

Van	Adviesteam Dijkontwerp
Door	Cor Bisschop, Bob van Bree, Ben Rijnveld, Marieke de Visser
Betrokken	Myron van Damme
Review	Adviesteam Dijkontwerp
Kopie aan	HWBP Kennis en Innovatie, Programma BOI, Programma Kennis voor Keringen, KKP en andere geïnteresseerden
Datum	24 december 2021
Versie	1
Onderwerp	Adviesteam Dijkontwerp: Rode draden nr. 4 – Bekleding op het binnentalud

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 vierde Rode draden van het Adviesteam en gaat in op bezwijken van de bekleding op het binnentalud van de kering, waardoor uiteindelijk de waterkering kan falen en inundatie op kan treden.

Reacties en feedback op deze Rode draden 4 zijn van harte welkom via info@adviesteamdijkontwerp.nl. Uiteraard zijn wij ook bereikbaar voor nadere toelichting.

2. Aanleiding en doel van deze Rode draden 4

2.1 Aanleiding

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. Het Adviesteam ziet dat veel dijkversterkingsprojecten worstelen met de vraag welk effect de overstromingskansbenadering heeft op het ontwerp van de bekleding op het binnentalud van waterkeringen. Tot nu toe zijn de vragen met name afkomstig van projecten in het bovenrivierengebied, maar dezelfde issues kunnen zich ook bij de overige primaire waterkeringen in Nederland voordoen. De vragen richten zich met name op het mechanisme Gras Afschuiven op Binnentalud (GABI) als ook macrostabiliteit als gevolg van infiltratie door golfoverslag (STBI|overslag). In het bijzonder het 'rekenen met de kans op een groter overslagdebiet' levert hierbij vragen op.

2.2 Probleembeschrijving

Verschillende initiërende mechanismen kunnen leiden tot schade aan de bekleding op het binnentalud. Dit leidt echter nog niet direct tot een overstroming; vervolgmecanismen zijn nodig om tot overstroming

te komen. Om tot een adequate schatting van de overstromingskans te komen, is het nodig om deze vervolgmecanismen mee te nemen.

Afhankelijk van het faalmechanisme en van de situatie – is het een initiële faalgebeurtenis of betreft het een vervolgebeurtenis – passen de beschikbare modellen en beslisregels meer of minder goed in de overstromingskansbenadering. In het afgelopen jaar heeft dit geleid tot meerdere vragen van projecten aan het Adviesteam. Hieruit blijkt dat er in projecten verschillende ontwerpaanpakken worden gehanteerd, waardoor er voor soortgelijke situaties zeer uiteenlopende verbetermaatregelen worden gedimensioneerd. Dit komt de uitlegbaarheid niet ten goede.

Aan verschillende aspecten van dit onderwerp wordt momenteel binnen meerdere programma's gewerkt. Dit is verklaarbaar, omdat het meerdere componenten in zich heeft en daardoor een multidisciplinaire aanpak vergt. Hier ziet het Adviesteam een risico in de afstemming omtrent raakvlakken tussen en prioritering van de deelonderzoeken.

2.3 Doel

Deze Rode draden heeft als doel om een overzicht te geven van de faalmechanismen rondom de bekleding op het binnentalud in relatie tot het falen van een waterkering volgens de overstromingskansbenadering. Ook de samenhang tussen de verschillende mogelijke initiële mechanismen wordt beschouwd, evenals een korte blik op de vigerende kennis die momenteel beschikbaar is. Vanuit dit vertrekpunt worden vervolgens de kennisleemtes waar projecten in hun ontwerpen tegenaan lopen geadresseerd. Dit memo geeft nadrukkelijk geen concrete oplossingen voor de geconstateerde kennisleemtes en moet gezien worden als een eerste stap in die richting.

Het Adviesteam heeft inmiddels al de nodige adviezen rondom dit onderwerp uitgebracht. Hierbij is vanuit de beschikbare instrumenten met de projecten meegedacht. De belangrijkste lessen uit deze adviezen zijn gebundeld in deze Rode draden.

Deze Rode draden is opgesteld vanuit een overkoepelende blik op de kennisbehoefte uit de verschillende dijkversterkingsprojecten. Vanuit dit overzicht wil het Adviesteam in dit memo de raakvlakken tussen de verschillende componenten inzichtelijk maken en aanbevelingen doen ten aanzien van de prioritering tussen de verschillende kennisvragen. Hiermee hopen we de discussie over dit onderwerp verder te helpen en mee te helpen om richting te geven aan vervolgonwikkelingen op dit vlak. Natuurlijk blijven we hier graag met de diverse stakeholders over meedenken!

2.4 Leeswijzer

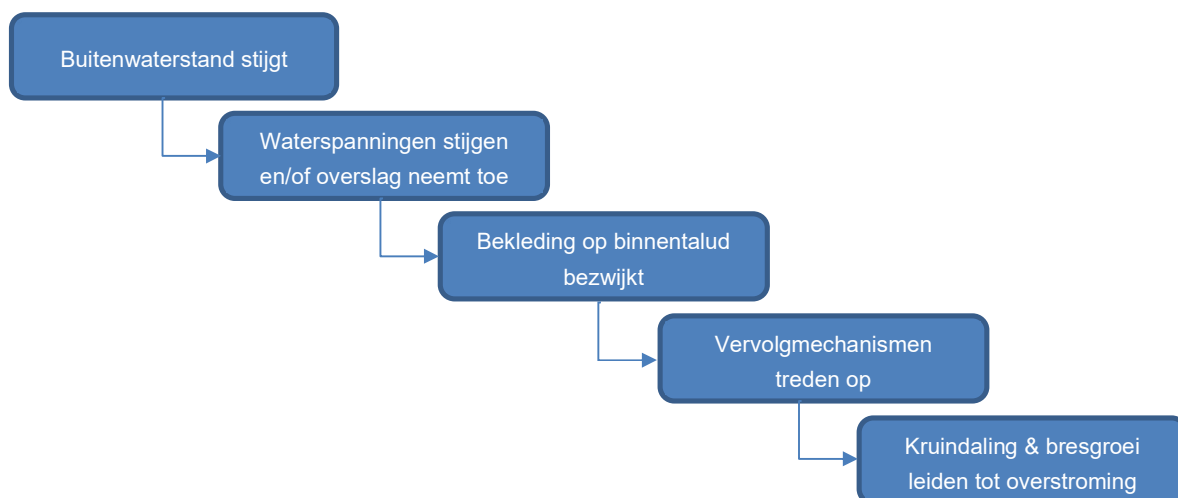
Deze Rode draden is als volgt opgebouwd: Eerst is in hoofdstuk 3 het conceptuele kader geschetst, waarbij het initiële bezwijken uiteindelijk tot falen van de waterkering leidt. In hoofdstuk 4 wordt een korte uiteenzetting gegeven van de verschillende initiële bezwijkmechanismen, die voor de bekleding op het binnentalud beschouwd worden. Hoofdstuk 4 gaat in op de adressering van de kennisleemtes, waarin ook een voorzet voor een aantal ontwikkelstappen op korte en lange termijn is opgenomen. Als laatste zijn in hoofdstuk 5, naast een bundeling van de verschillende adviezen van het Adviesteam over dit onderwerp, ook enkele praktische wenken voor projecten opgenomen.

3. Falen binnentalud in de overstromingskansbenadering

In dit hoofdstuk zijn de gebeurtenissen beschreven die kunnen leiden tot een overstroming als gevolg van het bezwijken van (delen van) de bekleding op het binnentalud. Hierbij is onderscheid gemaakt in de initiërende gebeurtenis (bezwijken bekleding op binnentalud) en vervolgebeurtenissen.

3.1 Gebeurtenissen die leiden tot een overstroming

Na het bezwijken van de bekleding op het binnentalud van een waterkering moeten vervolgebeurtenissen optreden voordat de waterkering faalt en een overstroming kan optreden. Achtereenvolgens moeten hiervoor doorgaans de volgende gebeurtenissen optreden:



Figuur 1 Globaal faalpad bezwijken bekleding binnentalud tot overstroming

Schade aan of het bezwijken van de bekleding op het binnentalud leidt niet direct tot een overstroming. Daarom moeten vervolgmechanismen optreden voordat doorgaande kruindaling en bresgroei en daarmee een overstroming optreden. In onderstaande alinea's wordt dit globale faalpad nader toegelicht.

Waterspanningen stijgen / overslag neemt toe

De **waterspanningen** in en onder de waterkering stijgen doordat het buitenwater stijgt en daarmee de freatische grondwaterstand in de waterkering als ook de stijghoogte in de ondergrond. Tijdens extreme omstandigheden kunnen de waterspanningen ook toenemen als gevolg van infiltratie door golfoverslag en/of overloop. Golfoverslag en overloop kan ook leiden tot belasting op de bekleding op de kruin en het binnentalud.

N.B. Het komt in de praktijk nauwelijks voor dat op overloop wordt ontworpen. Deze situatie wordt dan ook verder buiten beschouwing gelaten in deze memo.

Bezwijken bekleding op binnentalud

Het **binnentalud** van de waterkering kan door verschillende **initiërende mechanismen** bezwijken. De grootte van de schade na bezwijken varieert van het ontstaan van een enkele erosiekuil op het binnentalud tot het afdrukken van grotere schollen van de dijkbekleding op het binnentalud.

De verschillende mogelijke faalmechanismen zijn in het BOI opgehangen aan initiërende gebeurtenissen/mechanismen en gedefinieerd als¹:

- GEKB: Graserosie kruin en binnentalud;
- GABI: Gras afschuiven/opdrukken/uitspoelen binnentalud;
- STMI: Micro-instabiliteit;
- STBI/overslag: Macro-instabiliteit van het binnentalud bij significante golfoverslag.

In paragraaf 3.2 wordt aan de hand van een gebeurtenissenboom de samenhang van deze faalmechanismen uitgewerkt.

Vervolgmechanismen

Nadat de initiërende mechanismen zijn opgetreden, zullen **vervolgmechanismen moeten optreden** om uiteindelijk tot kruindaling en bresgroei te komen. Deze vervolgmechanismen zijn te onderscheiden in:

- Afschuivingen;
- Uitspoelen van kernmateriaal;
- Erosie van kernmateriaal.

Modellen om deze vervolgmechanismen te kunnen bepalen zijn slechts beperkt beschikbaar in de diverse leidraden en handreikingen voor waterkeringen in Nederland². Dit is enerzijds het gevolg van een kennisleemte, omdat het in de toets- en ontwerppraktijk tot 2017 niet gebruikelijk was om deze 'reststerkte' mee te nemen en anderzijds omdat deze vervolgmechanismen complex zijn. Hierin spelen onder andere de invloed van de duur van een bepaalde golfoverslag, onzekere opbouw van het dijklichaam, kennisleemtes over de erosiesterkte bij overslag en de verschillen tussen overloop en overslag een rol.

De vraag is dan ook in welke mate het resterende dijkprofiel na een initiërende gebeurtenis de hydraulische belasting nog kan weerstaan. Omdat deze vervolgmechanismen een aanzienlijke invloed kunnen hebben op de uiteindelijke kans op inundatie is het belangrijk om deze invloed adequaat te kunnen bepalen.

Kruindaling en bresgroei

Wanneer deze vervolgmechanismen tot een **kruindaling** leiden, bestaat de kans op **bresgroei**, waarna een overstroming kan optreden.

¹ Voor een uitgebreide beschrijving van deze initiële faalmechanismen wordt verwezen naar de Fenomenologische beschrijving uit het WBI ([2]).

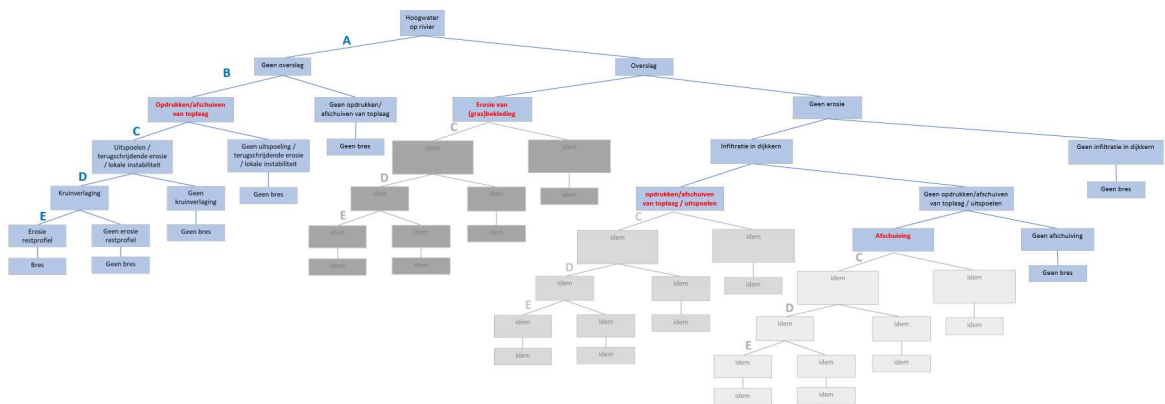
² Voor afschuiven en uitspoelen zijn wel modellen beschikbaar, maar deze zijn niet of slechts beperkt gevalideerd voor de specifieke situatie na een initiërende gebeurtenis. Zo ontbreken handvatten om de parameters goed in te schatten en is er geen veiligheidsfilosofie met gekalibreerde veiligheidsfactoren beschikbaar of (in het geval van afschuiven) is het maar de vraag in hoeverre de beschikbare veiligheidsfactoren nog van toepassing. Voor erosie is nog helemaal geen model beschikbaar in het WBI/OI/BOI.

De kans op optreden van al deze gebeurtenissen leidend tot een overstrooming dient conform de Waterwet voldoende klein te zijn. In de huidige analyses/rekenregels ligt de focus met name op het bepalen/berekenen van de kans op het ontstaan van het initiërende mechanisme. Hierbij wordt alleen de kans op initiatie van falen door GEBK, GABI, STMI en STBI|overslag beschouwd. De invloed van de vervolgmecanismen op de totale overstroomingskans wordt niet meegenomen. Dit leidt veelal tot een conservatieve benadering van de faalkans. Voor het ontwerp van een verbetermaatregel kan dit een prima aanpak zijn als de kering hoe dan ook op de schop moet. Als het wel of niet treffen van een kostbare maatregel echter afhankelijk is van de inschatting van de faalkans, dan is dit conservatisme ongewenst (in lijn met het adagium ‘robuust ontwerp – scherp beoordelen’).

3.2 Initiërende mechanismen en samenhang

3.2.1 Beschrijving faalproces

In het rapport Dijkdoorbraakprocessen uit 2002 [1] is al een aanzet gegeven voor het beschrijven van het faaltraject van een primair faalmechanisme tot aan de dijkdoorbraak. Ook zijn hier al enkele waarden voor overgangskansen gegeven voor de verschillende geotechnische mechanismen. De onder het mechanisme ‘overslag/overloop’ gegeven gebeurtenissenboom³ is het vertrekpunt geweest voor de aangepaste gebeurtenissenboom die in Figuur 2 is getoond (in bijlage 1 is deze figuur in groot formaat opgenomen). Opgemerkt wordt dat dit een eerste voorzet voor een generieke gebeurtenissenboom is, die uiteraard niet voor alle situaties passend is. Het zal altijd nodig zijn om in projecten een locatiespecifieke boom te maken. Onderstaande boom is vooral bedoeld om te laten zien dat er samenhang bestaat tussen de verschillende hiervoor genoemde initiërende mechanismen.



Figuur 2 Voorbeeld van een gebeurtenissenboom met samenhang tussen de verschillende mechanismen

Uit de gebeurtenissenboom volgt dat de dijkbekleding op het binnentalud zowel in een situatie met overslag als zonder overslag kan bezwijken. Daarnaast kan het wel of niet infiltreren van overslaand

³ Normaal gesproken wordt een gebeurtenissenboom van links naar rechts gepresenteerd, beginnend bij de initiërende gebeurtenis en eindigend bij falen. Omwille van de leesbaarheid is ervoor gekozen de boom van boven naar beneden te presenteren.

water in de dijk kern leiden tot een initiële faalgebeurtenis (zie Figuur 2 / Bijlage 1). Tevens is te zien dat de vervolggebeurtenissen na initieel falen in grote lijnen vergelijkbaar zijn. Dit is weergegeven door de gebeurtenissen C t/m E, die steeds in verschillende grijs tinten zijn aangegeven.

3.2.2 Situatie zonder overslag

Opdrukken/afschuiven van toplaag (STMI)

In een situatie zonder overslag kan het mechanisme Microstabiliteit (**STMI**) optreden. Dit mechanisme, waar uitspoelen van zandig materiaal uit de dijk kern onder wordt verondersteld, kan zich alleen voordoen bij zanddijken of bij dijken met een zandscheg aan de binnenzijde van de kering. De bekledingslaag op het binnentalud kan opgedrukt worden of afschuiven door het oplopen van de waterspanning in het dijk lichaam (door infiltratie door het buitentalud of oplopende waterspanningen in de ondergrond), waarna het onderliggende zandige materiaal kan uitspoelen. In het geval van een zandscheg zal aan de buitenzijde veelal een (oude) dijk kern of relatief dikke kleibekleding op het buitentalud aanwezig zijn, waardoor het kweldebiet door de dijk mogelijk zodanig laag is (afhankelijk van de ligging van de (oude) dijk kern, de doorlatendheid van de bekleding en het kleiige kernmateriaal) dat uitspoelen van zandig materiaal niet kan optreden.

3.2.3 Situatie met overslag

De dijk bekleding kan ook bezwijken als er door golfoverslag gedurende een periode water over de dijk stroomt. Het water zal vervolgens afstromen over de kruin en het binnentalud en hierbij deels infiltreren in het dijk lichaam. De verhouding hiertussen is afhankelijk van de eigenschappen van de talud bekleding.

Erosie van grasbekleding (GEKB)

Over het algemeen is door versnelling op het binnentalud de belasting door het afstromende water (uitgaande van een binnentalud zonder zwakke plekken / overgangen en objecten) het grootst aan de onderzijde van het talud net boven de insteek van het maaiveld of de binnenberm. De hier aanwezige bekleding⁴ zal als gevolg van deze belasting kunnen beschadigen. Hierbij kan zowel de grasmat als de onderlaag lokaal bezwijken. Dit bezwijken wordt onder het faalmechanisme Graserosie kruin en binnentalud (**GEBK**) beschouwd.

Opdrukken/afschuiven van toplaag (GABI)

Het water dat afstroomt via kruin en binnentalud infiltreert ook (gedeeltelijk) in de kruin en het talud. Dit kan leiden tot verzadiging en een waterstroom evenwijdig aan het talud door de bekledingslaag. Deze bekledingslaag kan vervolgens afschuiven / opdrukken of er kan uitspoelen van het kernmateriaal door de bekledingslaag optreden. Dit bezwijken wordt onder het faalmechanisme Gras afschuiven binnentalud (**GABI**) beschouwd.

⁴ Uiteraard kan de bekleding ook op een andere plaats bezwijken als daar de sterkte kleiner is dan de belasting, bijvoorbeeld als er een lokale verzwakking (boom, graverij, slechte grasmat, mollengat etc) aanwezig is.

Afschuiving (STBI)overslag)

In de situatie dat, als gevolg van infiltratie door golfoverslag, bovenstaande initiërende mechanismen niet optreden, kan de waterspanning toenemen waardoor de kering instabiel wordt en er grotere cirkelvormige of rechte afschuifvlakken in de kering ontstaan. Deze afschuiving wordt macrostabiliteit gegeven infiltratie als gevolg van golfoverslag (**STBI)overslag**) genoemd. Afhankelijk van de grootte van dergelijke glijvlakken is er sprake van direct falen of zijn ook vervolgmecanismen nodig om tot falen van de kering te komen⁵. Hierbij wordt opgemerkt dat andere initiërende mechanismen kunnen leiden tot een sterke toename van de infiltratie door golfoverslag en hiermee tot een sterke toename van de kans op dit faalmechanisme.

Het is duidelijk dat de kans op het optreden van het initiërende mechanisme (en hiermee de relevantie) afhankelijk is van onder andere:

- geometrie van de kering: kruinhoogte en helling van buiten- en binnentalud;
- opbouw van de kering: kern van klei of zand of aanwezigheid van zandscheg en wel of geen kleibekleding op binnen- en/of buitentalud;
- type hydraulische belasting: grootte en duur van de belasting (waterstand en golven).

Samenvattend kan gesteld worden dat er een grote samenhang is (afhankelijkheid bestaat) tussen de verschillende faalmechanismen. Zo worden drie van de vier initiërende mechanismen gedreven door dezelfde belastinggebeurtenis (overslag) en zijn de mogelijke vervolgmecanismen ook hetzelfde. In de vigerende beoordelings- en ontwerppraktijk is het echter gebruikelijk om de faalmechanismen in afzondering te beschouwen. Door de initiërende mechanismen in samenhang te beschouwen en het ontwerp / de beoordeling te richten op het meest relevante (initiële of juist vervolg-)mechanisme, kan de beoordeling of ontwerpverificatie mogelijk gericht en minder conservatief worden uitgevoerd.

4. Adressering kennisbehoeftes uit projecten

4.1 In welke knopen zitten de kennisbehoeftes?

In deze paragraaf wordt aandacht besteed aan de kennisbehoeftes waar projecten tegenaan lopen als gebruik wordt gemaakt van faalpaden of gebeurtenissenbomen om de overstromingskans beter te benaderen. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de initiërende mechanismen uit de gebeurtenissenboom en de vervolgmecanismen die moeten volgen om tot overstromingsgevolgen te komen. Hoewel het Adviesteam van mening is dat het verstandig is de faalmechanismen in samenhang te beschouwen, is er omwille van de leesbaarheid voor gekozen dit in de volgende paragrafen per mechanisme nader uit te werken.

4.1.1 Opdrukken/afschuiven van toplaag (STMI)

Initiërend mechanisme

Voor STMI worden dezelfde deelfaalmechanismen getoetst als voor GABI, alleen dan voor de situatie zonder significante overslag. Voor STMI geldt dan ook hetzelfde als verderop bij GABI gesteld is.

⁵ Zie ook Rode draden nr. 3 - Werkwijze falen door macrostabiliteit

Aanvullend geldt dat er een geometrische toets beschikbaar is, waarin beoordeeld wordt of uitspoelen leidt tot kruinverlaging. Op basis hiervan kan worden geconcludeerd dat de bijdrage aan de overstromingskans verwaarloosbaar klein is. Andersom kan, als hier niet aan voldaan wordt, niet zonder meer gesteld worden dat dit initiërende mechanisme daadwerkelijk gaat optreden.

Vervolgmechanismen

Na het optreden van een afschuiving van de binnendijkse grasbekleding is in het spoor STMI alleen het vervolgmechanismen *uitspoelen van kernmateriaal door interne waterdrukken* relevant omdat er geen overslag is (zie gebeurtenissenboom in Figuur 2). Hiervoor is alleen een geometrische toets beschikbaar waarin beoordeeld wordt of uitspoelen leidt tot kruinverlaging als wordt gerekend met een gemiddelde taludhelling na uitspoeling van 1:5. Er is geen model beschikbaar om uitspoeling van zand uit de kern te kwantificeren. Dit is een kennisleemte.

4.1.2 Opdrukken/afschuiven van toplaag (GABI)

Initiërend mechanisme

Het mechanisme GABI kan op basis van beslisregels (in bijvoorbeeld een eenvoudige toets) worden beschouwd, waaruit dan blijkt dat de overstromingskans verwaarloosbaar klein is. Andersom kan, als niet aan deze eenvoudige regels voldaan wordt, niet zonder meer gesteld worden dat dit initiërende bezwijkmechanisme daadwerkelijk gaat optreden.

Als niet middels eenvoudige beslisregels aangetoond kan worden dat de bijdrage aan de overstromingskans verwaarloosbaar is, kan een nadere beoordeling of ontwerpverificatie uitgevoerd worden. Afhankelijk van het type dijk – kleidijk, zanddijk met kleibekleding, zanddijk – moeten verschillende deelfaalmechanismen worden nagelopen (opdrukken en afschuiven van de bekleding, uitspoelen van zanddeeltjes door de bekleding). Hiervoor zijn diverse, relatief eenvoudige modellen beschikbaar. Hierbij loopt men in de praktijk tegen de volgende kennisleemtes aan:

- In het BOI zijn geen modellen beschikbaar om de kans op het opdrukken/afschuiven van de toplaag te bepalen. Het is hierdoor niet mogelijk om tot een schatting van de faalkans in de knoop GABI te komen.
- Bij het mechanisme GABI wordt soms een stabiliteitsanalyse met het model Spencer – Van der Meij uitgevoerd om het afschuiven van de bekleding te berekenen (deze suggestie wordt in oude leidraden als ook in bijvoorbeeld de schematiseringshandleidingen van het WBI2017 aangedragen). Het is echter de vraag in hoeverre een dergelijke stabiliteitsanalyse passend is voor GABI. Voor het mechanisme GABI, waarbij een grondwaterstroming door een gestructureerde (in brokken uit elkaar gevallen) kleilaag gaat stromen en hierdoor een potentieel glijvlak zou kunnen ontstaan, lijkt het model Spencer – Van der Meij minder goed te passen dan bij een situatie met een glijvlak door een niet-gestructureerd materiaal. Daarnaast laten de grondeigenschappen van een dergelijke gestructureerde bekledingslaag zich moeilijk vatten in de parameters die voor een stabiliteitsanalyse nodig zijn. Resultaten uit een stabiliteitsanalyse voor dit mechanisme moeten dan ook met de nodige nuance worden bekeken.
- In algemene zin geldt voor alle beschikbare modellen dat de benodigde invoerparameters veelal niet heel eenduidig zijn te bepalen.
 - Kleibekleding op kleidijk:

Het Edelman-Joustra-criterium wordt gebruikt om de stabiliteit tegen afschuiven te berekenen. Bij de toepassing van dit model bestaat veel discussie omtrent het te hanteren grondsterktemodel en de hierbij behorende sterkteparameters (en hoe deze wordt bepaald) maar ook geometrische parameters (welke dikte van de kleilaag moet worden gehanteerd en hoe wordt deze bepaald).

Recent is een masterthesis op de TUDelft afgerond ([21][22]), waarbij het Edelman-Joustra criterium (binnen het faalmechanisme GABI) in meer detail is beschouwd voor de situatie van een kleibekleding op een kern van klei. Hierin zijn de nodige inzichten in dit specifieke criterium verkregen en is vergelijking gezocht met de resultaten van probabilistische stabiliteitsanalyses. Hiermee is een eerste aanzet gegeven voor vervolgonderzoek, waarvoor inmiddels voorstellen zijn gedaan. Er is echter op dit moment nog geen veiligheidsfilosofie, noch een eenduidige methode voor het bepalen van de sterkteparameters.

- Kleibekleding op zandkern / kleidijk met zandscheg en kleibekleding
Voor deze situaties is er weinig discussie over de modellen en rekenregels. Ook hier ontbreken modellen voor het ondersteunen van kansinschattingen. Verder is er veel discussie over de belangrijkste parameter waarmee de berekening wordt gevoed, namelijk de mate van verzadiging van de zandige dijk kern of de zandscheg door infiltratie door overslaand water.

Vervolgmechanismen

Na het optreden van een afschuiving van de binnendijkse grasbekleding moet in ieder geval één van de volgende vervolgmechanismen optreden (zie gebeurtenissenboom in Figuur 2) voordat sprake is van een overstroming:

- uitspoelen van kernmateriaal door interne waterdrukken/-stroming;
- terugschrijdende erosie van het kernmateriaal door overslaand water;
- vervolgfascuivingen.

Uitspoelen van kernmateriaal door interne waterdrukken

Hiervoor is momenteel niet veel beter beschikbaar dan de geometrische toets waarin beoordeeld wordt of uitspoelen leidt tot kruinverlaging als wordt gerekend met een gemiddelde taludhelling na uitspoeling van 1:5. Er is geen model beschikbaar om uitspoeling van zand uit de kern te kwantificeren. Dit is een kennisleemte.

Terugschrijdende erosie

Hiervoor is momenteel nog geen model beschikbaar. Er is zelfs geen eenvoudige beslisregel om te bepalen of dit überhaupt een relevant mechanisme is. Het is evident dat hier een kennisleemte ligt.

Vervolgfascuivingen

Gegeven het ontstaan van een glijvlak, kan met glijvlakberekeningen of vuistregels voor vervolgfascuivingen een berekening uitgevoerd worden. Er kan echter geen kans bepaald worden,

omdat de gekalibreerde veiligheidsrelaties uit het WBI niet toegepast kunnen worden op deze situatie⁶. Tevens is er een belangrijke interactie met terugschrijdende erosie. Vervolgafschuivingen kunnen overigens ook nog optreden nadat het erosieproces door overslag gestopt is, omdat er dan een relatief steil talud resteert wat na/tijdens uitvloeien van de waterspanningen kan afschuiven. Ook hier moet dus nog de nodige kennis ontwikkeld worden.

Met de nu beschikbare modellen kan dus vooralsnog geen onderbouwde inschatting worden gedaan van de aanvullende 'sterkte' uit vervolgprocessen om de bijdrage van het faalmechanisme GABI aan de overstromingskans beter te benaderen.

4.1.3 Afschuiving (STBI|overslag)

Initiërend mechanisme

Voor het mechanisme STBI geldt dat het bepalen van de kans op het initiërende mechanisme in beginsel mogelijk is met de beschikbare stabiliteitsmodellen in het WBI. Dit kan op zowel probabilistische als semi-probabilistische wijze. Voor de semi-probabilistische werkwijze geldt dat het omrekenen van partiële factoren naar faalkansen middels de gekalibreerde relatie uit het WBI voor STBI|geen overslag – een werkwijze die zowel bij ontwerpen als beoordelen gebruikelijk is – een grove benadering van de faalkans oplevert. Het is namelijk maar de vraag of deze voor STBI|geen overslag afgeleide set aan partiële veiligheidsfactoren ook voor STBI|overslag correct is. Voor de STBI-kalibratie is uitgegaan van grote glijvlakken door de diepe ondergrond, waardoor de onzekerheid over de sterkte dominant is. Bij STBI|overslag gaat het om veel oppervlakkiger glijvlakken die hoofdzakelijk door antropogene grondlagen (dijksmateriaal) snijden. Waarschijnlijk is daarom de belasting veel dominanter dan de sterkte van de ondergrond. Los van de vraag of een semi-probabilistische ontwerpverificatie überhaupt wenselijk is, is het dus de vraag of het gebruik van de WBI-kalibratie voor de situatie STBI|overslag passend is.

Voorts lijkt het ontstaan van grote glijvlakken in het dijklichaam nadat als gevolg van golfoverslag het dijklichaam grotendeels verzadigd is geraakt, toch andere kenmerken te hebben dan een groot glijvlak door de diepere ondergrond. Resultaten uit een stabiliteitsanalyse voor dit mechanisme moeten dan ook met de nodige nuance worden bekeken. Ook in deze situatie zal het glijvlak veelal door antropogene grondlagen snijden en ook de grootte van het glijvlak is van een andere orde dan bij de reguliere macrostabiliteitsanalyses (zonder infiltratie) het geval is. Daarnaast geldt dat de benodigde invoerparameters veelal niet heel eenduidig zijn te bepalen. Denk hierbij met name aan de ligging van de freatische lijn, (vooral ook) het waterspanningsverloop met de diepte in relatie tot de mate van infiltratie bij overslag en het bepalen van de sterkte van de onder dagelijkse omstandigheden onverzadigde zone die door infiltratie (gedeeltelijk) verzadigd raakt. Op dit moment wordt onderzoek gedaan naar de sterkte in de onverzadigde zone. De eerste resultaten zijn vastgelegd in een tussenrapport [23] en kunnen benut worden om een meer realistische schematisatie te maken.

Vervolgmechanismen

Hiervoor geldt hetzelfde als voor GABI.

⁶ In deze relaties is namelijk ook de 'kans op de buitenwaterstand' betrokken, terwijl het hier om voorwaardelijke kansen gaat (kans gegeven een eerdere faalgebeurtenis)

4.1.4 Erosie van grasbekleding (GEKB)

Initiërend mechanisme

Voor het mechanisme GEKB geldt dat in het BOI een probabilistisch model beschikbaar is waarmee een faalkansberekening (voor de eerste drie knopen in de gebeurtenissenboom van figuur 2) kan worden uitgevoerd. Hiervoor geldt dat er met name rondom overgangen en knikpunten in de geometrie nog kennisvragen liggen om tot een nauwkeurige kansinschatting te komen. In de basis is de modellering voor het faalmechanisme GEKB echter al veel verder gevorderd dan de andere faalmechanismen. De kennisleemtes voor dit faalmechanisme zijn bekend en worden verder in deze Rode draden daarom niet nader genoemd.

Vervolgmechanismen

Hiervoor geldt hetzelfde als voor GABI.

4.2 Vervolgstappen

Het Adviesteam raadt aan om ontwikkelingen en onderzoeken rondom de bekledingen op het binnentalud in samenhang te beschouwen en te prioriteren op de bepalende knopen in de gebeurtenissenboom. Hier denken we graag in mee.

Gegeven de huidige stand van de kennis zou het goed zijn de volgende stappen op korte termijn te zetten:

- De gebeurtenissenboom [figuur 2] eerst in gezamenlijkheid (door betrokkenen in dit werkveld zoals HWBP, KvK, BOI, Adviesteam) nader uitwerken. Nader onderzoek kan vervolgens mede geprioriteerd worden op de bepalende knopen in de gebeurtenissenboom
- Voor dijken met een **kleibekleding op een kleikern** lijkt veel reststerkte aanwezig na bezwijken van de bekledingslaag. In [17] is een erosiemodel voor deze situatie beschikbaar. Hoewel er nog veel onzekerheden zijn in dit model, zou dit model probabilistisch toepasbaar gemaakt kunnen worden, waarbij de onzekerheden expliciet worden meegenomen. Tevens kan dan ook de belastingduur worden meegenomen. Er is dan in ieder geval een model en de onzekerheden kunnen vervolgens met nader onderzoek verkleind worden. Ook voor **kleidijken met een bekleding op een zandscheg** biedt dit mogelijk inzicht in de reststerkte na bezwijken van de bekledingslaag en erosie van de zandscheg.

Naar de mening van het Adviesteam is er vervolgens tevens aandacht nodig voor de volgende onderwerpen om de kans op een overstroming als gevolg van bezwijken van de bekleding beter in te kunnen schatten:

- Initiërende mechanismen
 - Op dit moment ontbreken modellen om de kans op opdrukken / afschuiven van de bekleding en uitspoelen van zand mee te bepalen.
 - Voor stabiliteit bij overslag geldt dat er nog veel kennisleemtes zijn over de invoerparameters voor het analyseren van dit mechanisme. Dit betreft bijv. de mate van

infiltratie, omgang met de sterkte van het dijksmateriaal en 3D effecten bij kleinere glijvlakken.

- Vervolgmechanismen:
 - Op dit moment ontbreken modellen om de kans op uitspoeling en terugschrijdende (head-cut) erosie te bepalen.
- In algemene zin wordt aanbevolen om voor zowel de initiërende als de vervolgmechanismen eerst de benodigde modelontwikkeling te doen om kansinschattingen mogelijk te maken. Indien gewenst kan daarna aandacht worden besteed aan een bijbehorend veiligheidsformat (faalkansruimte, lengte-effect, faalkansschattingen/partiele factoren etc.)
- Het adequaat kunnen bepalen van de benodigde modelparameters is naar de mening van het Adviesteam essentieel om tot betrouwbare kansinschattingen te komen. Bij veel van de huidige modellen is hier veel discussie over. We bevelen aan allereerst kritisch te beschouwen of deze modellen adequaat zijn of dat er wellicht adequatere modellen toepasbaar zijn en daarnaast aan de modelontwikkeling duidelijke handreikingen voor het bepalen van de parameters te koppelen.
- In iedere beschouwing van de stabiliteit van de bekleding (opdrukken / afschuiven) en het dijklichaam (STBI|overslag) speelt de mate van infiltratie van het overslaand water in de bekleding en het dijklichaam een belangrijke rol. Momenteel zijn er wel modellen, maar er is weinig praktijkervaring waar die modellen op gekalibreerd zijn. Aanbevolen wordt daarom om veldonderzoek uit te voeren naar de mate van infiltratie bij overslag en de invloed die infiltratie heeft op de sterkteparameters van de relevante grondlagen. Wellicht kan dit relatief eenvoudig worden gecombineerd met praktijkproeven naar de erosiebestendigheid van de grasbekleding.
- De reststerkte na falen van de bekleding is met name bij dijken met een kleikern naar verwachting substantieel. Prototype proeven zijn nodig om erosiemodellen te kalibreren en valideren. Gezien de verscheidenheid in erosiebestendigheid tussen kleisoorten is het tevens van belang om een methodiek te ontwikkelen waarmee lokaal verkregen inzichten in erosiegedrag kunnen worden vertaald naar andere dijksecties.

Tot slot wordt opgemerkt dat in dit memo de nadruk ligt op de beschikbare modellen / beslisregels / instrumenten. Dit komt doordat de vragen aan het Adviesteam nagenoeg altijd zijn gebaseerd op de bestaande ontwerppraktijk. In algemene zin willen we daarom opmerken dat het ons verstandig lijkt om de bestaande modellen niet 'voor kennisgeving aan te nemen', maar deze kritisch te beschouwen. Wordt de fysica hiermee afdoende beschreven, zijn de benodigde rekenparameters adequaat te bepalen en is het hiermee (op termijn) mogelijk om tot kansinschattingen te komen?

5. Adviezen Adviesteam / Handelingsperspectief

5.1 Bundeling adviezen tot op heden

In de afgelopen periode heeft het Adviesteam verschillende vragen gekregen die gerelateerd zijn dit onderwerp. De belangrijkste elementen uit deze adviezen zijn hieronder samengevat.

Kies een 'slimme' ontwerp oplossing

In sommige gevallen is het mogelijk om de soms grote onzekerheden 'weg te ontwerpen', bijvoorbeeld door een slimme keuze van de locatie van een (toch al voorziene) stabiliteitswand of het toepassen van

een taludverflauwing of aanleg van een drainage, waardoor het mechanisme niet meer op kan treden of niet meer dominant is. Daarnaast is in sommige gevallen een wat robuustere ontwerp oplossing efficiënter dan een minder robuuste oplossing met een grote beheer- en onderhoudsinspanning. Voor deze situaties kan het uitvoeren van een LCC analyse deze keuze ondersteunen.

In dit licht is het overigens aan te bevelen een eventuele opgave aan de bekleding op het binnentalud vroegtijdig te onderkennen, zodat dit tijdig in het ontwerp betrokken kan worden.

Stel het beslisprobleem centraal en maak onzekerheden expliciet

Op basis van de specifieke situatie zijn vaak de boven- en ondergrenzen van de onzekere parameters wel in te schatten. Door te onderzoeken welke parameterwaarden (bijv. mate van infiltratie, schuifsterkte etc.) nodig zijn om tot een ander besluit of significant ander ontwerp te komen en dit te relateren aan de kansrijkheid om een dergelijke parameter waarde te kunnen onderbouwen, kan tot een handelingsperspectief worden gekomen en kan een besluit worden genomen om deze onzekerheden al dan niet nader te onderzoeken.

Focus op de bepalende faalpaden

In veel gevallen is aannemelijk te maken welk initiërend mechanisme voor de specifieke situatie ontwerpbepalend is. Het is dan ook het meest efficiënt om de ontwerpenergie daarop te richten. Daarnaast is er binnen het faalpad vaak een beperkt aantal knopen bepalend voor de uiteindelijk kans op overstroming. Door die te identificeren en daar het ontwerp op te dimensioneren, kan de complexiteit van het ontwerp vraagstuk beperkt worden.

Maak gebruik van de beschikbare kennis en literatuur

Voor situaties waar het ontwerp van de bekleding op het binnentalud niet ontwerpbepalend is, zijn de modellen en rekenregels uit het OI2014v4 [7], Bijlage III van de wettelijke regeling en de diverse schematiseringshandleidingen in het BOI over het algemeen toereikend voor het maken van het ontwerp. Voor situaties waar de bekleding op het binnentalud bepalend is voor het ontwerp, is het aan te raden om gebruik te maken van de achterliggende kennisbasis om tot een passend ontwerp te komen. Referenties [1] en [11] tot en met [19] (niet uitputtende lijst van relevante onderzoeken en literatuur) kunnen hierbij behulpzaam zijn.

Probabilistische analyses

Voor de ontwerpverificatie van de macrostabiliteit bij overslag wordt vaak gebruik gemaakt van de semi-probabilistische aanpak uit de KPR factsheet [6]. Omdat deze semi-probabilistische aanpak niet gekalibreerd is en/of optimalisatie van het ontwerp gewenst is, worden in sommige projecten probabilistische analyses ten aanzien van macrostabiliteit uitgevoerd. In sommige projecten lijkt de probabilistische aanpak voor de situatie met overslag tot een 'zwaarder' ontwerp te leiden dan de semi-probabilistische aanpak. Ongeacht of met een probabilistische aanpak tot een 'zwaarder' of 'lichter' ontwerp wordt gekomen, wordt het uitvoeren van probabilistische analyses aangemoedigd omdat dit tot een nauwkeurigere inschatting van de faalkans leidt. Hierbij is het wel van belang bij het uitvoeren van probabilistische analyses alle dominante onzekerheden als stochastische variabelen te modelleren. Het toepassen van conservatieve waarden voor parameters die dominant zijn kan leiden tot een onrealistische (te hoge) inschatting van de faalkans.

Onderzoek en praktijkproeven

Om de onzekerheden te verkleinen, is doen van onderzoek en/of het uitvoeren van praktijkproeven in veel gevallen nuttig. Hierbij kan gedacht worden aan:

- Onderzoek (bijv. proefsleuven) om de dikte van de gestructureerde zone te bepalen;
- Onderzoek (bijv. triaxiaalproeven, vinproeven) om de sterkte van de deklaag te bepalen;
- Infiltratieproeven (bijv. infiltratiebak of 'prototypeschaal') om de mate van infiltratie en sterkte van de toplaag bij een bepaald overslagdebiet te bepalen. Dit kan worden ondersteund door waarneming en modellering van de interactie tussen neerslag en de freatische lijn. Ook het uitvoeren van een golfoverslagproef bij verhoogde freatische lijn kan zinvol zijn.
- Modelonderzoek om de duur van de overslagperiode in het hoogwater nauwkeuriger te bepalen.

Zeker bij grootschalige proeven is het vaak noodzakelijk om deze proeven tijdig in het proces in te plannen. Hierbij is een fase- en/of projectoverstijgende aanpak vaak nodig om tot een succesvolle onderzoekscampagne te kunnen komen. Het is daarbij van belang om van tevoren na te denken over hoe lokaal verkregen resultaten op een goede manier vertaald kunnen worden naar andere dijken.

5.2 Praktische wenken voor projecten gegeven de huidige stand van zaken

Voor de korte termijn (lees: gegeven de huidige stand van het instrumentarium) willen we alvast de volgende praktische adviezen aan projecten meegeven:

- Ga in een vroegtijdig stadium na of falen van de bekleding op het binnentalud mogelijk bepalend is voor de scope of het ontwerp van een project
- Werk de gebeurtenissenboom specifiek voor een project uit om te onderzoeken welke knopen bepalend zijn. Het is lastig algemene regels/oplossingen te geven, maar op basis van locatiespecifieke kenmerken is vaak wel te onderbouwen of falen van de bekleding op het binnentalud ontwerpbepalend is. Hierbij kunnen de tips uit paragraaf 5.1 ook behulpzaam zijn. Het is dan wellicht mogelijk toe te redeneren naar de volgende punten:
 - Voor kleibekleding op kleidijken is het aannemelijk dat bij gangbare (niet te steile) taludhellingen het falen van de bekleding op het binnentalud in het rivierengebied geen drager van de versterkingsopgave zal zijn;
 - Voor dijken met een kleikern en zandscheg met kleibekleding kan in sommige gevallen hetzelfde gelden;
 - Het grootste risico zien wij bij zanddijken met of zonder kleibekleding. Hier is sprake van weinig reststerkte en is de sterkte van de bekleding op het binnentalud dus een belangrijke ontwerpparameter die dominant is voor de faalkans van het faalpad.
- Probeer onzekerheden bij het schatten van kansen voor de bepalende knopen in het faalpad gericht te verkleinen, bijvoorbeeld door specifiek (grond)onderzoek of prototypeschaal proeven zoals infiltratieproeven uit te voeren.

6. Literatuur

[1] Calle, ir. E.O.F. (Geodelft). (Maart 2002). Dijkdoorbraakprocessen 720201/39.

[2] Deltares. (2018). Fenomenologische beschrijving Faalmechanismen WBI, mei 2018.

- [3] Deltares. (Mei 2002). Beoordeling binnenwaartse stabiliteit op basis van zoneringsmethode CO-390110/34.
- [4] Expertisenetwerk waterveiligheid (ENW). (27 maart 2009). Technisch Rapport Actuele Sterkte van dijken.
- [5] Kennisplatform Risicobenadering (KPR). (20 december 2018). Factsheet Relevant glijvlak. Afweging ter bepaling glijvlak voor faalmechanisme Macrostabieliteit Binnenwaarts.
- [6] Kennisplatform Risicobenadering (KPR). (Januari 2018). Werkwijzer macrostabieliteit i.c.m. golfoverslag OI2014V4 (concept).
- [7] Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (Februari 2017). Handreiking ontwerpen met overstromingskansen, veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansnormen (OI2014v4).
- [8] Ministerie van Verkeer en Waterstaat en Expertise Netwerk Waterkeren (ENW). (Juli 2007). Leidraad Rivieren.
- [9] Rijkswaterstaat WVL, Unie van Waterschappen, Deltares. (Juni 2020). Handreiking DOT – Groene versie, Deskundigen Oordeel voor de Toets op maat, versie 1.0.
- [10] Technische adviescommissie voor de waterkeringen (TAW). (Maart 1994). Handreiking constructief ontwerpen.
- [11] Achtergrondrapport Ontwerpinstrumentarium 2014, RWS, december 2016
- [12] SBW Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding - Fase 4A Modelontwikkeling Vechtdijk, kenmerk 1201541-000-GEO-0021, juni 2010
- [13] SBW Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding - Fase 4B Predictie Vechtdijk, kenmerk 1201541-000-GEO-0023, juni 2010
- [14] SBW Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding - Fase 4D Evaluatie Vechtdijk, kenmerk 1201541-000-GEO-0021, december 2010
- [15] Factual Report Overslagproeven en afschuifproef Afsluitdijk, Infram, 27 september 2009
- [16] Analyse infiltratieproef IJsseldijk, POVM, 11202663-002-GEO-0002, 22 oktober 2018
- [17] Residual dike strength after macro-instability, WTI 2017, 1207811-013-HYE-0001, Version 1, 23 April 2014, final
- [18] Cover layer stability during wave overtopping, WTI 2017, maart 2015
- [19] Golfoverslag en sterkte binnentaluds van dijken, SBW, 2007
- [20] Rode draad overstroming door dijkerosie, HWBP, 9 juni 2020
- [21] Master thesis: Stability assessment of the landside slope cover on clay flood embankments in the Netherlands, L.G.W. Stenfeld, 15 juni 2021
- [22] Semi-probabilistische analyse afschuiven kleibekleding - Review master-thesis Lars Stenveld, Deltares, 5 november 2021
- [23] Handelingsperspectief schuifsterkte onverzadigde zone, De Innovatieversneller, 21 november 2021

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: Samenhang tussen de verschillende initiële bezwijkmechanismen van de bekleding op kruin en binnentalud van waterkeringen

