de vervolgmecanismen die daarbij kunnen optreden. Deze methode sluit aan bij de overstromingskansbenadering. Met deze methode kan in het ontwerp (en beoordeling) – onderbouwd – rekening worden gehouden met de sterkte van de waterkering na een initiële afschuiving. De ervaring leert dat elk ontwerp zijn specifieke elementen heeft. Voor deze memo is daarom bewust gekozen om de methode op hoofdlijnen te beschrijven.

1.2 Relatie met andere documenten

Er zijn diverse oude leidraden, factsheets en technische rapporten beschikbaar, waarin methodes zijn beschreven om de zogenaamde 'reststerkte' in rekening te brengen [2] [3] [4]. Deze methodes zijn echter allemaal gebaseerd op de overschrijdingskansbenadering en ze passen niet zondermeer bij de

overstromingskansbenadering. Veel van deze documenten bevatten echter nog wel bruikbare onderdelen. In bijlage 1 is daarom een overzicht opgenomen van deze documenten.

1.3 Leeswijzer

Deze Rode draden is als volgt opgebouwd: Eerst is in hoofdstuk 2 het conceptuele kader geschetst waarbij faalgebeurtenissen centraal staan. Vervolgens is in hoofdstuk 3 ingegaan op de uit te voeren ontwerpverificaties. De beschreven stappen zijn met een voorbeeld ondersteund. In bijlage 1 is een overzicht van ‘oude’ rapporten over restbreedte gegeven.

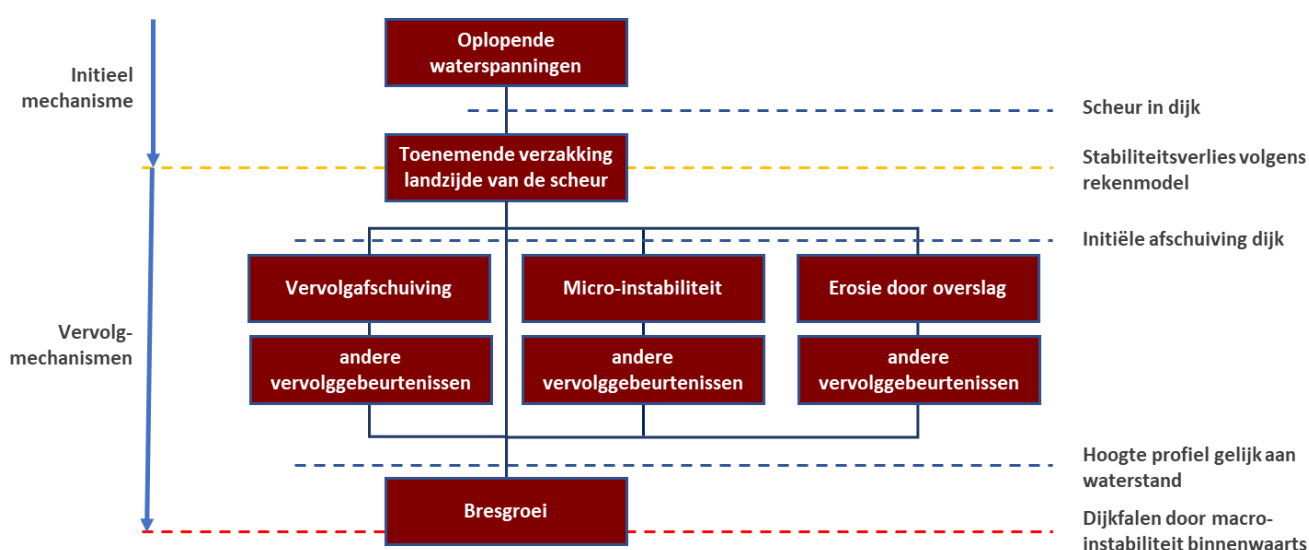
2. Faalgebeurtenissen

In dit hoofdstuk zijn de gebeurtenissen beschreven die kunnen leiden tot een overstroming. Hierbij is onderscheid gemaakt in de initiële gebeurtenis (een eerste afschuiving) en vervolgebeurtenissen.

2.1 Gebeurtenissen die leiden tot een overstroming

In de overstromingskansbenadering worden eisen gesteld aan de kans dat een binnenwaartse macro-instabiliteit (STBI) leidt tot een overstroming. Een overstroming kan plaatsvinden doordat bij een grote afschuiving direct water kan instromen. Bij kleine afschuivingen kan water pas instromen als na de initiële afschuiving andere mechanismen optreden, zoals erosie of vervolgafschuivingen.

In Figuur 1 is op hoofdlijnen weergegeven hoe het faalmechanisme macrostabiliteit kan leiden tot een overstroming. Na een initiële afschuiving kunnen vervolgemechanismen ervoor zorgen dat er een overstroming ontstaat. Relevante vervolgebeurtenissen zijn veelal vervolgafschuivingen, micro-instabiliteit en/of erosie door overloop of golfoverslag. Deze kunnen weer worden gevolgd door andere vervolgemechanismen. Welke gebeurtenissen uiteindelijk daadwerkelijk tot een overstroming kunnen leiden is sterk afhankelijk van de lokale situatie. Onder andere de grootte van het initiële glijvlak en de materialisatie van de waterkering zijn hiervoor sterk bepalend.



Figuur 1: Gebeurtenissen die leiden tot falen van de dijk na macro-instabiliteit (gebaseerd op figuur 2.7 in [8])

2.2 Initiële afschuiving

Een waterkering verliest direct haar waterkerend vermogen wanneer tijdens hoogwater een binnenwaartse afschuiving optreedt waarbij de kruin over de volledige breedte wordt verlaagd en water direct het achterliggende gebied instroomt. Als het water eenmaal over de waterkering stroomt kan de kruinverlaging uitgroeien tot een bres, die vervolgens tot een overstroming met substantiële schade en slachtoffers zal leiden.

Als de omvang van een initiële afschuiving beperkt is, blijft de waterkering grotendeels intact. Indien dit profiel de belastingen kan weerstaan, leidt de afschuiving niet direct tot een overstroming. Dit is bijvoorbeeld het geval bij waterkeringen met een relatief brede kruin en bij keringen waarbij het initiële glijvlak alleen door de berm gaat.

2.3 Vervolgmechanismen

Als de omvang van een initiële afschuiving beperkt is, zal de kering pas falen wanneer na een initiële afschuiving vervolgmechanismen optreden. De belangrijkste vervolgmechanismen zijn:

- Een vervolgschuiving van het grondlichaam;
- Micro-instabiliteit (bij een zandkern);
- Erosie van het dijklichaam door overloop en/of golfoverslag.

2.3.1 Overstroming door vervolgschuiving

Het profiel dat overblijft na een eerste (initiële) afschuiving kan falen door één of meerdere volgende (veelal kleinere) afschuivingen. Bij het intredepunt van de eerste afschuiving ontstaat een steil talud dat opnieuw langs een recht of een gebogen schuifvlak kan afschuiven. Pas als bij een tweede of derde afschuiving de kruin dusdanig wordt verlaagd dat water over de kruin kan stromen, zal het achterland onderlopen. Het stromende water zal het dijklichaam verder eroderen, waarna bresgroei optreedt.

Als het na afschuiving overgebleven deel van de kruin hoger is dan de buitenwaterstand kunnen onder bepaalde omstandigheden de vervolgmechanismen erosie door golfoverslag of micro-instabiliteit optreden.

2.3.2 Overstroming door micro-instabiliteit

Bij een zanddijk kan het profiel dat overblijft na een afschuiving verder falen door micro-instabiliteit. Bij het intredepunt van de eerste afschuiving is een steil talud ontstaan en komt een deel van de zandkern bloot te liggen. In het geval dat zich hier een hoge ligging van de freatische waterstand in het dijklichaam bevindt, kan als gevolg van uitstromend grondwater de zandkern eroderen. Bij dat proces zal steeds meer zand uitspoelen en zal de erosie van het profiel steeds verder voortschrijden totdat uiteindelijk de kruin van de waterkering wordt aangetast. Dit is een vrij langzaam proces (een aantal uren en geen minuten of seconden). Indien de ligging van de freatische lijn lager is dan de bovenkant van de afgeschoven grondmoot zal micro-instabiliteit niet kunnen optreden. Er is dan immers geen sprake van uittredend water.

Bij een profiel dat bestaat uit ondoorlatende materialen zal micro-instabiliteit niet optreden. Vanwege de relatief grote ondoorlatendheid van het dijk materiaal is er namelijk nauwelijks of geen sprake van uittredend water, waardoor micro-instabiliteit niet kan optreden.

2.3.3 Overstroming door erosie kruin/binnentalud overloop/overslag

Voor de situaties met significante overslag kan het profiel dat overblijft na een initiële afschuiving falen door erosie van het resterende deel van het binnentalud. Als gevolg van de initiële afschuiving ontstaat een bijna verticale klif die als gevolg van erosie door golfoverslag buitenwaarts kan verplaatsen over een bepaalde lengte. Dit fenomeen staat bekend als klif-erosie (headcut-erosie). Als deze erosie voldoende lang door kan gaan, zal dit uiteindelijk leiden tot een overstroming. Het optreden en het tempo van klif-erosie zijn sterk afhankelijk van het overslag-/overloopdebiet en de erosiebestendigheid van het dijksmateriaal.

3. Ontwerpverificatie

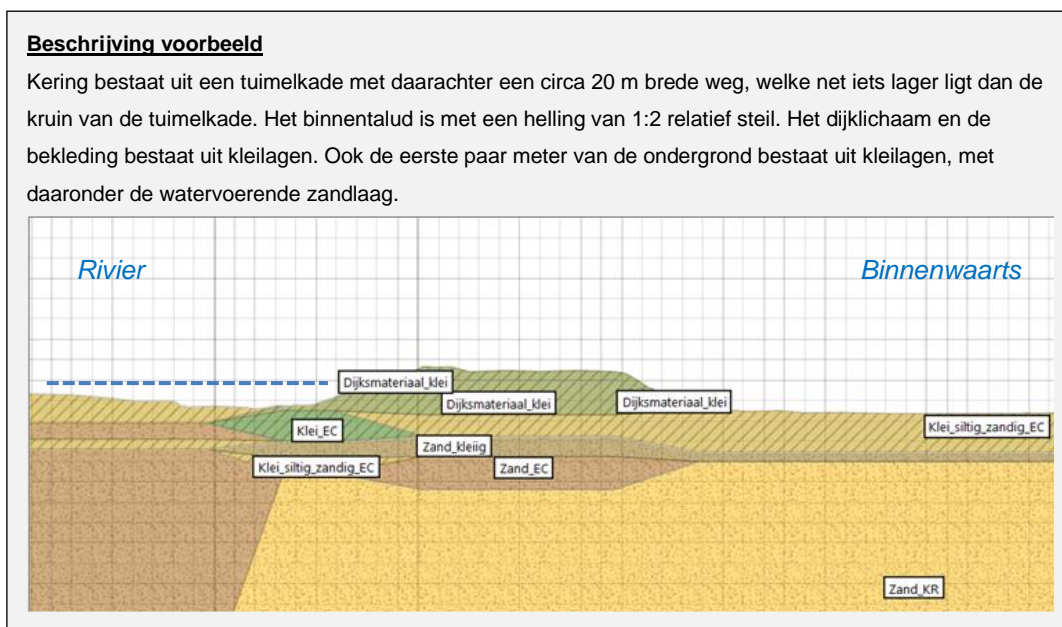
In dit hoofdstuk is een methode beschreven om een ontwerpverificatie uit te voeren voor het faalmechanisme macrostabiliteit en de vervolgmecanismen die daarbij kunnen optreden. Elke situatie is anders en heeft zijn specifieke kenmerken en aandachtspunten. Het is daarom belangrijk om gedurende het ontwerpproces te blijven beschouwen welke gebeurtenissen relevant zijn voor de specifieke situatie waarvoor het ontwerp wordt opgesteld. In de hieronder beschreven methode is daarom de eerste stap om de relevante gebeurtenissen te analyseren.

3.1 Methode ontwerpverificatie

De methode bestaat uit een aantal stappen. Generiek kunnen de volgende stappen voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts worden doorlopen.

0. Analyseer relevante gebeurtenissen;
1. Bepaal de initiële glijvlakken;
2. Bepaal afstand tot de norm;
3. Bepaal relevante faalpaden;
4. Kwantificeer kansen;
5. Check consistentie en uitlegbaarheid.

Afhankelijk van het resultaat bij stap 2 dienen alle stappen te worden doorlopen of kan na stap 2 worden gestopt. De ontwerpstappen zijn verder uitgewerkt in de volgende paragrafen. De stappen worden geïllustreerd met het voorbeeld uit Tekstbox 3.1.



Tekstbox 3.1: Beschrijving voorbeeld

3.2 Stap 0 - Analyseer relevante gebeurtenissen

Voordat begonnen wordt met uitgebreide berekeningen en analyses is het verstandig om eerst na te gaan welke gebeurtenissen in de specifieke ontwerpsituatie relevant zijn met betrekking tot macrostabiliteit. Soms is een erg onwaarschijnlijke gebeurtenis niet relevant omdat een andere gebeurtenis onder dezelfde omstandigheden veel waarschijnlijker is. De ervaring leert dat dit van geval tot geval verschilt. De eerste stap is daarom om te bepalen welke gebeurtenissen relevant zijn. Feitelijk betekent dit dat men bij stap 0 een snelle doorkijk moet maken naar stappen 1 t/m 5, zonder deze al volledig uit te werken.

Zo zal bij een zanddijk met deklaag van klei, of bij een kleidijk met een binnenwaarts gelegen zandscheg met een deklaag van klei, de stijging van de freatische lijn in de dijk niet hoger kunnen zijn dan de opdrukpotentiaal van de binnendijkse bekleding. Hierdoor is het wellicht aannemelijker dat opdrukken van de bekleding als initieel faalmechanisme op zal treden.

Stap 0 Voorbeeld

Vanwege het relatief steile binnentalud en dunne deklaag in het achterland, is de verwachting dat er initieel een oppervlakkig glijvlak zal ontstaan. Dit wordt ook ondersteund door de stabiliteitsanalyse, waarmee een zeer lage stabiliteitsfactor voor dit oppervlakkige glijvlak is bepaald. De kering is opgebouwd uit kleilagen, waardoor micro-instabiliteit geen relevant vervolgmecanisme is. Ook heeft de tuimelkade een zodanig kruinniveau dat de kans op erosie van het dijklichaam ruimschoots aan de eisen voor GEKB voldoet. Het faalpad voor deze situatie bestaat dan ook uit een initiële afschuiving gevolgd door een of meerdere vervolgfascuivingen. Deze kunnen zich als cirkelvormige of als rechte glijvlakken ontwikkelen.

Tekstbox 3.2 Voorbeeld Stap 0

3.3 Stap 1 - Bepaal de initiële glijvlakken

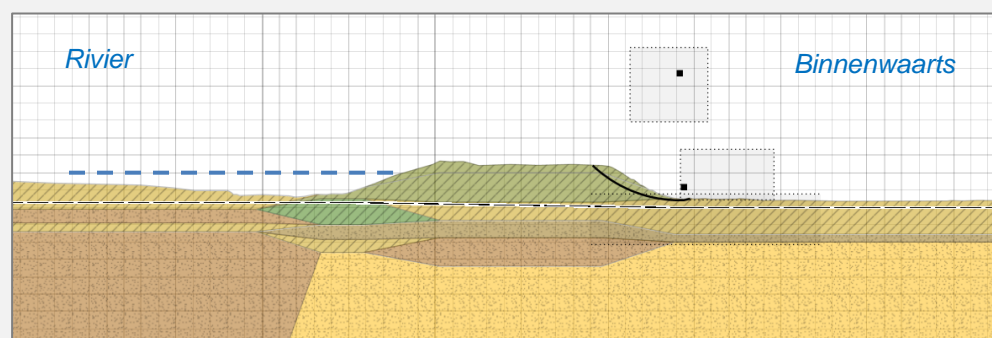
In deze stap dienen de relevante glijvlakken die redelijkerwijs tot een overstroming kunnen leiden, al dan niet na gebeurtenissen volgend op een initiële afschuiving, te worden bepaald. Bepaal vervolgens voor deze glijvlakken de faalkans (semi-probabilistisch of probabilistisch) voor de situaties met en zonder infiltratie als gevolg van overslag conform de *Werkwijzer macrostabiliteit i.c.m. golfoverslag* [5]. Met een probabilistische analyse of met de semi-probabilistische rekenregels uit het WBI/OI kan de kans op jaarbasis van een glijvlak worden afgeschat.

Het is niet altijd evident welke initiële gebeurtenis nader beschouwd moet worden. Is dit bijvoorbeeld een relatief oppervlakkige afschuiving met een relatief grote kans van optreden (of anders gesteld een lage stabiliteitsfactor), maar waarbij er nog relatief veel (rest)sterkte aanwezig is? Of is dit een relatief groot glijvlak met een relatief kleine kans van voorkomen (hogere stabiliteitsfactor), maar die het waterkerend vermogen zwaar aantast? Bij twijfel is het raadzaam om alle¹ initiële glijvlakken en vervolggebeurtenissen die een niet-verwaarloosbare bijdrage aan de overstromingskans kunnen leveren nader te beschouwen.

Bij het selecteren van glijvlakken is het raadzaam om te bedenken of er relevante “volgorde-effecten” te verwachten zijn. Ofwel: zullen de meest waarschijnlijke initiële afschuivingen andere afschuivingen meer of minder waarschijnlijk maken? Zo kan een initiële afschuiving enerzijds leiden tot een profielverandering waarbij het aandrijvend moment kleiner wordt. Anderzijds zal de grondsterkte ter plaatse van het initiële schuifvlak afnemen.

Stap 1 voorbeeld

Uit de stabiliteitsanalyse volgt het initiële glijvlak dat door het programma als maatgevend en daarmee met de laagste veiligheidsfactor is bepaald. Het glijvlak snijdt al niet heel diep en zal zich vermoedelijk niet over een grote breedte ontwikkelen. Om een beeld te krijgen wat een groter (en veelal dieper snijdend) glijvlak voor een effect heeft op de stabiliteitsfactor kunnen analyses worden uitgevoerd waarbij het glijvlak wordt gedwongen verder buitenwaarts in te snijden (bijvoorbeeld in stappen van een aantal meter).



Tekstbox 3.3 Voorbeeld Stap 1

¹ Het aantal potentiële glijvlakken is in realiteit vrijwel oneindig. Hier wordt bedoeld op afschuivingen die representatief zijn voor een set vergelijkbare afschuivingen (vgl. met de scenario's in de schematiseringstheorie).

3.4 Stap 2 - Bepaal afstand tot de norm

Op basis van de berekende faalkans van het initiële glijvlak kan de afstand tot de norm (doelkans) worden bepaald. Dit kan gedaan worden voor situaties zonder overslag en situaties met infiltratie als gevolg van overslag. In de laatste situatie dient de faalkans te worden gecorrigeerd voor de kans op overslag [5]. Bedenk of het aannemelijk is dat het faalkanstekort overbrugd kan worden met een analyse van de vervolgebeurtenissen in het faalpad.

Als de kans op het optreden van een (potentieel relevant) initieel glijvlak al voldoende klein is, dan hoeft uiteraard niet verder te worden gegaan om aan te tonen dat de kans op overstroming voldoende klein is. De ontwerpverificatie kan dan na deze stap worden gestopt.

Stap 2 voorbeeld

Uit de stabiliteitsanalyse volgt dat het initiële glijvlak (zie figuur) een stabiliteitsfactor van 0,68 heeft. Met de kalibratie-formule (schadefactor vs. beta) levert dit een benaderende kans van 1/30 per jaar op. De berekende stabiliteit van het glijvlak voldoet daarmee zeer ruim niet aan de vereiste veiligheid (stabiliteitsfactor van circa 1,2 en faalkans van $2,5 \cdot 10^{-07}$ per jaar).

Zoals gesteld is in dit voorbeeld de kans op golfoverslag zeer klein, waardoor de situatie met verzadiging door deze golfoverslag niet is beschouwd.

In stap 2 is gecontroleerd of de kans op een afschuiving die direct tot een kruinverlaging leidt kleiner is dan de eis. Dat blijkt het geval, dit glijvlak heeft namelijk een stabiliteitsfactor van 1,41 (kans van $1 \cdot 10^{-11}$ per jaar). Het beschouwen van vervolgemechanismen in stap 3 en verder is daarmee zinnig/kansrijk.

Tekstbox 3.4 Voorbeeld Stap 2

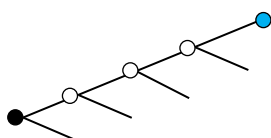
Let bij het selecteren van een methode voor het bepalen van de kans op een glijvlak op de grootte van het glijvlak. De evenwichts-stabiliteitsmodellen (Spencer, LiftVan, Bishop) en de bijbehorende rekenregels (bijvoorbeeld de set aan partiële veiligheidsfactoren voor semi-probabilistische analyses) gaan uit van afschuivingen door meerdere grondlagen, waarbij een glijvlak met een breedte van circa 30 tot 50 m en een diepte van enkele meters ontstaat. Als met het stabiliteitsprogramma ondiepe glijvlakken worden berekend, die bijvoorbeeld in z'n geheel door de gestructureerde toplaag gaan, dan dienen deze met de nodige terughoudendheid te worden beschouwd in relatie tot macrostabiliteit. In dit geval is eerder sprake van bijvoorbeeld het faalmechanisme afschuiven van de bekleding (GABI).

3.5 Stap 3 - Bepaal relevante faalpaden

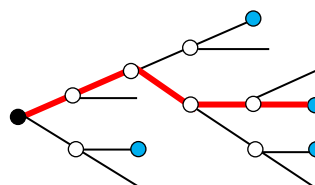
Om vervolgemechanismen te betrekken in de analyse is het behulpzaam om één of meerdere faalpaden uit te werken. Een faalpad is een opeenvolging van gebeurtenissen, startend met een initieel glijvlak en eindigend met een overstroming. Het is een systematische weergave van het verhaal, waarop een afschuiving en de daarop volgende gebeurtenissen tot een overstroming kunnen leiden (zie stap 0). Soms kan een initiële afschuiving op verschillende manieren tot een overstroming leiden. Als dat zo is, dan is het opstellen van een gebeurtenissenboom een praktische methode voor het systematisch genereren van faalpaden.

In een gebeurtenissenboom wordt na elke gebeurtenis gekeken welke vervolggebeurtenissen zich kunnen voordoen. Door zo stap voor stap een boom te ontwikkelen, kan worden voorkomen dat er faalpaden worden gemist. In figuur 2 zijn schematische weergaven opgenomen van een faalpad en een gebeurtenissenboom. Er zijn steeds twee vervolggebeurtenissen getoond, uitgaande van één initieel glijvlak. In realiteit kunnen er uiteraard meer initiële glijvlakken en vervolggebeurtenissen zijn die beschouwd moeten worden.

A. Enkel faalpad



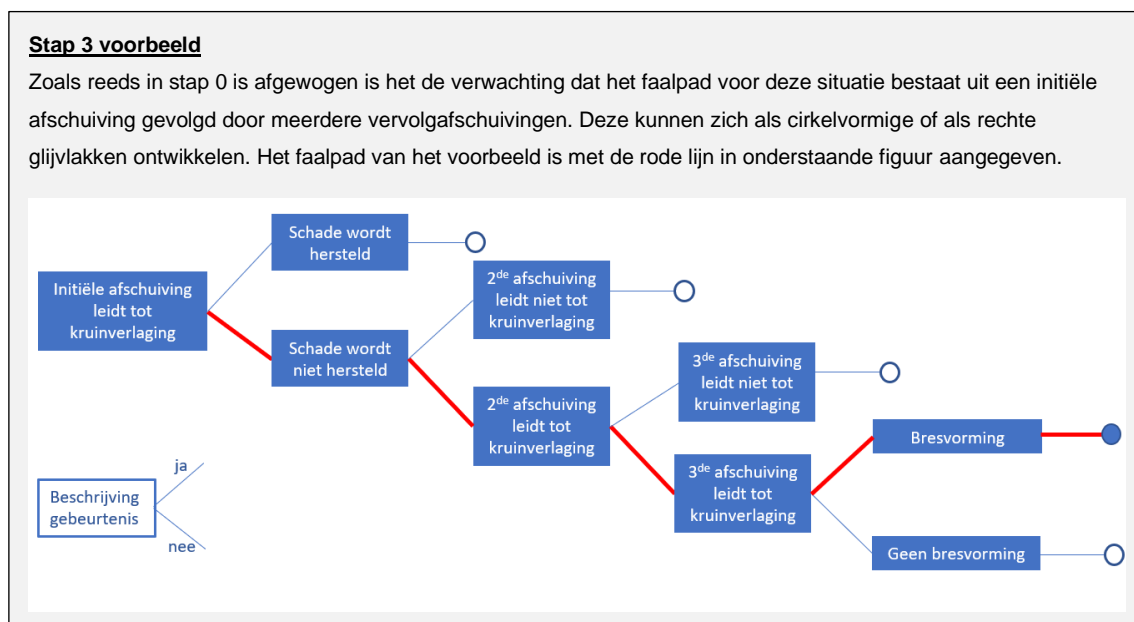
B. Gebeurtenissenboom met vier faalpaden waarvan er een rood is uitgelicht



- Initiële afschuiving
- Tussengebeurtenis op een faalpad
- Overstroming

Figuur 2. Enkel faalpad (links) en gebeurtenissenboom met verschillende faalpaden (rechts)

Belangrijk is dat de takken in een gebeurtenissenboom alle mogelijkheden zonder overlap moeten afdekken. Bij twee vervolggebeurtenissen is de ene vervolggebeurtenis dus noodzakelijkerwijs het complement van de ander. Ter illustratie: als de ene vervolggebeurtenis “tijdig herstel” is, dan is de ander “geen tijdig herstel” en als de ene vervolggebeurtenis “overstroming” is, is de ander “geen overstroming”. Door er steeds op te letten dat de gebeurtenissen elkaar uitsluiten én gezamenlijk dekkend zijn, wordt voorkomen dat er dubbeltellingen ontstaan of dingen over het hoofd worden gezien. Per knoop moet de totale kans van de vervolggebeurtenissen (gegeven de voorgaande gebeurtenissen) dus één bedragen.



Tekstbox 3.5 Voorbeeld Stap 3

3.6 Stap 4 - Kwantificeer kansen

Door voor elke vervolggebeurtenis uit stap 3 de kans te bepalen, kan de kans op overstroming door macro-instabiliteit worden bepaald. Hierbij spelen onderstaande aspecten een rol.

Combineren van kansen op gebeurtenissen

Bij het combineren van de kansen op de verschillende gebeurtenissen in een faalpad tot een overstromingskans dient rekening te worden gehouden met de correlatie tussen de deelgebeurtenissen. De bovengrens ontstaat wanneer wordt uitgegaan van volledige correlatie. In dat geval is de overstromingskans gelijk aan de kans van de gebeurtenis met de kleinste kans van optreden. Wanneer de gebeurtenissen volledig ongecorrleerd zijn, wordt de overstromingskans bepaald door het product van alle losse kansen op de verschillende vervolgebeurtenissen.

Afhankelijk van de lokale situatie kan een aantal methoden worden gebruikt. Onderstaand wordt een aantal methoden aangegeven, waarbij de methoden ook een steeds gedetailleerdere aanpak betreffen:

- I. Bovengrens benadering op basis van volledige correlatie: indien met volledige correlatie aan de eis wordt voldaan is geen verdere analyse nodig.
- II. Realistische uitwerking met correlatie op basis van expert judgement (bv. DOT-analyse: Deskundige Oordeel Toets-op-maat), aantonen dat de overstromingskans kleiner is dan de norm.
- III. Realistische uitwerking met correlatie op basis van integrale modellering. Door het uitvoeren van een probabilistische analyse van het faalpad kan worden onderbouwd dat de overstromingskans van het faalpad kleiner is dan de eis.

Op basis van expert judgement kan ook worden geconcludeerd dat nadere analyse niet zinvol is en de overstromingskans ook bij het meenemen van vervolgemechanismen te groot blijft.

Jaarkansen versus voorwaardelijke kansen

Alleen de kans op de startgebeurtenis, de initiële afschuiving, is een kans per jaar. De overige gebeurtenissen zijn voorwaardelijke kansen: het zijn daarmee kansen *gegeven* het optreden van de voorgaande gebeurtenissen en daarmee een kans per keer.

De reguliere (semi)probabilistische rekenregels en de reguliere hydraulische belastingstatistiek hebben betrekking op kansen op jaarbasis. In methode II zijn deze dus niet zondermeer toepasbaar voor het bepalen van voorwaardelijke kansen op vervolgebeurtenissen. Ter illustratie: de schadefactorformule gaat uit van een kans op jaarbasis. Het gebruik van de schadefactorformule voor het schatten van de kans op een afschuiving levert dus een kans op jaarbasis. In deze kans komt tot uitdrukking dat de kans op een extreme waterstand in een jaar klein is. Voor het schatten van de kans op een vervolgafschuiving is de schadefactorformule dus niet geschikt. In geval van een initiële afschuiving is de kans op een extreme waterstand immers zeer groot en ook kan de kansverdeling van de sterkte gegeven een eerste afschuiving anders zijn dan de 'initiële' kansverdeling van de sterkte.

Methoden voor het schatten van voorwaardelijke kansen

Er zijn verschillende methoden beschikbaar voor het schatten van voorwaardelijke kansen. Op hoofdlijnen zijn dit:

1. (semi) probabilistische modelberekeningen;
2. gestructureerde expertschattingen (oftewel: "expert elicitation").

Bij probabilistische modelberekeningen wordt een model opgesteld dat aangeeft onder welke condities een bepaalde gebeurtenis zal optreden. Vervolgens dient dit model gevoed te worden met de kansverdelingen van de onzekere invoerparameters. Op deze manier kan worden berekend wat de kans is dat de gebeurtenis zal optreden. De gebruiker specificeert dus alleen kansen ten aanzien van de invoer, niet ten aanzien van de uitvoer. Deze kansen berusten in de regel op statistische analyses (bijv. geostatistiek of waterstandstandsstatistiek) en/of expert judgement.

Bij gestructureerde expertschattingen worden direct kansen gespecificeerd ten aanzien van het optreden van een bepaalde (vervolg)gebeurtenis. Er zijn verschillende methoden ontwikkeld om dit zorgvuldig en systematisch te doen. De ervaring leert namelijk dat mensen gemakkelijk forse vergissingen maken bij het inschatten van kansen. Dat komt door groepsdenken, overmoed, anchoring (een focus op door anderen genoemde waarden), gevoeligheid voor wat we ons makkelijk kunnen voorstellen en nog vele andere factoren. In de Nederlandse waterbouwkundige praktijk is het gebruik van expertschattingen nog weinig gebruikelijk, al wordt hier sinds een aantal jaren in pilots wel ervaring mee opgedaan [6].

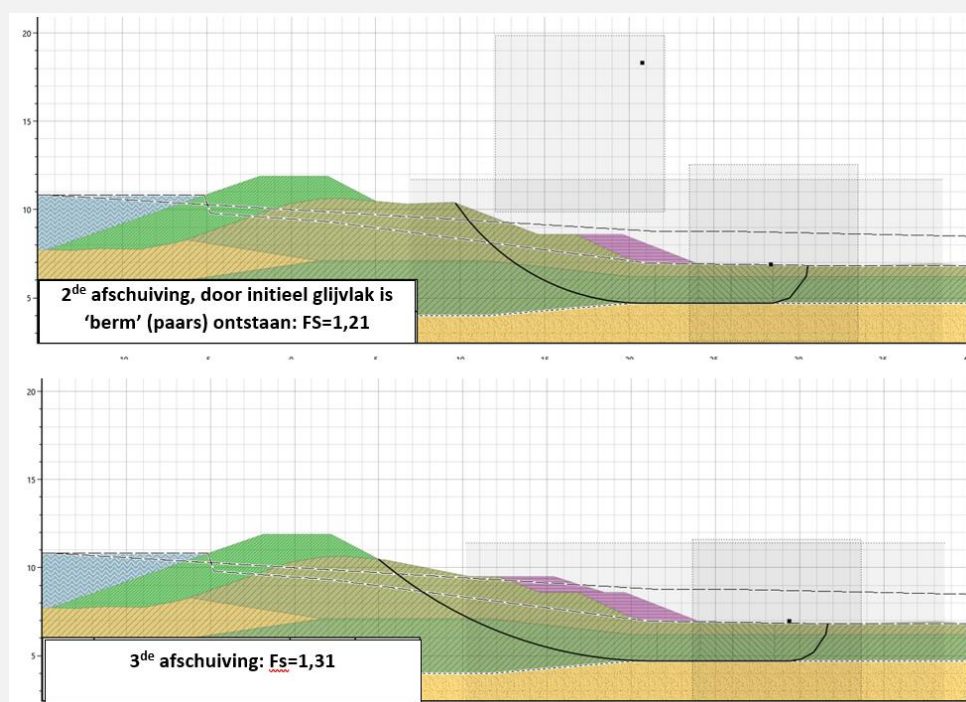
Hoewel het nog vaak voorkomt dat bij twijfel van het ergste wordt uitgegaan, is een kans van 100% op de worst case-uitkomst dikwijls weinig realistisch. Wanneer de worst case niet voldoet aan de eisen past het bij de grondslagen van de overstromingskansbenadering om een realistischere inschatting te maken, onderbouwd op basis van bijvoorbeeld ervaringskennis, proeven of historische gebeurtenissen. Dat voelt wellicht ongemakkelijk, maar bij bijvoorbeeld het bepalen van scenariokansen voor de afleiding van een schematiseringfactor speelt uiteindelijk eenzelfde subjectiviteit een rol.

Als stelregel kan worden aangehouden dat het bijzonder lastig is om experts betrouwbare uitspraken te ontlokken over kleine kansen. Kansen kleiner dan 1/10 zijn al lastig, kansen kleiner dan 1/100 dikwijls

problematisch. Het kan dan ook handig zijn om niet de vraag te proberen te beantwoorden wat de kans op een bepaalde gebeurtenis “is”, maar terug te rekenen wat de kans zou moeten zijn om tot een ander oordeel/ander besluit te komen. Het is namelijk een stuk eenvoudiger om te beargumenteren dat een kans toch zeker kleiner zal zijn dan bijvoorbeeld 50% dan dat een kans van 0,5% een reële inschatting is.

Stap 4 Voorbeeld

In onderstaande figuur zijn glijcirkels van tweede en derde afschuivingen geschematiseerd waarbij met paars de afgeschoven grondmoot van de voorgaande afschuiving is geschematiseerd.



De kansen op vervolgmecanismen kunnen op de beschreven manieren worden bepaald en samengevoegd tot een overstromingskans door macro-instabiliteit.

Vanwege de grote breedte van de kering is in dit voorbeeld is gestart met een bovengrensbepaling. In deze bovengrensbepaling is uitgegaan van volledige correlatie tussen het ontstaan van de 1^{ste}, 2^{de} en 3^{de} afschuiving door de kans op de 1^{ste} en 2^{de} afschuiving in het faalpad gelijk aan 1 (100%) te stellen. Hiervoor is de afgeschoven geometrie van het initiële glijvlak (stap 2) in de berekening geschematiseerd (met behoud van volume en wellicht gereduceerde sterkte in zone rondom glijvlak). Voor het tweede glijvlak wordt hiermee een stabiliteitsfactor van 1,2 berekend (benaderende kans van $1,0 \cdot 10^{-06}$ per jaar), waarmee nog steeds niet aan de vereiste veiligheidsseis wordt voldaan. Dit is wel het geval bij de derde afschuiving (stabiliteitsfactor is 1,31 en kans is $2,0 \cdot 10^{-08}$ per jaar). Hierdoor mag geconcludeerd worden dat de kans voldoende klein is dat een binnenwaartse afschuiving tot een overstroming leidt.

De bovengrensmethode zal niet in elke situatie toepasbaar zijn. Bij het Adviesteam Dijkontwerp zijn ook projecten bekend die de overstromingskans met meer realistische methoden hebben bepaald. Het Adviesteam helpt graag bij het toepassen van deze methoden.

Tekstbox 3.6 Voorbeeld Stap 4

3.7 Stap 5 - Check consistentie en uitlegbaarheid

Moet de dijk wel of niet versterkt worden? Moet het talud verflauwd worden? Moet de berm langer of hoger worden? Uiteindelijk dient een stabiliteitsanalyse ter onderbouwing van dergelijke keuzes. Berekeningen, faalpad analyses, expertschattingen, etc. zijn hulpmiddelen om een keuze te onderbouwen, geen doel op zich. Het is dan ook altijd raadzaam om na te gaan of de uitgevoerde analyses de keuze kunnen dragen. De uitkomst van een voorzichtig ingestoken analyse kan bijvoorbeeld een stevige onderbouwing zijn van het besluit om *niet* te versterken. Andersom kan een voorzichtig ingestoken analyse onmogelijk een stevige onderbouwing zijn van het besluit om *wel* te versterken. Kortom: het is altijd raadzaam om aan het eind van de rit nog eens kritisch te bekijken of er werkelijk een overtuigend verhaal ligt.

Stap 5 Voorbeeld

Met gevoeligheidsanalyses voor de aannamen rondom de sterkte van het afgeschoven materiaal en de deklaag bij opbarsten is de stabiliteit van de conclusie gecontroleerd.

In het voorbeeld blijkt er geen opgave te zijn, ondanks dat er nog een aantal behoudende keuzen en aannamen zijn gemaakt. Dit alles maakt dat er een goede onderbouwing ligt om dit geval niet te versterken.

Tekstbox 3.7 Voorbeeld Stap 5

4. Literatuur

Verwijzingen:

- [1] Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Handreiking ontwerpen met overstromingskansen, veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansnormen (OI2014v4), Februari 2017.
- [2] Technische adviescommissie voor de waterkeringen (TAW), Handreiking constructief ontwerpen, Maart 1994.
- [3] Deltares, Beoordeling binnenwaartse stabiliteit op basis van zoneringsmethode CO-390110/34, Mei 2002.
- [4] Expertisenetwerk waterveiligheid (ENW), Technisch Rapport Actuele Sterkte van dijken, 27 maart 2009.
- [5] Kennisplatform Risicobenadering (KPR), Werkwijzer macrostabiliteit i.c.m. golfoverslag OI2014V4 (concept), Januari 2018.
- [6] Rijkswaterstaat WVL, Unie van Waterschappen, Deltares, Handreiking DOT – Groene versie, Deskundigen Oordeel voor de Toets op maat, versie 1.0, Juni 2020.
- [7] Kennisplatform Risicobenadering (KPR), Factsheet Relevant glijvlak. Afweging ter bepaling glijvlak voor faalmechanisme Macrostabiliteit Binnenwaarts, 20 december 2018.
- [8] Deltares, Fenomenologische beschrijving Faalmechanismen WBI, mei 2018

Overige gerelateerde literatuur:

- [9] Ministerie van Verkeer en Waterstaat en Expertise Netwerk Waterkeren (ENW), Leidraad Rivieren, juli 2007.
- [10] Calle, ir. E.O.F. (Geodelft), Dijkdoorbraakprocessen 720201/39, Maart 2002.
- [11] Residual dike strength after macro-instability, WT12017, Rijkswaterstaat WVL / Deltares 2014, B, 1207811-013-HYE-0001-ghb

Context van deze Rode draden-rapportage

Het Adviesteam Dijkontwerp is door het programmabestuur van de alliantie Hoogwaterbescherming opgericht om:

- projecten te adviseren over de toepassing van de overstromingskansbenadering en nieuwe kennis middels integraal, multidisciplinair en specialistisch advies, en
- de programmadirectie HWBP te adviseren door het beantwoorden van technisch inhoudelijke vragen vanuit begeleiding en de ingangstoets geïnteresseerden.

Het Adviesteam krijgt hierdoor goed overzicht over nieuwe kennis en ervaringen van de diverse projecten. Zoals ook in het Inrichtingsplan van het Adviesteam is opgenomen, kan dit overzicht worden gebruikt om stakeholders te ondersteunen door:

- kennis- en ontwikkelvragen te identificeren voor o.a. ontwerpinstrumentarium en onderzoeks- en innovatieprogramma's,
- relevante issues bij de programmadirectie HWBP te agenderen, en
- de Kennis en Kunde Platforms (KKP) te ondersteunen bij verspreiding van nieuwe kennis en ervaringen.

Hiertoe is in het Inrichtingsplan opgenomen dat het Adviesteam regelmatig de rode draden uit de advisering rapporteert in een memo en dit met de betrokken stakeholders deelt en bespreekt.

Bijlage 1 Richtlijnen m.b.t. ‘reststerkte’ uit de overschrijdingskansbenadering

Er zijn diverse leidraden, factsheets en technische rapporten beschikbaar waarin methodes zijn beschreven om de zogenaamde ‘reststerkte’ in rekening te brengen [2] [3] [4]. Deze methodes zijn echter allemaal gebaseerd op de overschrijdingskansbenadering en ze passen niet zondermeer bij de overstromingskansbenadering. Veel van deze documenten bevatten echter nog wel bruikbare onderdelen. Daarom is in deze bijlage een overzicht opgenomen van deze documenten.

De bestaande richtlijnen/technische rapporten met betrekking tot het vaststellen van ‘reststerkte’ zijn ontwikkeld zonder dat daarbij expliciet de relatie met golfoverslag is gelegd. Bij het afleiden van de veiligheidsfactoren is impliciet aangenomen dat bresvorming door erosie als gevolg van overlopen of golfoverslag geen rol van betekenis speelde. Hieronder is een overzicht gegeven van de richtlijnen en leidraden die een aanpak presenteren voor het rekenen met ‘reststerkte’.

- In de “Handreiking Constructief ontwerpen” [2] uit 1994 zijn twee reststerkte aanpakken geschetst. Eén geldig voor situaties met maximaal 1 l/m/s golfoverslag en één geldig voor situaties met maximaal 0,1 l/m/s golfoverslag.
- In 2002 is de reststerkte aanpak verfijnd en is de aanpak geïmplementeerd in de stabiliteitssoftware DGeostability (Beoordeling binnenwaartse stabiliteit op basis van zoneringsmethode CO-390110/34 mei 2002 [3]). Hierbij is de toepassingsvoorwaarde met betrekking tot overloop en golfoverslag beperkt tot 0,1 l/m/s.
- In het “Technisch Rapport Actuele Sterkte van Dijken” [4] uit 2009 is de reststerkte aanpak verder beperkt door de toepassingsvoorwaarde dat geen opdrijven mag plaatsvinden

Deze bestaande richtlijnen en toepassingsvoorwaarden zijn gezien de nu vaak gehanteerde ontwerpuitgangspunten zodanig beperkend dat in veel gevallen geen ‘reststerkte’ in rekening kan worden gebracht.

Toepassingsvoorwaarde opdrijven

Binnen Deltares is voor situaties met opdrijven in een aantal studies gekeken naar de gevoeligheid van de ligging van het intredepunt van het relevante glijvlak. Eerst was geconcludeerd dat de onzekerheid van de ligging van het intredepunt van het maatgevende glijvlak bij opdrijven groot is. Dit is overgenomen in [5]. Later is gebleken dat de onzekerheid over het intredepunt niet significant afwijkt van situaties zonder opdrijven, waardoor de stelling voor de bekeken gevallen niet geldig is. Daarom kunnen toepassingsvoorwaardes t.a.v. onzekerheid over de ligging van het intredepunt van het relevante glijvlak vervallen.