

**Datum**

28 februari 2022

Aantal pagina's

1 van 13

Contactpersoon

Alfons Smale

Myron van Damme

Diederik Bijvoet

David-Jan Smeenge

Doorkiesnummer

+31(0)88 335 8208

E-mail

Alfons.Smale@deltares.nl

Onderwerp

Rode draad overstroming door dijkerosie

Dit document is tot stand gekomen door overleg tussen RWS WVL, HWBP en Deltares. Het gaat om een gezamenlijk document met een gezamenlijke visie op de faalmechanismen leidend tot dijkerosie en de faalpaden die als gevolg van dijkerosie tot overstroming kunnen leiden. Doel van dit document is het geven van overzicht over de huidige stand van zaken van de kennis en de kennisleemtes ten aanzien van dijkerosie. Dit document geeft aanknopingspunten voor de communicatie binnen de genoemde organisaties, maar ook met waterkeringbeheerders, over initiatieven voor onderzoek rondom dijkerosie. Met dit document wordt beoogd richting te geven aan de vraag welk onderzoek in welke situatie zinvol is in verband met de impact die het onderzoek kan hebben op het faalpad c.q. de overstromingskans.

Bij het opstellen van plannen van aanpak voor Kennis voor Keringen (KvK), de Kennis en Innovatie Agenda (KIA) of het Strategisch onderzoek van Deltares kan op dit document worden aangesloten. Dat moet helpen om te zien waar raakvlakken zijn of om te voorkomen dat zaken dubbel worden gedaan. Door met plannen van aanpak aan te sluiten op dit document kan ook helder worden aangegeven wat de achtergrond van een onderzoeksvoorstel is. Daarnaast kan het document helpen met het afstemmen van de visies en de onderzoeksprogramma's van RWS (Kennis voor Keringen, KvK), HWBP (Kennis en Innovatie Agenda, KIA) en Deltares (Strategisch Onderzoek).

Uiteraard kunnen er ook andere overwegingen zijn om een onderzoek op te starten in relatie tot dijkversterkingsprojecten. Dat kan zijn vanuit een LCC-benadering, duurzaamheid, CO₂-reductie et cetera. In dit document wordt alleen ingegaan op kennis en kennisleemtes ten aanzien van dijkerosie in de context van de overstromingskansbenadering en de faalpaden-benadering.

Continue worden zowel bij Kennis voor Keringen als HWBP KIA en het SO programma van Deltares diverse onderzoeksvoorstellen ingediend. Deze voorstellen hebben vaak betrekking op verbetering van een individuele schakel in de keten van gebeurtenissen die leidt tot een overstroming. Een keten van gebeurtenissen die tot overstroming leidt wordt ook wel een faalpad genoemd. Om de voorstellen op elkaar af te stemmen en ten behoeve van de prioritering van onderzoeksvoorstellen is het van belang om de onderzoeken in de keten te plaatsen. Het overzicht dat hieruit volgt, geeft ook inzicht in relevante kennisleemten die nog niet in de onderzoeksprogramma's worden opgepakt.

De doelgroep van dit memo zijn in eerste instantie experts van de bovengenoemde 3 organisaties die een goede achtergrondkennis van de mechanismen leidend tot dijkerosie hebben.

De rode draad is tot stand gekomen door eerst de keten van gebeurtenissen die leiden tot een overstroming door dijkerosie te beschouwen. De kennis en kennisleemtes die voor ieder van deze gebeurtenissen relevant is, is gecategoriseerd al naargelang die betrekking heeft op: theorie, model, ontwerp/realisatie, en implementatie.

Keten van gebeurtenissen overstroming door dijkerosie

Verschillende faalpaden waarbij dijkerosie tot overstroming leidt kunnen worden geïnitieerd:

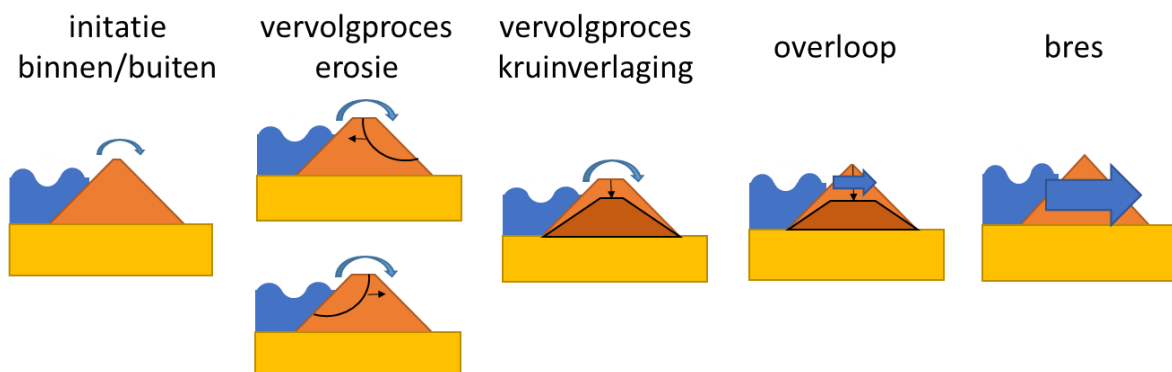
1. Falen toplaag harde en zachte bekleding **buitentalud** leidt tot overstroming
 - a. Falen harde of zachte bekleding
 - b. Falen **overgangsconstructie**
 - c. Falen **overgang** harde en zachte bekleding **buitentalud**
2. Falen toplaag harde en zachte bekleding kruin en **binnentalud** leidt tot overstroming
 - a. Falen harde of zachte bekleding
 - b. Falen **overgangsconstructie**
 - c. Falen **overgang** harde en zachte bekleding **kruin en binnentalud**

Voor de verschillende faalpaden “overstroming door dijkerosie” kan de onderstaande generieke keten van gebeurtenissen worden geschetst. De keten van gebeurtenissen bestaat uit:

- Initiatie van schade (ofwel buiten talud ofwel kruin / binnentalud) door golfaanval of overloop
- Vervolgproces: erosie van het dijklichaam (voortschrijdend/terugschrijdend of ondiepe afschuivingen) leidend tot kruinverlaging
- Kruinverlaging door overslag tot overloop
- Kruinverlaging door overloop
- Bresgroei

Opgemerkt wordt dat in de bovenstaand beschreven keten geen noodmaatregelen/herstel zijn benoemd. Noodmaatregelen kunnen de keten doorbreken, maar zijn nu nog buiten beschouwing gelaten.

Een beschrijving van deze keten van gebeurtenissen is nader uitgewerkt in bijlage 1.



Figuur 1 Keten van gebeurtenissen dijkerosie

In het kader van de prioritering van onderzoeksvragen voor Kennis voor Keringen is op basis van de keten van gebeurtenissen nagegaan welke fasen (initiatie, of vervolgproces) dominant is voor de overstromingskans. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen 6 archetypen van dijken/watersystemen. In onderstaande tabel zijn de resultaten hiervan weergegeven. Uiteraard zijn er nog vele variaties en uitzonderingen te identificeren, dit is slechts een versimpeling van de situatie “in het veld”.

	Zanddijk met toplaag (bekleding) of dijk met zandkern	Kleidijk of dijk met kleikern
Kust	- Initieel mechanisme. Falen van de bekleding (dus inclusief kleilaag) - Vervolgproces (verhouding hangt af van de belastingduur)	- Initieel mechanisme en - Vervolgproces (verhouding hangt af van golfcondities)
Meer	- Initieel mechanisme. Falen van de bekleding (dus inclusief kleilaag) - Vervolgproces (verhouding hangt af van golfcondities)	- Vervolgproces + initieel
Rivier	- Vervolgproces + initieel	- Vervolgproces + initieel

Tabel 1 Aanname van de dominante fasen uit de keten van gebeurtenissen bij overstroming door dijkerosie (De eerst beschreven fase is dominant de tweede is daaraan ondergeschikt.)

Huidige stand van zaken kennis rondom dijkerosie

De huidige stand van zaken rondom kennis van dijkerosie (initieel mechanisme en vervolgproces) kan worden geschetst aan de hand van theorie rondom kennis en innovatieontwikkeling. Voordat een nieuw idee in de praktijk wordt toegepast zijn een aantal fasen te onderscheiden.

De TRL onderscheid 9 fasen en de handreiking innovaties 5. In onderstaande figuur zijn de fasen weergegeven. In de eerste fasen wordt gecontroleerd of een idee correct is en wordt de theorie ontwikkeld, in de tweede fase worden vanuit de theorie modellen en instrumenten opgesteld welke in de derde fase toepasbaar worden gemaakt voor de relevante omstandigheden en uiteindelijk geïmplementeerd. Elke fase heeft eigen kenmerken en vraagt een andere aanpak. Na elke fase vindt een go no-go beslissing plaats. In de handreiking innovaties is het ontwikkelproces van kennis en innovaties voor waterveiligheid beschreven.

TRL	kennis	product	
1	Concept van technologie is beschreven basisprincipes zijn bekend	Geobserveerd gedrag vastgelegd	theorie
2	Het concept is uitgewerkt Theorie beschreven	Hypothese geformuleerd	
3	Werking concept aangetoond Model beschikbaar	1 ^e bewijs van functioneren vastgelegd	ontwikkel
4	De technologie is gevalideerd Toepasbaarheid model is bekend	Prototype getest op laboratoriumschaal	
5	De technologie is getest Veiligheidsformat uitgewerkt	Valisatie onderzoek uitgevoerd (maakbaarheids-, grote schaalproef)	ontwerp/realisatie
6	De werking is gedemonstreerd Groene versies van tools beschikbaar	Pilot full scale	
7	De technologie is geïntegreerd in Best practices	Full scale toepassing in praktijk	implementatie
8	De technologie presteert naar behoren Geïntegreerd in instrumentarium	Werking naar behoren, praktijkhandreikingen opgesteld	
9	Klaar voor toepassing	Klaar voor toepassing	

Figuur 2 Fasen kennis- en innovatieontwikkeling Dijkerosie

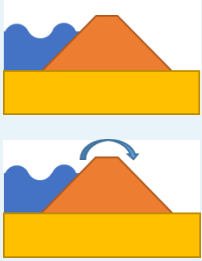
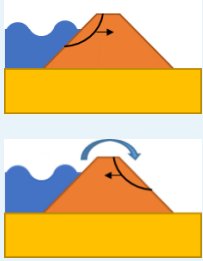
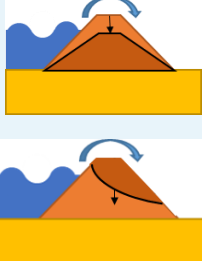
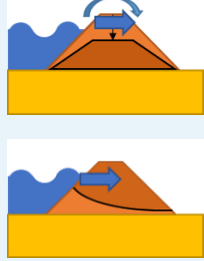

TRL 1	De eerste fase wordt gekenmerkt door fundamenteel onderzoek. De basisprincipes van het idee worden onderbouwd en er worden aannames over de werkingsprincipes van de theorie gedaan. Hier is echter nog geen experimenteel bewijs voor beschikbaar.
TRL 2	De theorie en het mogelijke toepassingsgebied worden geformuleerd
TRL 3	De concepten / theorie worden gevalideerd met een 'proof of concept' als resultaat. In dit geval betreft het proof of concept de formulering van een model
TRL 4	Het proof of concept (model) wordt (met laboratoriumproeven) gevalideerd.
TRL 5	Het model wordt getest en gevalideerd in een relevante omgeving. Gedacht kan worden aan full scale proeven.
TRL 6	De toepassing van het model wordt met een pilot in een relevante omgeving gedemonstreerd. Het model is nog niet volledig gekalibreerd (fine getuned) voor de operationele omgeving. Met behulp van deze demonstratie wordt het technisch werkingsprincipe aangetoond
TRL 7	Het model wordt afgeregeld op de verschillende toepassingsgebieden
TRL 8	Het model presteert naar behoren, software wordt gereleased en documentatie (handleidingen, handreikingen, achtergronddocumentatie) worden afgerond.
TRL 9	Model en achterliggende kennis is geïmplementeerd in basisinstrumentarium en wordt gebruikt voor beoordelen en ontwerpen van waterkeringen.

Tabel 2 TRL niveaus, vertaald naar kennisontwikkeling dijkerosie

Nieuwe (generieke) kennis landt uiteindelijk in een basisinstrumentarium waarmee veiligheidsanalyses voor beoordelen en ontwerpen kunnen worden uitgevoerd. Voor dijkerosie bestaat het basisinstrumentarium uit de volgende instrumenten:

- Software met bijbehorende handleidingen
- Schematiseringshandreiking
- Technische Leidraden met achtergrondinformatie

Op dit moment is de theorieontwikkeling rondom van het fysische proces, rondom vervolprocessen, niet accuraat genoeg en is het rekenmodel van het initieel mechanisme nog niet voor alle archetypen en relevante omstandigheden toepasbaar. In onderstaande tabellen zijn de huidige stand van zaken en in het verlengde daarvan de kennishiaten weergegeven:

Overstroming door dijkerosie	Initiatie:	Vervolprocessen:			
					
	<p>1a. Schade bekleding buitentalud door golfaanval</p> <p>1b. Schade bekleding kruin en binnentalud door golfoverslag</p>	<p>2a. Erosie door golfaanval</p> <p>2b. Erosie door golfoverslag</p>	<p>3. Kruin-verlaging</p>	<p>4. Overloop</p>	<p>5. Bresgroei</p>
<p>Narratief</p>	<p><i>Golfaanval op buiten talud, kruin of binnen talud veroorzaken schade aan bekleding en/of overgangen</i></p>	<p><i>Door de schade aan de bekleding kan erosie van de toplaag en kernmateriaal plaatsvinden</i></p>	<p><i>Bij doorgaande erosie ontstaat een kruinverlaging die de hoeveelheid overslag beïnvloed</i></p>	<p><i>Bij kruinverlaging onder de buitenwaterstand loopt het water over de dijk</i></p>	<p><i>De bres groeit in de lengterichting van de waterkering</i></p>

A. Relevante factoren/kennis:

<p>Bepalende factoren</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Belasting en sterkte bekledingen: - Combinaties waterstanden, golven, verloop van de storm en belastingduur - Grasbekleding: graskwaliteit en kwaliteit toplaag - Asfaltbekleding: dikte en sterkte - Steenzetting: dikte en gewicht - Vertaling HB naar interne belasting: - Stroomsnelheid als functie van externe HB en geometrie en ruwheid van dijklichaam. - Stijgsnelheid freatische lijn (ook in relatie met andere mechanismen zoals macro-stabiliteit) - Sterkte overgangconstructie 	<ul style="list-style-type: none"> - Dikte en sterkte deklaag - Combinaties waterstanden, golven, verloop van de storm en belastingduur - Erosie-bestendigheid en erosiegedrag kernmateriaal 	<ul style="list-style-type: none"> - Combinaties waterstanden, golven, verloop van de storm en belastingduur - Vertaling HB naar interne belasting: - Stroomsnelheid - Stijgsnelheid freatische lijn - Erosie-bestendigheid kernmateriaal 	<ul style="list-style-type: none"> - Erosie-bestendigheid kernmateriaal - Combinaties waterstanden en belastingduur - Volume dijk 	<ul style="list-style-type: none"> - Erosie-bestendigheid kernmateriaal - Combinaties waterstanden en belastingduur - Sterkte maaiveld - Aanwezigheid voorland - Polderpeil - Uniformiteit dijkmateriaal - Verhang - Kombagerend vermogen - Getij
<p>Theorie (model)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Gras: cumulatieve overbelastings-benadering - Harde bekleding: traditionele empirische relaties 	<ul style="list-style-type: none"> - Kliferosie (terugschrijdende erosie) - Erosie/afslag buitentalud (voortschrijdende erosie) 	<ul style="list-style-type: none"> - Voort- en terugschrijdende erosie in relatie met andere mechanismen zoals macrostabiliteit 	<ul style="list-style-type: none"> - Voort- en terugschrijdende erosie 	
<p>Model</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Stroomsnelheid 	<ul style="list-style-type: none"> - Stroomsnelheid 	<ul style="list-style-type: none"> - Tijdsafhankelijkheid 		

parameters	- Tijdsafhankelijkheid - Sterkte gras	- Tijdsafhankelijkheid			
Toepassings-gebieden	- Coëfficiënten Klei- en zanddijken - Coëfficiënten Overgangen	- Kleidijken - <i>Zanddijk minder relevant</i>	- Kleidijk - <i>Zanddijk minder relevant</i>		
Implementatie	- Keuze invloeds-coëfficiënten				

B. Kennisleemtes

Theorie	- Haalbaarheid beschrijving falen harde belastingen met minersom. - Consensus over theorie achter de stabiliteit teenconstructies - Aanscherpen beschrijving belastingen o.b.v. lange termijn statistiek - Consistente beschrijving belastingen op buitentalud, kruin, en binnentalud - Invloed van (on)diepte op belasting - Invloed van (gecombineerde) ruwheid, bermen, schuine golven en ondiepte - Sterkte van asfalt geproduceerd op lagere temperatuur. - Hoe kunnen de effecten van graverij worden verdisconteerd in de beoordeling	- Bezwijkproces deklaag onder bekleding - Verandering belastingen bij geërodeerde dijk - Vaststellen erosieparameters per kleisoort	- Initiatie van macro/micro-stabiliteit door erosie	- Superkritische stroming en vertaling daarvan naar (schuif)spanningen - Realiteitscheck tussen aangenomen sterkte en bandbreedte onzekerheden	- Superkritische stroming en vertaling daarvan naar (schuif)spanningen - Realiteitscheck tussen aangenomen sterkte en bandbreedte onzekerheden
Model	- Aanscherping cumulatieve overbelastings-benadering door onderzoek naar dominante belasting-parameters - Sterkte teenconstructie bepalen voor steenzetting - Probabilistisch rekenmodel voor GABI/STMI/GABU	- Bepaling van schuif- en piekspanningen - Verwerking in erosierelaties - (Model)-onzekerheden in erosiegedrag	(Model)-onzekerheden in erosiegedrag		- Invloed tijdsafhankelijkheid erosiesnelheid bij constante belastingen door een bres nader vaststellen
Toepassing	- Aanscherping coëfficiënten voor: - Overgangen - Gras op zand	- Toepassingsgebied erosiemodel uitbreiden andere grondopbouw en/of overgangen		- Rivieren: acceptabel risico bij voldoende komberging	
Implementatie	- Aansluiting werkprocessen/beschikbare data bij beheerders - Gebruiksvriendelijkheid verbeteren	- Aansluiting werkprocessen met faalpaden bij beschikbare data bij beheerders	- Aansluiting werkprocessen met faalpaden bij beschikbare data bij beheerders		

C. Onderzoekvoorstellen

Theorie	- Ketenbeschouwing dijkerosie (FP2)	- Erosierelatie klei	- Reststerkte BI (DE1)	- Reststerkte BI (DE1)	- Reststerkte BI (DE1)
----------------	-------------------------------------	----------------------	------------------------	------------------------	------------------------

	<ul style="list-style-type: none"> - Strategie hydraulische randvoorwaarden (DSO1) o.a. inventarisatie voor benodigde parameters cumulatieve overbelastingsmethode - Strategie waterbeweging op talud (DSO3) - Meerjarige Veldmetingen Eems Dollard (HWBP – NZV) 	<ul style="list-style-type: none"> binnentalud (DE1) - Koppeling met stabiliteit (SV2) - Ketenbeschouwing dijkerosie (FP2) - Strategie vervolgmecanismen dijkerosie (DSO2) - 	<ul style="list-style-type: none"> - Ketenbeschouwing dijkerosie (FP2) - Strategie vervolgmecanismen dijkerosie (DSO2) 	<ul style="list-style-type: none"> - Ketenbeschouwing dijkerosie (FP2) - Strategie vervolgmecanismen dijkerosie (DSO2) 	<ul style="list-style-type: none"> - Ketenbeschouwing dijkerosie (FP2) - Verkenning Bresgroei (DSO4)
Model	<ul style="list-style-type: none"> - Windstatistiek en basispeilen (HBO1) - Tijdsafhankelijkheid (HBO1, HBO2, HBO6) - Combinatie bekleding mechanismen (HWBP – ZZZ & DE4) - Verbreden theorie van cumulatieve overbelasting (HB5) - Toepassing OpenFoam als onderzoeksmiddel t.b.v. bepalen stroomsnelheden (DSO5) - Consistente beschrijving stroomsnelheden grasbekledingen in Cumulatieve overb. Meth. (DE3) 	<ul style="list-style-type: none"> - Tijdsafhankelijkheid (HBO2) - Randvoorwaarden kust (HBO1) - GEBU-tool (HWBP – WSRL & NZV) - Erosiemodel klei binnentalud (Polder2C's) - Kansverdeling kritiek overslagdebiet fragmentarische zode (DE 9) 			
Toepassing	<ul style="list-style-type: none"> - Kalk en klei (HWBP – POV DGG) - Overgang hard-zacht (HWBP-NZV & DE3) - Coëfficiënten overgangen (HWBP-ZZZ & DE3) - Effect modelonzekerheden (HB3) - Nieuwe pilot: volledige cases beoordeling waterkering (FP1) - Future dikes (HWBP – WSRL) - Graverij door dieren (VOW1) - Prestatie eisen waterbouwasfaltbeton (VOW2) - Invloed waterdiepte op golfoverslag (VOW3) - Parameters stroomsnelheden dijktalud (VOW4) 	<ul style="list-style-type: none"> - Erosie Overgang hard/zacht (HWBP-NZV) - Erosie van gras en onderlagen bij overgangen (HWBP - ZZZ) - Reststerkte BU (DE2) - Nieuwe pilot: volledige cases beoordeling waterkering (FP1) - Onderzoek geschiktheid kwelderklei (HWBP – WSHA) - Onderzoek Gras en Klei: Continuering monitoring erosiebestendigheid (HWBP – WSHA) - Erosiebestendigheid van de kleikern (HWBP – NZV) - Koppelen uitkomsten kleinschalige proeven aan golfoverslagproeven (DE1 en Polder2C's) 	<ul style="list-style-type: none"> - Reststerkte BU (DE2) - Nieuwe pilot: volledige cases beoordeling waterkering (FP1) 		

Implementatie	<ul style="list-style-type: none">- Ontwikkeling dijkerosiemodule (BOI)- Implementatie cumulatieve overbelasting-methode GEKB (BOI)- Duinerosie (BOI)- Technische leidraden- Schematiserings-handleidingen- Ontwerphandleidingen- Westerschelde Hansweert: Zetsteen van baggerspecie (HWBP – WSSS)- Afleiden kansverdelingen kritiek overslagdebiet voor vaststellen dominant faalpad.	<ul style="list-style-type: none">- Idem initiatie- Reststerkte WoS (HWBP-WSRL)	<ul style="list-style-type: none">- Idem initiatie	<ul style="list-style-type: none">- Idem initiatie	
----------------------	---	--	--	--	--

Rode draden

Wanneer het kennisoverzicht naast tabel 1 met dominante gebeurtenissen wordt gehouden ontstaat een beeld van de gebiedsspecifieke aspecten die relevant zijn voor de overstromingskans. Hieruit kunnen de rode draden voor onderzoek naar het mechanisme Dijkerosie worden getrokken.

	Wat is meest belangrijk
Basis (Alle gebieden)	<ul style="list-style-type: none">- Basis op orde- Kritieke belasting in termen van duur en hoogte voor falen grasmat/bekleding- Erosie (terugschrijdend of voortschrijdend) van onderlagen/kern- Interactie met andere mechanismen (bv macro-instabiliteit na erosie)
Rivierengebied	<ul style="list-style-type: none">- Vanwege de over het algemeen beperkte golfaanval is hier bepaling van sterkte van de grasmat (en overgangsconstructies/NWOs van belang)- Eveneens vanwege beperkte golfhoogte is erosie van onderlaag en kern een bepalende factor in de faalkans
Meren	<ul style="list-style-type: none">- Vanwege hogere golven is vooral het tijdsverloop van waterstand en golven leidend tot falen bekleding van belang- Stroomsnelheden behorende bij golfoploop en golfoverslag bepalen de faalkans: deze interne belasting is samen met de invloed van overgangen/NWOs van belang.
Kust- en estuaria	<ul style="list-style-type: none">- Vanwege hogere golven is vooral het tijdsverloop van waterstand en golven leidend tot falen bekleding van belang- Stroomsnelheden behorende bij golfoploop en golfoverslag bepalen de faalkans: deze interne belasting is samen met de invloed van overgangen/NWOs van belang.

Tabel 1 Gebiedsspecifieke belangrijke aspecten voor dijkerosie

Gelet op de lopende ontwikkelingen in onderzoek en projecten kan een voorlopige prioritering in de belangrijke aspecten geschetst worden.

Gebied	Rode lijn	Lopende/ geagendeerde kennisontwikkeling	Resterende aspecten urgent	Lange termijn
Basis (Alle gebieden)	Scherpere bepaling faalkans toplaag door: - bepaling interne belasting - bepaling invloed overgangconstructies - bepaling erosiebestendigheid toplaag en kern	<p>KvK:</p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>Theorie</u>: Ketenbeschouwing dijkerosie (FP2) - <u>Theorie/model</u>: Reststerkte binnentalud (DE1, Polder2C's) - <u>Theorie/model</u>: Verbreden toepasbaarheid erosietools (DE2) - <u>Theorie/model</u>: Tijdsafhankelijkheid (HB1, HB2, HB6) - <u>Model</u>: Combinatie bekleding mechanismen (DE4) - <u>Model</u>: Verbreden theorie van cumulatieve overbelasting (HB5) - <u>Model</u>: Consistente beschrijving snelheden op bekleding GEBU en GEKB - <u>Toepassing</u>: Coëfficiënten overgangen (DE3) - <u>Toepassing</u>: Effect modelonzekerheden (HB3) - <u>Model</u>: kalibratie kleinschalige erosie tests met grootschalige erosietests <p>BOI:</p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>Implementatie</u>: cumulatieve overbelasting-methode GEKB (BOI) <p>HWBP:</p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>Toepassing</u>: Kalk en klei (HWBP-POV DGG) - <u>Toepassing</u>: <i>Future Dikes (bloemrijke dijken)</i> (HWBP-WSRL) - <u>Toepassing</u> <i>Minerale toeslag in klei</i> (HWBP-ZZL) <p>Strategische Onderzoek</p> <ul style="list-style-type: none"> - strategie hydraulische randvoorwaarden (DSO1) - strategie vervolgmecanismen dijkerosie (DSO2) - strategie waterbeweging op talud (DSO3) - verkenning bresgroei (DSO4) - toepassing OpenFoam in oploopzone (DSO5) <p>KPP-Versterking Onderzoek Waterveiligheid (VOW)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Graverij door dieren (VOW1) - Beoordelingsmethodiek OSA (VOW2) - Invloed waterdiepte op golfoverslag (VOW3) - Parameters stroomsnelheden dijktaalud (VOW4) 	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Theorie</u>: Kliferosie (terugschrijdende erosie) - <u>Theorie</u>: Erosie/afslag buitentalud (voortschrijdende erosie) - <u>Theorie</u>: Voort- en terugschrijdende erosie in relatie met andere mechanismen zoals macrostabiliteit - <u>Implementatie</u>: Uniformiteit dijkmateriaal - <u>Theorie</u>: Superkritische stroming en vertaling daarvan naar (schuif)spanningen - <u>Theorie</u>: Initiatie van macro/micro-stabiliteit door erosie - <u>Model</u>: Bepaling van schuif- en piekspanningen - <u>Model</u>: (Model)-onzekerheden in erosiegedrag - <u>Toepassingsgebied</u>: erosiemodel uitbreiden andere grondopbouw en/of overgangen - <u>Model</u>: beoordelingsmethodiek teenconstructies - <u>Ter discussie</u>: losschietend water / plonsbelasting - <u>Model</u>: beoordelingsmethodiek GABI 	Probabilistische bepaling faalkans keten van gebeurtenissen

Gebied	Rode lijn	Lopende/ geagendeerde kennisontwikkeling	Resterende aspecten urgent	Lange termijn
Rivierengebied	Scherpere bepaling faalkans door meenemen reststerkte na falen grasmat (binnen- en buitentalud)	KvK: <ul style="list-style-type: none"> - <u>Toepassing</u>: Coëfficiënten overgangen (DE3) - <u>Toepassing</u>: Kansverdeling kritiek overslagdebiet voor een fragmentarische zode. HWBP: <ul style="list-style-type: none"> - <u>Implementatie</u>: Reststerkte WoS (HWBP-WSRL) - <u>Theorie/model/toepassing</u>: (HWBP-NZV) <i>Erosiebestendigheid buitentalud en kleikern</i> 		
Meren	Scherpere bepaling faalkans door: <ul style="list-style-type: none"> - introductie tijdafhankelijkheid - benodigde hoogte overgang harde/zachte bekleding 	KvK: <ul style="list-style-type: none"> - <u>Theorie/model</u>: Overgang hard-zacht (HWBP-NZV & DE3) - <u>Toepassing</u>: Werkprocessen interactie hydraulische belastingen dijkerosie (HB3) HWBP: <ul style="list-style-type: none"> - <u>Theorie/model</u>: Overgang hard-zacht (HWBP – NZV & DE3) - <u>Toepassing</u> <i>Teenconstructies (HWBP-ZZL)</i> - <u>Theorie</u>: <i>Gebogen buitentalud steenbekleding (HWBP-ZZL)</i> - <u>Theorie/model/toepassing</u>: (HWBP-NZV) <i>Erosiebestendigheid buitentalud en kleikern</i> 		
Kust- en estuaria	Scherpere bepaling faalkans door: <ul style="list-style-type: none"> - introductie tijdafhankelijkheid - benodigde hoogte overgang harde/zachte bekleding - 	KvK: <ul style="list-style-type: none"> - <u>Theorie/model</u>: Overgang hard-zacht (HWBP-NZV & DE3) - <u>Model</u>: Nieuw belastingmodel kust voor dijken en duinen (HB7) HWBP: <ul style="list-style-type: none"> - <u>Theorie/model</u>: erosie kleilaag bij overgang hard-zacht (HWBP –NZV & DE3) - <u>Theorie/model</u>: erosie bij flauwe taluds en hogere golven (HWBP-H&A, brede groene dijk) - <u>Toepassing</u> <i>Teenconstructies (HWBP-ZZL)</i> - <u>Theorie</u>: <i>Gebogen buitentalud steenbekleding (HWBP-ZZL)</i> - <u>Theorie/model/toepassing</u>: (HWBP-NZV) <i>Erosiebestendigheid buitentalud en kleikern</i> 		

Recente ontwikkelingen ten aanzien van implementatie nieuwe kennis

Vanuit de rode draden zijn verschillende projecten opgestart en uitgevoerd om de kennisvragen geschetst in dit document te beantwoorden. Hieronder wordt een korte samenvatting gegeven van de items waarvoor ten tijde van het opstellen van deze versie van de rode draden aanvullende informatie beschikbaar was. Meer informatie aangaande deze onderzoeken (en de resultaten) kan worden verkregen bij HWBP-DIV, RWS-Kennis voor Keringen of Deltares-Strategisch Onderzoek.

We onderscheiden in het overzicht van actuele ontwikkelingen twee hoofd categorieën; (i) onderwerpen gerelateerd aan de keten van gebeurtenissen leidend vanaf Dijkerosie tot falen en (ii) onderwerpen gerelateerd aan specifieke knopen mechanismen binnen individuele faalpaden. Bij het opstellen van deze versie van de rode draden blijken er veel ontwikkelingen te zijn ten aanzien van individuele knopen en beperkte ontwikkelingen ten aanzien van het meer overkoepelende faalpaden analyses.

Faalpadanalyses/gebeurtenissenbomen:

1. In het kader van Kennis voor Keringen wordt gewerkt aan de ontwikkeling van zogenaamde knopenkaarten. De knopenkaarten hebben tot doel om een beeld te schetsen van de relevantie van het meenemen van vervolprocessen. Daarnaast wordt een overzicht gegeven van de instrumenten beschikbaar voor het kwantificeren van de kansbijdrage van vervolprocessen. De knopenkaarten worden opgesteld voor Dijkerosie, Interne Erosie en Stabiliteitsverlies. Status: lopend
2. In het Kader van Kennis voor Keringen wordt gewerkt aan een case waarbij verschillende aanscherpingen van de overstromingskans worden uitgewerkt. Het gaat hier in eerste instantie om het in rekening brengen van de afhankelijkheden tussen mechanismen en doorsnedes en in tweede instantie mogelijk het meenemen van vervolprocessen. Status: lopend.

Aanscherping instrumenten/rekenregels met betrekking tot Dijkerosie:

1. Door HWBP/WDOD zijn proeven uitgevoerd om de erosie bestendigheid van gras op zand in te schatten. De bevindingen zijn zodanig dat minder dijkversterking nodig is langs delen van de Vecht en de IJssel. Het betreft hier inzichten met betrekking tot de sterkte van gras zoals benodigd voor het beoordelen/ontwerpen van de mechanismen GEKB en GEBU. Status; afgerond
2. Door HWBP/WDOD zijn proeven uitgevoerd om de erosie bestendigheid van gras op het traject Zwolle-Olst in beeld te brengen. Het betreft een dijk met onderlagen welke niet (volledig) uit klei bestaat. Inzichten van deze proeven leiden tot een aanscherping van de sterkte van de grasmat zoals gehanteerd in de mechanismen GEKB en GEBU. Status: afgerond.
3. Door Zuiderzeeland is een aanpak ontwikkeld waarbij de mechanismen GEKB en GEBU gecombineerd zijn. Hierbij zijn effectief de volgende aspecten aangescherpt: (i) zuivere cumulatieve overbelasting methode voor GEKB in plaats van kritieke overslagdebieten, (ii) mogelijkheid voor probabilistische analyse GEBU-oploop en GEBU-klap, (iii) scherpere bepaling hydraulische randvoorwaarden voor GEBU ten opzichte van de nu gehanteerde Q-variant en (iv) mogelijkheid om via een foutenboom de mechanismen GEKB, GEBU-oploop en GEBU-klap in gezamenlijkheid te beschouwen. Deze vier aspecten zorgen voor

een aanscherping van de benodigde kruinhoogte en benodigde hoogte van de harde bekleding. Status: afgerond.

4. Onderzoek in de Deltagoot, aangevuld met numerieke berekeningen, voor waterschap Noorderzijlvest en Wetterskip Fryslân heeft geleid tot een nieuwe rekenmethode voor het ontwerpen en beoordelen van de kleibekleding met gras op het boventalud. Dit leidt ertoe dat de overgang van de harde bekleding naar de grasbekleding op een lager niveau dan voorheen kan komen te liggen. Status: loopt.
5. Het HWBP heeft een tool ontwikkeld waarmee de kans op een overstroming als gevolg van falen grasmat (GEBU) en vervolgerosie bepaald kan worden. Het betreft een tool waarbij de eerder opgedane inzichten bij Deltagoot proeven zijn geïmplementeerd in een probabilistische tool. Inmiddels is er een prototype beschikbaar voor het riveirengedebied en wordt gewerkt aan een versie voor de kust (waarbij ook de invloed van een harde bekleding wordt meegenomen). Status: loopt
6. Met Deltagootproeven in het kader van de POV-Waddenzeedijken met Noorse Steen, die niet is ingegoten met gietasfalt of beton, is vastgesteld dat de oude rekenmethode onveilige resultaten geeft. De nieuwe rekenmethode wordt in 2022 geïmplementeerd in Steentoets. Status: loopt.
7. Met Deltagootproeven in het kader van de POV-Waddenzeedijken met een steenzetting met een dichte overgangsconstructie in de golfklapzone, zoals vaak langs de Waddenzee voorkomt, is vastgesteld dat Steentoets onnodig conservatieve resultaten geeft. Een nieuwe rekenmethode wordt in 2022 geïmplementeerd in Steentoets, waardoor steenzettingen scherper kunnen worden beoordeeld en ontworpen. Status: loopt.
8. In het kader van de renovatie van de asfaltbekleding (WAB) op de Lauwersmeerdijk zijn voor Wetterskip Fryslân Deltagootproeven uitgevoerd met 50 jaar oud asfalt. Het is gebleken dat dit asfalt sterker is dan volgens de huidige rekenmethodes, mits de freatische lijn voldoende laag blijft. Als de freatische lijn onder het asfalt in de buurt komt van de buitenwaterstand, is de stabiliteit juist veel lager dan volgens de huidige rekenmethodes. In WBI-2017 was hier al een waarschuwing voor opgenomen, maar nu is er een formule waarmee het maximaal toelaatbare niveau van de freatische lijn kan worden berekend. Status: afgerond.
9. In opdracht van het Wetterskip Fryslân is er onderzoek gedaan naar de bijdrage van een granulaire onderlaag onder een asfaltbekleding (WAB). Het toepassen van een granulaire onderlaag maakt het mogelijk om de asfaltbekleding beter te verdichten tijdens de aanleg, waardoor de levensduur flink verlengd kan worden. Daarnaast draagt het bij aan de sterkte van het asfalt en kan daardoor een dunnere asfaltlaag worden toegepast. Tenslotte wordt het onderhoud en beheer van de asfaltbekleding eenvoudiger, omdat scheuren in het asfalt niet meer zo makkelijk leiden tot het uitspoelen van het zand van de ondergrond. Er is een rekenmethode ontwikkeld voor het bepalen van de laagdikte van het asfalt waarin de invloed van de granulaire onderlaag is verdisconteerd. Status: afgerond.