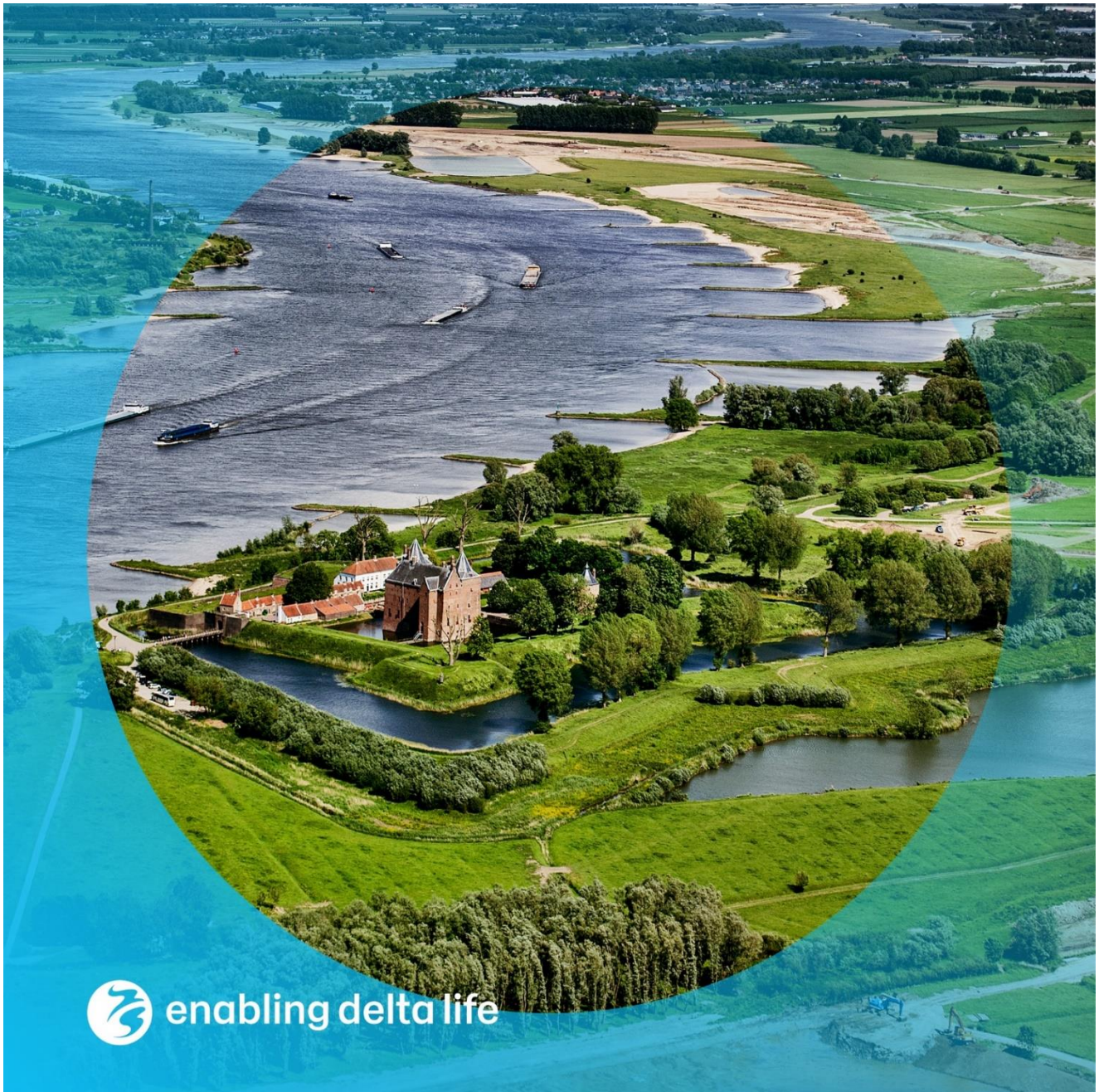


Veiligheidsraamwerk dierlijke graverijen in waterkeringen



Veiligheidsraamwerk dierlijke graverijen in waterkeringen

Veiligheidsraamwerk dierlijke graverijen in waterkeringen

Opdrachtgever	Deltares/ SITO
Contactpersoon	Meindert Van
Referenties	-
Trefwoorden	Veiligheidsraamwerk, dierlijke graverij, waterkeringen

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	15-12-2022
Projectnummer	11208018-002
Document ID	11208018-002-GEO-0001
Pagina's	29
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

Frans van den Berg		

Samenvatting

Het aantal dierlijke graverijen in infrastructuur, waaronder waterkeringen, neemt de laatste jaren steeds mee toe. Dit komt onder andere door de exponentiële groei van de bever die de beschermde status heeft. Tevens volgt uit onderzoek dat de inspectie en detectie van de dierlijke graverijen geen gemakkelijke opgave is.

De gevolgen voor de veiligheid van, met name, de waterkeringen kunnen groot zijn. Een graverij kan namelijk invloed hebben op de sterkte en de hydraulische weerstand van de waterkering. Doorbraken als gevolg van dierlijke graverijen in Nederland, Italië en de Verenigde Staten zijn al gemeld.

Vraagstelling en doel

Om grip te krijgen op dit fenomeen is een veiligheidsraamwerk voor dierlijke graverijen opgezet. Het doel hiervan is om hiermee de relevantie van kennisleemtes vast te stellen die spelen bij graverijen in waterkeringen. Op basis van het veiligheidsraamwerk kunnen maatregelen worden genomen om de overstromingsrisico's door graverij te beheersen.

Aanpak

Ten behoeve van het opstellen van dit raamwerk is binnen Deltares vanuit verschillende expertisegebieden onderzocht hoe de hoogwaterveiligheidsrisico's door dierlijke graverij beter beheerst kunnen worden. De resultaten hiervan zijn in het voorliggende rapport verwerkt.

Veiligheidsraamwerk

Het veiligheidsraamwerk bestaat uit verschillende onderdelen:

Onderdeel 1 Wat is er aan de hand?

Hierin wordt de context van het project aangegeven: een exponentiële toename van dierlijke graverijen, voornamelijk van de bever, en een promotieonderzoek waaruit volgt dat inspectie en detectie lang niet alle dierlijke graverij opspoorde.

Onderdeel 2 Wat is relevant?

Geeft de relevantie aan van de invloed van de verschillende dierlijke graverijen op de overstromingskans van de waterkering in de vorm van een matrix.

Onderdeel 3 Hoe te beheersen?

Een bowtie-analyse (ned: vlinderstrikmethode) kan worden gebruikt voor het beheersen van overstromingsrisico's door graverij. De bowtie-analyse is opgebouwd uit de diverse scenario's en faalpaden die relevant zijn voor dierlijke graverijen. Middels een stappenplan wordt aangegeven hoe men dit zelf uit kan voeren.

Onderdeel 4 Hoe te bepalen?

Om een daadwerkelijke kwantitatieve inschatting te maken van het risico van dierlijke graverijen in waterkeringen is in deze rapportage een werkwijze opgenomen om de overstromingskans door dierlijke graverijen te bepalen.

Kennisvragen

De voornaamste kennisvragen zijn:

- Wat zijn de schadefrequenties per dier, is dit juist bij hoogwater of niet?
- Wat zijn de detectie- en reparatiemogelijkheden en de bijbehorende kansen van slagen?
- Wat zijn de mogelijke maatregelen tegen dierlijke graverij en wat zijn de bijbehorende kansen van slagen?

Oplossingsrichtingen

Vanuit de faalpaden volgt dat voor een aantal dieren/situaties het mogelijk is om overstromingsrisico's te beheersen door middel van detectie en tijdig herstel voor hoogwater. Voor andere dieren/ situaties bestaat deze mogelijkheid niet en kan graverij leiden tot te grote overstromingskansen. Adequate maatregelen zijn in dat geval nodig. Het voorkomen van graverijen is daarbij vaak een effectieve maatregel. Ontwerpoplossingen zijn hiervoor beschikbaar.

Aanbeveling

Voor het bepalen van de juiste maatregel is het uitwerken van de relatie dieren/situatie en waar deze in het faalpad terecht komen en of er maatregelen nodig zijn om een kritische situatie te voorkomen belangrijk.

Aanbevolen wordt om de in deze rapportage vermelde methodiek nader uit te werken met behulp van een voorbeeld of case (bijvoorbeeld in de vorm van een of meerdere workshops met dijkbeheerders), waarbij met behulp van de bowtiemethodiek een aantal combinaties van situaties en dieren met elkaar worden gecombineerd om een beter inzicht te krijgen in de faalkansen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Aanleiding en context	7
1.2	Probleemstelling en doel	7
1.3	Aanpak	7
2	Dierlijke graverijen in regels	8
3	Veiligheidsraamwerk	10
3.1	Wat is er aan de hand?	10
3.2	Wat is relevant?	10
3.3	Hoe te beheersen?	11
3.3.1	Inleiding	11
3.3.2	Bowtie-analyses	11
3.3.3	Scenario's en faalpaden	13
3.3.4	Stappenplan aantonen veiligheid graverijen	17
3.3.5	Bepalen van de overstromingskans door een dierlijke graverij in de waterkering	18
3.3.6	Samengevat	19
3.4	Hoe te bepalen?	19
3.5	Kennisvragen	22
3.6	Oplossingsrichtingen	23
4	Conclusies en aanbevelingen	24
4.1	Conclusies	24
4.2	Aanbevelingen	24
	Referenties	25
A	Schade per dier	27

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en context

Vanuit de waterschappen, maar ook vanuit de spoorwegwereld, komen steeds meer signalen dat het aantal graverijen in dijk- en spoorlichamen fors toeneemt. Vooral de exponentiele groei van het aantal bevers is hier debet aan. Onder dierlijke graverij in een waterkering, wordt elke graverij verstaan van een dierlijke graver die de overstromingskans significant vergroot. De invloed van graverij op overstromingskans is niet bekend. Een raamwerk ontbreekt op basis waarvan relevante kennisvragen kunnen worden gedefinieerd. Het raamwerk kan worden gebruikt voor het definiëren van een handelingsperspectief voor beheersen van overstromingsrisico's door graverij in waterkeringen.

1.2 Probleemstelling en doel

Om de gevolgen van dierlijke graverijen op de waterveiligheid te kunnen duiden, is het zaak de nu nog onbekende kennisvragen helder te krijgen. Om de kennisvragen helder te krijgen is een veiligheidsraamwerk opgesteld voor dierlijke graverij. Dit veiligheidsraamwerk is opgesteld naar analogie van het veiligheidsraamwerk dat voor indirecte mechanismen/NWO (Schweckendiek, 2018) en het veiligheidsraamwerk voor innovaties (Kanning, 2021).

Het veiligheidsraamwerk is gebaseerd op de volgende gebeurtenissen:

Graverij treedt op en leidt tot schade aan de kering. Daarbij zijn er twee mogelijke vervolgpaden:

of: Schade wordt op tijd opgemerkt en hersteld voordat een hoogwater optreedt.

of: Schade heeft invloed op een direct mechanisme met als gevolg dat de schade een significante bijdrage levert aan de overstromingskans.

Op basis van dit veiligheidsraamwerk is een hoofdlijn voor een veiligheidshandelingsperspectief opgesteld om overstromingskansen door dierlijke graverijen te beheersen. Hieruit volgen dan de kennisvragen en de oplossingsrichtingen die relevant zijn voor de waterveiligheid. Het uitwerken van een voorbeeld voor diverse dieren in diverse situaties maakt geen deel uit van deze rapportage.

1.3 Aanpak

Om het doel te bereiken is een veiligheidsraamwerk voor dierlijke graverijen in primaire waterkeringen opgesteld.

Vervolgens is dit raamwerk en de geïdentificeerde kennisvragen in een interne workshop met deelnemers met verschillende kennisexpertises van Deltares besproken. Op basis van de input vanuit deze workshop is het rapport voor 2022 afgerond.

Faalkans

De scope van dit rapport ligt bij het effect van graverijen op de overstromingskans. De overstromingskans zonder graverij is wel van belang, maar valt buiten de scope van dit rapport.

In hoofdstuk 2 is aangegeven hoe de dierlijke graverijen in de diverse wettelijke regels zijn verankerd. In hoofdstuk 3 is het veiligheidsraamwerk beschreven. In hoofdstuk 4 staan de conclusies en aanbevelingen.

2 Dierlijke graverijen in regels

Omgevingswet en de Waterwet

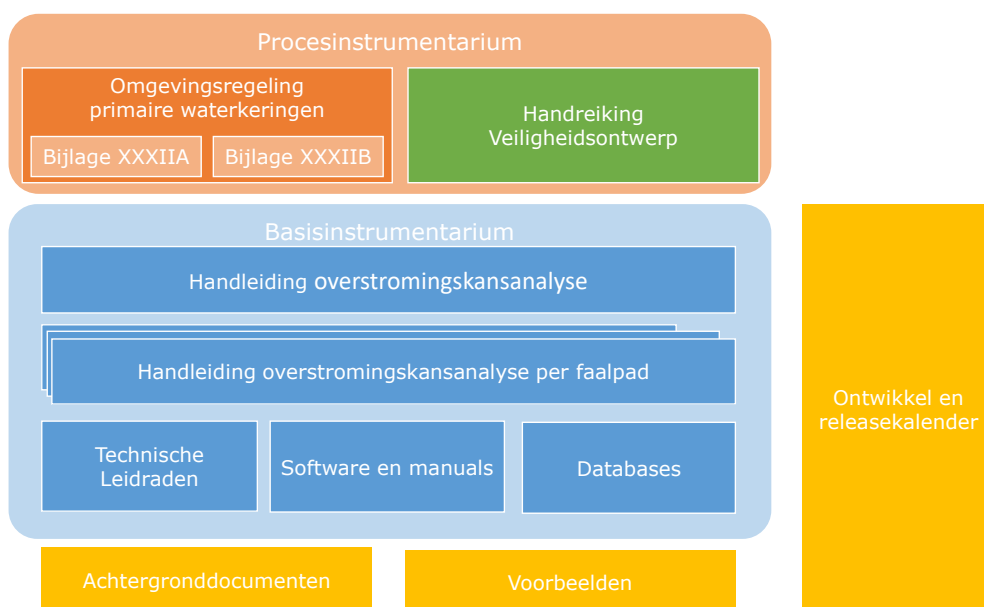
Verwacht wordt dat eind 2023 de nieuwe omgevingswetgeving wordt ingevoerd. De voorschriften met betrekking tot het bepalen van de veiligheid van de primaire waterkeringen worden van de Waterwet overgeheveld naar de Omgevingswet. Naast de Omgevingswet blijven de Waterschapswet en onderdelen van de Waterwet geldig (Gijzen et al, 2022).

Monitoren

Volgens de nieuwe omgevingswet is het doel van monitoring *het bewaken van de staat of kwaliteit van de fysieke leefomgeving*. De monitoring van primaire keringen wordt gezien als een continu proces gericht op het bewaken van activiteiten/gebeurtenissen, die rondom de waterkering plaatsvinden, en significante invloed hebben op de overstromingskans van de waterkering. Onderdeel van het monitorproces is de periodieke beoordeling waarin een reële overstromingskans wordt bepaald en vergeleken met de omgevingswaarde. Hierdoor kunnen tijdig maatregelen worden genomen als er niet aan de omgevingswaarden worden voldaan, zoals bijvoorbeeld dierlijke graverij. Hierna wordt er dan voldaan aan de zorgplicht.

Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium

Per 1 januari 2023 zal met de invoer van de omgevingswet het WBI2017 vernieuwen, ondanks dat de omgevingswet pas eind 2023 wordt ingevoerd. In onderstaande figuur is de opbouw van het nieuwe beoordelingsinstrumentarium weergegeven.



Figuur 1 Overzicht proces- en basisinstrumentarium BOI (Min. I&W, 2022b).

Het BOI bestaat uit een procesinstrumentarium, een basisinstrumentarium en overige documenten. De omgevingsregeling is onderdeel van het procesinstrumentarium en bevat de voorschriften voor de uitvoering van de beoordeling. De handreiking Veiligheidsontwerp ondersteunt het ontwerpproces en heeft in tegenstelling tot de Omgevingsregeling geen verplichtend karakter.

In het BOI wordt onderscheid gemaakt tussen directe faalmechanismen en indirecte mechanismen. Dierlijke graverijen in waterkeringen behoren niet tot de directe faalmechanismen, maar zijn een indirect mechanisme. Zij kunnen de inleiding vormen voor een direct faalmechanisme. Conform (Min. I&W, 2022b) wordt een indirect mechanisme als volgt beschreven: “Indirecte mechanismen hebben betrekking op gebeurtenissen die van invloed zijn op de situatie van de waterkering (hoe de waterkering erbij ligt) tijdens een extreme hydraulische belasting. Deze leidt tot verzwakkende omstandigheden en vergroot de kans dat een of meerdere faalpaden tot een overstroming leiden.” In tabel 5.2. van (Min. I&W, 2022 b) wordt graverij als een indirect mechanisme benoemd.

Het indirecte mechanisme van dierlijke graverijen kan effect hebben op de volgende faalmechanismen:

- Macrostabieliteit binnenwaarts (STBI).
- Macrostabieliteit buitenwaarts (STBU).
- Piping (STPH).
- Micro-instabiliteit/ Interne erosie (STMI).
- Falen bekleding:
 - Grasbekleding afschuiven buitentalud (GABU).
 - Grasbekleding erosie buitentalud (GEBU).
 - Grasbekleding afschuiven binnentalud (GABI).
 - Grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEKB).

Een uitgebreide beschrijving van de faalmechanismen is opgenomen in ('t Hart, 2018).

Door dierlijke graverij wordt de fysieke toestand van de waterkering negatief beïnvloed. Deze invloed is sterk afhankelijk van de situatie en soort dierlijke graverij, denk hierbij aan:

- Soort dier (bever, das, rat, mol, muis, vos, konijn, hond, ..).
- Locatie van de graverij op de waterkering (teen, berm, talud, kruin, water- of landzijde, ..).
- Soort dijk (kleidijk, zanddijk, veendijk, ..).
- Aanwezigheid van hoogwater.

De aanwezigheid van dierlijke graverijen heeft effect op verschillende geotechnische aspecten van de waterkering:

- Aanpassing van de freatische lijn, hoger of lager (STBI, STBU).
- Uitspoelen van zand (ongunstiger dan bij de in de voorschriften onderkende verticale of loodrechte scheuren, vanwege de doorgaans licht olopemde helling van hollen).
- Verlagen van de kruin, talud of berm.
- Aanpassing heterogeniteit door aantal holtes in de kering.

3 Veiligheidsraamwerk

3.1 Wat is er aan de hand?

Exponentiele toename dierlijke graverijen

De toename van dierlijke graverijen in waterkeringen van onder andere de bever neemt de laatste jaren exponentieel toe. Tevens geven de dijkbeheerders van Waterschappen langs onder andere de IJssel, de Maas en de Waal aan dat de urgentie van de aanpak van dierlijke graverijen hoog is dat meer instrumenten nodig zijn om de risico's door dierlijke graverij te beheersen (Van den Berg en Koelewijn, 2022). In de afgelopen jaren zijn in Limburg al tientallen bevers gedood, omdat ze kades beschadigden of wateroverlast veroorzaakten met dammen in beekdalen.¹ Onlangs, in oktober 2022, zijn er ook twee bevers in het Oude Wiel aan de teen van de Waalbandijk te Wamel (Gelderland) als voorzorg afgeschoten,¹ omdat de bijdrage aan de overstromingskans van de graverij niet kon worden bepaald en mogelijk te groot was. De bever is een beschermde diersoort in Nederland en mag daarom alleen in Nederland worden afgeschoten in uitzonderlijke gevallen met toestemming van het bevoegd gezag.

Inspectie en detectie

In het promotieonderzoek van Klerk (2022) wordt aangegeven dat geen enkele dijkinspecteur tijdens een dijkinspectie alle graverijen waarneemt. Een optimistische bovengrens is dat 90% van de aanwezige graverijen wordt waargenomen. In het geval van de bever kan de detectie afnemen tot vijftig procent. Dit heeft er vooral mee te maken dat de bever de ingang van zijn hol onder de waterlijn graaft en geen graverijen in het talud zichtbaar zijn.

3.2 Wat is relevant?

Om de relevantie aan te geven van de invloed van de dierlijke graverijen op de overstromingskans is in Tabel 1 een matrix weergegeven. In deze matrix is aangegeven wat de invloed is van een dier op de geotechnische eigenschappen van de waterkering. De input van deze tabel is vastgesteld op basis van eigen waarnemingen en gesprekken met dijkbeheerders en literatuur (Koelewijn et al, 2020). Deze tabel pretendeert niet compleet te zijn, omdat deze is vastgesteld op basis van expert judgement en een selecte groep van betrokkenen. De tabel kan in de toekomst nog aan verandering onderhevig zijn door nieuwe inzichten en informatie door bijvoorbeeld dijkbeheerders/ zoölogen.

¹ <https://nos.nl/artikel/2449301-eerste-bevers-afgeschoten-in-gelderland>

Tabel 1 Invloedsmatrix van mogelijke invloed dierlijke graverij op geotechnische eigenschappen van de kering.

Dier	Aanpassing verloop freatische lijn	Aantasting deklaag	Aantasting gras bekleding	Verzakking talud of kruin	Optreden kortsluiting binnen- en buitenwaarts	Uitspoelen zand
Bever	+	+	-	+	+	+
Mol	+/-	+	+	-	-	-
(Woel-, musksus) rat	-	+	+	-	-	-
Vos	+/-	+	+	+	-	+
Das	+	+	+	+	+	+
Konijn	-	+	+	+/-	-	+
Muis	-	+	+	-	-	-

+ = van invloed op geotechnisch aspect van de waterkering.

+/- = van mogelijk invloed op geotechnisch aspect van de waterkering.

- = geen invloed op geotechnisch aspect van de waterkering.

De schade die per dier optreedt is globaal beschreven in (Koelewijn et al., 2020) en opgenomen als Bijlage A.

3.3 Hoe te beheersen?

3.3.1 Inleiding

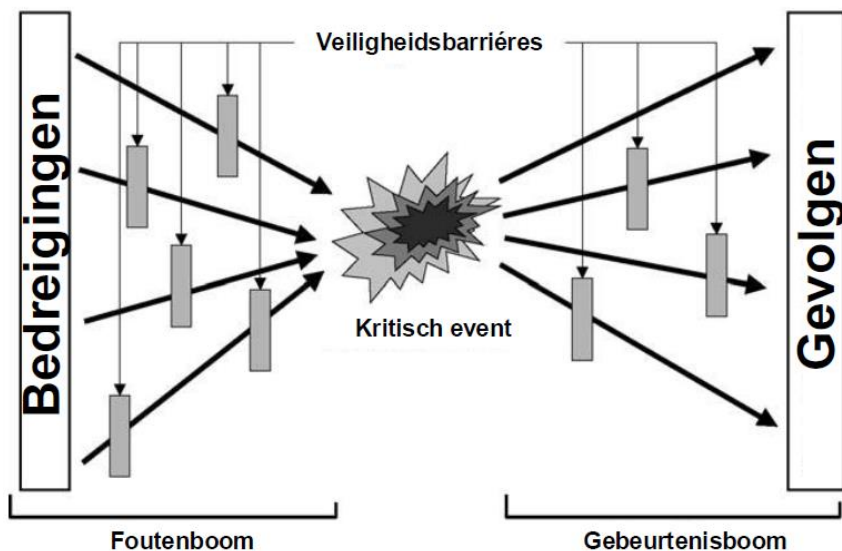
De problematiek van de dierlijke graverijen in waterkeringen is in de voorgaande paragrafen duidelijk geworden. Om overstromingsrisico's van de dierlijke graverijen in een waterkering te beheersen wordt een zogenaamde bowtie-analyse gebruikt.

De vraag is hoe kunnen we de overstromingsrisico's beheersen? Hiertoe is het noodzakelijk om te weten welke bedreigingen een rol spelen, *de scenario's*, en de gevolgen van deze bedreigingen, *de faalpaden*, die tot een overstroming leiden. Met behulp van de zogenoemde bowtie-methode (zie §3.3.2) wordt vervolgens een analyse uitgevoerd. Aan de hand van deze analyse kan ook de faalkans bepaald worden.

Met behulp van de bowtie-analyse kan het probleem beter ontleed worden en ontstaan er mogelijkheden om het probleem te beheersen.

3.3.2 Bowtie-analyses

De bowtie-analyses worden breed gehanteerd in veiligheidsanalyses in industriële toepassingen met een hoog risico. De naam is ontleend aan de vorm van de figuren die vaak worden gebruikt om risico's inzichtelijk te maken zie Figuur 2.



Figuur 2 Voorbeeld van een bowtie diagram. Vertaalde versie overgenomen uit (Klerk, 2021) origineel van (De Dianous & Fiévez, 2006).

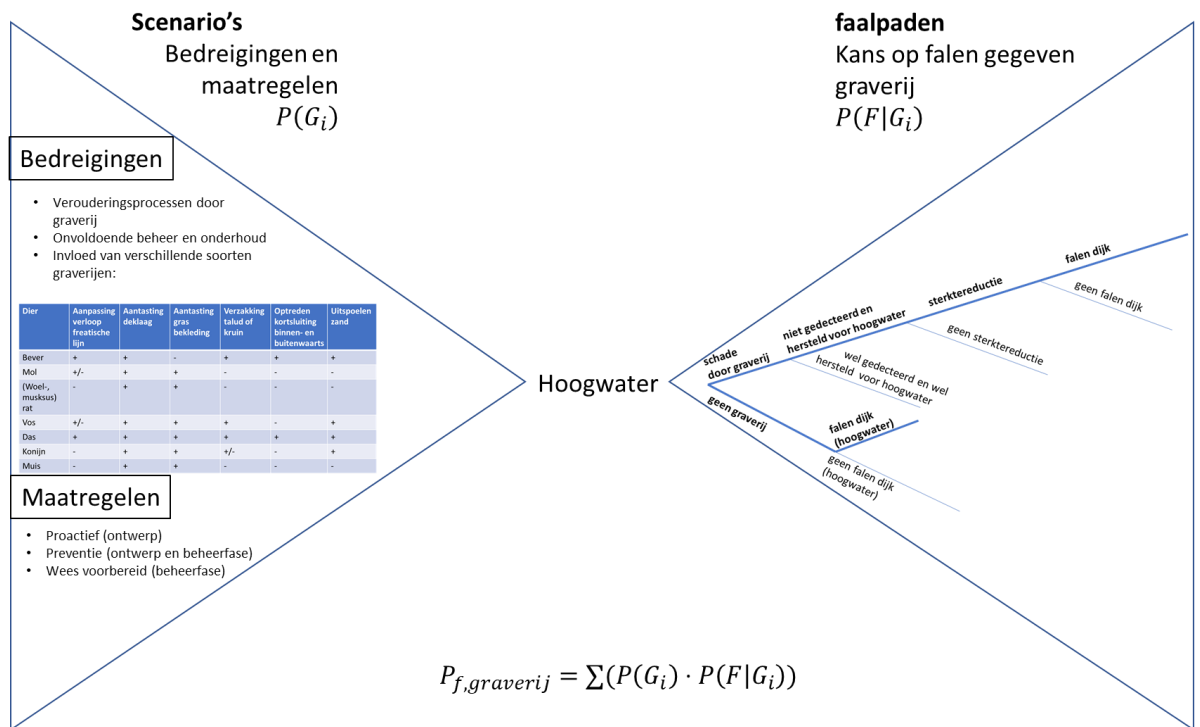
De traditionele Bowtie methode, zoals in Figuur 2 gaat uit van een *foutenboom* aan de linkerkzijde, waarbij een “normale situatie” wordt verondersteld met bedreigingen (de diagonale pijlen) en belemmeringen van de bedreigingen (de grijze vlakken). De belemmeringen van de bedreigingen zijn de te nemen maatregelen.

Ten gevolge van de bedreigingen (en onvoldoende maatregelen) zal in het midden van de bowtie een ongewenste situatie, een kritisch event, ontstaan. Aan de rechterzijde worden in de gebeurtenissenboom de gevolgen beschreven van deze ongewenste situatie. De gevolgen kunnen door middel van de belemmeringen (de grijze vlakken) worden verkleind of weggenomen.

Voor dierlijke graverijen in waterkeringen is een bowtie-analyse opgesteld. Zie Figuur 3. Deze geeft een overzicht van:

1. Aan de linkerkzijde de foutenboom met mogelijke *scenario's* die op kunnen treden (bedreigingen en de maatregelen).
2. Aan de rechterzijde de gebeurtenissenboom met de mogelijke *faalpaden* (consequenties) die tot falen kunnen leiden met als gevolg een overstroming (de ongewenste situatie).

Deze bowtie geeft een overzicht van de scenario's en de faalpaden die gezamenlijk tot falen (overstroming) kunnen leiden en geeft de totale faalkans (P_f). Deze totale faalkans moet voldoen aan de faalkanseis van de waterkering.



$P_{f,graverij}$ = de kans op falen van de dijk
 $P(G_i)$ = de kans op een graverij
 $P(F|G_i)$ = falen dijk gegeven een graverij

Figuur 3 Bowtie dierlijke graverijen in waterkeringen.

De bovengenoemde scenario's en faalpaden worden nader toegelicht in de volgende paragraaf. De kans op falen van de dijk ten gevolge van een graverij wordt toegelicht in §3.3.5.

3.3.3 Scenario's en faalpaden

De bepaling van de faalkans van de waterkering (P_f) kan op basis van scenario's en faalpaden worden uitgevoerd en is de ingang voor het uitvoeren voor een bowtie-analyse. Hieronder volgt een beschrijving van de faalpaden en de scenario's zoals gehanteerd in

Figuur 3.

Scenario's

Dit zijn verschillende gebeurtenissen die kunnen optreden waardoor de kering met graverij er niet zo bij ligt zoals in het ontwerp van uit is gegaan met bijbehorende kans $P(G)$. Zoals eerder beschreven bestaan deze uit bedreigingen en maatregelen om deze bedreigingen weg te nemen.

De *bedreigingen* binnen deze scenario's zijn onder andere:

- De invloed van verschillende soorten graverijen (zie ook Tabel 1).
- Verouderingsprocessen door graverijen.
- Onvoldoende beheer en onderhoud.
- Etc.

De te nemen *maatregelen* zijn onder te verdelen in volgende 4 categorieën (Van den Berg, 2021). Alleen de eerste drie categorieën horen bij de maatregelen die onder de scenario's vallen:

Proactief (ontwerp en uitvoering)

Maatregelen die de blootstelling aan het risico op dijkdoorbraken door dierlijke graverij in een vroeg stadium verminderen, zoals (Van den Berg & Koelewijn, 2022):

- Zodanig ontwerp van waterkeringen dat dit de dierlijke graverij afschrikt, denk hierbij onder andere aan:
 - Het aanbrengen van gaas.
 - Damwanden.
 - Bestorting van steen in de buitenoever.
 - Taluds van een klei-kalkmengsel.
- Dieren voorzien van een aantrekkelijk alternatieve locatie, in de buurt van een waterkering die een dijkomgeving kan vervangen, denk hierbij aan:
 - (Drijvende) hoogwatervluchtplaatsen.
 - Een kunstmatige heuvel.

Preventie (dagelijks beheer)

Maatregelen die de kans op een dijkdoorbraak door dierlijke graverij verkleinen, zoals:

- Bestrijding van graaf dieren.
- Vroegtijdige detectie en monitoring van dierlijke activiteiten die de veiligheid van een dijk kunnen bedreigen.
- Herstel van de dijk na een graverij, bij voorkeur al in een vroeg stadium.

Voorbereid zijn (dagelijks beheer)

Maatregelen die vooraf kunnen worden genomen om de impact te verminderen bij het bezwijken van een dijk door dierenactiviteit, zoals:

- Voorbereiden van menselijk handelen (weten wat je moet doen en hoe je dit doet) en dit regelmatig oefenen.
- Voorbereiden van materialen (zakken, zand, vulmachines, pompen).

Repressie (noodmaatregel)

Maatregelen die snel kunnen worden toegepast tijdens een hoogwater en een (dreigende) overstroming.

- Pas (tijdelijke) maatregelen toe op door dieren veroorzaakte graverijen die grote gevolgschade tijdens een overstromingsramp kunnen verminderen of vertragen. Zandzakken kunnen bijvoorbeeld erosie voorkomen aan de grasmat.

Op de workshop Noodmaatregelen bij graverijschade van bevers (Wiki noodmaatregelen, 2022) georganiseerd door Wiki Noodmaatregelen op 26 oktober 2022 was een groot aantal dijkbeheerders aanwezig. Bij de behandeling van een case waarbij mogelijk een bever in de kering aanwezig is, werd getracht een noodmaatregel te treffen. Het resultaat van deze case was dat het een grote uitdaging was om een passende noodmaatregel te vinden voor dierlijke graverijen tijdens hoogwater. Aanbevolen wordt om hier nader onderzoek naar te doen.

Schematiseren van scenario's

Op basis van de basisprincipes uit §6.1 van de handleiding overstromingskansanalyse van Min I&W (2022c) zijn de volgende aspecten afgeleid voor het definiëren van scenario's:

1. *Houdt het beslisprobleem centraal*

Hierbij dient de volgende vraag leidend te zijn: "Welk doel dient de schematisering?".

Beslisproblemen kunnen bijvoorbeeld zijn:

- De selectie van relevante faalmechanismen.
- Het inschatten van de kans op een (of meer) initieel mechanisme via een modelanalyse.
- Het bepalen van de bijdrage van een faalpad aan de overstromingskans.

2. *Van grof naar fijn werken*

Schematiseren heeft een iteratief karakter: grof beginnen en verfijnen waar het nodig is.

Verfijning kan daarbij onder andere worden bereikt door het toepassen van een nauwkeuriger analyse of het verzamelen van extra informatie waardoor de invoer nauwkeuriger kan worden bepaald.

Hierbij spelen de volgende vragen:

- Welke informatie is nodig om tot een stabiel resultaat te komen, gegeven het doel?
- Welke analyse moet worden uitgevoerd en hoe moet de werkelijkheid vertaald worden om deze analyse goed te kunnen uitvoeren?

3. *Expliciet omgaan met onzekerheden*

Met onzekerheden kan bij het schematiseren op verschillende manieren worden omgegaan:

- Het verdisconteren in scenario's.
- Het hanteren van kansverdelingen.
- Het uitvoeren van gevoeligheids- of hoekpuntenanalyses.
- Het maken van afspraken, bijvoorbeeld: de afvoer bij Lobith is niet hoger dan 18.000 m³/s.

4. *Consistent schematiseren:*

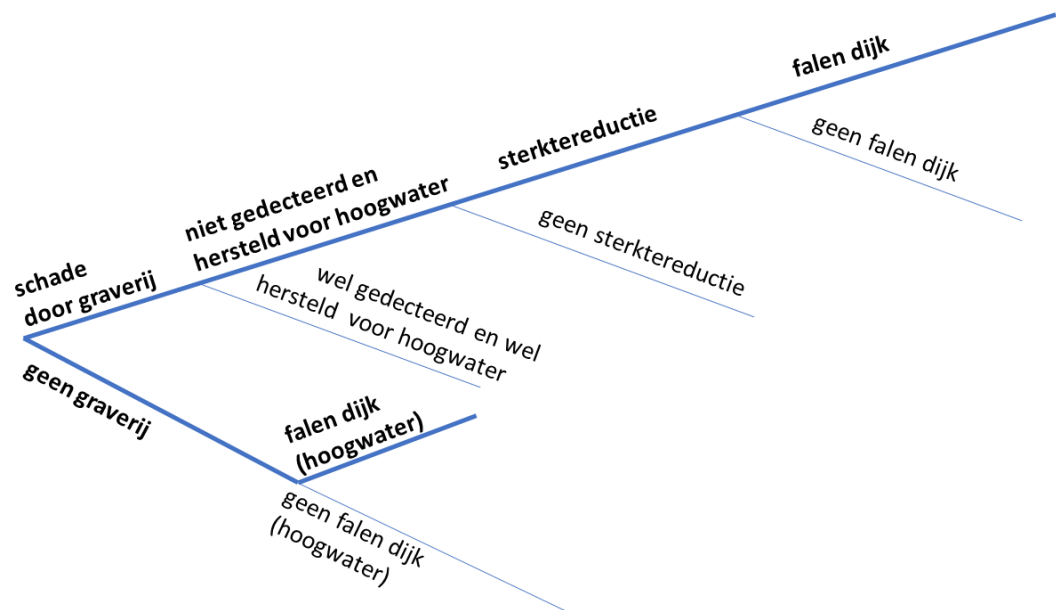
Hiermee wordt bedoeld keuzes op dezelfde manier maken, voor uitlegbaarheid en geloofwaardigheid.

Faalpaden

De faalpaden beschrijven de verschillende ketens van gebeurtenissen die na een initiële gebeurtenis leiden tot overstroming. Een faalmechanisme is de verzameling faalpaden met dezelfde initiële gebeurtenis die leiden tot overstroming.

Dierlijke graverijen tasten de sterkte en de hydraulische weerstand aan van de waterkering. De aanpassing van deze aspecten door een graverij op een specifieke locatie is van invloed op de overstromingskans voor die locatie. Daarom is het van belang om door middel van een analyse te bepalen welke faalpaden het meest waarschijnlijk zijn.

In Figuur 4 is een voorbeeld gegeven van een faalpad, zoals opgenomen in de bowtie-analyse. De aparte takken zijn beschreven in Tabel 2.



Figuur 4 Generiek faalpad voor de beoordeling van een waterkering met de aanwezigheid van dierlijke graverij en de beschouwing van de gelijktijdigheid van dierlijke graverijen en hoogwater.

Tabel 2 beschrijving takken van generiek faalpad.

Tak	Beschrijving
Schade door graverij	'Schade door graverij' betreft de aanwezigheid van één of meerdere dierlijke graverijen in de waterkering die een significante schade oplevert aan de dijk.
Geen graverij	Bij 'geen graverij' wordt ervan uitgegaan dat er daadwerkelijk geen graverij in de waterkering aanwezig is en uitgegaan wordt van een onbeschadigde waterkering.
Niet gedetecteerd én hersteld voor hoogwater	Deze tak betreft de kans dat een relevante (hoge) waterstand tijdens de herstelperiode optreedt.
Wel gedetecteerd én hersteld voor hoogwater	Deze tak geeft aan dat de graverij tijdig gedetecteerd en hersteld is voor het optreden van hoogwater. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de sterkte van de kering op hetzelfde niveau is als voor de graverij.
Sterktereductie	De sterktereductie beschrijft de schematisering van de (negatieve invloed) van de graverijen in de dijk. Dit betekent feitelijk dat de dijk beschadigd is en dat het waterkerend vermogen is aangetast. Deze schade leidt niet noodzakelijkerwijs tot een overstroming.
Falen dijk <i>bovenste tak</i>	Het 'falen dijk' is een conventionele analyse van een faalmechanisme, inclusief de geschematiseerde sterktereductie.
Falen dijk (hoogwater) <i>Onderste tak</i>	Het 'falen dijk' is een conventionele analyse van een faalmechanisme tijdens hoogwater zonder de invloed van een dierlijke graverij.

3.3.4 Stappenplan aantonen veiligheid graverijen

Dit stappenplan is naar analogie opgesteld van Kanning (2019).

De bedoeling van de te doorlopen stappen is dat:

- (I) Inzicht wordt verkregen in welke graverijen (dier, locatie etc.) mogelijk grote gevolgen hebben voor de veiligheid.
- (II) Dat gerichte maatregelen kunnen worden uitgedacht om deze graverijen te kunnen voorkomen/de kans hierop voldoende klein te maken.

De te doorlopen stappen zijn op hoofdlijnen de volgende:

1. Inventarisatie mogelijke bedreigingen

Als eerste worden mogelijke bedreigingen geïdentificeerd die afwijkingen van het gewenste gedrag van het functioneren van de waterkering kunnen veroorzaken.

Voorbeeld:

Te denken valt aan een graverij van een bever in de teen van een waterkering.

2. Inventarisatie invloed bedreigingen op faalpad(en)

Na inventarisatie van de bedreigingen wordt voor elke bedreiging onderbouwd wat de globale invloed op het functioneren van de maatregel is. Daarbij wordt voor elke knoop in de relevante faalpaden kwalitatief beschreven wat de invloed is, en globaal ingeschat wat de invloed op de faalkans is.

Voorbeeld:

Sterktereductie van de waterkering door een verhoogde freatische lijn ten gevolge van een bevergraverij in de waterkering.

3. Inventarisatie mogelijke maatregelen

Op basis van de eerste inventarisatie kan maatregelen worden gedefinieerd waarmee doelmatig bedreigingen kunnen worden uitgesloten/de kans erop kan worden verkleind. Deze maatregelen kunnen plaatsvinden in de verschillende fases van de life-cycle van de waterkering:

- a. Het ontwerp.
- b. De uitvoering.
- c. Dagelijks beheer.

Voorbeeld:

Een aantal voorbeelden zijn hierna in Tabel 3 tijdens de verschillende fases weergegeven:

Tabel 3 Voorbeelden van de te nemen maatregelen in de verschillende fases van de life-cycle van de waterkering.

Ontwerp	Uitvoering	Dagelijks beheer
Plaatsen van een fijnmazig gaas	Diep genoeg plaatsen van een voldoende sterk fijnmazig gaas om uit te sluiten dat er bijvoorbeeld bevers (onder)doorgraven, ook bij laag water	Verhoogde visuele inspectie
Plaatsen damwanden	Combineren damwanden als maatregel tegen graverij	Detectiemethodieken
Taluds van klei/ kalk	Steenbestorting in de teen van de dijk	Bestrijding van graafdieren

4. Iteratief bepalen meest significante bedreigingen

Op basis van de inventarisatie van bedreigingen en de mogelijke maatregelen kan (kwalitatief) worden ingeschat welke bedreigingen het meest significant zijn. Op basis hiervan worden in de volgende stap de (bijvoorbeeld 2) meest significante bedreigingen nader uitgewerkt.

Voorbeeld:

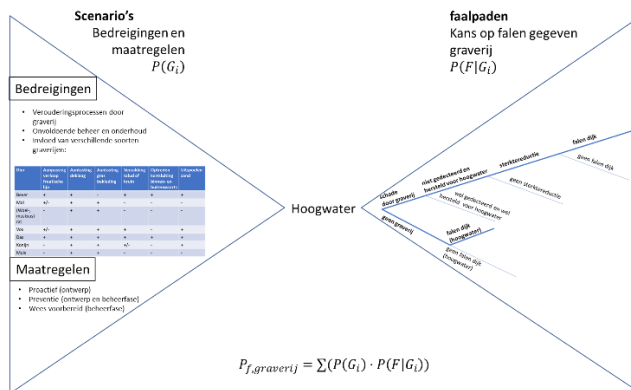
Bedreigingen	Maatregelen
Mogelijke graverijen	Inspectie en detectie
	Aanbrengen gaas
Bever in de teen van de dijk	Hol uitgraven en weer herstellen

5. Uitwerken significante bedreigingen

Uitwerken van de scenario's en faalpaden van de meest significante bedreigingen, en hoe deze met veiligheidsbarrières kunnen worden beheerst. Dit is een iteratief proces met stap 4.

Voorbeeld:

Het opstellen van één of meerdere bowties. Zoals hieronder afgebeeld.



6. Overzicht handelingsperspectief voor benodigd veiligheidsniveau

Op basis van de uitwerking van de significante bedreigingen, en op basis van de gekozen maatregelen ontstaat een helder handelingsperspectief t.a.v. hoe het vereiste veiligheidsniveau kan worden gehaald.

Het verdient de aanbeveling om deze stappen in een nader stadium uit te werken voor een case. Een handige vorm hiervoor is bijvoorbeeld één of meerdere workshops met een aantal dijkbeheerders of een andere nader te bepalen werkwijze.

3.3.5

Bepalen van de overstromingskansen door een dierlijke graverij in de waterkering

Meerdere combinaties van scenario's en faalpaden, zoals in de vorige paragraaf zijn bepaald, kunnen een bijdrage leveren aan de overstromingskans. Het is niet werkbaar en ook niet nodig om voor alle scenario's en faalpaden een kwantitatieve analyse uit te voeren. Om deze te bepalen wordt iteratief te werk gegaan. Eerst op basis van verkennende analyses het relatieve belang van verschillende paden en scenario's in schatten en identificeren. Hierbij is het mogelijk om met eenvoudige maatregelen bepaalde gebeurtenissen uit te sluiten. Voor de belangrijkste paden en scenario's kan vervolgens met een gedetailleerde analyse worden onderzocht wat nodig is om aan de veiligheid te voldoen.

Dit kan op basis van geavanceerde probabilistische analyses, maar ook op basis van eenvoudiger manieren om te onderbouwen dat iets wel of niet een significant effect kan hebben op de kans, in combinatie met mogelijke maatregelen. In de volgende paragraaf wordt een relatief eenvoudig manier gepresenteerd.

Afhankelijk van het scenario wordt het faalpad op verschillende manieren doorlopen (bijvoorbeeld uitgaande van een dassenburcht in een waterkering). Er zijn dus veel verschillende combinaties van scenario's en faalpaden. Gezamenlijk leiden deze tot een totale faalkans welke aan de faalkanseis moet voldoen:

$$P_{f,graverij} = \sum P(G_i) \cdot P(F|G_i) < P_{eis,dsn} \quad (3.1)$$

Waarin:

P_f = De kans op falen van de dijk gegeven een graverij.

$P(G_i)$ = De kans op een graverij (de scenario's).

$P(F|G_i)$ = Falen dijk gegeven een graverij (de faalpaden).

Doelstelling is uiteindelijk dat voldoende wordt onderbouwd dat de totale overstromingskans van de waterkering, gegeven alle scenario's en faalpaden voldoende klein is. Het stappenplan in §3.3.4 beoogt deze onderbouwing te ondersteunen. Vooral van belang hierbij is om de verschillende scenario's te identificeren en iteratief vast te stellen:

(I) welke bedreigingen significant zijn en

(II) welke maatregelen te treffen zijn.

Hierbij ontstaat een top 5 van de belangrijkste bedreigingen waar in detail naar gekeken moet worden. In §3.4 wordt een beschrijving gegeven hoe de genoemde faalkans kan worden bepaald.

3.3.6 **Samengevat**

Om de problematiek van graverijen te beheersen is met behulp van de bowtie-methode een analyse uitgevoerd. Met behulp van deze methode kan algemeen gesteld worden dat de invloed van graverij op de dijkveiligheid bepaald wordt door:

1. De bedreiging: de kans op schade door graverij
 - a. De kans op graverij, in combinatie met eventuele.
 - b. Maatregelen in ontwerp, uitvoering en beheer.
2. Faalpaden: de gevolgen van de graverijsschade op de faalkans van de dijk
 - a. Kans op de detectie en herstel voor hoogwater.
 - b. De sterktereductie door niet gedetecteerde/herstelde schade.

De voornoemde 4 punten bepalen uiteindelijk de kans op dijkkfalen door graverij. Via het aangeboden stappenplan wordt bepaald hoe dit voor een bepaalde case kan worden uitgewerkt.

3.4 **Hoe te bepalen?**

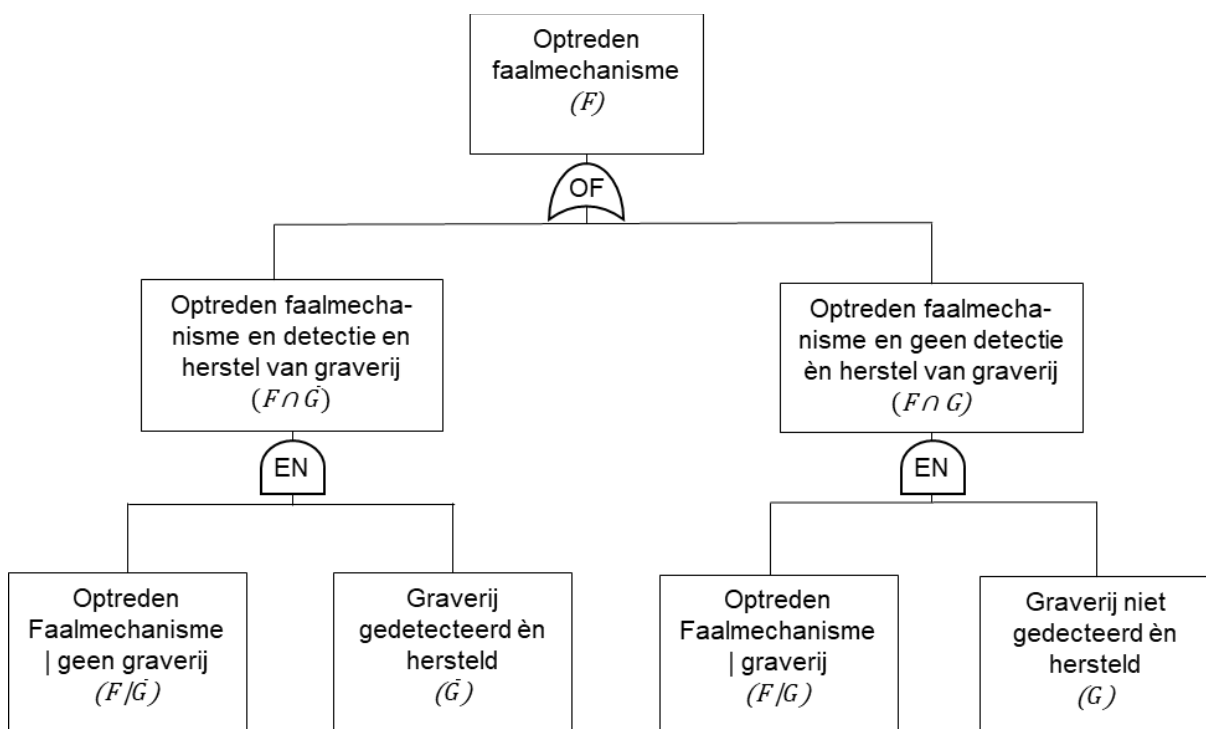
Bepalen overstromingskans door graverij

In deze paragraaf wordt niet gekeken naar de effecten van alle soorten graverij, maar wel naar wanneer graverij wel en niet invloed van invloed is op het halen van de faalkanseis van de kering. Hierbij wordt de volgende redeneerlijn aangehouden, zoals in Figuur 5 is uitgewerkt:

Graverij treedt op en leidt tot schade aan de kering. Daarbij zijn er twee mogelijke vervolgpaden:

of: Schade wordt op tijd opgemerkt en hersteld voordat een hoogwater optreedt, dan is er geen nadelig gevolg;

of: Schade heeft invloed op een direct mechanisme met als gevolg dat de schade een significante bijdrage levert aan de overstromingskans.



G = graverij niet gedetecteerd en hersteld voor hoogwater (dus graverij aanwezig tijdens hoogwater)
 \bar{G} = graverij gedetecteerd en hersteld voor hoogwater (dus geen graverij aanwezig tijdens hoogwater)
 $F|G$ = falen dijk gegeven een graverij
 $F|\bar{G}$ = falen dijk gegeven geen graverij

Figuur 5: Foutenboom voor maatregelen tegen graverijen.

De toelaatbare overstromingskans per jaar vanuit de Waterwet heeft betrekking op een waterkering traject en alle relevante faalmechanismen (faaloorzaken).

De kans wordt berekend volgens:

$$P(F) = P(F|G) \cdot P(G) + P(F|\bar{G}) \cdot P(\bar{G}) \quad (3.2)$$

En om aan de veiligheidseisen te voldoen geldt dus:

$$P(F|G) \cdot P(G) + P(F|\bar{G}) \cdot P(\bar{G}) < P_{eis,dsn} \quad (3.3)$$

Hierbij geldt:

$$P_{eis,dsn} = \frac{P_{max} \cdot \omega}{N} \quad (3.4)$$

$P_{eis,dsn}$ = Faalkanseis per faalmechanisme per doorsnede of kunstwerk (per jaar).

P_{max} = De maximaal toelaatbare kans van een traject (ondergrens Norm).

ω = De faalkansbijdrage van het mechanisme.

N = Het lengte-effect.

De faalkansbijdrage en lengte-effect factor is zo bepaald dat als aan $P_{eis,dsn}$ wordt voldaan, er ook aan de maximaal toelaatbare kans per traject wordt voldaan. Om aan te tonen dat je aan $P_{eis,dsn}$ voldoet zijn vaak semi-probabilistische verificaties afgeleid via zogenaamde

kalibraties. Deze kalibraties zijn voor het faalmechanisme macrostabiliteit weergegeven in Kanning et al. (2017).

Opgemerkt dient te worden dat de bepaling van de faalkanseis per faalmechanisme per doorsnede in de nieuwe aanpak van het WBI in 2023 anders wordt. Vanaf dat moment wordt er daadwerkelijk ingezet op het bepalen van de overstromingskans van een heel dijktraject. In de nieuwe aanpak is er geen sprake meer van eisen op faalmechanisme-, vak- of doorsnedeniveau en dus ook niet meer van een faalkansverdeling bij het beoordelen. Zie onderstaand kader voor de nieuwe aanpak. Overgenomen uit Koelewijn (2022). De daadwerkelijke bepaling van de faalkanseis heeft verder geen invloed op de onderstaande methodiek.

Per relevant faalmechanisme wordt de bijdrage aan de overstromingskans van het traject ingeschat. Deze worden gecombineerd om op trajectniveau een accurate overstromingskansinschatting te kunnen maken en deze te kunnen vergelijken met de "omgevingswaarde" (de overstromingskans eis per traject).

Bij de inschatting van faalkansen per doorsnede, wordt nadrukkelijk gekeken naar de dominante faalpaden (doorsneden en faalmechanismen die het meest bijdragen aan de overstromingskans van het traject). In deze nieuwe aanpak delen alle faalmechanismen dus automatisch de volledige faalkansruimte (omdat er niet meer per vak of mechanisme wordt vergeleken).

Hoewel dus niet meer wordt gesproken van een gecombineerde faalkansruimte, zal de nieuwe manier van beoordelen als gevolg hebben dat er in het geval van één of twee dominante faalmechanismen meer gebruik wordt gemaakt van het feit dat andere mechanismen gezamenlijk minder bijdragen aan de faalkans van het traject.

Maatregelen tegen graverijen kunnen op vergelijkbare wijze worden beoordeeld. Naast onderbouwen dat je aan $P_{eis,dsn}$ voldoet is het ok mogelijk om direct (via probabilistische analyses) te onderbouwen dat de overstromingskans kleiner is dan P_{max} . Voor dit veiligheidsraamwerk gaan we ervan uit dat de veiligheid wordt meegenomen binnen de directe faalmechanismes.

In alle gevallen is het mogelijk op basis van een probabilistische analyse exact te bepalen of men aan de eis voldoet. Vaak is dit niet wenselijk en is het voldoende om een deel van bovenstaande vergelijking exact te bepalen. Vaak kan dat door semi-probabilistische voorschriften te kunnen gebruiken.

Ruwweg heb je de volgende verificatiemethoden, dit dient in een later stadium nog verder uitgewerkt worden met voorbeelden.

1) De bijdrage van graverij aan de totale faalkans is erg klein

In dat geval is $P(G) \sim 0$ (de aanwezigheid van de graverij = ~ 0 of de kans op detectie en herstel = ~ 1) en reduceert (3.2) tot:

$$P(F|\bar{G}) < P_{eis,dsn} \quad (3.5)$$

en

$$P(G) < \frac{P_{eis,dsn}}{P(F|G)} \quad (3.6)$$

De eis voor de mechanismen gegeven dat er geen schade door graverij is blijft dus gelijk. Praktisch betekent dit dat alle faalkansruimte gaat naar het mechanisme gegeven dat de kans op graverij heel klein is of de kans heel groot is dat schade op tijd wordt gedetecteerd en hersteld en dat aangetoond moet worden dat schade door graverij een verwaarloosbare kans heeft.

2) De bijdrage van graverij is dominant

Er geldt:

$$P(F|G) < P_{eis,dsn} \quad (3.7)$$

In dit geval moet de kans op falen gegeven geen schade door graverij verwaarloosbaar klein zijn.

3) Met en zonder detectie en herstellen van graverij allebei significante bijdrage

Beide termen in de foutenboom dragen bij aan de faalkans. In dit geval dienen er zwaardere eisen gesteld te worden aan de 2 takken dan aan het totaal, bijvoorbeeld met een verdere opdeling van de faalkanseis met een factor x . En dan beide termen hier toetsen met een probabilistische of semi-probabilistische regel, dus bijvoorbeeld:

$$P(F|G) < x \cdot P_{eis,dsn} \quad (3.8)$$

$$P(F|\bar{G}) < (1 - x) \cdot P_{eis,dsn} \quad (3.9)$$

Als alternatief kan er gebruik gemaakt worden van een schematiseringsfactoraanpak.

In Koelewijn & van den Berg (2022) is een indicatie gegeven van de invloed van verschillende graverijen in verschillende delen van de dijk op de overstromingskans.

Gebruik

Welke van de drie situaties tot het meest efficiënte ontwerp leidt, dient nader uitgezocht te worden.

Het is dus van belang om inzicht te hebben in de kans dat schade door graverij ten tijde van een hoogwater aanwezig is en wat de effecten op de faalkans zijn. Bovenstaande gaat ervan uit dat graverij binnen ontwerp of beoordeling van een direct faalmechanisme worden meegenomen. Dit is conform (Min. I&W, 2022b) waarin dierlijke graverijen in waterkeringen geen apart faalmechanisme zijn, maar worden beschouwd als een zogenaamd initiërend mechanisme. De graverijen kunnen wel aanleiding vormen voor de conditionering van de dijk, waardoor een faalpad van een faalmechanismen versneld doorlopen kan worden (bijvoorbeeld doordat verschillende stappen kortgesloten worden).

In sommige gevallen is het ook mogelijk er voor te kiezen dat er een directe eis wordt bepaald conform vergelijking 3.3 waarin graverij een eigen deel van de beschikbare faalkansruimte (ω) krijgt.

3.5 Kennisvragen

Er zijn verschillende kennisvragen om nader te onderzoeken voor de beschreven methode:

- Wat zijn de schadefrequenties per dier, is dit juist bij hoogwater of niet?
- Wat zijn de detectie- en reparatiemogelijkheden en de bijbehorende kansen van slagen?
- Wat zijn de mogelijke maatregelen tegen dierlijke graverij en wat zijn de bijbehorende kansen van slagen?
- Welke faalpaden en scenario's neem je mee in de bowtie-analyse en welke kun je uitsluiten?

- Tot wanneer (welke tak) zijn deze faalpaden en scenario's relevant?
- Hoe kan men gebeurtenissen relatief ten opzichte van elkaar bepalen?
- Hoe gedragen gravende dieren zich bij hoogwater, welke beslissingen nemen ze waarom, wat speelt er nog meer een rol?
- Welke eisen aan uitvoering, beheer en onderhoud horen bij het uitsluiten van bepaalde scenario's/ faalpaden.
- Stel je eisen aan bepaalde elementen of de totale waterkeringsconstructie?
- Wat is het toepassingsgebied van de bowtie analyse?
- Hoe werkt de verificatie, semi-probabilistiek op basis van partiële factoren of probabilistisch?
- Hoe neem je waterstandsafhankelijkheid mee?

3.6 Oplossingsrichtingen

Vanuit de faalpaden volgt dat voor een aantal dieren/situaties het mogelijk is om overstromingsrisico's te beheersen door middel van detectie en tijdig herstel voor hoogwater. Voor andere dieren/ situaties bestaat deze mogelijkheid niet en kan graverij leiden tot te grote overstromingskansen. Adequate maatregelen zijn in dat geval nodig. Het voorkomen van graverijen is daarbij vaak een effectieve maatregel. Ontwerp oplossingen zijn hiervoor beschikbaar.

Afgeleide oplossingsrichtingen zijn onder andere:

- *Verbeteren inspectie en detectie maatregelen.*
Bij de huidige dijkinspecties wordt lang niet alles gedetecteerd (Klerk, 2022), dus is het belangrijk om daar verbetering in aan te brengen. Sterk verbeterde dijkinspecties waarbij gebruik gemaakt wordt van andere/ aanvullende detectiemethoden. Alleen een visuele inspectie is niet voldoende, Daarnaast frequenter en veel gericht inspecteren door bijvoorbeeld gebruik te maken van risicokaarten. Waterschap Brabantse Delta bijvoorbeeld is hier al voorzichtig mee begonnen.
- *Constructieve maatregelen*
Op de meest kritieke plekken constructieve maatregelen aanbrengen. Het doel hiervan is met name gericht op voorkomen dat bijvoorbeeld bevers de freatische lijn kunnen verhogen of kortsluiting in watervoerende pakketten kunnen veroorzaken. Zie paragraaf 3.2.
- *Beheersen uitdijende populatie*
Op systeemniveau is het verstandig om na te denken over hoe om te gaan met de uitdijende populatie. Denk hierbij aan bijvoorbeeld bevervluchtplaatsen, maar ook aan hoe we het beheer van bijvoorbeeld de bever goed kunnen regelen.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

In dit rapport zijn handvatten gegeven voor het bepalen van de overstromingskans van een (primaire) waterkering door dierlijke graverij. Dit is onder meer gedaan met de bowtie-methode.

Op basis van deze analyse wordt de invloed van graverij op de dijkveiligheid bepaald door:

1. De bedreiging: de kans op schade door graverij
 - a. De kans op graverij, in combinatie met eventuele.
 - b. Maatregelen in ontwerp, uitvoering en beheer.
2. Faalpaden: de gevolgen van de graverij schade op de faalkans van de dijk
 - a. Kans op de detectie en herstel voor hoogwater.
 - b. De sterktereductie door niet gedetecteerde/herstelde schade.

Om de invloed van de graverij nader te kunnen duiden zijn verschillende kennisvragen naar voren gekomen. De volgende kennisvragen dienen nader te worden onderzocht om tot een beter inzicht in de kans op graverij te komen:

- Wat zijn de schadefrequenties per dier, is dit juist bij hoogwater of niet.
- Wat zijn de detectie- en reparatiemogelijkheden en de bijbehorende slaagkansen?
- Wat zijn de mogelijke maatregelen tegen dierlijke graverij en wat zijn de slaagkansen?
- Wat zijn de mogelijke bedreigingen van dierlijke graverijen en wat zijn de bijbehorende kansen?
- Welke faalpaden en scenario's neem je mee in de bowtie-analyse en welke kun je uitsluiten?
 - Tot wanneer (welke tak) zijn deze faalpaden en scenario's relevant?
 - Hoe kan men gebeurtenissen relatief ten opzichte van elkaar bepalen?
 - Hoe gedragen gravende dieren zich bij hoogwater, welke beslissingen nemen ze waarom, wat speelt er nog meer een rol?
- Welke eisen aan uitvoering, beheer en onderhoud horen bij het uitsluiten van bepaalde scenario's/ faalpaden.
- Stel je eisen aan bepaalde elementen of de totale waterkeringsconstructie?
- Wat is het toepassingsgebied van de bowtie analyse?
- Hoe werkt de verificatie, semi-probabilistisch op basis van partiele factoren of probabilistisch?
- Hoe neem je waterstandsafhankelijkheid mee?

4.2 Aanbevelingen

Aanbevolen wordt om de in deze rapportage vermelde methodiek nader uit te werken met behulp van een voorbeeld of case (bijvoorbeeld in de vorm van een workshop met dijkbeheerders), waarbij met behulp van de bowtie-methodiek een aantal combinaties van situaties en dieren met elkaar worden gecombineerd om een beter inzicht te krijgen in de faalkansen. Denk hier bijvoorbeeld aan een bever die in de buitenteen van een kering heeft gegraven. Uit deze analyse kan dan naar voren komen in welke situaties en voor welke dieren maatregelen nodig zijn om de bedreigingen te kunnen opheffen.

Het wordt aanbevolen om na te gaan wat de verschillende noodmaatregelen zijn die genomen kunnen worden indien er een dierlijke graverij in de kering aanwezig is en er dreiging van) hoogwater is. De genoemde kennisvragen zoals opgenomen in dit rapport dienen nader onderzocht te worden.

Referenties

- De Ruijter & Guldenmund, 2015. A. de Ruijter and F. Guldenmund, "The bowtie method: A review," *Saf. Sci.*, vol. 88, pp. 211–218, 2015, doi: 10.1016/j.ssci.2016.03.001.
- De Dianous & Fiévez, 2006. V. De Dianous and C. Fiévez, "ARAMIS project: A more explicit demonstration of risk control through the use of bow-tie diagrams and the evaluation of safety barrier performance," *J. Hazard. Mater.*, vol. 130, no. 3 SPEC. ISS., pp. 220–233, 2006, doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.07.010.
- Gijzen et al. 2022. Nienke Gijzen, Alessandra Bizzarri en Han Knoeff, *Overzicht Omgevingswetgeving i.r.t. de veiligheid van primaire waterkeringen*, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, BOI, concept, 21 februari 2022
- 't Hart, 2018. 't Hart, R, Fenomenologische beschrijving Faalmechanismen WBI, Deltares, kenmerk 1200574-007-GEO-0005-ga, mei 2018
- Kanning, 2021. Wim Kanning, *Veiligheid innovaties*, Deltares, kenmerk 11207012-004-GEO-0001 concept, d.d. 6-10-2021
- Kanning et al, 2017. Dr. W. Kanning, Dr. A. Teixeira, Ir. M. van der Krogt, Ir. K. Rippi, *Derivation of the semi-probabilistic safety assessment rule for inner slope stability*, Deltares, kenmerk 1230086-009-GEO-0030 versie 3 , d.d. April 2017
- Koelewijn et al, 2020. André Koelewijn, Annette Kieftenburg, Lieke Hüsken, *Graverij door dieren, Invloed op de veiligheid van waterkeringen*, Deltares, kenmerk 11205235-003-ZWS-0001, d.d. 14-12-2020.
- Koelewijn, 2022. André Koelewijn, Mogelijkheden tot aanscherping veiligheidsbeoordeling en rol van aanvullende monitoring Dijkstrekkings Moerdijk - Drimmelen en Willemstad – Noordschans, concept, Deltares, kenmerk 11208766-002-GEO-0001, 21-10-2022
- Koelewijn & Van den Berg, 2022. André Koelewijn en Frans van den Berg, *Invloed van dierlijke graverijen op de overstromingskans, een kwantitatieve inschatting*, Deltares, kenmerk 11208057-050-GEO-0002, december 2022.
- Klerk, 2021. Wouter Jan Klerk, Methodiek voor risicogestuurd B&O van dijkbekledingen, groene versie, Deltares, kenmerk 11206820-005-GEO-0005, 13-12-2021
- Klerk, 2022. W.J. Klerk, *Decisions on life-cycle reliability of flood defence systems*, proefschrift TUDelft, 28-3-2022, <https://doi.org/10.4233/uuid:877bed45-d775-40bb-bde2-d2322cb334f0>
- Min. I&W, 2018. *Factsheet 'verhaal van de kering' versie 1*, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, datum 19 juni 2018
- Min. I&W, 2022a. *Bijlage XXXIIA bij de artikelen 12.2b en 122c (procedure beoordeling primaire waterkeringen*, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, BOI, concept, 5 juli 2022, gevonden op: <https://iplo.nl/thema/water/waterveiligheid/primaire-waterkeringen/beoordelen-primaire-waterkeringen/uitvoerbaarheidstoets-beoordelings/onderdelen-boi/> (bezocht, 9 december 2022)
- Min. I&W, 2022b. *Bijlage XXXIIB bij de artikelen 12.2b en 122c (randvoorwaarden beoordeling primaire waterkeringen*, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, BOI, concept, 5 juli 2022, gevonden op:

<https://iplo.nl/thema/water/waterveiligheid/primaire-waterkeringen/beoordelen-primaire-waterkeringen/uitvoerbaarheidstoets-beoordelings/onderdelen-boi/> (bezocht 9 december 2022)

Min. I&W, 2022c. *Handleiding overstromingskansanalyse*, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, BOI, concept, juli 2022 versie 0.8 Concept, gevonden op:

<https://iplo.nl/thema/water/waterveiligheid/primaire-waterkeringen/beoordelen-primaire-waterkeringen/uitvoerbaarheidstoets-beoordelings/onderdelen-boi/> (bezocht 9 december 2022)

Schweckendiek, 2018. WBI Veiligheidsraamwerk Kabels en leidingen, , Deltares, kenmerk 11202225-005-GEO-0001-jpjm, mei 2018




Van den Berg, 2021. Frans van den Berg, *Graverij door dieren in waterkeringen, Een kwantitatieve analyse en overzicht huidige kennis*, Deltares , d.d. 2-12-2021 KPP rapport 11206793-002-ZWS-0002

Van den Berg en Koelewijn, 2022. Van den Berg, F.P.W., Koelewijn, A.R, *Degradatie van dijken door dieren en droogte, Uitwerking observaties graverijen en scheuren & handelingsperspectief*, 11208034-002-ZWS-0001, Deltares, 28-11-2022

Wiki noodmaatregelen, 2022. Wiki Noodmaatregelen, Ulrich Förster, Rinse Joustra, Arjan Krikke, Jan van de Baan, *Workshop Noodmaatregelen bij Graverijschade van bevers 2022*, 26 oktober 2022

A Schade per dier

Tabel A.1 Invloeden van dierlijke graverijen – uitkomst van een workshop van een casus van een kanaaldijk met een zandkern langs een natuurgebied. Integraal overgenomen uit (Koelewijn et al, 2020).

Invloed van graverijen door dieren			Discussie
			
klein (bijv. muis)	middelgroot (bijv. konijn)	groot (bijv. bever)	
<p>1. Graverij buitendijks door middelgroot of groot dier, leidend tot piping Hol of ingang burcht aan buitenzijde van dijk, in mindere mate aan de binnenzijde, leidt tot verkorting van de kwelweglengte, zeker wanneer de deklaag boven de pipinggevoelige zandlaag wordt doorgraven. Hopen buitendijks kunnen ook leiden tot afdrukken van de kleibekleding binnendijks als gevolg van de hogere waterdruk. Gevolg: voortschrijdende erosie mede via het hol/de hopen gecombineerd met toenemende kwel; een zichzelf versterkend proces waarbij eventueel de kruin instort maar hoe dan ook leidt tot inundatie.</p>			<p>Wat gunstig is: het zandlichaam zal liever vermeden worden, zeker voor verblijfkamers. Ook is de kering vrij breed. Ongunstig is dat een bever graag een toegang onder de waterlijn maakt en daarbij onder dagelijkse omstandigheden en/of bij droogte de klei-deklaag doorgraaft.</p>
		<p>2. Graverij door bever nabij binnentoeen door kleideklaag Dit verlegt het uittredepunt voor piping kanaalwaarts. Vooral een risico bij lage waterstanden.</p>	<p>De afname van de kwelweglengte is relatief gering, zolang de buitendijkse situatie intact blijft.</p>
<p>3. Buitendijkse graverijen door alle dieren die bij (extreem) hoogwater leiden tot vullen van de kern en vervolgens falen door micro- of macro-instabiliteit De doorgravingen van de buitendijkse kleibekleding leiden ertoe dat de freatische lijn in de zandkern sneller zal stijgen, waardoor gemakkelijker verweking van het binnentalud ontstaat of afschuiving van het binnentalud door verlagings van de korreldruk (en daarmee verlies van schuifsterkte) en toename van het gewicht</p>			<p>Kanttekeningen: - Bij muizen heb je een plaag nodig voordat een effect merkbaar wordt. - De hopen kunnen ook bijdragen aan een betere drainage</p>
<p>4. Versterkte erosie bij overloop of golfoverslag, door beschadiging van de bekleding als gevolg van graverijen van alle soorten gravende dieren De invloed van slechts enkele kleine dieren is bescheiden, maar bij grote aantallen niet. Een muizenplaag maakt bovendien niet alleen hopen, maar kan ook het wortelstelsel opeten. Konijnen maken hopen die diep genoeg kunnen zijn om een kleibekleding met een dikte van 0,7 tot 1,0 m te doorgraven, waardoor de zandkern bloot komt te liggen en de erosie versnelt. <i>Zie hoofdstuk 4 van deze rapportage ter illustratie.</i></p>			
<p>5. Kruinverlaging door vooral bij hoogwater instortende hopen Met name in zand kunnen hopen instabiel raken wanneer de freatische lijn stijgt, al dan niet door direct instromen van water. Door deze instortingen kan de kruin verzakken, wat weer gemakkelijker tot overloop/overslag van water leidt.</p>			<p>Instorten kan ook op andere momenten gebeuren. Reikwijdte van gangenstelsel is van grote invloed.</p>

Een belangrijke kanttekening bij de verkregen resultaten is dat deze in de eerste plaats zijn uitgewerkt voor, en dus gelden voor, de concrete casus van een dijk met een zandkern, met aan de ene kant een kanaal en aan de andere kant een landelijk gebied. Alleen al omdat uit deze omschrijving de concrete locatie niet te herleiden valt, is een dergelijke situatie echter niet uniek. Toch moet bedacht worden dat de situatie bij bijvoorbeeld kleidijken en in bebouwd gebied hiervan in belangrijke mate kan afwijken, met andere mechanismen en faalpaden die een (hoofd)rol spelen.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl