Memo

Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Deltares

HWBP
voor sterke dijken

Datum
04 maart 2024

Aantal pagina's
1 van 13

Contactpersoon
Alfons Smale
Myron van Damme
Diederik Bijvoet
Jasper van de Hoef

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, CO_2-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.

Continu 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:

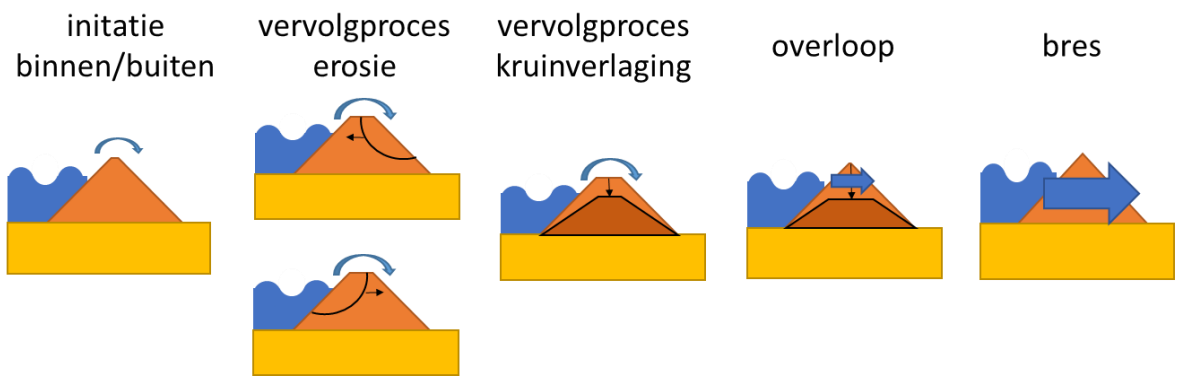
1. Falen toplaag harde en zachte bekleding **buitentalud** leidt tot overstroming
    a. Falen harde of zachte bekleding
    b. Falen **overgangsconstructi**e
    c. Falen **overgang** harde en zachte bekleding **buitentalud**
2. Falen toplaag harde en zachte bekleding kruin en **binnentalud** leidt 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 fase (initiatie, of vervolgproces) dominant is voor de overstromingskans. Hierbij is onderscheidt 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 onderscheidt 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.

Figuur 2 Fasen kennis- en innovatieontwikkeling Dijkerosie

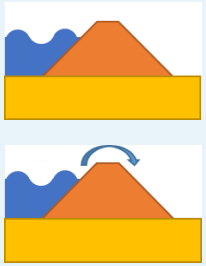
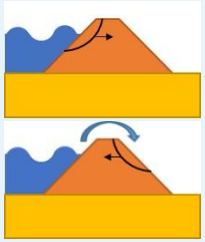
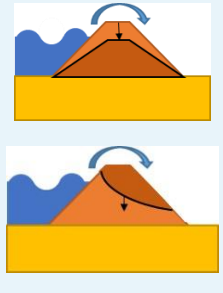
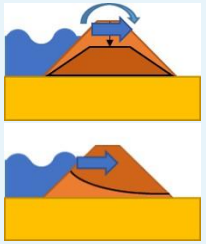
TRL 1	De eerste fase wordt gekenmerkt door fundamenteel onderzoek. De basisprincipes van het idee worden onderbouwd en er worden aannames over de werkingsprincipes van de theorie gedaan. Hier is echter nog geen experimenteel bewijs voor beschikbaar.
TRL 2	De theorie en het mogelijke toepassingsgebied 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 prototype schaal 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 vrijgegeven 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 vervolgprocessen, 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:**	**Vervolgprocessen:**			
					
	1a. Schade bekleding buitentalud door golfaanval **1b. Schade bekleding kruin en binnentalud door golfoverslag**	**2a. Erosie door golfaanval** **2b. Erosie door golfoverslag**	**3. Kruin-verlaging**	**4. Overloop**	**5 Bresgroei**
Narratief	*Golfaanval op buiten talud, kruin of binnen talud veroorzaken schade aan bekleding en/of overgangen*	*Door de schade aan de bekleding kan erosie van de toplaag en kernmateriaal plaatsvinden*	*Bij doorgaande erosie ontstaat een kruinverlaging die de hoeveelheid overslag beïnvloedt*	*Bij kruinverlaging onder de buitenwaterstand loopt het water over de dijk*	*De bres groeit in de lengterichting van de waterkering*

A. Relevante factoren/kennis:

Bepalende factoren	- Belasting en sterkte bekledingen: - Combinaties waterstanden, golven, verloop van de storm en belastingduur - Grasbekleding: graskwaliteit, grastype, en kwaliteit toplaag - Asfaltbekleding: dikte en sterkte, bitumenkwaliteit, grondwaterstanden - Steenzetting: dikte en gewicht - Vertaling HB naar interne belasting: - Overgang van externe HB naar relevante belastingen op de bekleding, zoals golfoploophoogte, piekdrukken, frontsnelheden, golfterugtrekking, waterlaagdikte, overslagdebieten et cetera.	- Dikte en sterkte deklaag - Combinaties waterstanden, golven, verloop van de storm en belastingduur - Erosiebestendigheid en erosiegedrag bekleding en kernmateriaal - relatie met moment van bezwijken van bekleding/hoe omgaan met tijdsafhankelijkheid - Erodeerbaarheid bekleding	- Combinaties waterstanden, golven, verloop van de storm en belastingduur - Vertaling externe HB naar relevante belasting op aangetaste lagen en kern: - Stroomsnelheid, waterlaagdikte, valhoogte in erosiekuil et cetera - Stijgsnelheid freatische lijn op de tijdschaal van een storm	- Erosie-bestendigheid kernmateriaal - Erodeerbaarheid van de kern in werkelijke staat, e.g. rekening houdend met bodemstructuur, scheuren, onder invloed van (extreme) droogte, te nat aanleggen e.d. - Combinaties waterstanden en belastingduur - Volume dijk	- Erosie-bestendigheid kernmateriaal - Combinaties waterstanden en belastingduur - Sterkte maaiveld - Aanwezigheid voorland - Dijkmateriaal en ruimtelijke variabiliteit hierin - Verhang - Kombergend vermogen

	- Respons freatische lijn in tijdschaal hoogwatergolf, storm en windgolf (ook in relatie met andere mechanismen zoals macro-stabiliteit) - Sterkte overgangsconstructie - Sterkte van de bekleding in werkelijke staat, e.g. rekening houdend met (de kans op) schade c.q. significante afwijkingen van de ontwerpstaat.		- Erosie-bestendigheid kernmateriaal - Erodeerbaarheid kernmateriaal - Invloed klimaatverandering/ - seizoenen op erosieparameters		
Theorie (model)	- Gras: cumulatieve overbelastings-benadering; standtijdlijnen - Kansverdelingen invloed overgangen - Harde bekleding: traditionele empirische relaties - Evenwichtsbeschouwingen opdrijven.	- Kliferosie (terugschrijdende erosie) - Erosie/afslag buitentalud (voortschrijdende erosie) - Expert judgement	- Voort- en terugschrijdende erosie in relatie met andere mechanismen zoals macrostabiliteit	- Voort- en terugschrijdende erosie	erosie in dijkrichting (bresgroei)
Model	- DiKernel, BM gras, BM asfalt, Steentoets, GEBU/GEKB tool	- Kliferosiemodel ISL (binnentalud OTOP2C's) - Erosiemodel buitentalud	- Kliferosiemodel ISL (binnentalud OTOP2C's) - Erosiemodel buitentalud		Verhey en van de Knaap, EMBREA, AREBA,
parameters	- Diverse belastingparameters - Tijdsafhankelijkheid - Diverse sterkteparameters per bekledingssoort	-Erodeerbaarheid - kritieke schuifspanning - schuifspanningen/ overslagvolumes	- Erodeerbaarheid - kritieke schuifspanning - schuifspanningen	- Erodeerbaarheid - kritieke schuifspanning - schuifspanningen	- Erodeerbaarheid - kritieke schuifspanning - schuifspanningen - Debiet door de bres
Toepassingsgebieden	- Coëfficiënten Klei- en zanddijken - Coëfficiënten Overgangen	- Kleidijken - *Zanddijk minder relevant*	- Kleidijk - *Zanddijk minder relevant*	Alle dijken	Alle dijken
Implementatie	- Keuze invloeds-coëfficiënten				

B. Kennisleemtes

Theorie	- Haalbaarheid tijdsafhankelijke beschrijving falen harde bekledingen, inclusies modelonzekerheden - Consensus over theorie achter de geotechnische stabiliteit teenconstructies en teenbestorting - Aanscherpen beschrijving externe belastingen (waterstand, golfcondities en tijdsverloop)o.b.v. Lange- termijn statistiek - Consistente beschrijving vertaling van externe belasting naar relevante belastingen op buitentalud, kruin, en binnentalud (frontsnelheid, piekdrukken, golfoverslagvolumes et cetera) - Invloed van (on)diepte op externe belasting en relevante belasting op de bekleding - Invloed van (gecombineerde) ruwheid, bermen, schuine golven en ondiepte - Sterkte van asfalt geproduceerd op lagere temperatuur en recyclefractie. - Bepaling van de freatische lijn bij hoogwater en golfklappen op een asfaltbekleding. - Hoe kunnen de effecten van graverij/ schades aan bekledingen worden verdisconteerd in de beoordeling in samenhang met de sterkte van bekledingslaag en dijkkern. - Welke realistische condities van de bekledingen zijn dominant voor het bepalen van de overstromingskans	- Bezwijkproces onderlaag - Verandering belastingen bij geërodeerde dijk - Bepalen van erosieparameters - Invloed seizoenen/ klimaatverandering en indirecte mechanismen op erosieparameters - Omgaan met onzekerheden variabiliteit in erodeerbaarheid op meterschaal en in ontwikkeling in erosieprofiel (plunge-pool of niet, geconcentreerde erosie door scheuren, invloed heterogeniteit op meterschaal in 3D (gelaagdheid en lengterichting) in kernmateriaal, invloed wegen en wegfunderingen et cetera)	- Initiatie van macro/microstabiliteit door erosie - Bepalen van erosieparameters - Invloed seizoenen en indirecte mechanismen op erosieparameters - Omgaan met onzekerheden variabiliteit in erodeerbaarheid op meterschaal en in ontwikkeling in erosieprofiel (plunge-pool of niet, geconcentreerde erosie door scheuren, invloed heterogeniteit op meterschaal in 3D (gelaagdheid en lengterichting) in kernmateriaal, invloed wegen en wegfunderingen et cetera)	- Superkritische stroming en vertaling daarvan naar (schuif)spanningen - Realiteitscheck tussen aangenomen sterkte en bandbreedte onzekerheden met ervaringen en grootschalige proeven.	- Superkritische stroming en vertaling daarvan naar (schuif)spanningen - Realiteitscheck tussen aangenomen sterkte en bandbreedte onzekerheden
Model	- Aanscherping cumulatieve overbelastingsmethode door onderzoek naar dominante belastingparameters m.n. in de golfoploopzone - Sterkte teenconstructie bepalen voor steenzetting - Consistente manier voor vaststellen piekbelastingen door golfklap tussen steen, gras, asfalt - Beschrijven van het tijdsafhankelijke faalgedrag van steenzettingen met een cumulatieve overbelastingsbenadering	- 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	- 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)
	- Strategie hydraulische randvoorwaarden (DSO1) o.a. inventarisatie voor benodigde parameters cumulatieve overbelastingsmethode - Strategie waterbeweging op talud (DS03) - Meerjarige Veldmetingen Eems Dollard (HWBP – NZV) - Plan tijdsafhankelijk beoordelen steenzettingen (DE5-2) - Ontwikkelen levensduurmodel warm asfalt met recyclefractie - Consistente benadering vaststellen frontsnelheden buitentalud, kruin en binnentalud - Raamwerk fysica voor bekledingen (DE11) - Beoordeling van de werkelijke staat van de bekleding, inclusief (de kans op) schade en andere afwijkingen van ontwerptoestand.	binnentalud (DE1) - Koppeling met stabiliteit (SV2) - HWBP project OEK naar het vaststellen van de instantane lokale erosie-eigenschappen van klei - Ketenbeschouwing dijkerosie (FP2) - Strategie vervolgmechanismen dijkerosie (DSO2) - Internationaal samenwerken aan een uniforme definitie van erosie-eigenschappen van grond, en hoe deze vast te stellen zijn. - NWO onderzoeksvoorstel naar de effecten van klimaatverandering op de erosie-eigenschappen van klei	- Ketenbeschouwing dijkerosie (FP2) - Strategie vervolgmechanismen dijkerosie (DSO2) - Internationaal samenwerken aan een uniforme definitie van erosie-eigenschappen van grond, en hoe deze vast te stellen zijn. - NWO onderzoeksvoorstel naar de effecten van klimaatverandering op de erosie-eigenschappen van klei	- Ketenbeschouwing dijkerosie (FP2) - Strategie vervolgmechanismen dijkerosie (DSO2) - RAAK project Taaie dijken	- Ketenbeschouwing dijkerosie (FP2) - Verkenning Bresgroei (DSO4) - RAAK project Taaie dijken

Model	- Windstatistiek en basispeilen (HBO1) - Tijdsafhankelijkheid (HBO1, HBO2, HBO6) - Combinatie bekleding mechanismen (HWBP – ZZL & 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) - Tijdsafhankelijk beoordelen steenzettingen	- Tijdsafhankelijkheid (HBO2) - Randvoorwaarden kust (HBO1) - GEBU-tool (HWBP – WSRL & NZV) - Erosiemodel klei binnentalud (OTOP2C's) - Kansverdeling kritiek overslagdebiet fragmentarische zode (DE 9)	-		-
Toepassing	- Kalk en klei (HWBP – POV DGG) - Overgang hard-zacht (HWBP-NZV & DE3) - Coëfficiënten overgangen (HWBP-ZZL & DE3) - Effect modelonzekerheden (HB3) - Nieuwe pilot: volledige cases beoordeling waterkering (FP1) - Future dikes (HWBP – WSRL) - Graverij door dieren (VOW1) - Invloed waterdiepte op golfoverslag (VOW3) - Parameters stroomsnelheden dijktalud (VOW4) - Levensduurmodel warm asfalt (HWBP project warm asfalt)	- Erosie Overgang hard/zacht (HWBP-NZV) - Erosie van gras en onderlagen bij overgangen (HWBP - ZZL) - 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) - Narekenen erosieproeven binnentalud ZZL met OTOP2C's	- Reststerkte BU (DE2) - Nieuwe pilot: volledige cases beoordeling waterkering (FP1)		

Implementatie	- Ontwikkeling dijkerosiemodule (BOI) - Implementatie cumulatieve overbelastingmethode GEKB (BOI) - Duinerosie (BOI) - Technische leidraden - BOI Handleidingen - Ontwerphandleidingen - Westerschelde Hansweert: Zetsteen van baggerspecie (HWBP – WSSS) - Afleiden kansverdelingen kritiek overslagdebiet voor vaststellen dominant faalpad.	- Idem initiatie - Reststerkte WoS (HWBP WSRL) - Dijkversterking Grebbedijk.	- Idem initiatie	- 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)	- 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) - Moment van bezwijken i.r.t. de erosie van de onderlagen
Rivierengebied	- 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 - Beschouwen van de potentiële impact van het aannemen van een kans op optreden van 1 van vervolgmechanismen op de mate van conservatisme van de invloedsparameters voor overgangen. Vergelijking gecombineerde z-functie (bekleding en onderlagen) met z-functie van enkel bekledingen.
Meren	- 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. - Moment van bezwijken van de bekleding i.r.t. vervolgerosie.
Kust- en estuaria	- 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. - Moment van bezwijken van de bekleding i.r.t. vervolgerosie.

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 overgangsconstructies - bepaling erosiebestendigheid toplaag en kern	**KvK:** - Theorie: Ketenbeschouwing dijkerosie (FP2) - Theorie/model: Reststerkte binnentalud (DE1) - Theorie/model: Verbreden toepasbaarheid erosietools (DE2) - Theorie/model: Tijdsafhankelijkheid (HB1, HB2, HB6) - Model: Combinatie bekleding mechanismen (DE4) - Model: Consistente beschrijving snelheden op bekleding GEBU en GEKB - Toepassing: Effect modelonzekerheden (HB3) - Model: kalibratie kleinschalige erosie tests met grootschalige erosietests - Model/theorie: Raamwerk voor hoe rekening te houden met tijdsafhankelijkheid bij beoordelingen - Model/theorie: Omzetten Steentoets in DiKernel met beschrijving bezwijken op basis van een cumulatieve overbelastingsmethode **BOI:** - Implementatie: cumulatieve overbelasting-methode GEKB (BOI) **HWBP:** - Toepassing: Kalk en klei (HWBP-POV DGG) - *Toepassing: Future Dikes (bloemrijke dijken) (HWBPWSRL)* - *Toepassing Minerale toeslag in klei (HWBP-ZZL)* **Strategische Onderzoek** - strategie hydraulische randvoorwaarden (DSO1) - strategie vervolgmechanismen dijkerosie (DSO2) - strategie waterbeweging op talud (DSO3) - verkenning bresgroei (DSO4) - toepassing OpenFoam in oploopzone (DSO5)	- Theorie: Kliferosie (terugschrijdende erosie) - Theorie: Erosie/afslag buitentalud (voortschrijdende erosie) - Theorie: Voort- en terugschrijdende erosie in relatie met andere mechanismen zoals macrostabiliteit - Model: Schade aan gras door golfaanval bij waterstanden net boven de berm. - Implementatie: Uniformiteit dijkmateriaal - Theorie: Superkritische stroming en vertaling daarvan naar (schuif)spanningen - Theorie: Initiatie van macro/micro-stabiliteit door erosie - Model: Consistente bepaling van schuif- en piekspanningen - Model: (Model)-onzekerheden in erosiegedrag - Toepassingsgebied: erosiemodel uitbreiden andere grondopbouw en/of overgangen - Model: beoordelingsmethodiek teenconstructies - Ter discussie: losschietend water / plonsbelasting	- Theorie: Invloed klimaatverandering op erosiebestendigheid gras en klei. - Theorie: Probabilistische beoordeling van faalpaden - Theorie: Werkelijke staat van de bekleding inclusief kans op schade of imperfecties meewegen in beoordeling en ontwerp. - Theorie: Effecten klimaatverandering op sterktemechanismen - Theorie: Evalueren van de impact van een alternatieve, wiskundig en fysisch mogelijk nauwkeurigere beschrijving van tijdsafhankelijke veranderingen van belastingen in grond ten gevolge van tijdsafhankelijke veranderingen in hydraulische belastingen

		KPP-Versterking Onderzoek Waterveiligheid (VOW) - Graverij door dieren (VOW1) - Invloed waterdiepte op golfoverslag (VOW3) - Bevorderen handelingsperspectief beheerders voor verdisconteren invloed van schades op de bekleding in de beoordeling - Voorspellen levensduur asfalt dijkbekleding bij toepassing nieuwe productiemethode		

Gebied	Rode lijn	Lopende/ geagendeerde kennisontwikkeling	Resterende aspecten urgent	Lange termijn
Rivierengebied	Scherpere bepaling faalkans door meenemen reststerkte na falen grasmat (binnen- en buitentalud)	**HWBP:** - Implementatie: Reststerkte WoS (HWBP-WSRL) - *Theorie/model/toepassing: (HWBP-NZV) Erosiebestendigheid buitentalud en kleikern*		
Meren	Scherpere bepaling faalkans door: - introductie tijdafhankelijkheid - benodigde hoogte overgang harde/zachte bekleding - bepaling bij de werkelijke staat van de bekleding ipv ontwerpsituatie	**KvK:** - Theorie/model: Overgang hard-zacht (HWBP-NZV & DE3) - Toepassing: Werkprocessen interactie hydraulische belastingen dijkerosie (HB3) **HWBP:** - Theorie/model: Overgang hard-zacht (HWBP – NZV & DE3) - *Toepassing Teenconstructies (HWBP-ZZL)* - *Theorie: Gebogen buitentalud steenbekleding (HWBP-ZZL)* - *Theorie/model/toepassing: (HWBP-NZV) Erosiebestendigheid buitentalud en kleikern*		
Kust- en estuaria	Scherpere bepaling faalkans door: - introductie tijdafhankelijkheid - benodigde hoogte overgang harde/zachte bekleding - bepaling bij de werkelijke staat van de bekleding ipv ontwerpsituatie	**KvK:** - Theorie/model: Overgang hard-zacht (HWBP-NZV & DE3) - Model. Nieuw belastingmodel kust voor dijken en duinen (HB7) **HWBP:** - Theorie/model: erosie kleilaag bij overgang hardzacht (HWBP –NZV & DE3) - Theorie/model: erosie bij flauwe taluds en hogere golven (HWBP-H&A, brede groene dijk) - *Toepassing Teenconstructies (HWBP-ZZL)* - *Theorie: Gebogen buitentalud steenbekleding (HWBP-ZZL)* - *Theorie/model/toepassing: (HWBP-NZV) Erosiebestendigheid buitentalud en kleikern*		

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 dragen 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 hoofdcategorieën; (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 vervolgprocessen. Daarnaast wordt een overzicht gegeven van de instrumenten beschikbaar voor het kwantificeren van de kansbijdrage van vervolgprocessen. De knopenkaarten worden opgesteld voor Dijkerosie, Interne Erosie en Stabiltietsverlies. Status: afgerond

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 vervolgprocessen. Status: lopend.

3. In het kader van KvK wordt een raamwerk ontwikkeld voor het beschouwen van de fysica van het bezwijken van dijken geïnitieerd door erosie van een bekleding. Het raamwerk kan dienen ter ondersteuning van het toepassen van de faalpadenmethodiek.

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, GEBUoploop 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 langs de waddenzeedijken. Dit leidt ertoe dat de overgang van de harde bekleding naar de grasbekleding op een lager niveau dan voorheen kan komen te liggen. Status: afgerond.

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 rivierengebied en wordt gewerkt aan een versie voor de kust (waarbij ook de invloed van een harde bekleiding wordt meegenomen). Status: afgerond (Wel vervolgd onder 6)

6. Het HWBP doet binnen het project Onderzoek Erodeerbaarheid Klei onderzoek naar het kunnen vaststellen van de erosieparameters in erosiemodellen die de vervolgerosie door golfklap modelleren. Uit metingen is gebleken dat de huidige erosiecategorisering niet toereikend is hiervoor aangezien ook de mate van verdichting en structuurvorming bijvoorbeeld een significante rol speelt in de snelheid van erosie van klei onder golfklappen. De resultaten zouden moeten leiden tot een significante aanscherping van de erosieparameters in de HWBP tool beschreven onder 5. Status: loopt

7. 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: afgerond.

8. 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: afgerond.

9. 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.

10. 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.

11. Als onderdeel van een programmatische samenwerking tussen Rijkswaterstaat, HWBP, en STOWA wordt onderzoek gedaan naar de toepassing van warm geproduceerd asfalt voor gebruik in asfalt dijkbekledingen. Als onderdeel van dit programma wordt onderzoek gedaan naar de ontwikkeling van een nieuw levensduurmodel dat van toepassing is op het bestaande areaal van heet geproduceerd asfalt, als warm asfalt. Een eerste versie van het levensduurmodel is reeds ontwikkeld. Status: loopt

12. Als onderdeel van KvK wordt een methodiek ontwikkeld om door middel van een minserom het moment van bezwijken van steenzettingen in te kunnen schatten. De methodiek zal landen in de DiKErnel van BOI, en uiteindelijk leiden tot vervanging van de rekenmethodiek in Steentoets. Status: loopt

13. Als onderdeel van KvK wordt in samenwerking met Europese partners een erosiemodel ontwikkeld voor het meenemen van de erosieweerstand van klei door golfoverslag. Ook wordt er gekeken naar methodieken voor het kunnen vaststellen van de erosieparameters voor gebruik in het erosiemodel. Status: loopt

14. Als onderdeel van KvK wordt er gewerkt aan nieuwe kansverdelingen voor een consistente beschrijving van de frontsnelheid op het buitentalud, kruin en binnentalud voor toepassing in de cumulatieve overbelastingsmethode. Status: Loopt.