

Dierlijke graverijen in waterkeringen

Afweegkader maatregelen en invloed op veiligheid



Dierlijke graverijen in waterkeringen

Afweegkader maatregelen en invloed op veiligheid

Auteur(s)

Frans van den Berg

Andre Koelewijn

Dierlijke graverijen in waterkeringen

Afweegkader maatregelen en invloed op veiligheid

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Reindert Stellingwerff
Referenties	-
Trefwoorden	Dierlijke graverij, veiligheid, afweegkader, maatregelen

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	09-12-2024
Projectnummer	11210365-001
Document ID	11210365-001-ZWS-0001
Pagina's	81
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Frans van den Berg André Koelewijn	

Samenvatting

Het risico van dierlijke graverijen in waterkeringen is al sinds vele jaren een onderwerp van discussie in de waterschapswereld. Dit geldt zeker sinds de forse toename van de beverpopulatie in de jaren 2010-2024. In deze rapportage wordt een tweetal onderwerpen ter beeldvorming voor die discussie uitgediept.

Afweegkader Maatregelen: in het afweegkader wordt de vergelijking tussen verschillende maatregelen gemaakt: Is het bijvoorbeeld effectiever om graverij te voorkomen met een constructieve maatregel of zijn aanvullende maatregelen in beheer en onderhoud een betere keuze?

De verschillende maatregelen zijn gekozen op basis van literatuuronderzoek en overleg met dijkbeheerders die ze in de praktijk hebben toegepast. In het afweegkader worden vooral overwegingen gegeven om de verschillende maatregelen tegen elkaar af te kunnen wegen. Zie tabel S1:

Tabel S.1 Afweegkader maatregelen voor dierlijke graverij dagelijkse omstandigheden (OK = overstromingskans).

Maatregel	Kosten	Reductie overstromingskans	Implementatietijd	Passend in de omgeving
1) Opengraven en dichten	0	0	+	+
2) Inspecteerbaarheid vergroten	+	0	+	++
3) Onaantrekkelijk maken	0	-	0	-
4) Afdichten van de graverij	+	0	+	0
5) Toepassen van preventieve detectiemethoden	0	0	0	+
6) Toepassen Gaas	--	++	--	+
7) Toepassen Constructie	--	++	--	+

-- = zeer hoge kosten/ zeer lage reductie OK/ zeer lange implementatie tijd/ past zeer slecht in omgeving.

- = hoge kosten/ lage reductie OK/ lange implementatietijd/ past slecht in omgeving.

0 = gemiddelde kosten/ gemiddelde reductie OK/ gemiddelde implementatietijd/ past in omgeving.

+

++ = zeer lage kosten/ zeer hoge reductie OK/ zeer lage implementatietijd/ past zeer goed in de omgeving.

Faalkanstabel invloed dierlijke graverijen: om het afweegkader voor maatregelen toe te kunnen passen, is het nodig om een inschatting te kunnen maken van de invloed van graverijen door verscheidene diersoorten op de overstromingskans. Dit kan met een situatie-specifieke analyse, maar er kan ook gebruik worden gemaakt van meer generieke inschattingen per diersoort, met de globale locatie op de dijk van de graverij, en per faalmechanisme.

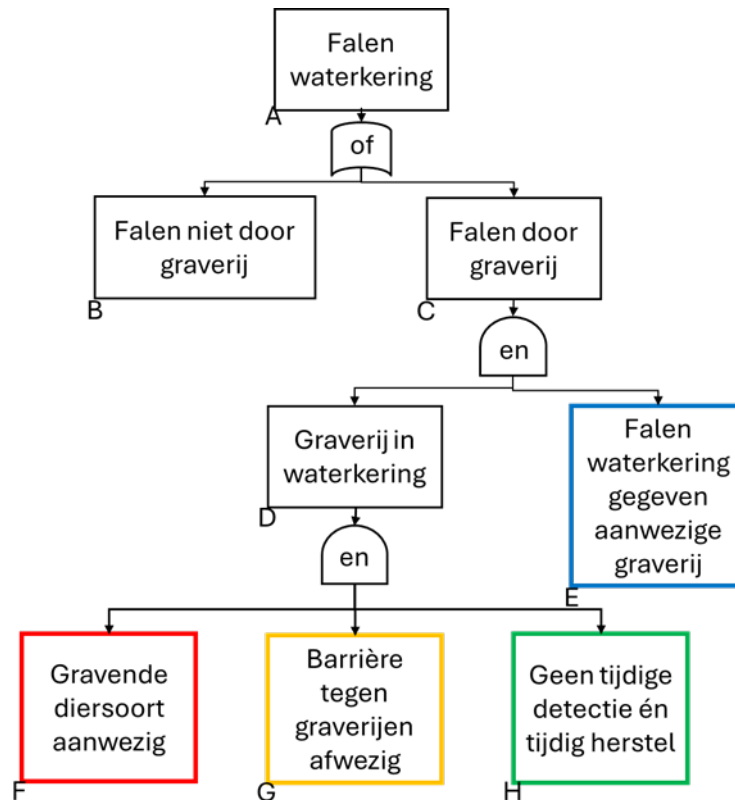
Hiertoe zijn in de afgelopen jaren al enkele tabellen gepubliceerd met de bandbreedte van deze invloed, voor verschillende typen dijkopbouw. Voor deze studie zijn deze tabellen gereviseerd, waarbij ook het inzicht is verwerkt dat de kleibekleding van een dijk na enkele jaren al in belangrijke mate gestructureerd is geraakt, en daardoor ook zonder (grote) graverijen al een hogere doorlatendheid kent dan direct na de aanleg.

Er zijn tabellen gegeven voor zanddijken met een kleibekleding, voor kleidijken en voor zandige dijken. Verder is er een aparte tabel gemaakt voor de invloed van bevergraverijen die gemaakt worden tijdens een hoogwater als het dijk op “drift” is. Die vormen een bijzondere bedreiging omdat dit zelfs met goed beheer en onderhoud, en verder verbeterde detectietechnieken, niet kan worden opgelost.

Benadrukt wordt dat deze tabellen betrekkelijk ruwe inschattingen betreffen, veelal op basis van expert judgement, voor verschillende situaties, waarbij de precieze getalswaarden nog ter discussie staan. Constructieve bijdragen aan deze discussie, ook in de vorm van concrete, onderbouwde cases en waarnemingen bij hoogwater, worden zeer gewaardeerd. Doordat de inschattingen ruw zijn kunnen de gegeven getalswaarden enkel gebruikt worden voor oriënterende analyses naar het effect van dierlijke graverijen op de faalkans van de waterkering op vakniveau.

Foutenboom

Om te bepalen of graverij uiteindelijk echt kan leiden tot falen van waterkering is een foutenboom opgesteld, gebaseerd op de kans dat een graverij aanwezig is, gegeven de populatie, maatregelen waar een barrièrewerking van uitgaat, en de kansen op tijdige detectie én herstel. Dit kan door het rechtergedeelte van de hierna gegeven faalboom concreet in te vullen, met de beschikbare hulpmiddelen. Daarmee kunnen ook verschillende alternatieve maatregelen op basis van effectiviteit en kosten worden afgewogen.



Figuur S.1 Foutenboom voor het falen van een waterkering, met focus op dierlijke graverijen.

Aanbevelingen

- Het verdient de aanbeveling om een goede eenduidige risico-inventarisatie voor heel Nederland te vervaardigen.
- De dijkbeheerder kan een waterschapsspecifieke keuze maken in de scores van de verschillende overwegingen van het maatregelen afwegingskader, zodat het beter aan sluit bij het waterschapssbeleid.
- Bij de gegeven waarden voor de bandbreedte in de “Faalkanstabel invloed van dierlijke graverijen” ontbreekt nog een impactanalyse, waarmee ook het realiteitsgehalte verder aangescherpt kan worden.
- Door aanvullende cases kan deze bandbreedte ook verder worden aangescherpt, al tonen de huidige cases ook al aan dat de potentiële invloed van dierlijke graverijen zeer groot kan zijn en dat ook dijkdoorbraken als gevolg van dierlijke graverijen daadwerkelijk voorkomen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	9
1.1	Context	9
1.2	Doel	9
1.3	Leeswijzer	9
2	Afweegkader maatregelen dierlijke graverij	10
2.1	Inleiding	10
2.2	Afbakening	10
2.3	Maatregelen en afwegingen	10
2.3.1	Inleiding	10
2.3.2	Maatregelen	11
2.3.3	Afwegingen	14
2.4	Afweegkader maatregelen	14
3	Faalkansverandering door dierlijke graverijen bij beoordeling, ontwerp en potentiële calamiteiten	16
3.1	Inleiding	16
3.2	Verandering van de faalkans van een waterkering door graverijen	17
3.2.1	Zanddijk met kleibekleding of kleidijk met zandscheg	17
3.2.2	Kleidijk	20
3.2.3	Zandige dijk	21
3.3	Voorbeeld van toepassing op een dijkvak	22
4	Conclusie en aanbevelingen	26
4.1	Conclusies	26
4.2	Aanbevelingen	26
	Referenties	28
A	Gedetailleerde onderbouwing invloedsfactoren	32
A.1	Toelichting	32
A.1.1	Lokale overstromingskans	32
A.1.2	Beperking van faalkansen tot primaire waterkeringen in Nederland	32
A.1.3	Dijksamenstelling, diersoort, faalmechanisme, locatie graverij & beschouwde belasting	32
A.2	Zanddijk met kleibekleding of kleidijk met zandscheg	33
A.2.1	Bever	35
A.2.1.1.	Afschuiven landzijde dijk	38
A.2.1.2.	Afdrukken bekleding	46
A.2.1.3.	Erosie bekleding	48
A.2.1.4.	Uitspoeling door een gat in de bekleding	50

A.2.1.5.	Piping	60
A.2.2	Muskusrat	64
A.2.2.1.	Afschuiven landzijde dijk	65
A.2.2.2.	Afdrukken bekleding	65
A.2.2.3.	Erosie van bekleding	65
A.2.2.4.	Uitspoeling door een gat in de bekleding	66
A.2.2.5.	Piping	66
A.2.3	Das	66
A.2.3.1.	Afschuiven landzijde dijk	68
A.2.3.2.	Afdrukken bekleding	68
A.2.3.3.	Erosie van bekleding	69
A.2.3.4.	Uitspoeling door een gat in de bekleding	69
A.2.3.5.	Piping	71
A.2.4	Beverrat	71
A.2.4.1.	Invloed op de beschouwde faalmechanismen	72
A.2.5	Mol	72
A.2.5.1.	Afschuiven landzijde dijk	72
A.2.5.2.	Afdrukken bekleding	72
A.2.5.3.	Erosie van bekleding	73
A.2.5.4.	Uitspoeling door een gat in de bekleding	74
A.2.5.5.	Piping	74
A.2.6	Vos en konijn	74
A.2.6.1.	Afschuiven landzijde dijk	74
A.2.6.2.	Afdrukken bekleding	74
A.2.6.3.	Erosie van bekleding	75
A.2.6.4.	Uitspoeling door een gat in de bekleding	75
A.2.6.5.	Piping	75
A.2.7	Woelrat en muis	75
A.2.7.1.	Afschuiven landzijde dijk	76
A.2.7.2.	Afdrukken bekleding	76
A.2.7.3.	Erosie van bekleding	76
A.2.7.4.	Uitspoeling door een gat in de bekleding	77
A.2.7.5.	Piping	77
A.2.8	Combinatie van meerdere diersoorten	77
A.3	Kleidijk	77
A.3.1	Cases	77
A.3.2	Binnenwaartse macrostabiliteit	80
A.3.3	Afdrukken bekleding	80
A.3.4	Erosie bekledingslaag	80
A.3.5	Uitspoeling door een gat in de bekleding	80
A.3.6	Piping	80

1 Inleiding

1.1 Context

Dierlijke graverijen in waterkeringen zijn al decennialang een uitdaging voor de dijkbeheerder. De laatste jaren is de invloed van de bever in de dijkenwereld toegenomen. De bever is in 1826 in Nederland uitgeroeid, maar in 1988 weer in de Biesbosch uitgezet. Het hernieuwd uitzetten van de bever leidde in 1966 tot discussie (Lutra, 1966). Men was destijds van mening dat het alleen acceptabel was als de bever enkel in het gebied van de Biesbosch zou kunnen leven. Dat is “helaas” niet de waarheid gebleken.

In 2012 werd in het blad Zoogdier het volgende opgetekend: *“Momenteel tref je ze vooral aan langs de grote rivieren: de Maas, Rijn, Waal en IJssel. Daarnaast ook in de Biesbosch, Flevopolder, verschillende Limburgse beken en bij de Hunze en het Zuidlaardermeer. Vanuit deze plekken zullen zij zich steeds meer gaan verspreiden naar het ‘achterland’, zoals de beken in Gelderland, Overijssel en Noord-Brabant. Maar ook de veen- en plassengebieden in Zuid- en Noord-Holland en in de provincies Groningen en Friesland. Waar niet eigenlijk? Voor de korte termijn lijken vooral de Zeeuwse eilanden lastig te bereiken, maar de ervaringen leren dat ook dit waarschijnlijk een kwestie is van geduld hebben.”* (Vreugdenhil et al, 2012).

Nu, in 2024, weten wij dat de bever op meerdere locaties in Nederland is aanbeland en de laatste inschatting is, dat er in Nederland nu ruim 6000 bevers leven en we toegroeien naar 10.000 dieren aan het eind van dit decennium. Deze inschatting en verwachting zijn gedaan op basis van informatie van de Zoogdierverseniging en Muskusrattenbeheer.¹ Uit eerdere onderzoeken is bekend dat deze populatiegroei een negatieve invloed kan hebben op overstromingskans van de waterkering.

1.2 Doel

In dit rapport wordt verder ingegaan op het toenemend risico van graverij en worden handvatten gegeven om een gefundeerde keuze te maken voor de verschillende maatregelen die onder meer bevergraverij tegengaan of om graverijen tijdig te herkennen zodat er maatregelen kunnen worden getroffen.

De doelstelling van deze rapportage is om een afweegkader te bieden tussen verschillende maatregelen tegen- of volgend op graverij. Dit helpt de dijkbeheerder een onderbouwde keus te maken aan de hand van verschillende overwegingen om tot een geschikte graverij(-werende) maatregel te komen. De tweede doelstelling is een handreiking te doen hoe met een faalkans veranderingstabel en een faalboom de invloed van een graverij gekwantificeerd kan worden, hetgeen verder kan helpen bij de besluitvorming.

1.3 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt het afweegkader maatregelen dierlijke graverij behandeld. In Hoofdstuk 3 volgt een nadere toelichting van de faalkans verandering en de faalboom voor graverij, met de kwantificering van de risico's. In Hoofdstuk 4 volgen de conclusies en aanbevelingen.

¹ https://www.linkedin.com/posts/keesschep_hoeveel-bevers-leven-er-in-nederland-dat-activity-7245336068030365696-8kRo/?utm_source=share&utm_medium=member_ios.

2 Afweegkader maatregelen dierlijke graverij

2.1 Inleiding

Bij het ontdekken of voorkomen van een dierlijke graverij in een waterkering zullen er door de keringbeheerder keuzes gemaakt moeten worden, hoe hiermee om te gaan. De te maken keuzes hangen onder andere af van het te verwachten risico op falen van de kering ten gevolge van de aanwezigheid van de verschillende dierlijke gravers. Als hulpmiddel om de keuzes te ondersteunen is er een praktisch afweegkader ontwikkeld, waarin de beheerder een keuze kan maken tussen de verschillende maatregelen die getroffen kunnen worden.

2.2 Afbakening

Het afweegkader maatregelen wordt opgesteld om een onderbouwde keuze te maken tussen de verschillende maatregelen ter voorkoming van een dierlijke graverij, in het bijzonder de bever. Dit afweegkader is bedoeld voor tijdens de dagelijkse omstandigheden van zowel primaire als secundaire waterkeringen ten behoeve van beheer en onderhoud. Momenteel wordt door Deltares, in opdracht van het HWBP en Stowa, een veiligheidsraamwerk voor dierlijke graverijen opgesteld, waarin ook een afweegkader met vergelijkbare opbouw voor ontwerp en tijdens hoogwater is opgenomen is.

De genoemde maatregelen in het opgenomen afweegkade zijn de momenteel meest voorkomende maatregelen. Er zijn ook minder voorkomende maatregelen zoals, gecombineerde oplossingen, kalk in klei/ steen/ asfalt onder een leeflaag. Deze zijn niet meegenomen.

Bij het opgestelde afweegkader wordt alleen rekening gehouden met de gevolgen van de schade die ontstaat door graverij in de kering. Er wordt geen rekening gehouden met andere vormen van schade zoals knaagschade aan bomen en andere gewassen, natschade ten gevolge van dammenbouw of het dichtstoppen van duikers en gemalen.

2.3 Maatregelen en afwegingen

2.3.1 Inleiding

In het afweegkader wordt de afweging tussen verschillende maatregelen genomen: Is het bijvoorbeeld effectiever om graverij te voorkomen met een constructieve maatregel of zijn aanvullende maatregelen in beheer en onderhoud een betere keuze?

In het afweegkader worden vooral overwegingen gegeven om de verschillende maatregelen tegen elkaar af te kunnen wegen.

Niet elke graverij is hetzelfde, omdat elke dierlijke graver zijn eigen vorm van graverij heeft (grootte, diepte, etc.). Door de toename van de populatie van de bever en het grote effect op de toename van de overstromingskans ten gevolge van een bevergraverij dient er actie te worden ondernomen om de keringen veilig te houden. Dit uit zich onder andere in detectie, graafwerende maatregelen en het bieden van een handelingsperspectief.

Let wel! De effectiviteit van de graafwerende maatregelen hangt mede af van de inventiviteit van de graver. Bijvoorbeeld een steenbestorting met stenen van onvoldoende gewicht of ingegraven netten waar de bever omheen graaft.

2.3.2 Maatregelen

Om dierlijke graverijen in een waterkering te verhinderen of te bemoeilijken zijn er verschillende mogelijkheden. Er kan hierbij onderscheid gemaakt worden in maatregelen die vooral functioneel zijn tijdens hoogwater en maatregelen die tijdens dagelijkse omstandigheden vooral functioneel zijn. Van een aantal maatregelen waarvan men in het verleden dacht dat deze een goede werking zouden hebben is inmiddels gebleken dat deze toch niet zo'n goede werking hebben. Denk hierbij aan een steenbestorting in de vooroever. Uit voorbeelden bij Waterschap Rivierenland en Waterschap Limburg is bekend dat de bevers de stenen verplaatsen om dan alsnog in de dijk te kunnen graven. Dit speelt vooral in de gebieden waar al veel bevers aanwezig en de optimale verblijfplaatsen al bezet zijn, zodat de jonge bevers op zoek gaan naar de suboptimale verblijfplaatsen.

Hieronder wordt een aantal maatregelen benoemd, die tijdens dagelijkse omstandigheden kunnen worden uitgevoerd.

De verschillende maatregelen die genomen kunnen worden zijn beschreven in onder andere Wong & Van Tilborg (2024), Hoogendoorn (2024), Van Dorst et al. (2024), kenniscentrumbever.nl, etc. Deze zijn hieronder opgenomen.

Per maatregel zijn de diverse kentallen opgenomen voor zover bekend. Deze zijn afkomstig uit Van Dorst et al. (2024). De kentallen uit die rapportage geven in een aantal gevallen een zeer nauwkeurige waarde. In onderhavige rapportage is ervoor gekozen om een meer indicatieve waarde te geven om schijnnaauwkeurigheid te vermijden. Buiten de kosten van de maatregelen zijn er ook de baten van vermeden schade. Deze zijn niet meegenomen in het afweegkader.

1) Opengraven en dichten

Indien erdoor bijvoorbeeld de dijkbeheerder of muskusrattenbestrijder een graverij wordt ontdekt én deze locatie ligt op een potentieel gevaarlijke locatie (zie hiervoor ook Hoofdstuk 3), dan kan deze worden open gegraven en gedicht. Hierdoor zal de burcht en het gangenstelsel verdwijnen en zal de schade worden hersteld door aan te vullen. Een uitgebreide beschrijving over de aanpak van het opengraven en dichten van een hol/burcht is gegeven door Schep & Dijkstra (2024).

Kosten:

- Opengraven en dichten bevergraverij: € 9.000,--/ stuk (met ontheffing).
- Opengraven en dichten dassengraverij: € 7.000,--/ stuk.

2) Inspecteerbaarheid vergroten

Het doel van het vergroten van de inspecteerbaarheid is niet om graverij te voorkomen maar een tijdige waarneming van de graverijen te hebben. Dit werkt het beste door voldoende inspecties te hebben en goed inspecteerbare keringen. Een kering is goed inspecteerbaar als kritieke punten goed bereikbaar zijn. Hiervoor is ruimte in de vorm van bijvoorbeeld een inspectiepad nodig, maar ook toegankelijkheid van de teensloot, onderwater oevers en bosschages nabij de oevers. Herstel is door een vroegtijdige waarneming eenvoudig en beperkt in omvang.

Kosten

- Aanvullende inspecties, incl. materieel en vervoer: Ca. € 750,-- á € 1.000,-- p.p./ dag.

3) Onaantrekkelijk maken

Een onaantrekkelijke kering zorgt ervoor dat de kans op graverij afneemt. Een kering is (voor bevers en dassen) onaantrekkelijk als er weinig begroeiing aanwezig is, en (voor bevers) als het onderwatertalud zeer flauw is.

Indien er al een beschermd dier aanwezig is in de kering zoals een bever of een das, dient een alternatieve (aantrekkelijke) locatie gemaakt te worden. Voor dassen zijn er al verschillende projecten opgezet door de Environment Agency in het Verenigd Koninkrijk om kunstmatige dassenburchten te plaatsen in de buurt van kering, zie Figuur 2.1. Ook in Nederland is door het Waterschap Aa en Maas een kunstmatige dassenburcht gemaakt nabij Megen.



Figuur 2.1 Kunstmatige dassenburcht in het Verenigd Koninkrijk (bron: Environment Agency).

Kosten

- Verlagen oever (eventueel verleggen kade) binnendijs of buitendijs: € 260.000/ km.
- Verflauwen oever (eventueel verleggen kade) binnendijs: € 135.000/ km.
- Verondiepen: € 135.000/ km.
- Verwijderen houtige begroeiing € 7.000/ m².

Specifiek voor de das

- Plaatsen dassenraster kleinschalig € 500,-/ 10 m.
- Plaatsen dassenraster grootschalig € 40.000/ km.
- Stenen of beton kleinschalig € 4.000/ 10 m.
- Stenen of beton grootschalig € 4,0 miljoen/ km.
- Alternatieve burchtlocatie € 9.000/ stuk.

4) Het afdichten van de graverij

Het afdichten van een graverij met behulp van bijvoorbeeld (zwe)klei om te zorgen dat de graver geen toegang heeft tot het hol.

Bij een oefening in het kader van noodmaatregelen zijn in de Marnewaard op 19 september 2024 zijn proeven uitgevoerd met verschillende soorten afdichting. Enige observaties van U. Förster van Deltares:

- Bij het gebruik van netten met zwelkleikorrels (van de laagste zwelklasse) zwelt de zwelklei te langzaam om voldoende af te dichten om de waterdruk bij sterke stroming door het gat tegen te kunnen houden. Bij observatie de volgende dag zaten de bentonietzakken echter goed vast en dichtten het gat goed af.
- De zandzak en de zak gevuld met Super Absorbend Polymer ("Pampers") sloten het gat niet goed af.
- Fender om hopen met druklucht oppompen: plooi van de zak blijft ingevouwen waardoor water langs de plooi kan uittreden. De maat van de balg moet beter afgestemd zijn op de maat van het hol. Als de druk te hoog wordt opgevoerd dan barst de grond op. Dit is problematisch als de dikte van de bekleding zeer klein is.

Mogelijkheden om hopen op te vullen met een zandschuimmengsel is mogelijk ook een goede optie, maar dit dient nog verder onderzocht te worden.

Let wel, dat het voor de bever en das alleen toegestaan is, en dus mogelijk is, om de hopen en gangen tijdens dagelijkse omstandigheden te dichten als men er zeker van is dat er geen bever of das in de hopen en gangen aanwezig is. In geval van hoogwater is deze toetsing niet nodig en kunnen er direct maatregelen genomen worden.

Kosten

Afhankelijk van het aantal te vullen hopen ca. € 750,-- á € 1000,-- p.p./dag inclusief materieel en vervoer. De kosten van 25 kilo Mikolit® 300 zwelklei is ca. € 15,-- exclusief btw.

5) Toepassen van preventieve detectiemethodieken met geroerde grond

Het betreft hier detectiemethodieken die continu meten en in het grondlichaam worden aangebracht (geroerde grond). Denk hierbij aan het toepassen van glasvezeltechniek, waarmee men een bever- of dassengraverij kan detecteren. Door het toepassen van preventieve detectiemethodieken kan er ook reactief worden gehandeld.

Kosten:

De kosten voor de uitleesunits, de zogenaamde interrogators, zijn nog steeds vrij hoog. De kosten van een enkele interrogator bevinden zich grofweg tussen de 100.000 en 150.000 euro. Met een apparaat van 100.000 euro kan 3 tot 50 km worden bemeaten. De mogelijke nauwkeurigheid en de resolutie lopen daarbij sterk uiteen. De minimumeisen volgen uiteindelijk uit de monitoringsbehoefte, die zal per situatie vastgesteld moeten worden. Dat geldt eveneens voor het type kabel dat toegepast wordt. De prijs daarvan kan variëren van 3 tot 15 euro per meter afhankelijk van de soort metingen. Voor de metingen van een dierlijke graverij kan worden volstaan met een kabel met een tweetal glasvezels met een robuustere beschermende mantel (Van den Berg & Nieboer, 2024).

6) Gaas

Met gaas wordt voorkomen dat graverij (diep) in de kering komt. Om dit te voorkomen kan het gaas op twee manieren worden aangebracht:

- In de ondergrond in het talud van de dijk tot max. 4 m onder het maaiveld.
- Evenwijdig aan het dijktalud.

Kosten:

- Plaatsen gaas over een kort traject: € 20.000,--/100 m.
- Plaatsen gaas over een lang traject: € 150.000,--/km.

De bovenstaande kosten zijn indicatieve prijzen en hangen af van veel factoren, zoals goede bereikbaarheid, kwaliteit van het gaas (levensduur > 50 jaar. gepuntlast- of geweven gaas.) en de diepte van het te plaatsen gaas (2-4 m onder het maaiveld).

Plaatsen gaas evenwijdig aan het talud: € 20,-- à € 50,-- per m²

Deze kosten zijn ook afhankelijk van meerdere factoren, bereikbaarheid, grootte van het traject, of het gaas direct aangebracht wordt op het talud, of dat er bijvoorbeeld eerst de graslaag van het talud afgehaald wordt, gefreesd, geprofileerd, gaas aangebracht wordt en er vervolgens weer een afdeklaag op komt.

7) Constructie

Een constructie voorkomt net als gaas dat een graverij (diep) in de kering komt. Een constructie heeft echter meer sterkte waardoor deze mogelijk (deels) als vervangende kering kan fungeren. Herstel van de kering is daarom niet altijd nodig. Dit hangt af van het ontwerp en wordt al snel zeer duur. Als een constructie niet in het ontwerp is opgenomen dan is deze maatregel waarschijnlijk naar verhouding te duur.

Kosten:

- Damwand over een kort traject: € 150.000,--/100 m.
- Stenen/ beton constructie over een kort traject: € 40.000,--/ 100 m.

2.3.3

Afwegingen

Verschillende afwegingen zijn mogelijk om tot een keuze te komen van een bepaalde maatregel. De afwegingen zijn afhankelijk van de volgende aspecten:

Kosten: wat kosten de verschillende maatregelen?

Het kostenaspect is een belangrijke afweging. Hierbij is het van groot belang om de kosten van de verschillende maatregelen in kaart te brengen. Bij de verschillende maatregelen in de voorgaande sub-paragraaf is een inschatting gegeven van deze kosten. Houd er wel rekening dat deze zowel naar boven als beneden af kunnen wijken.

Overstromingskans: hoeveel kan de overstromingskans worden gereduceerd?

In het volgende hoofdstuk wordt hiervoor een handreiking gedaan. Afhankelijk van de dijkopbouw, de graver en het initiële faalmechanisme kan de overstromingskans aanzienlijk groter worden en op basis van de maatregelen kan deze vergroting van de overstromingskans weer ten dele, of volledig, ongedaan worden gemaakt.

Implementatietijd: hoelang duurt het voordat de maatregel effect heeft?

Hier zit een groot verschil in tussen de verschillende maatregelen.

Het uitvoeren van een extra inspectie kan snel geregeld worden, terwijl bij het aanbrengen van gaas er meer tijd zit tussen het moment van beslissen en aanbrengen.

Hoe past het in de omgeving?

Visuele aantrekkelijkheid van de omgeving wordt beïnvloed door de maatregel, hoe minder zichtbaar de maatregel hoe beter de maatregel in de omgeving past.

2.4

Afweegkader maatregelen

Om voor een dijkbeheerder een handelingsperspectief te geven over hoe om te gaan met een graverij is in deze paragraaf een afweegkader opgesteld.

De eerste vraag die (door de dijkbeheerder) gesteld dient te worden is "Hoe groot is de kans dat er gravers worden verwacht in het gebied". Dit kan worden uitgevoerd door middel van een inventarisatie van potentiële graverij.

Dit kan bijvoorbeeld met een agent based model, zoals Van den Berg & Noyons (2024) dit hebben gedaan om het gedrag van bevers tijdens hoogwater te bepalen. Ook hebben al een groot aantal Waterschappen, Provincies, Rijkswaterstaat en ProRail ervaring met risico-inventarisaties. Recente voorbeelden zijn:

- Wetterskip Fryslân (Van der Wouw, 2023).
- Waterschap Drents Overijsselse Delta (Holscher et al, 2022).
- Waterschap Aa en Maas (Larooij, 2022) en aan aanvullende studie loopt momenteel om de risico-inventarisatie te optimaliseren (Wiet van Bragt (Aa en Maas) en Femke Kuiphof (Van Hall Larenstein).
- Provincie Drenthe, Provincie Groningen, Waterschap Hunze en Aa's en Waterschap Noorderzijlvest (Bos et al, 2020).
- Waterschap Rijn en IJssel (Wegener et al, z.d.).
- Waterschap Brabantse Delta².
- Rijkswaterstaat Noord Brabant en Limburg (Van Dorst et al, 2024).
- ProRail (Terpstra et al, 2022).

In hoeverre er algemene toepasbaarheid uit volgt, moet nog nader worden bepaald. Volgens een dijkbeheerder van Waterschap Rivierenland zullen op termijn voor alle risicolocaties voor bevergraverij (alle locaties met water binnen 30 m afstand van de teen van de waterkering) een preventieve maatregel getroffen worden. Dan wel graafwerend, dan wel een inrichting van gunstiger habitat op afstand van de kering. Het is dan van belang om een goede risico-inventarisatie te hebben per Waterschap.

In Tabel 2.1 is het afweegkader maatregelen weergegeven op basis van de eerder gegeven 7 maatregelen en overwegingen. Dit afweegkader is bedoeld voor dagelijkse omstandigheden ten behoeve van beheer en onderhoud. Momenteel wordt door Deltares, in opdracht van het HWBP en Stowa, een veiligheidsraamwerk voor dierlijke graverijen opgesteld, waarin ook een afweegkader met vergelijkbare opbouw voor ontwerp en ingrepen tijdens hoogwater is opgenomen.

Tabel 2.1 Afweegkader maatregelen voor dierlijke graverij dagelijkse omstandigheden.

Maatregel	Kosten	Reductie overstromingskans	Implementatietijd	Passend in de omgeving
1) Opengraven en dichten	0	0	+	+
2) Inspecteerbaarheid vergroten	+	0	+	++
3) Onaantrekkelijk maken	0	-	0	-
4) Afdichten van de graverij	+	0	+	0
5) Toepassen van preventieve detectiemethoden	0	0	0	+
6) Toepassen Gaas	--	++	--	+
7) Toepassen Constructie	--	++	--	+

-- = zeer hoge kosten/ zeer lage reductie OK/ zeer lange implementatie tijd/ past zeer slecht in omgeving.

- = hoge kosten/ lage reductie OK/ lange implementatietijd/ past slecht in omgeving.

0 = gemiddelde kosten/ gemiddelde reductie OK/ gemiddelde implementatietijd/ past in omgeving.

+ = lage kosten/ hoge reductie OK/ lage implementatietijd/ past goed in de omgeving.

++ = zeer lage kosten/ zeer hoge reductie OK/ zeer lage implementatietijd/ past zeer goed in de omgeving.

² Persoonlijke mededeling Marcel van der Doef (Waterschap Brabantse Delta).

3 Faalkansverandering door dierlijke graverijen bij beoordeling, ontwerp en potentiële calamiteiten

3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk vormt de aanzet voor en een onderbouwing van een concept-tabel “Faalkansverandering dierlijke graverijen bij beoordeling en ontwerp”. Daarmee kan de potentiële invloed van graverijen per onderscheiden directe faalmechanisme binnen een beperkte bandbreedte worden ingeschat per dijkvak. Dit dient zowel ter ondersteuning van de beoordeling en ontwerpen, als voor gebruik bij potentiële calamiteiten, zoals bij graverij door bevers tijdens een hoogwatersituatie.

De basis hiervoor is gelegd door Koelewijn (2023), waarin een tabel is opgenomen met een geschatte bandbreedte van de invloed op de overstromingskans door binnenwaartse macrostabiliteit, afdrukken van de kleibekleding, erosie van de kleibekleding, uitspoeling door een gat in de kleibekleding en piping, als gevolg van graverijen door bevers, dassen, mollen, vossen, konijnen, woelratten en muizen, uitgesplitst naar de taludzijde waarin gegraven wordt. Nadien is een uitsplitsing per dijktype gegeven in Van den Berg & Koelewijn (2023) en zijn ook aanvullende cases en analyses beschikbaar gekomen, met name in de internationale literatuur. Verder zijn de ervaringen uit de hoogwaterperiode rond de jaarwisseling 2023/2024 meegenomen, evenals voortschrijdend inzicht op diverse aspecten, mede vanuit het inmiddels lopende HWBP KIA-project op het gebied van dierlijke graverijen.

De tabellen “Faalkansverandering”, waarvan in de volgende paragraaf een vernieuwde versie wordt gegeven, geven een (soms erg grote) bandbreedte aan van de conditionele verandering van de overstromingskans, gegeven een aanwezige graverij en een hoogwater rond de waterstand bij norm (WBN). Voor binnenwaartse macrostabiliteit en piping is gebruik gemaakt van formules die ten behoeve van de kalibratie voor WBI2017 zijn afgeleid, en die duidelijk niet toepasbaar zijn voor kleinere regionale waterkeringen. Meer in het algemeen geldt dat de onderbouwing mager te noemen is, vanwege een beperkt aantal praktijkcases, proeven en analyses. Ook geldt dat de onderbouwing voor binnenwaartse macrostabiliteit beter is dan voor de andere initiële mechanismen. Bij het opstellen van de tabellen is rekening gehouden met zowel de mogelijkheid van golfoverslag en/of overloop als de mogelijkheid dat dit niet optreedt, zonder expliciet onderscheid te maken naar de kans hierop. Het hogere deel van de bandbreedte van de invloedsfactor gaat dan uit van golfoverslag of overloop, de lage kant gaat ervan uit dat er geen golfoverslag of overloop is. De bandbreedte is mede zo groot door de grote impact van golfoverslag en overloop op meerdere faalmechanismen. De impact van dierlijke graverijen in het algemeen hangt vooral samen met de veranderingen in de (tijdsafhankelijke) waterdrukverdeling als gevolg van de graverijen.

Na publicatie kwam naar voren dat de grote bandbreedte lastig is voor toepassing in de praktijk. Ook werd niet altijd begrepen dat de toe te passen bovengrens gelimiteerd wordt door de basisfaalkans van de kering – een kans groter dan 1 is uiteraard nooit mogelijk. Daarnaast werd meermalen opgemerkt dat naast een invloed in “ongrijpbare” kansen, ook weergave van de verandering van de stabiliteitsfactor of een andere uitkomst uit een rekenmodel nuttig zou zijn om de invloed van dierlijke graverijen te kunnen duiden. Tot slot werd een uitsplitsing naar dijktype (zandkern met kleibekleding, kleidijk of zandige dijk) waardevol geacht, die al in Van den Berg & Koelewijn (2023) is gegeven.

Sinds de publicatie is ook nieuwe informatie beschikbaar gekomen, waaronder de notie dat niet alleen bevers, maar ook andere diersoorten, in elk geval de das, invloed kunnen hebben op het faalmechanisme piping.

Ook zijn er meer cases beschikbaar, zodat de onderbouwing, met name voor de andere initiële mechanismen dan binnenwaartse macrostabiliteit, kon worden uitgebreid.

In dit hoofdstuk wordt in §3.2 eerst ingegaan op de verandering van de faalkans van een waterkering door graverijen, waarna in §3.3 wordt ingegaan op een voorbeeld van de toepassing op een concreet dijkvak.

3.2 Verandering van de faalkans van een waterkering door graverijen

In bijlage A wordt een uitgebreide onderbouwing gegeven van de verandering van de faalkans van een waterkeringen door graverijen voor beoordeling en ontwerp. Hierbij is ook ingegaan op de situatie bij hoogwatersituaties met een doorgaans lagere piekwaterstand en een kortere duur dan waarvoor bij beoordeling en ontwerp moet worden uitgegaan. In beperkte mate is ook een indicatie gegeven van de verandering van de stabiliteitsfactor van gangbare rekenmodellen.

Verder zijn ook muskusratten en beverratten toegevoegd als diersoorten.

Het inzicht dat in de praktijk altijd binnen enkele jaren structurering van de kleibekleding plaatsvindt als gevolg van bodemvormingsprocessen, droogte en vernatting (Van der Meer et al., 2023; Halter, 2024), heeft geleid tot enige verlaging van diverse getalswaarden ten opzichte van vorige versies. De realiteit is immers dat met name kleibekledingen een grotere effectieve doorlatendheid krijgen, vooral in de bovenste meter, dan waarmee vaak nog in het ontwerp, en ook in de beoordeling, is gerekend. De verdere vergroting als gevolg van dierlijke graverijen van de bulkdoorlatendheid van een voor het faalmechanisme representatief dijkgedeelte is daardoor minder groot: de achteruitgang van de beperkte doorlatendheid van de kleibekleding ligt immers niet volledig aan deze graverijen.

3.2.1 Zanddijk met kleibekleding of kleidijk met zandscheg

De onderbouwing – op basis van waarnemingen, berekeningen en redenties, waaronder vergelijkingen met de impact van andere diersoorten – betreft vooral dijken met een zand(ige) kern met een kleibekleding. Hiervoor zijn in §A.2 de bandbreedtes afgeleid zoals vermeld in Tabel 3.1. Het gaat hierbij om graverijen die, vanuit het oogpunt van de diersoort, goed ontwikkeld zijn, dus geen beginnende holen zoals die in één nacht gegraven zouden kunnen worden en daarom nog beperkt van omvang zijn.

Tabel 3.1 Geschatte bandbreedte van de invloedsfactoren van dierlijke graverijen op de overstromingskans per faalmechanisme per dijkvak voor een zanddijk met kleibekleding of een kleidijk met zandscheg, voor ontwerp en beoordeling, dus voor waterstand bij norm (WBN), om te gebruiken voor oriënterende analyses naar het effect van dierlijke graverijen op de faalkans van de waterkering op vakniveau, ter ondersteuning in de afweging van maatregelen bij dierlijke graverijen in dijken. NB: de getalswaarden zijn hoofdzakelijk gebaseerd op expert judgement. De overstromingskans kan nooit groter worden dan 1, als uitgangspunt kan de overstromingskans volgens het ontwerp of de laatste beoordeling dienen. De kleuren zijn ter indicatie en gebaseerd op de hoogste waarde per cel of diersoort.

Dier - graaflocatie	Binnenwaartse macrostabiliteit	Afdrukken bekleding	Erosie bekleding	Uitspoeling door gat in bekleding	Piping (BEP)
Bever					
- landzijde	0.1 – 100	0	1*	1 – 100 000	1 – 10 000
- waterzijde	10 – 1000	1 – 1000	1 – 100	1 – 10	1 – 100 000
- beide zijden	0.1 – 10 000	0	1 – 1000	10 – 1 000 000	1 – 10 000 000
Muskusrat					
- landzijde	1 – 10	0 – 1	1 – 100	1 – 10	1 – 10 000
- waterzijde	1 – 10	1 – 10	1 – 100	1 – 10	1*
- beide zijden	1 – 10	0 – 10	1 – 1000	1 – 30	1 – 10 000
Das					
- landzijde	0.01 – 1	0.001 – 1	3 – 1000	1 – 100 000	1 – 10 000
- waterzijde	1 – 10 000	1 – 10 000	3 – 1000	1 – 1000	1 – 100 000
- beide zijden	0.1 – 1000	0.001 – 10 000	3 – 10 000	3 – 10 000 000	1 – 10 000 000
Beverrat					
- landzijde	1 – 10	0 – 1	1 – 100	1 – 10	1 – 10 000
- waterzijde	1 – 10	1 – 10	1 – 100	1 – 10	1*
- beide zijden	1 – 10	0 – 10	1 – 1000	1 – 30	1 – 10 000
Mol					
- landzijde	0.1 – 1	0.01 – 1	1 – 100	1 – 1000	1 – 10 000
- waterzijde	1 – 10	1 – 3	1 – 100	1 – 100	1*
- beide zijden	1 – 3	0.01 – 3	1 – 1000	1 – 10 000	1 – 10 000
Vos en konijn					
- landzijde	0.1 – 1	0.001 – 10	3 – 1000	1 – 10	1*
- waterzijde	1*	1 – 30	1 – 100	1 – 10	1*
- beide zijden	0.1 – 1	0.001 – 100	3 – 10 000	1 – 30	1*
Woelrat en muis					
- landzijde	0.3 – 1	0.3 – 1	1 – 3	1 – 10	1*
- waterzijde	1*	1*	1 – 3	1 – 3	1*
- beide zijden	0.3 – 1	0.3 – 1	1 – 3	1 – 30	1*

* Een dergelijke graverij op deze locatie en/of diepte die invloed heeft op dit faalmechanisme is onwaarschijnlijk.

Benadrukt wordt dat deze tabel, evenals de tabellen hierna, betrekkelijk ruwe inschattingen betreft, veelal op basis van expert judgement, voor een ruime variatie aan situaties, die nog volop ter discussie staat. Constructieve bijdragen aan deze discussie, ook in de vorm van concrete, onderbouwde cases en waarnemingen bij hoogwater, worden zeer gewaardeerd. Dit zal de waarde van de tabel, en daarmee de bruikbaarheid, zeker verbeteren. Voor nu zijn de gegeven getalswaarden enkel bruikbaar voor oriënterende analyses naar het effect van dierlijke graverijen op de faalkans van de waterkering op vakniveau.

In §A.2.1 is voor de faalmechanismen binnenwaartse macrostabiliteit en afdrukken bekleding ook een inschatting gegeven van de invloed op de stabiliteitsfactoren volgens gangbare rekenmodellen voor graverijen door bevers. Dit is samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 3.2 *Geschatte bandbreedte van de invloedsfactoren van bevergraverijen op de stabiliteitsfactor per faalmechanisme per dijkvak voor een zanddijk met kleibekleding of een kleidijk met zandscheg, voor ontwerp en beoordeling, dus voor waterstand bij norm (WBN), om te gebruiken voor oriënterende analyses naar het effect van dierlijke graverijen op de faalkans van de waterkering op vakniveau, ter ondersteuning in de afweging van maatregelen bij dierlijke graverijen in dijken. NB: de getalswaarden zijn hoofdzakelijk gebaseerd op expert judgement. De overstromingskans kan nooit groter worden dan 1, als uitgangspunt kunnen de berekeningen volgens het ontwerp of de laatste beoordeling dienen.*

Graaflocatie	Binnenwaartse macrostabiliteit	Afdrukken bekleding
Landzijde	-50% tot +10%	Mechanisme kan niet meer optreden
Waterzijde	-50% tot -3%	-50% tot 0%
Beide zijden	-40% tot +10%	Mechanisme kan niet meer optreden

Verder is een inschatting gemaakt van de bandbreedte van de invloed van bevergraverijen zoals die tijdens een meer gangbaar hoogwater zouden kunnen ontstaan, om daarmee een handvat te bieden aan dijkbeheerders in potentiële calamiteitsituaties die zich af en toe voordoen. Het gaat dan om een hoogwater waarbij:

- De piekwaterstand op ongeveer de helft tot driekwart van het verschil tussen dagelijkse omstandigheden en beoordelingsomstandigheden ligt (afgekort tot '50-75% van WBN').
- Het hoogwater een kleine week duurt.
- Er voorafgaand aan het hoogwater geen sprake was van een eerder hoogwater, (zeer) extreme neerslag of droogte.
- De dijk voorafgaand aan het hoogwater nog geen graverijen heeft van bevers of muskusratten, weinig tot geen graverijen van mollen en de bekleding boven de waterlijn min of meer intact is.

Aangenomen wordt dat tijdens het hoogwater er wel één of meer nieuwe bevergraverijen worden gemaakt, waarbij het dan gaat om slechts een beperkt hol waarbij de kleibekleding wel doorbroken is (anders dan bij een ondiepe, verkennende graverij). Dit leidt tot de invloeden zoals aangegeven in Tabel 3.3.

Tabel 3.3 *Geschatte bandbreedte van de invloedsfactoren van dierlijke graverijen op de overstromingskans per faalmechanisme per dijkvak voor een zanddijk met kleibekleding of een kleidijk met zandscheg, voor een hoogwater (50-75% van WBN), om te gebruiken voor oriënterende analyses naar het effect van dierlijke graverijen op de faalkans van de waterkering op vakniveau, ter ondersteuning in de afweging van maatregelen bij dierlijke graverijen in dijken. NB: de getalswaarden zijn hoofdzakelijk gebaseerd op expert judgement. De overstromingskans kan nooit groter worden dan 1, als uitgangspunt kan de overstromingskans volgens het ontwerp of de laatste beoordeling dienen.*

Graaflocatie	Binnenwaartse macrostabiliteit	Afdrukken bekleding	Erosie bekleding	Uitspoeling door gat in bekleding	Piping (BEP)
- landzijde	0.3 – 10	0	1*	1 – 1000	1 – 100
- waterzijde	3 – 100	1 – 100	1 – 10	1 – 3	1*
- beide zijden	0.3 – 300	0	1 – 100	3 – 1 000	1 – 100

* Een dergelijke graverij op deze locatie en/of diepte die invloed heeft op dit faalmechanisme is onwaarschijnlijk.

Tabel 3.4 *Geschatte bandbreedte van de invloedsfactoren van bevergraverijen op de overstromingskans per faalmechanisme per dijkvak voor een zanddijk met kleibekleding of een kleidijk met zandscheg, voor een hoogwater (50-75% van WBN), om te gebruiken voor oriënterende analyses naar het effect van dierlijke graverijen op de faalkans van de waterkering op vakniveau, ter ondersteuning in de afweging van maatregelen bij dierlijke graverijen in dijken. NB: de getalswaarden zijn hoofdzakelijk gebaseerd op expert judgement. De overstromingskans kan nooit groter worden dan 1, als uitgangspunt kunnen de berekeningen volgens het ontwerp of de laatste beoordeling dienen.*

Graaflocatie	Binnenwaartse macrostabiliteit	Afdrukken bekleding
Landzijde	-20% tot +5%	Mechanisme kan niet meer optreden
Waterzijde	-20% tot 0%	-30% tot 0%
Beide zijden	-20% tot +5%	Mechanisme kan niet meer optreden

Omdat deze problematiek van nieuwe graverijen tijdens een hoogwatersituatie voornamelijk speelt voor bevers, is deze aanvulling niet voor andere diersoorten gemaakt.

3.2.2 Kleidijk

Voor een kleidijk is er voornamelijk sprake van redematies die starten met de bandbreedte van de faalkans zoals gegeven in Tabel 3.1. Als een dijk geheel uit klei is opgebouwd, dan is het effect van een graverij door de bekleding heen tot aan de kern aanzienlijk kleiner. Nog steeds wordt het grootste effect op de waterveiligheid verwacht van de veranderingen in de (tijdsafhankelijke) waterdrukverdeling, maar dit effect zal een stuk kleiner zijn dan bij een dijk met een zandkern en een kleibekleding.

Voornamelijk vanuit het buitenland zijn er wel situaties bekend waarbij dierlijke graverijen bij een kleidijk tot ernstige schade of zelfs een dijkdoorbraak hebben geleid. Voor piping maakt de samenstelling van de dijk geen verschil. In Tabel 3.5 zijn de geschatte bandbreedtes aangegeven. Vanwege het nagenoeg ontbreken van berekeningen zijn er geen verdere tabellen te geven voor een kleidijk. Een nadere toelichting bij de verschillende faalmechanismen is gegeven in §A.3.

Tabel 3.5 Geschatte bandbreedte van de invloedsfactoren van dierlijke graverijen op de overstromingskans per faalmechanisme per dijkvak voor een kleidijk, voor ontwerp en beoordeling, dus voor waterstand bij norm (WBN), om te gebruiken voor oriënterende analyses naar het effect van dierlijke graverijen op de faalkans van de waterkering op vakniveau, ter ondersteuning in de afweging van maatregelen bij dierlijke graverijen in dijken. NB: de getalswaarden zijn hoofdzakelijk gebaseerd op expert judgement. De overstromingskans kan nooit groter worden dan 1, als uitgangspunt kan de overstromingskans volgens het ontwerp of de laatste beoordeling dienen. De kleuren zijn ter indicatie en gebaseerd op de hoogste waarde per cel of diersoort.

Dier - graaflocatie	Binnenwaartse macrostabiliteit	Afdrukken bekleding	Erosie bekleding	Uitspoeling door gat in bekleding	Piping (BEP)
Bever					
- landzijde	0.1 – 10	0 – 1	1*	1 – 100	1 – 10 000
- waterzijde	1 – 100	1 – 10	1 – 10	1 – 100	1 – 100 000
- beide zijden	0.1 – 1000	0 – 1	1 – 10	1 – 1 000	1 – 10 000 000
Muskusrat					
- landzijde	1 – 10	0 – 1	1 – 10	1 – 10	1 – 10 000
- waterzijde	1 – 10	1 – 10	1 – 3	1 – 10	1*
- beide zijden	1 – 10	0 – 10	1 – 30	1 – 30	1 – 10 000
Das					
- landzijde	0.1 – 1	0.01 – 1	1 – 100	1 – 100	1 – 10 000
- waterzijde	1 – 1000	1 – 10	1 – 100	1 – 100	1 – 100 000
- beide zijden	0.1 – 1000	0.01 – 10	1 – 1000	1 – 1000	1 – 10 000 000
Beverrat					
- landzijde	1 – 10	0 – 1	1 – 100	1 – 10	1 – 10 000
- waterzijde	1 – 10	1 – 10	1 – 100	1 – 10	1*
- beide zijden	1 – 10	0 – 10	1 – 1000	1 – 30	1 – 10 000
Mol					
- landzijde	1*	0.01 – 1	1 – 100	1 – 100	1 – 10 000
- waterzijde	1 – 3	1 – 3	1 – 100	1 – 100	1*
- beide zijden	1 – 3	0.01 – 3	1 – 1000	1 – 1000	1 – 10 000
Vos en konijn					
- landzijde	0.3 – 1	0.01 – 10	1 – 100	1 – 10	1*
- waterzijde	1*	1 – 10	1 – 100	1 – 10	1*
- beide zijden	0.3 – 1	0.01 – 100	1 – 1000	1 – 30	1*
Woelrat en muis					
- landzijde	1*	1*	1 – 3	1*	1*
- waterzijde	1*	1*	1 – 3	1*	1*
- beide zijden	1*	1*	1 – 3	1*	1*

* een dergelijke graverij op deze locatie en/of diepte die invloed heeft op dit faalmechanisme is onwaarschijnlijk.

3.2.3 Zandige dijk

Voor de impact van dierlijke graverijen op voornamelijk uit zand samengestelde dijken is, net als voor kleidijken, in Van den Berg & Koelewijn (2023) een eerste inschatting gegeven. Daarbij is er rekening mee gehouden dat dergelijke dijken in de praktijk lang niet altijd bestaan uit vrijwel zuiver zand, zoals te zien is in de zandkern van de dijk in Figuur bijlage A.1, maar enige kleifracie bevatten. Ingeschat wordt dat dit type dijk qua gevoeligheid voor dierlijke graverijen dichter bij de dijk met zandkern en kleibekleding ligt dan bij de kleidijk.

Voorzichtigheidshalve zijn in belangrijke mate dezelfde waarden aangehouden als voor de dijk met zandkern en kleibekleding, met alleen uitzonderingen bij de invloed van bevergraverijen op de binnenwaartse macrostabiliteit: die wordt aan de waterzijde als kleiner ingeschat omdat er geen sprake zal zijn van het doorbreken van een enigszins waterremmende laag, en bij dassen wordt de invloed op de erosie van het waterzijdig talud als groter geschat, omdat zandiger materiaal nog wat makkelijker zal afkalven onder invloed van golven en stroming, met alle gevolgen van dien als het hoogwater lang genoeg aanhoudt.

In de literatuur zijn overigens geen voldoende concrete voorbeelden aangetroffen van falen bij dit dijktype. Het voorbeeld van Bayoumi & Meguid (2011) over het falen van de afvalwatervijver van de Iowa Beef Processors nabij Wallula, Washington (VS) in 1993 betreft weliswaar 'silty soil', maar is onvoldoende concreet.

Vanwege het ontbreken van een bekledingslaag met een lagere doorlatendheid zijn afdrucken van de bekleding en uitspoeling door een gat in de bekleding niet aan de orde bij deze dijkopbouw. Erosie van de bekleding betreft in dit geval erosie van het talud. Voor piping maakt de samenstelling van de dijk opnieuw geen verschil. In Tabel 3.6 zijn de geschatte bandbreedtes aangegeven.

Tabel 3.6 Geschatte bandbreedte van de invloedsfactoren van dierlijke graverijen op de overstromingskans per faalmechanisme per dijkvak voor een zandige dijk, voor ontwerp en beoordeling, dus voor waterstand bij norm (WBN), om te gebruiken voor oriënterende analyses naar het effect van dierlijke graverijen op de faalkans van de waterkering op vakniveau, ter ondersteuning in de afweging van maatregelen bij dierlijke graverijen in dijken. NB: de getalswaarden zijn hoofdzakelijk gebaseerd op expert judgement. De overstromingskans kan nooit groter worden dan 1, als uitgangspunt kan de overstromingskans volgens het ontwerp of de laatste beoordeling dienen. De kleuren zijn ter indicatie en gebaseerd op de hoogste waarde per cel of diersoort.

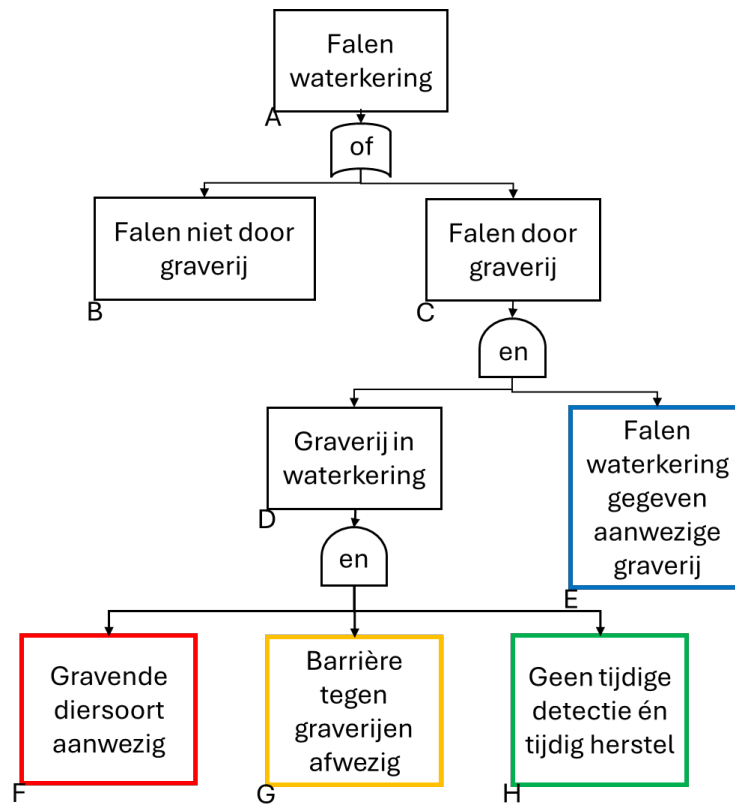
Dier - graaflocatie	Binnenwaartse macrostabiliteit	Erosie bekleding (talud)	Piping (BEP)
Bever			
- landzijde	0.1 – 1	1*	1 – 10 000
- waterzijde	1 – 1000	1 – 100	1 – 100 000
- beide zijden	0.1 – 1000	1 – 1000	1 – 10 000 000
Muskusrat			
- landzijde	1 – 10	1 – 100	1 – 10 000
- waterzijde	1 – 10	1 – 100	1*
- beide zijden	1 – 10	1 – 1000	1 – 10 000
Das			
- landzijde	0.1 – 1	3 – 1000	1 – 10 000
- waterzijde	1 – 10 000	3 – 10 000	1 – 100 000
- beide zijden	0.1 – 1000	3 – 10 000	1 – 10 000 000
Beverrat			
- landzijde	1 – 10	1 – 100	1 – 10 000
- waterzijde	1 – 10	1 – 100	1*
- beide zijden	1 – 10	1 – 1000	1 – 10 000
Mol			
- landzijde	0.1 – 1	1 – 100	1 – 10 000
- waterzijde	1 – 10	1 – 100	1*
- beide zijden	1 – 3	1 – 1000	1 – 10 000
Vos en konijn			
- landzijde	0.1 – 1	3 – 1000	1*
- waterzijde	1*	1 – 100	1*
- beide zijden	0.1 – 1	3 – 10 000	1*
Woelrat en muis			
- landzijde	1*	1 – 3	1*
- waterzijde	1*	1 – 3	1*
- beide zijden	1*	1 – 3	1*

* een dergelijke graverij op deze locatie en/of diepte die invloed heeft op dit faalmechanisme is onwaarschijnlijk.

3.3 Voorbeeld van toepassing op een dijkvak

Vanuit het lopende HWBP KIA-project 'Veiligheidsraamwerk dierlijke graverijen' is Figuur 3.1 overgenomen. Deze foutenboom maakt de onderlinge afhankelijkheden duidelijk. De toepassing hiervan is bedoeld per dijkvak. De te vermijden topgebeurtenis is het falen van de waterkering ('A'). Dit kan gebeuren zónder een graverij (B; dit is de situatie waarop normaal

ontworpen of beoordeeld wordt, dus bijvoorbeeld de kans volgens de laatste landelijke beoordeling), of wél door een graverij (C). De kans op falen door een graverij wordt, enigszins triviaal, gegeven door de kans op de aanwezigheid van een graverij (D) én de kans op falen gegeven een graverij (E).



Figuur 3.1 Foutenboom voor het falen van een waterkering, met focus op dierlijke graverijen (naar Kanning, 2024).

Onderdeel E wordt gegeven door de eerdergenoemde tabellen, die een bandbreedte van de vermenigvuldigingsfactor voor de faalkans zonder graverij (B) aangeven, ervan uitgaande dat er een graverij aanwezig is. De kans daarop wordt daarbij aangenomen als 100% (of: 1). Dat is echter ook geen vanzelfsprekendheid, maar afhankelijk van de volgende drie factoren:

- (F) er is een graver aanwezig / actief.
- (G) er is geen effectieve barrière aanwezig die graverijen verhinderd heeft.
- (H) er is geen tijdige detectie én tijdig herstel geweest.

Aan de drie laatstgenoemde factoren kunnen kansen worden toegekend. De kans op een graverij van een zekere omvang (F) is afhankelijk van de aanwezigheid van dieren (en de diersoort) en de (hoogwater)omstandigheden en zal variëren tussen 0 en 1. Afwezigheid van enige vorm van een barrière (ook de nabijheid van een alternatieve hoogwatervluchtplaats mag in dit verband als een barrière voor graverijen in de dijk worden gezien), betekent een kans van 1 voor onderdeel G. Wanneer een graverij weliswaar ontstaat, maar tijdig wordt gedetecteerd en de waterkering tijdig wordt hersteld, dus voordat een situatie ontstaat die tot falen van de waterkering kan leiden, dan kan aan onderdeel H een kans 0 worden toegekend.

Wanneer aan één van de factoren F, G of H een factor 0 kan worden toegekend, dan zal er geen kans zijn op de aanwezigheid van een graverij en wordt de kans op falen van de waterkering door een graverij ook niet vergroot.

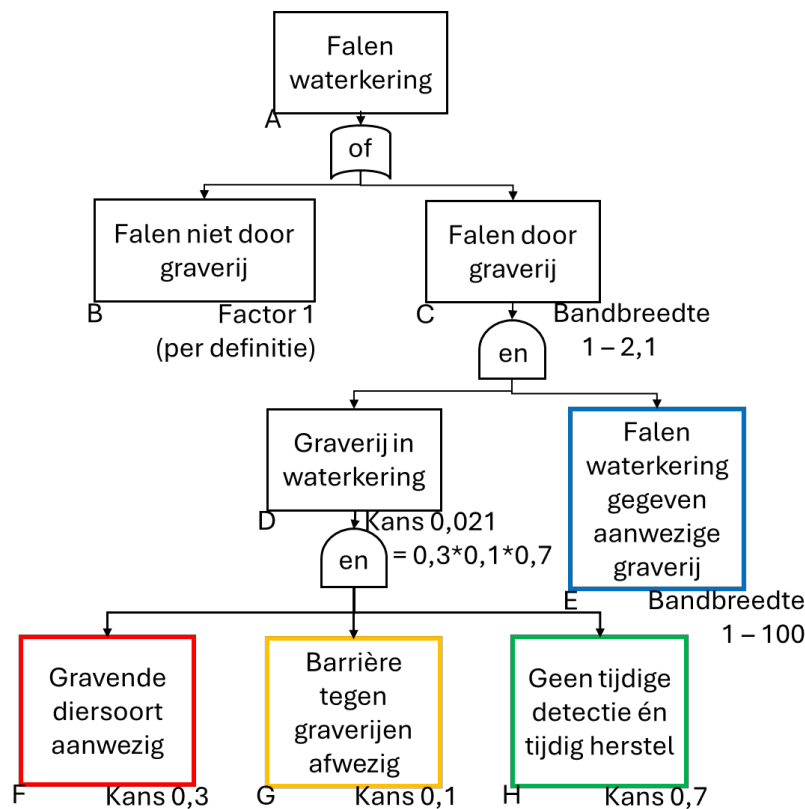
Kansen zijn in de praktijk echter lang niet altijd 0 of 1. Echter, zolang het product van de factoren F, G en H vermenigvuldigd met de invloedsfactor op de overstromingskans kleiner is dan 1, dan heeft een graverij geen ongunstige invloed op de faalkans van de waterkering.

Als getallenvoorbeeld voor een dijkvak, met steenbestorting, kijkend naar bevergraverij en het initiële mechanisme macrostabiliteit binnenwaarts:

- 1) De kans dat er gezien de populatieverdeling in de regio bevers bij dit dijkvak actief zijn wordt geschat op 30%.
- 2) Gegeven de aanwezigheid van een steenbestorting en bevers, wordt de kans op een beverhol in de dijk geschat op 10%.
- 3) De kans dat deze graverij niet tijdig wordt gedetecteerd en hersteld, wordt geschat op 70%.

De kans op een graverij wordt hiermee geschat op het product van deze schattingen $0,3 \cdot 0,1 \cdot 0,7 = 0,021$ (-).

De bovengrens van de invloed van een volledig ontwikkelde bevergraverij op binnenwaartse macrostabiliteit, in Tabel 3.1 aangegeven als een factor 100 ligt hoog, maar wordt met bovenstaand inschatting gereduceerd tot 2,1, zie ook Figuur 3.2 (NB: de ondergrens is voor deze situatie 1 en verandert hierdoor niet). De aanwezigheid van de steenbestorting, de beperkte kans op de aanwezigheid van bevers en relatief geringe kans op detectie en herstelmaatregelen geven voor dit dijkvak een aanzienlijke verkleining van de faalkans door dierlijke graverijen.



Figuur 3.2 Foutenboom met ingevuld getallenvoorbeeld.

In situaties met een grote invloed van graverij op de faalkans kan deze op drie manieren effectief worden bestreden, namelijk door het aanbrengen van een barrière, door populatiebeheer (ook rond een hoogwatersituatie) en door adequate detectie met tijdig herstel.

Verschillende manieren hiervoor, zoals die uit het afweegkader maatregelen uit het vorige hoofdstuk naar voren kunnen komen, kunnen met de geschetste aanpak worden beoordeeld op hun effectiviteit en kostenefficiëntie.

4 Conclusie en aanbevelingen

4.1 Conclusies

Bijna 40 jaar na de introductie heeft de bever zich nagenoeg door heel Nederland verspreid en de beverpopulaties bevinden zich vooral langs de grote rivieren en de beekdalen. De bever kan door het graven in waterkeringen zorgen voor een toenemende faalkans, waardoor actie nodig is om de bever in de kering te voorkomen. Om voor een dijkbeheerder een handelingsperspectief te geven over hoe om te gaan met een graverij is in dit rapport een afweegkader opgesteld. Het afweegkader maatregelen is toepasbaar voor de meest kwetsbare locaties. Voorafgaand aan het afweegkader dient er door het betreffende waterschap daarom een risico-inventarisatie opgesteld te worden, om de meest kwetsbare locaties vast te stellen.

Het afweegkader maakt het mogelijk om een onderbouwde keuze te maken welke maatregel gekozen wordt bij een kwetsbare locatie. Het afweegkader bestaat enerzijds uit een aantal te nemen maatregelen om dierlijke graverijen tijdig op te merken en of te voorkomen en bestaat anderzijds uit overwegingen om tot bepaalde maatregelen te komen. De maatregelen zijn onder te verdelen in 1) het in een vroeg stadium ontdekken van de graverijen door verbeterde inspectie en detectie en repareren hiervan en 2) het zorgen dat gravers niet in de kering kunnen door bijvoorbeeld gaas en/of constructies.

De overwegingen om tot een bepaalde maatregel te komen zijn: kosten, reductie overstromingskans, implementatietijd en omgevingsinpassing. Per maatregel zijn de bovenstaande 4 overwegingen in ogenschouw genomen en beoordeeld. Bijvoorbeeld: de maatregel van het plaatsen van gaas geeft een hoge reductie van de overstromingskans, maar is relatief kostbaar en kost relatief veel tijd, echter dit past uiteindelijk wel goed in de omgeving.

Verder zijn er een vernieuwde “tabellen faalkansverandering”, waarin de inschatting is gemaakt van de bandbreedte van de invloed van dierlijke graverijen op de overstromingskans (per dijkvak), voor verschillende typen dijkopbouw. Hierbij is ook het inzicht verwerkt dat een kleibekleding met een dikte van orde 1 m na een aantal jaren een ontwikkelde bodemstructuur krijgt waardoor ook zonder (grote) graverijen de doorlatendheid van deze laag van gelijke orde van grootte is als van zand.

Behalve de invloed van een ontwikkelde graverij op de overstromingskans is ook een kader aangegeven waarmee rekening kan worden gehouden met de kans dat een dergelijke graverij aanwezig is, gegeven maatregelen zoals gaas, de populatie en de kansen op tijdige detectie én herstel. Daarmee kunnen ook verschillende alternatieve maatregelen op basis van effectiviteit en kosten worden afgewogen.

4.2 Aanbevelingen

Hieronder volgen een aantal aanbevelingen betreffende het afweegkader maatregelen:

- Het is van belang om een goede eenduidige risico-inventarisatie voor heel Nederland te vervaardigen. Op dit moment hebben of voeren veel Waterschappen, RWS en ProRail een risico-inventarisatie uit, waarbij er niet veel wordt samengewerkt en er geen éénduidig risico-inventarisatie aanwezig is. De DGWB (Directoraat-generaal Water en Bodem) van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat heeft opdracht gegeven om een landelijk protocol voor bevergraverij op te stellen. Hierin is echter geen landelijke risico-inventarisatie in voorzien.

- Het opgestelde “afweegkader maatregelen” kan door de verschillende dijkbeheerders (Waterschappen en Rijkswaterstaat) worden gehanteerd om onderbouwd voor verschillende maatregelen te kiezen om risicovolle bevergraverijen in de waterkering te voorkomen, hetzij door betere inspectie en/of graafwerende maatregelen. Mogelijk kan de dijkbeheerder nog een aanpassing maken in de gekozen score van de verschillende overwegingen om bijvoorbeeld beter aan te sluiten op waterschapsspecifieke beleidskaders.

De “tabellen faalkansverandering dierlijke graverij” geven de bandbreedtes van de invloed van diverse dierlijke graverijen op de overstromingskans als gevolg van verscheidene faalmechanismen. Voor de tabellen zijn de volgende aanbevelingen te maken:

- Er ontbreekt nog een impactanalyse, waarmee het realiteitsgehalte van iedere ingeschatte faalkansverandering verder aangescherpt kan worden.
- Door aanvullende cases kan deze bandbreedte ook verder worden aangescherpt, al tonen de huidige cases, vooral uit het buitenland, ook aan dat de potentiële invloed van dierlijke graverijen zeer groot kan zijn en dat ook dijkdoorbraken als gevolg van dierlijke graverijen ook daadwerkelijk voorkomen.

Referenties

- Bayoumi & Meguid, 2011. Ahmed Bayoumi & Mohamed A. Meguid, Wildlife and safety of earthen structures: a review, *Journal of failure analysis and prevention*, **11**: 295-319.
- Bos et al, 2020. D. Bos, R. de Jong, H. van Hemert, Vilmar Dijkstra, G. Kurstjens, Beverbeheerplan Groningen en Drenthe 2021-2025, Provincie Drenthe, Provincie Groningen, Waterschap Hunze en Aa's en Waterschap Noorderzijlvest, rapport 19-42, 26-11-2020.
- Camici et al., 2017. S. Camici, S. Barbetta & T. Moramarco, Levee body vulnerability to seepage: the case study of the levee failure along the Foenna stream on 1 January 2006 (central Italy), *Journal of Flood Risk Management* **10**: 314-325, doi.org/10.1111/jfr3.12137
- Ceccato & Simonini, 2023. Francesca Ceccato & Paolo Simonini, The effect of heterogeneities and small cavities on levee failures: The case study of the Panaro levee branch (Italy) on 6 December 2020, *Journal of flood risk management*, e12882. doi.org/10.1111/jfr3.12882
- De Boer, 2021. Abel de Boer, persoonlijke mededeling, Hedwigepolder, juni 2021.
- De Bruijn et al., 2024. H.T.J. de Bruin, M.A.J.P. van Dam, E.R. Jas, W. Kanning, P. Kraaijenbrink & M.G. van der Krogt, Stabiliteit bij golfoverslag, literatuurstudie faalpaden, initiële en vervolgemechanismen, conceptrapport 11208415-005-GEO-0001, Deltares, Delft, 5 juli 2024, 69 pp.
- Depreiter et al., 2022. D. Depreiter, J. Vercruyssen, K. Verelst, W. Zomer, A. Koelewijn, V. Tsimopoulou & P. Peeters, *Continuous overflow tests on Belgian levees*, report, Interreg 2 Seas project Polder2C's, December 2022.
- EA, 2019. *Engineering considerations when managing burrowing animals in FCRM embankments*, Technical Guidance 259_10_SD01, Environment Agency, 16 mei 2019, 5 pp.
- Evers & Cornelisse, 2021. Wijnand Evers & Wim Cornelisse, *Bevers tijdens HW 2021*, Waterschap Drents Overijsselse Delta & Waterschap Rivierenland, Presentatie gehouden bij Calamiteiten Team Waterkeringen, Online, 27 mei 2021, 32 sheets.
- Hahmann et al., 2004. T. Hahmann, S. Möbes, J. Regiment & H-P. Trömel, *Biberbaue im Oderdeich*. *Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg*, **13** (1): 22-26.
- Halter, 2024. W. Halter, Rekenen aan dijken met structuurvorming, presentatie in het kader van de workshop bodemstructuurvorming bij dijken, Netwerk Dijkmonitoring, Amersfoort, 2 oktober 2024. <http://www.dijkmonitoring.nl/training/netwerk-dijkmonitoring/2024/> bezocht op 16 oktober 2024.
- Holscher & Zomer, 2021. R. Holscher & W.S. Zomer, *Field research on burrows and discontinuities in embankments, fact finding research in the Hedwige-Prosperpolder*, report Polder2C's, STOWA report 2021-52, 5 November 2021, 32 pp.
- Holscher et al., 2022. R. Holscher, M. de Groot, W. Evers & G.J. van Dijk, Risico Inventarisatie Bevers: Een zoektocht naar een gewenst evenwicht. WDOD, 2022.
- ICOLD, 2017. *Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations*. International Commission on Large Dams, Paris, 2017.

- Kanning, 2024. Wim Kanning, Veiligheidsraamwerk dierlijke graverij, interne presentatie in het kader van HWBP KIA-project Veiligheidsraamwerk dierlijke graverij, Deltares, Delft, 7 oktober 2024.
- Kapinga, 2022. Sander Kapinga, *Invloed dierlijke graverijen op waterveiligheid*, presentatie op landelijke ontwerp- en beoordelingsdag, Utrecht, 1 december 2022, 18 sheets.
- Kapinga et al., 2022. Sander Kapinga, Rik Nieuwhof & Luis Benavides Narvaez, *Invloed beverholen op de stabiliteit waterkering Oude Wiel Wamel*, memo, Waterschap Rivierenland, 7 oktober 2022, 7 pp.
- Hoogendoorn, 2023. H. Hoogendoorn, WSRL-Richtlijn: preventieve maatregelen tegen dierlijke graverij, Waterschap Rivierenland, rapport d.d.17-07-2023
- Koelewijn, 2021. Andre Koelewijn, *Waargenomen invloed van mollengangen op dijkveiligheid*, rapport, Interreg 2 Zeeën project Polder2C's, 5 mei 2021.
- Koelewijn et al., 2022. Koelewijn, A.R., Rikkert, S.J.H., Peeters, P., Depreiter, D., van Damme, M., & Zomer, W., *Overflow Tests on Grass-Covered Embankments at the Living Lab Hedwige-Prosperpolder: An Overview*. *Water*, 14(18), 2859.
- Koelewijn, 2023. Andre Koelewijn, *Invloed van dierlijke graverijen op de overstromingskans, een kwantitatieve inschatting*, rapport 11208057-050-GEO-0002, Deltares, Delft, 26 mei 2023, 49 pp., https://publications.deltares.nl/11208057_050_0002.pdf
- Larooij, 2022. A.M. Larooij, Risicoanalyse graafschade waterkeringen door zoogdieren bij waterschap Aa en Maas. "Van Aandoenlijk tot Zorgen" [Bsc thesis Bos & Natuurbeheer]. van Hall Larenstein, 2022.
- Lutra, 1966. Lutra, orgaan van de zoogdierkunde en zoogdierenbescherming, Bulletin de la société pour l'étude et la protection des mammifères, Volume 8, nr. 3, Gouda, December 1966.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016. *Handreiking ontwerpen met overstromingskansen, Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansnormen*, Versie OI2014v4, december 2016, 71 pp.
- NDFF, 2024. Verspreidingsatlas Zoogdieren, Nationale Databank Flora en Fauna, <https://www.verspreidingsatlas.nl/8496057> bezocht op 8 augustus 2024.
- Orlandini et al., 2015. Stefano Orlandini, Giovanni Moretti & John D. Albertson, Evidence of an emerging levee failure mechanism causing disastrous floods in Italy, *Water Resources Research* **51**: 7995-8011, doi.org/10.1002/2015WR017426
- Peteau, 2022. Pauline Peteau, The effect of animal burrows on the stability of the levees in the Netherlands, Internship report, École Nationale Supérieure de Géologie, Nancy, September 2022, 31 pp.
- Saghaee et al., 2017. Gholamreza Saghaee, Ahamd A. Mousa & Mohamed A. Meguid, Plausible failure mechanisms of wildlife-damaged earth levees: insights from centrifuge modelling and numerical analysis, *Canadian Geotechnical Journal* **54**: 1496-1508, 2017. dx.doi.org/10.1139/cgj-2016-0484
- Schep & Dijkstra, 2024. Kees Schep en Vilmar Dijkstra, Werkinstructie verwijderen holen/burchten van bevers, MRB-Rivierenland en Zoogdierverseniging, versie 2024. https://www.kenniscentrumbever.nl/sites/default/files/2024-05/instructie_uitgraven_holen_2024.pdf
- Smyrniou, 2024. Eleni Smyrniou, Waterstand met graverij, sensitivity study, interne presentatie in het kader van HWBP KIA-project Veiligheidsraamwerk dierlijke graverij, Deltares, Delft, 7 oktober 2024, 16 sheets.

- Suddeth et al., 2008. Robyn Suddeth, Jeffrey F. Mount & Jay R. Lund, *Levee decisions and sustainability for the Delta, Technical appendix B*, Public Policy Institute of California, San Francisco, August 2008, pp. 18-19.
- Taccari, 2015. Maria Luisa Taccari, *Study upon the possible influence of animal burrows on the failure of the levee of San Matteo along the Secchia river, Modelling of groundwater flow with precipitation and water level changes and mechanism of collapse of the Secchia Failure with particular attention to burrows geometry and their influence to the stability of the dike (19th January 2014, San Matteo, Modena, Italy)*, MSc thesis, TU Delft, 13 July 2015, 160 pp.
- Taccari & Van der Meij, 2016. Maria Luisa Taccari & Raymond van der Meij, Investigation of the influence of animal burrowing on the failure of the levee of San Matteo along the Secchia river, *E-UNSAT, E3S Web of Conferences* 9, 19001, doi.org/10.1051/e3sconf/20160919001
- TAW, 1985. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, deel 1 bovenrivierengebied*, Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage, september 1985, ISBN 90-12-05169-X.
- Terpstra et al., 2022. M. Terpstra, C. de Jonge-Stegink, V. Dijkstra & D. Bos, Regionale risico-inventarisatie bevergraverij in spoortaluds, Altenburg & Wymenga ecologisch onderzoek bv, 11-04-2022 https://www.kenniscentrumbever.nl/sites/default/files/2022-06/regionale_risico-inventarisatie_bevergraverij_in_spoortaluds_0.pdf
- Tsimopoulou & Koelewijn, 2022. Vana Tsimopoulou & André Koelewijn, *Management of harmful animal activities on levees: Fact finding fieldwork in the Living Lab Hedwige-Prosperpolder*, report, Interreg 2 Seas project Polder2C's, December 2022.
- USBR, 2017. *Canal operation and maintenance: animals*, report, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, November 2017, 38 pp.
- Van Dam, 2024. Menno van Dam, Stabiliteit bij golfoverslag, interne presentatie in het kader van HWBP KIA-project Stabiliteit bij Golfoverslag, Deltares, Delft, 25 juni 2024, 31 sheets.
- Van der Wouw, 2023. Naomi van der Wouw, Risicoanalyse, Kwetsbaarheid van keringen voor graverij door de bever (Castor fiber) binnen de provincie Fryslân, Een risicoanalyse in het kader van een majorstage Hogeschool Van Hall Larenstein Leeuwarden, september 2023
- Van Dorst et al. (2024). M. van Dorst, J. van der Linden & S. Groot, Rapport risicoanalyse en maatregelen bever en das. Rijkswaterstaat kanalen Noord-Brabant en Limburg (059-23-BWZ). definitief versie 3. bwz ingenieurs, 2024.
- Van den Berg, 2022. Frans van den Berg, *Effect bevergraverij op faalmechanismen dijken*, rapport 11207915-001-GEO-0002, Deltares, Delft, 20 mei 2022.
- Van den Berg & Koelewijn, 2024. Frans van den Berg & André Koelewijn, *Graverij door dieren, Verschillende praktijkcases, inspectietechnieken en uitsplitsing invloed op overstromingskans*, rapport 11209262-001-ZWS-0001, Deltares, Delft, 6 december 2023, 55 pp.
- Van den Berg & Noyons, 2024. F.P.W. van den Berg & B.C. Noyons, *Beaver digging during highwater with an agent based model : Case studies in Dutch river sections*, rapport 11210269-002-GEO-0001, Deltares, Delft, 17-10-2024, https://publications.deltares.nl/11210269_002_0001.pdf

- Van den Berg & Nieboer, 2024. Frans van den Berg & Roeland Nieboer, *Dierlijke graverijen detecteren met glasvezel, onderzoek mogelijkheden*, rapport met kenmerk 11210320-010-BGS-0001, concept versie, Deltares, Delft, d.d. 28-10-2024
- Van der Meer et al., 2023. Martin van der Meer, Tanja Voogd, Myron van Damme, André Koelewijn, Marc Hijma, Martine van der Ploeg, Gijs Hoffmans, Bas Hofland, Jean-Louis Briaud & Werner Halter, *Expert meeting levee erosion 14 September 2023*, Hoogwaterbeschermingsprogramma – De Innovatieversneller Bekleding en dijkerosie, Delft, 14 september 2023, <https://publicwiki.deltares.nl/display/HWBPBekleding/Generieke+kennisontwikkeling> - presentaties en opbrengst zijn toegankelijk via <https://publicwiki.deltares.nl/download/attachments/277479559/EMLE%20info%20set.zip>
- Van Dijk, 2021. P.M. van Dijk, *Prediction method for grass erosion on levees by wave overtopping, Linking models to experiments*, MSc thesis, Technische Universiteit Delft, Delft, 31 augustus 2021, 116 pp.
- Van Hemert & Spoorenberg, 2006. H. van Hemert & C. Spoorenberg, *Gevolgen van graverij door muskusratten en beverratten voor de veiligheid van waterkeringen*, rapport WG-SE20060948, DHV, Amersfoort, 5 oktober 2006, 97 pp.
- Van Hoven, 2014. A. van Hoven, *Residual dike strength after macro-instability*, Report 1207811-013-HYE-0001, Deltares, Delft, March 2014.
- Van Hoven, 2022. A. van Hoven, *Schematiseringshandleiding grasbekleding, WBI 2017*, versie 6.0 (definitief), Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, z.p., 31 maart 2022, 154 pp.
- Vreugdenhil et al., 2012. S. Vreugdenhil, J. Dekker & V. Dijkstra, *Toekomst voor de Nederlandse bevers*, Zoogdier, 3, 2012.
- Wegener et al, z.d., Anna Wegner, Herbert Jolink, Jeroen ter Raa en Kees Jan Leuvenink, *BeverDasRisikoanalyse voor onze waterkeringen*, Waterschap Rijn & IJssel. Zonder datum
- Wong & Van Tilborg, 2024. H.W. Wong & R. van Tilborg, *Aanpak dierlijke graverijen voor hoogwaterbescherming*, versie definitief 2.0 Notitie met referentie RO11.M06, Waterschap Aa & Maas, 's-Hertogenbosch, 8 januari 2024.

A Gedetailleerde onderbouwing invloedsfactoren

A.1 Toelichting

In deze bijlage is voor alle elementen van de tabellen met invloedsfactoren van dierlijke graverijen op de lokale overstromingskans in hoofdstuk 3 een onderbouwing gegeven.

A.1.1 Lokale overstromingskans

De lokale overstromingskans wordt in de beoordelings- en ontwerppraktijk vaak aangeduid als 'overstromingskans op doorsnedeniveau' of 'overstromingskans op dijkvakniveau'. Een waarde van de invloedsfactor groter dan 1 betekent een toename van de overstromingskans en is dus ongunstig. Een waarde kleiner dan 1 bij een specifiek faalmechanisme betekent een afname en lijkt daarom gunstig, maar in het algemeen gaat dat gepaard met een veelal ongunstiger invloed op een ander faalmechanisme. Uiteraard kan de totale faalkans nooit groter worden dan 1, hier moet bij de interpretatie van de uitkomsten rekening mee worden gehouden.

A.1.2 Beperking van faalkansen tot primaire waterkeringen in Nederland

De invloedsfactoren uitgedrukt in termen van de overstromingskans zijn vooral geldig voor de primaire waterkeringen in Nederland, indien voor de bepaling daarvan gebruik gemaakt is van een berekening waarbij binnenwaartse macrostabiliteit of piping een knoop vormen in het beschouwde faalpad, zodat gebruik gemaakt kan worden van correlaties die hiervoor zijn afgeleid (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016:31,40). Voor alle andere situaties en faalpaden kan op basis van analogie een faalkansverandering worden ingeschat, of is de bepaling van de invloed van dierlijke graverijen beperkt tot de verandering van de uitkomst van een modelberekening, zoals een stabiliteitsfactor of een verval dat veilig gekeerd kan worden.

A.1.3 Dijksamenstelling, diersoort, faalmechanisme, locatie graverij & beschouwde belasting

De indeling van de vervoloparagrafen is naar samenstelling van de dijk (voor een zanddijk met kleibekleding of een kleidijk met zandscheg in §A.2, voor een kleidijk in §A.3, voor een zandige dijk alleen in de hoofdtekst in §3.2.3). Binnen §A.2 is een onderverdeling gemaakt naar de diersoort (bever / muskusrat / das / beverrat / mol / vos en konijn / woelrat en muis, met beschrijving van kenmerken van de diersoorten die meer algemeen geldig zijn). Op daarbinnen is dan nog een beschrijving gemaakt naar graverijen aan de landzijde, aan de waterzijde, of aan beide zijden, en voor het faalmechanisme is op basis van de initiële hoofdmechanismen een indeling per mechanisme gegeven (binnenwaartse macrostabiliteit / afdrukken bekleding / erosie bekleding / uitspoeling door een gat in de bekleding / piping (terugschrijdende erosie via een zandlaag in de ondergrond).

Een algemene uitleg naar wat er verstaan wordt onder de dijksamenstelling, kenmerken van de diersoort, het faalmechanisme en de locatie van de graverij op de dijk in algemene zin wordt telkens gegeven op de eerste plek waar dit aan de orde is.

De huidige getallen voor de bandbreedte van de faalkans zijn gebaseerd op waarnemingen, berekeningen, redematies en pas als de voorgaande elementen allemaal ontbreken, vergelijkingen met factoren voor andere diersoorten. De hoeveelheid waarnemingen, en ook de hoeveelheid goed-onderbouwde berekeningen is op het moment van schrijven nog beperkt, zodat veel getallen nu nog gebaseerd zijn op afgeleide redematies. De tekst is zó opgezet, dat dergelijke beperkingen goed zichtbaar zijn, zodat aanpassingen op basis van aanvullende waarnemingen en/of berekeningen, evenals veranderde inzichten met betrekking tot de gevolgde redematies op een navolgbare wijze kunnen worden doorgevoerd.

A.2 Zanddijk met kleibekleding of kleidijk met zandscheg

Hieronder wordt verstaan: een dijklichaam waarvan de kern geheel of in belangrijke mate uit zand bestaat, met een afdekkende kleilaag. De kleilaag voorziet primair in de waterkerende functie, het zand eronder waarborgt stabiliteit – mits goed gedraineerd. Als slechts een deel van de kern uit zand bestaat, zoals in de situatie van een kleidijk met een zandscheg, dan is goede drainage van het zand nog steeds van groot belang voor het goed functioneren van de dijk.

In Figuur bijlage A.1 is een voorbeeld getoond van een dijk met een zandkern en een kleibekleding. De bekleding is naar verhouding dun. Beschadiging van de kleibekleding, bijvoorbeeld door een dierlijke graverij, doorbreekt het werkingsprincipe van dit type waterkering, waardoor de freatische lijn in het zand hoger kan komen dan voorzien en bovendien verdere beschadigingen van de kleibekleding kunnen optreden.

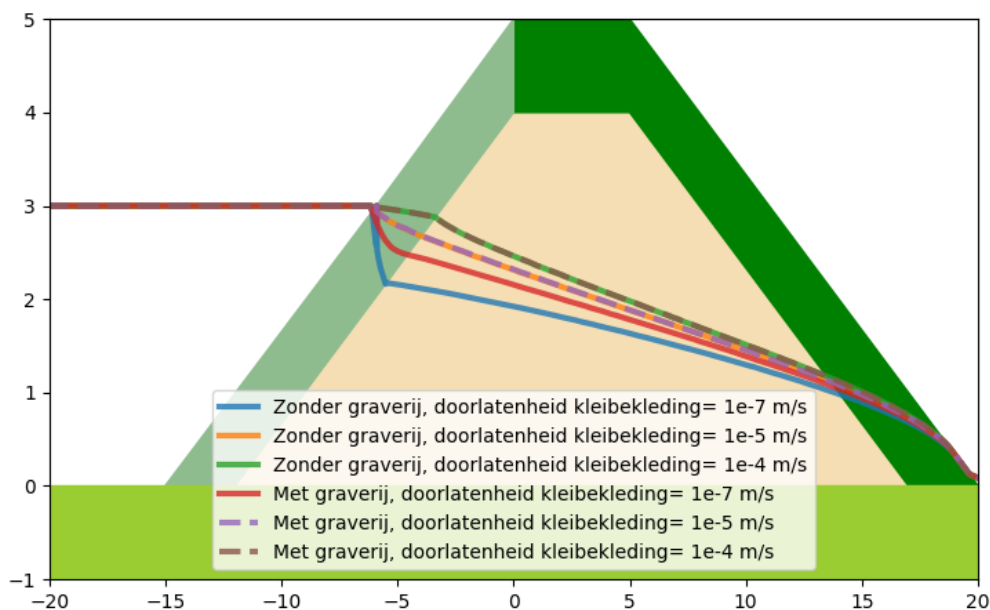


Figuur bijlage A.1 Voorbeeld van een primaire waterkering bestaande uit een zandkern met kleibekleding: de IJsseldijk ter hoogte van het Reevediep (foto: Bianca Hardeman).

Hierbij past wel de kanttekening dat het voor de waterhuishouding in de dijk een groot verschil maakt of er wordt uitgegaan van een ontwerpwaarde voor de doorlatendheid van de kleibekleding in de orde van 1×10^{-7} m/s (ongeveer 1 cm/dag), of dat op basis van structuurvorming voor de buitenste 1,2 m een meer realistische waarde van 1×10^{-4} à 1×10^{-5} m/s (Halter, 2024; zie Figuur bijlage A.2) wordt gehanteerd. Verkennende berekeningen met een uniforme doorlatendheid over de dikte van de kleibekleding laten zien dat de doorlatendheid van de kleibekleding meer invloed heeft dan de aanwezigheid van een graverij, zie Figuur bijlage A.3, waarin de blauwe en rode lijnen horen bij een lage doorlatendheid, respectievelijk zonder en met graverij, en de gestreepte lijnen bij een hoge(re) doorlatendheid, waarbij de situaties zonder en met graverij samenvallen. In Koelewijn (2023) was nog uitgegaan van een lage doorlatendheid van de kleibekleding, passend bij een ongestructureerde situatie, waar in stabiliteitsanalyses (nog) vaak van wordt uitgegaan.

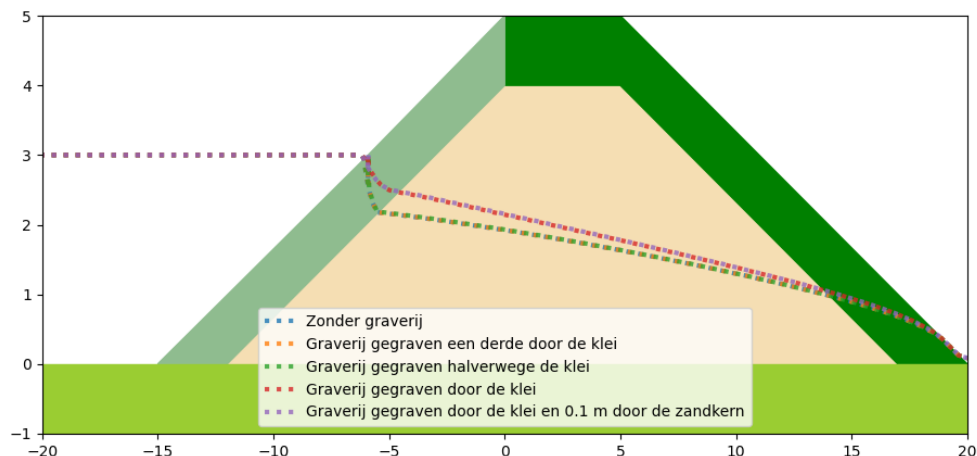
	Diepte		Doorlatendheid
	top	basis	k_s
	[m -mv]	[m -mv]	[m/s]
beste schatting	0,0	0,3	1,0E-04
	0,3	0,8	2,0E-05
	0,8	1,2	1,0E-05
lage doorlatendheid	0,0	0,3	3,0E-05
	0,3	0,8	2,0E-06
	0,8	1,2	2,0E-06
hoge doorlatendheid	0,0	0,3	3,0E-04
	0,3	0,8	8,0E-05
	0,8	1,2	2,0E-05

Figuur bijlage A.2 Doorlatendheid van kleibekleding op dijken, geldig voor onverzadigde zone zonder zand- en stoorlagen (Halter, 2024:10).



Figuur bijlage A.3 Invloed van doorlatendheid kleibekleding (1 m dik) en graverij tot op zandkern (Smyrniou, 2024).

Een ander aspect is de diepte van de graverij: slechts voor een gedeelte in de kleibekleding, of tot aan of zelfs in de zandkern. De invloed hiervan is getoond in Figuur bijlage A.4, uitgaande van een lage en uniforme doorlatendheid van de klei. Verreweg het grootste verschil ontstaat als de kleibekleding geheel doorgraven wordt. De voorgaande figuur relateert dit weer.



Figuur bijlage A.4 Invloed diepte graverij op de fretatische lijn voor stationaire omstandigheden (Smymiou, 2024).

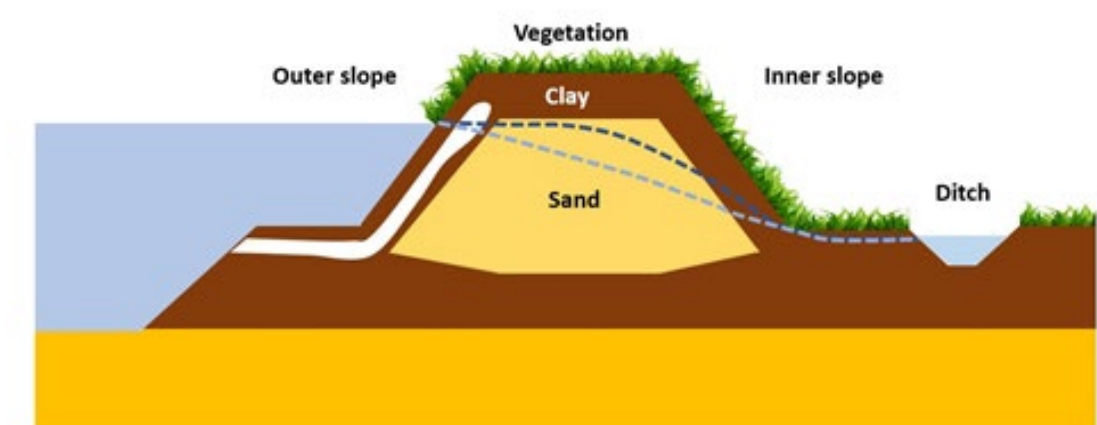
Bij kleidijken met een zandscheg waarbij het functioneren van de zandscheg niet door de dierlijke graverij wordt beïnvloed gelden de invloedsfactoren zoals gegeven voor een kleidijk, zie §A.3.

A.2.1 Bever

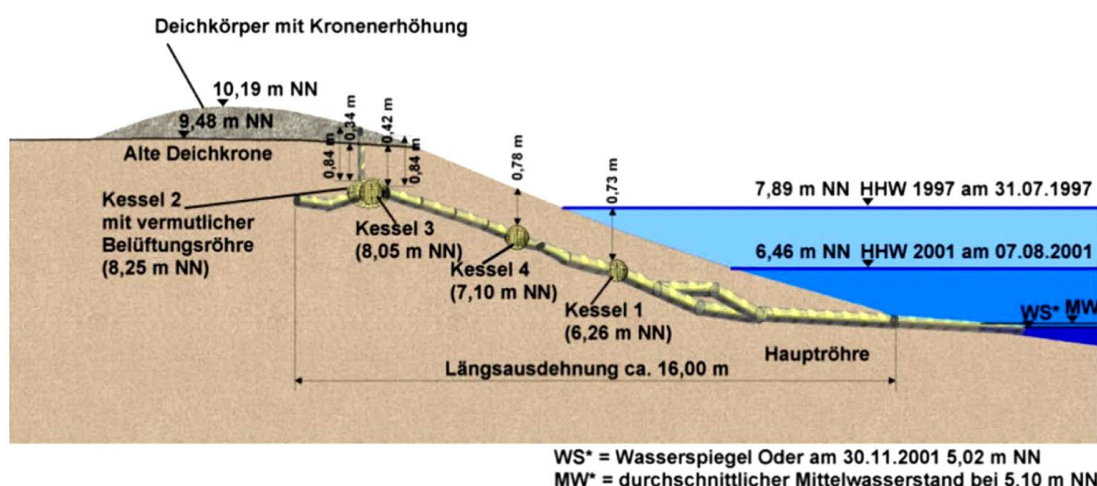
Beveren leven alleen of in paren met tot drie jongen en zijn sterk territoriaal: andere bevers worden doorgaans niet in de nabijheid geduld. Een uitzondering daarop geldt wanneer bevers door hoogwater uit hun hollen of burchten verdreven worden, dan kunnen ze toleranter zijn. Volwassen dieren, zowel vrouwtjes als mannetjes, zijn in totaal 100 tot 120 cm lang en wegen 20 tot 40 kg.

Op zoek naar een territorium kunnen zij tot 20 km per etmaal afleggen. Ze leven als nachtdieren. Bij het verkennen van de mogelijkheden voor een nieuw hol worden veelal meerdere locaties uitgetoetst, tot orde vijf locaties in één nacht, met ondiepe graverijen (tot 30 cm) als resultaat. Het dieper graven op één locatie volgt dan meestal pas een nacht later (Evers & Cornelisse, 2021). In één nacht kan tot 10 m worden gegraven, bij uitzondering tot 20 m.

Een bever graaft gangen met een diameter van 30 tot 40 cm, met kamers die een diameter van 70 cm of meer kennen. Gangenstelsels kunnen meer dan 40 m lang zijn. De toegang tot een hol (intact dak) of burcht (ingestort dak, doorgaans afgedekt met takken en bladeren) bevindt zich ongeveer een halve tot hele meter onder water en is daardoor niet gemakkelijk te detecteren. Wanneer bij (zeer) lage waterstanden de toegang droogvalt, wordt een lagergelegen ingang gegraven of een nieuw hol gegraven. Bij hoogwater, in een situatie die daarvoor de ruimte biedt, kan een nieuw of bestaand hol onder het oppervlak steeds hoger worden uitgegraven, zie Figuur bijlage A.5 voor het principe en Figuur bijlage A.6 voor een op concrete waarnemingen gebaseerde schematisering waarbij tijdens een hoogwater steeds hoger is gegraven aan de waterzijde van de dijk.



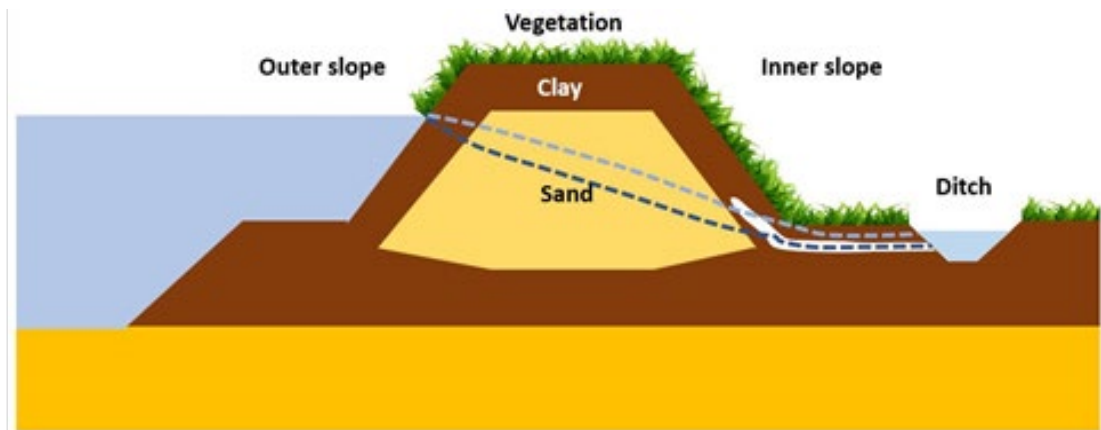
Figuur bijlage A.5 Principe van buitendijkse graverij en invloed daarvan op de freatische lijn (van lichtblauwe lijn naar donkerblauwe lijn; Peteau, 2022:8).



Figuur bijlage A.6 Bevergangen en -holen zoals aangetroffen in een dijk langs de Oder (Hahmann et al., 2004).

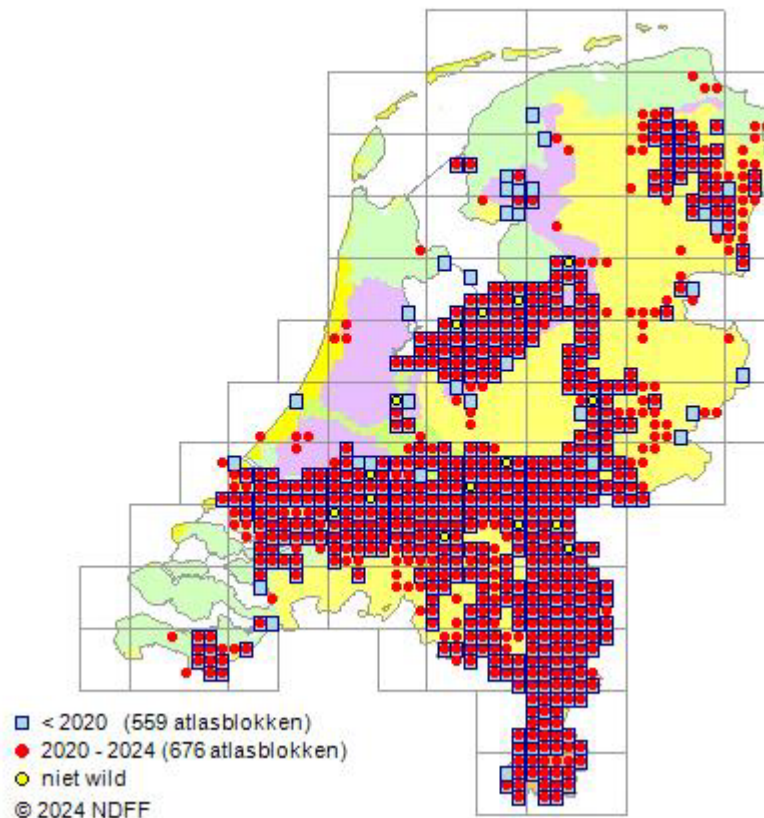
Een ander voorbeeld is gegeven door Bayoumi & Meguid (2011) en betreft de Pischieri Lake Dam, ten zuiden van Cleveland, Ohio. Dit betreft een 11 m hoge homogene aarden dam, gebouwd in 1957, met een reservoiroppervlak van 2,2 ha en een volume van $74 \times 10^3 \text{ m}^3$. Bij een routine-inspectie in 1999 werden twee gaten met een diameter van ongeveer 30 cm ontdekt in het landzijdig talud, ongeveer halverwege. Er stroomde naar schatting een kleine 4 liter per minuut aan water uit deze gaten. Vervolgens werd aan de waterzijde gecontroleerd of daar stroming of kolken zichtbaar waren, maar dat was aanvankelijk zonder resultaat. Tijdens het verwijderen van allerlei drijfvuil en bladeren op het waterzijdig talud kwam een graverij tevoorschijn. Hier stroomde water en aan de landzijde stroomde dit uit de eerdergenoemde gaten, met een debiet van naar schatting 80 liter per minuut. Daarop is het materiaal teruggelegd op de graverij, waarna de stroming verminderde. Vanwege het risico op falen is het reservoirpeil verlaagd, waarna de betreffende sectie, die aan de waterzijde vol met ingestorte graverijen bleek te zitten, is afgegraven en herbouwd, waarna deze nog is afgedekt met een kleilaag en stortsteen.

Indien aan de landzijde gegraven wordt, dan leidt een graverij naar verwachting juist tot een lagere freatische lijn, zie Figuur bijlage A.7.



Figuur bijlage A.7 Principe van binnendijkse graverij en invloed daarvan op de freatische lijn (van lichtblauwe lijn naar donkerblauwe lijn; Peteau, 2022:8).

Het aantal bevers in Nederland wordt momenteel geschat op ongeveer 7000 dieren.³ Ze worden inmiddels overal aangetroffen waar dijken zijn, ruwweg met uitzondering van een brede kuststrook, zie Figuur bijlage A.8.



Figuur bijlage A.8 Verspreiding van de bever over Nederland (NDFF, 2024).

De bever heeft in Europa een beschermde status, waardoor het nemen van maatregelen tegen holen en burchten die de overstromingsveiligheid bedreigen doorgaans veel tijd vergen, tot meerdere jaren aan toe voor het verkrijgen van een vergunning. Bij dreigende calamiteiten kan deze proceduuretijd desnoods sterk worden bekort, in het uiterste geval tot

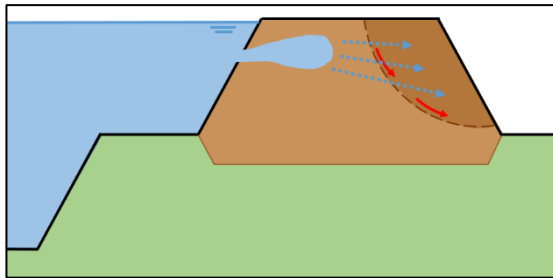
³ <https://www.waterforum.net/45563-hollandse-delta-plaatst-gaas-in-dijk-tegen-gravende-bevers/> (bezocht op 7 augustus 2024).

minder dan een kwartier. In §A.2.3, direct voor §A.2.3.1, wordt hier wat uitgebreider bij stilgestaan voor de das, die op hoofdlijnen dezelfde bescherming geniet als de bever.

A.2.1.1.

Afschuiven landzijde dijk

Graverijen kunnen vanwege de gedeeltelijk verdwenen indringingsweerstand leiden tot een snellere stijging van de freatische lijn in de dijk dan voorzien, waardoor een hoogwatersituatie eerder tot een kritieke situatie leidt. Dit geldt specifiek voor graverijen aan de waterzijde van de dijk, zie Figuur bijlage A.9 en Figuur bijlage A.10. De weerstand van de bekledingslaag ontbreekt ter plaatse van de graafgang waardoor de dijk zich plaatselijk veel sneller vult dan waar in de analyses ten behoeve van de beoordeling en het ontwerp vooraf rekening mee gehouden is.



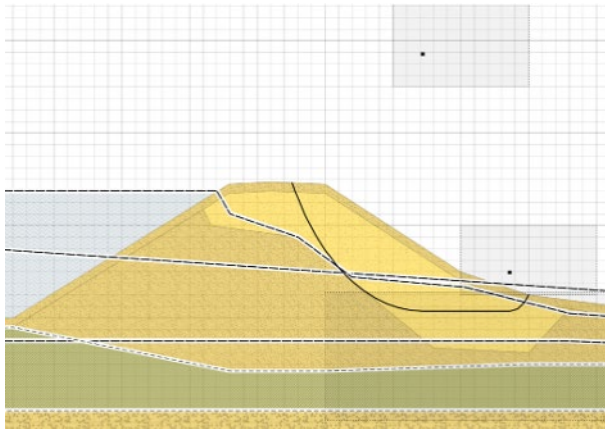
Figuur bijlage A.9 Graverij aan de waterzijde van een dijk, waardoor gemakkelijker binnenwaartse macroinstabiliteit optreedt (EA, 2019:3).



Figuur bijlage A.10 Graverijen in waterzijdig talud (links: Van Dam, 2024:12, rechts: Evers & Cornelisse, 2021:21)

Graverijen aan de landzijde zouden over het algemeen juist kunnen leiden tot een verlaging van de freatische lijn (als ware het drainage), hetgeen voor dit mechanisme gunstig uitpakt. Voor andere mechanismen is dit echter weer ongunstig. Een uitzondering geldt voor graverijen beneden de waterlijn zoals die bij hoogwater kan optreden, dan vindt immers ook vanaf de landzijde infiltratie plaats. Dit geldt voor alle typen dijken.

De optredende glijvlakken bij afschuiving van het talud door macrostabiliteit (zie Figuur bijlage A.11 en Figuur bijlage A.12) zijn over het algemeen in de orde van 20 tot 50 meter breed. De infiltratie via de graverij zal daarom aan weerszijden tot ruim 10 meter van de opening in de bekleding moeten zijn verspreid om tot een significante invloed te leiden. Overigens zal dit al snel het geval zijn als de graverij zich onder de bekledingslaag zijdelings uitstrekt. Of dit het geval kan zijn, verschilt per situatie, maar bij veel opgravingen van bevergraverijen worden ook gangen in de lengterichting van de dijk aangetroffen, met name bij de meer ontwikkelde hollen. Doordat de infiltratie enige tijd vergt, geldt in het algemeen wel dat een langdurig hoogwater een groter gevaar vormt dan een kortdurende hoogwatersituatie.

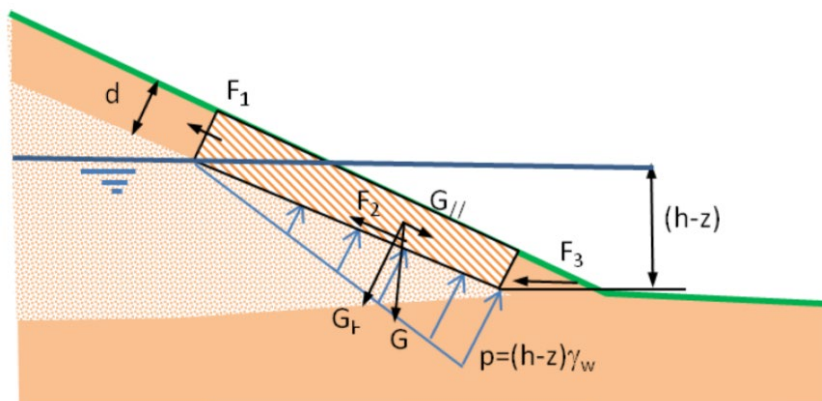


Figuur bijlage A.11 Voorbeeld van afschuiven landzijdig talud in een rekenmodel (Van Dam, 2024:22). De donkere lijn geeft aan waarlangs de bovenliggende grond afschuift.

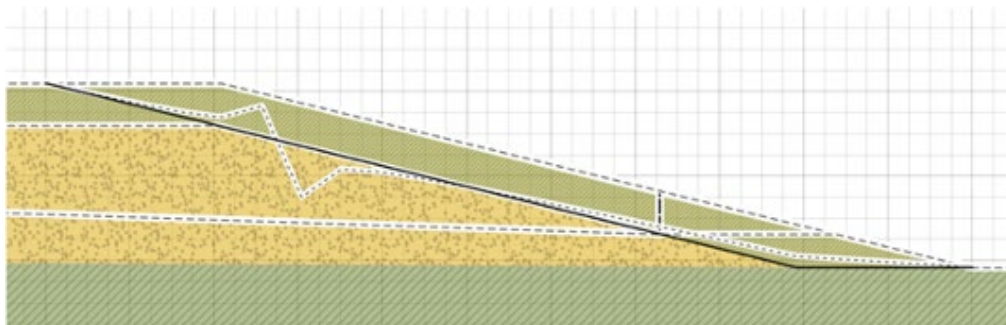


Figuur bijlage A.12 Afschuiving halverwege talud met steile klif in de Zuiderlingedijk, Spijk (Van Hoven, 2014).

Er kan ook afschuiven van alleen de bekledingslaag optreden (zie Figuur bijlage A.13 en Figuur bijlage A.14), mede onder invloed van de verhoogde freatische lijn door graverijen aan de waterzijde. Dit wordt tegenwoordig tot hetzelfde initiële mechanisme gerekend. Analytische formules worden hiervoor gegeven in §D.2.3 van de Schematiseringshandleiding grasbekleding (Van Hoven, 2022:89-91).



Figuur bijlage A.13 Schematische weergave krachten op een grondmoot voor beschrijving evenwicht parallel aan talud (Van Hoven, 2022:89).



Figuur bijlage A.14 Voorbeeld van afschuiven van de bekleding op het landzijdig talud in een rekenmodel (Van Dam, 2024:22). De donkere lijn geeft aan waarlangs de bovenliggende grond afschuift.

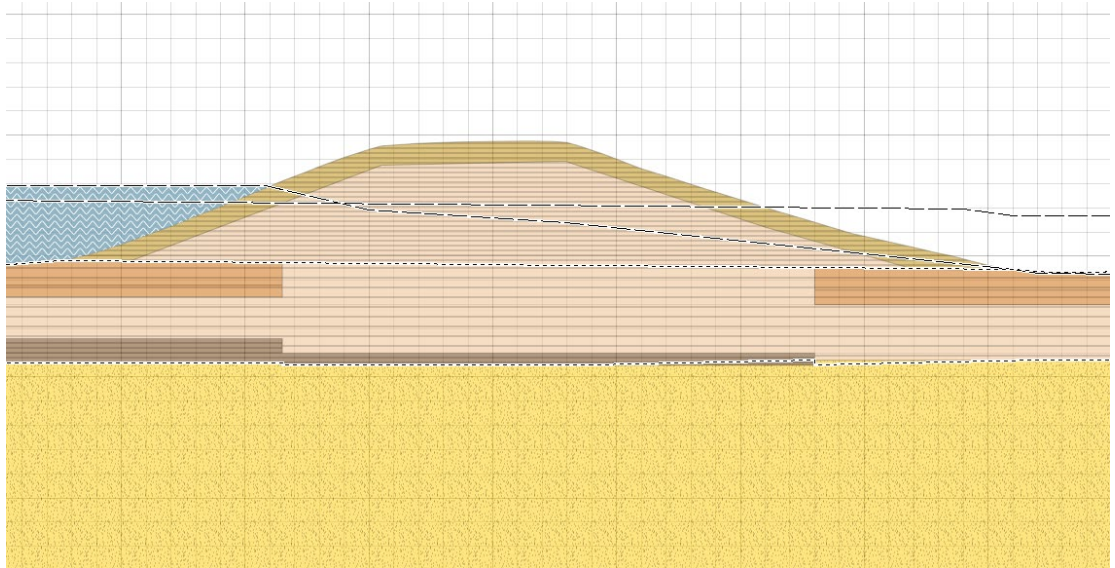
Hierbij past de kanttekening dat de verhoging van de freatische lijn wel een slecht doorlatende bekledingslaag vereist aan de landzijde, hetgeen zeker bij bekledingen die onderaan het talud wat dikker zijn aangebracht wel mogelijk is, maar er moet wel gewaakt worden voor onnodig conservatisme: als het realistisch is om een (te) goed doorlatend waterzijdig talud te veronderstellen, dan mag ook de vraag worden gesteld of het landzijdig talud niet eveneens sterker doorlatend is dan in het ontwerp bedoeld was. Zie ook §A.2, direct na Figuur bijlage A.1.

Case Drielse Dijk

De Drielse Dijk ligt aan de linkeroever van de Nederrijn, stroomafwaarts van Arnhem. De locatie is aangegeven in Figuur bijlage A.15 en het dwarsprofiel in Figuur bijlage A.16.

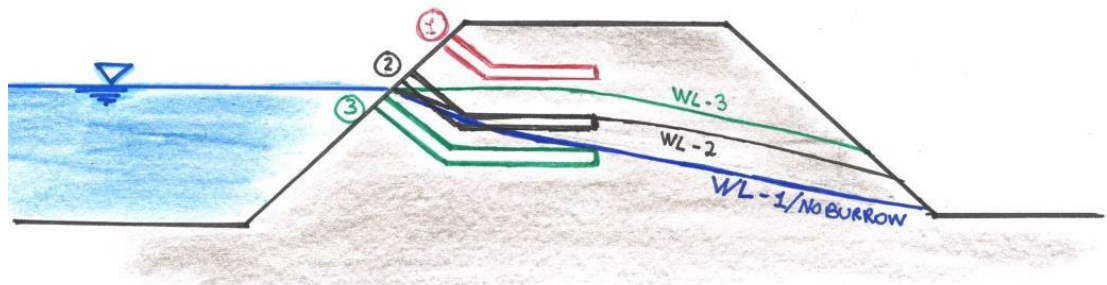


Figuur bijlage A.15 Locatie van de beschouwde sectie van de Drielsedijk bij Arnhem (Van den Berg, 2022:12).



Figuur bijlage A.16 Dwarsprofiel Drielse dijk (de afstand tussen de gridlijnen bedraagt 1 m) (Van den Berg, 2022:13).

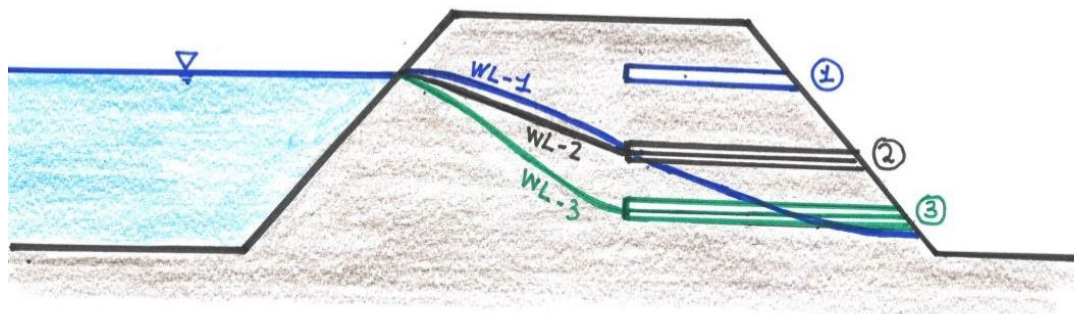
Onder de aanname dat in deze dijk vergelijkbare bevergraverijen kunnen plaatsvinden als waargenomen in een vergelijkbare dijk langs de Oder (Figuur bijlage A.6) en de invloed op de ontwikkeling van de freatische lijn tijdens hoogwater vergelijkbaar is met de situatie zoals nagerekend voor een vergelijkbare dijk in Noord-Italië waar falen is opgetreden (Taccari, 2015), met een schematisering zoals aangegeven in Figuur bijlage A.17 voor een graverij aan de waterzijde en conform Figuur bijlage A.18 voor een graverij aan de landzijde, is de invloed op de berekende stabiliteitsfactor⁴ en de faalkans⁵ aangegeven in Tabel bijlage A.1. De invloed van graafgangen op de freatische lijn is ook experimenteel onderzocht door Saghaei et al. (2017) en hun uitkomsten komen hiermee overeen.



Figuur bijlage A.17 Doorgangen op verschillende hoogtes in het waterzijdig talud en de invloed daarvan op de freatische lijn in de dijk (Taccari, 2015:64).

⁴ Volgens een evenwichtsmodel, waarbij in principe geldt dat een uitkomst kleiner dan 1 tot falen leidt en een uitkomst groter dan 1 niet.

⁵ Bepaald met de kalibratieformule voor uit Mohr-Coulomb-model zoals gegeven door Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2016:40) en derhalve strikt genomen alleen geldig voor Nederlandse primaire keringen.



Figuur bijlage A.18 Doorgangen op verschillende hoogtes in het landzijdig talud en de invloed daarvan op de freatische lijn in de dijk (Taccari, 2015:65).

Tabel bijlage A.1 Berekende invloed van graverijen op afschuiven aan de landzijde van de Drielse Dijk (Van den Berg, 2022; Koelewijn, 2023:22-25).

Waterzijde	Landzijde	Stabiliteitsfactor SF	Vershil in stabiliteitsfactor ΔSF	Faalkans P_f	Vershil (als factor t.o.v. 'geen graverijen') $P_f \times$
<i>Dagelijkse omstandigheden (waterstand van NAP + 8,8 m)</i>					
Geen graverij	Geen graverij	1.251	n.v.t.	$1,03 \times 10^{-8}$	n.v.t.
<i>Maatgevende omstandigheden (WBN; waterstand van NAP + 12,9 m)</i>					
Geen graverij	Geen graverij	0,966		$1,05 \times 10^{-4}$	1
	Halverwege talud	0,968	+0,2%	$1,00 \times 10^{-4}$	0,95
	Net boven dijkteen	0,99	+2,5%	$5,6 \times 10^{-5}$	0,53
Net onder waterstand bij norm (WBN)	Geen graverij	0,93	-3,7%	$2,6 \times 10^{-4}$	2,5
	Halverwege talud	0,93	-3,7%	$2,6 \times 10^{-4}$	2,5
	Net boven dijkteen	0,968	+0,2%	$1,00 \times 10^{-4}$	0,95
Net boven buitenteen	Geen graverij	0,75	-22%	$1,17 \times 10^{-2}$	111
	Halverwege talud	0,75	-22%	$1,17 \times 10^{-2}$	111
	Net boven dijkteen	0,968	+0,2%	$1,00 \times 10^{-4}$	0,95

Voor de graverijen aan de landzijde geldt de kanttekening dat deze niet waarschijnlijk zijn voor bevers, omdat zij doorgaans onder de waterlijn graven (zoals aangegeven in Figuur bijlage A.7), maar bijvoorbeeld beverratten, mollen en vossen zouden de geschematiseerde gaten wel kunnen maken. Belangrijker is de constatering dat de graverijen aan de landzijde halverwege het talud geen invloed hebben, en de graverijen nabij de teen van de dijk een beperkt positieve invloed hebben ten opzichte van de uitgangssituatie zonder graverijen. Vanwege de negatieve invloed op andere initiële mechanismen zijn deze graverijen aan de landzijde echter toch ongunstig voor de veiligheid.

Ontwerp en beoordeling

Voor ontwerp en beoordeling geldt als uitgangspunt dat er een volledig ontwikkeld gangen- en holenstelsel aanwezig is, zoals na enige tijd verwacht mag worden bij iedere diersoort. Bij bevers betekent dat dat er meerdere graafgangen aanwezig zijn, waarvan er één over meerdere verblijfkamers beschikt. Zie de case Wamel in §A.2.1.4 als voorbeeld, dit betreft een situatie van een beverpaar met enkele jongen. Van een meer complexe situatie, waarbij in lengterichting van de dijk verbindingen zijn tussen verschillende gangen, wordt niet op voorhand uitgegaan. Deze benaderingswijze geeft inzicht in het verschil tussen geen graverijen of een situatie waarin geen maatregelen genomen zijn tegen graverijen én deze ook aanwezig zijn. Hierbij is uitgegaan van de beschreven cases en een inschatting van de

effecten op andere dijken, waarbij uitgegaan is van de variatie aan dijken zoals die over het algemeen gangbaar is.

De variatie, of bandbreedte, die dan nog overblijft, is afhankelijk van de dijkomvang (de graverij schaalt niet mee bij een kleinere dijk of grotere dijk), de belastingduur (kortstondig, zoals aan de kust, langdurig, zoals bij de meren, of daartussenin, zoals langs de grote rivieren) en het type belasting (golven wel of niet dominant). Variaties die doorgaans niet worden meegenomen in ontwerp en beoordeling, zoals meerdere hoogwaters kort achter elkaar en de (recente) neerslaghistorie, zijn hier ook niet beschouwd.

Een landzijdige bevergraverij kan door de betere drainage een gunstig effect hebben op het freatisch vlak in de dijk en daarmee gunstig uitpakken voor het faalmechanisme afschuiven aan de landzijde. Daarmee neemt het risico op uitspoeling echter ook weer toe, zie voor dat initiële mechanisme §A.2.1.4. Daarentegen neemt de kans op een lokale instabiliteit bij met name kleinere dijken juist toe bij een dergelijke graverij. De cases waarvoor berekeningen beschikbaar zijn, laten een gevarieerd beeld zien. Daarbij moet bedacht worden dat er in de praktijk nog wel wat extremere resultaten mogelijk zijn. Uitgedrukt in verandering van stabiliteitsfactor wordt een variatie van -30% (ongunstig) tot +10% (gunstig) mogelijk geacht, met voor primaire keringen een verandering in de overstromingskans variërend van 0,1 (gunstig) tot 100 (ongunstig).

Een waterzijdige bevergraverij zal in het gunstigste geval naar verwachting amper effect hebben: 3% afname van de stabiliteitsfactor of een factor 10 toename van de faalkans. Dat geldt bij een relatief grote dijk met een kortstondige belastingduur. Bij een kleinere dijk kan het verschil naar verwachting oplopen tot 30% afname van de stabiliteitsfactor of een factor 1000 toename van de faalkans voor primaire waterkeringen en daarmee vergelijkbare keringen.

In het betrekkelijk onwaarschijnlijke geval dat er sprake is van bevergraverijen aan beide zijden van de dijk (op minder dan 10 à 30 m onderlinge afstand in lengterichting van de dijk), dan wordt de invloed op de stabiliteitsfactor geschat op een afname van 40% (ongunstig) tot een toename van 10% (gunstig), afhankelijk van welke van beide stelsel de doorslag geeft. Uitgedrukt in de overstromingskans voor primaire waterkeringen wordt een verandering met een factor 0,1 (gunstig) tot 10 000 (ongunstig) verwacht.

In Tabel bijlage A.2 is dit samengevat.

Tabel bijlage A.2 *Geschatte bandbreedte van de Invloedsfactoren van bevergraverijen op afschuiven aan de landzijde per dijkvak voor een zanddijk met kleibekleding of een kleidijk met zandscheg, voor ontwerp en beoordeling, dus voor waterstand bij norm (WBN), om te gebruiken voor oriënterende analyses naar het effect van dierlijke graverijen op de faalkans van de waterkering op vakniveau, ter ondersteuning in de afweging van maatregelen bij dierlijke graverijen in dijken. NB: de getalswaarden zijn hoofdzakelijk gebaseerd op expert judgement. De overstromingskans kan nooit groter worden dan 1, als uitgangspunt kan de overstromingskans volgens het ontwerp of de laatste beoordeling dienen.*

Bevergraverij – landzijdig afschuiven (ontwerp en beoordeling)	ΔSF	$P_f \times$
Graverij aan landzijde	-30% - +10%	0,1 – 100
Graverij aan waterzijde	-30% - -3%	10 – 1000
Graverij aan beide zijden	-40% - +10%	0,1 – 10 000

Concrete hoogwatersituaties

Voor concrete hoogwatersituaties is er een grote variatie aan mogelijkheden wat betreft onder andere:

- Maximaal optredende waterstand.
- Duur van het hoogwater.
- Wel of geen recent voorafgaande hoogwaters.
- Wel of geen significante neerslag.
- Mate waarin dierlijke graverijen de gelegenheid hebben gehad om tot ontwikkeling te komen.
- Aanwezigheid van andere diersoorten.

Voor een concrete hoogwatersituatie geldt dat deze meestal minder extreem zal zijn dan de ontwerpomstandigheden (waaronder de waterstand bij norm, WBN), maar in zeldzame gevallen juist nog wat extremer. Om toch enig handvat te bieden, is naast bovenstaande tabel ook een inschatting gemaakt voor een hoogwater waarbij:

- De piekwaterstand op ongeveer de helft tot driekwart van het verschil tussen dagelijkse omstandigheden en beoordelingsomstandigheden ligt.
- Het hoogwater een kleine week duurt.
- Er voorafgaand aan het hoogwater geen sprake was van een eerder hoogwater, (zeer) extreme neerslag of droogte.
- De dijk voorafgaand aan het hoogwater nog geen graverijen heeft van bevers of muskusratten, weinig tot geen graverijen van mollen en de bekleding boven de waterlijn min of meer intact is.

Aangenomen wordt dat tijdens het hoogwater er wel één of meer nieuwe bevergraverijen worden gemaakt, waarbij het dan gaat om slechts een beperkt hol waarbij de kleibekleding wel doorbroken is (anders dan bij een ondiepe, verkennende graverij). Dit leidt tot de invloeden zoals aangegeven in Tabel bijlage A.3.

Tabel bijlage A.3 *Geschatte bandbreedte van de invloedsfactoren van bevergraverijen op afschuiven aan de landzijde, voor een hoogwater (50-75% van WBN), om te gebruiken voor oriënterende analyses naar het effect van dierlijke graverijen op de faalkans van de waterkering op vakniveau, ter ondersteuning in de afweging van maatregelen bij dierlijke graverijen in dijken. NB: de getalswaarden zijn hoofdzakelijk gebaseerd op expert judgement. De overstromingskans kan nooit groter worden dan 1, als uitgangspunt kan de overstromingskans volgens het ontwerp of de laatste beoordeling dienen.*

Bevergraverij – landzijdig afschuiven (gangbaar hoogwater, nieuwe graverij)	ΔSF	$P_f \times$
Graverij aan landzijde	-20% - +5%	0,3 – 10
Graverij aan waterzijde	-20% - 0%	3 – 100
Graverij aan beide zijden	-20% - +5%	0,3 – 300

Deze werkwijze is voor bevers ook in de navolgende paragrafen telkens gevolgd.

Meer in het algemeen wordt het volgende ingeschat, steeds ten opzichte van de uitgangssituatie bij ontwerp en beoordeling (Tabel bijlage A.2):

- Maximaal optredende waterstand:
 - Tussen de helft en driekwart van het verschil tussen dagelijkse omstandigheden en beoordelingsomstandigheden: ruwweg een halvering van de genoemde verandering in stabiliteitsfactor, logaritme van de invloed op de faalkans gehalveerd.
 - Tot aan de kruin: ruwweg 20% - 30% extra verslechtering in stabiliteitsfactor, faalkans 10 tot 100 maal groter.
- Duur van het hoogwater:
 - Bij een hoogwaterduur van ongeveer een dag: ruwweg een halvering, behalve aan de kust.
 - Bij een hoogwaterduur van ongeveer een week: geen wezenlijk verschil (aan de kust pakt dit sowieso ernstiger uit, ook zonder graverijen).
 - Bij een hoogwaterduur van meerdere weken: ruwweg 10% - 25% extra verslechtering in stabiliteitsfactor, faalkans 3 tot 100 maal groter.
- Bij recent voorafgaande hoogwaters neemt de effectieve hoogwaterduur toe, zij het dat eenvoudigweg optellen van de hoogwaterduren tot enige overschatting leidt.
- Bij (zeer) extreme neerslag én bij extreme droogte neemt de stabiliteitsfactor af en de faalkans toe, als gevolg van respectievelijk verweking en scheurvorming. De combinatie van één van deze extremen, waar weinig concrete ervaring mee is, ook wat betreft de invloed op de waterveiligheid, met dierlijke graverijen, waar eveneens nog maar weinig ervaring mee is, is dermate weinig onderzocht dat hier geen nadere inschatting van de invloed wordt gemaakt⁶.
- Aanwezigheid van graverijen voorafgaand aan het hoogwater. Hierbij zijn twee extremen te onderscheiden en twee middenposities, die in de praktijk steeds vaker zal voorkomen:
 - graverijen kunnen onbelemmerd tot ontwikkeling komen omdat er in feite geen beheer op plaatsvindt: dan is de situatie bij een verwachte hoogwaterstand conform beoordelingsomstandigheden al beschreven door de standaardtabellen voor ontwerp en beoordeling, zoals Tabel bijlage A.2.
 - voorafgaand aan het hoogwater is de dijk in perfecte staat wat betreft graverijen – die zijn geheel afwezig. Alle invloed van graverijen tijdens hoogwater is een gevolg van

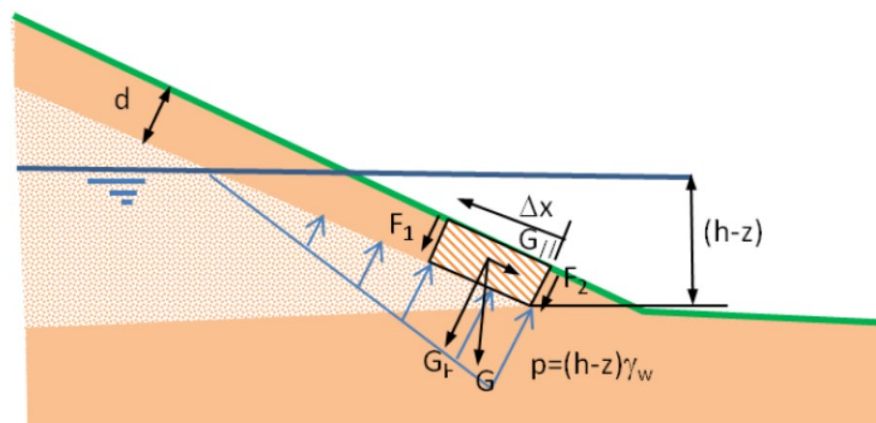
⁶ Om tot een tabel met een inschatting van de bandbreedte van de invloed van de verschillende factoren voor een concrete situatie te komen (en de procedure niet vast te laten lopen), wordt de invloed van (zeer) extreme neerslag voorlopig generiek ingeschat op -10% in stabiliteitsfactor en een factor 30 in de overstromingskans, en de invloed van extreme droogte op -5% in stabiliteitsfactor en een factor 10 in de overstromingskans.

nieuwe graverijen – die door de beperkt beschikbare tijd slechts in beperkte mate tot ontwikkeling zullen komen.

- Een middenpositie met amper graverijen voorafgaand aan het hoogwater. Tabel bijlage A.3 wordt geldig geacht onder de aannamen die vlak daarvoor zijn gemaakt, namelijk dat er wél nieuwe bevergraverijen zijn, maar geen andere graverijen onder de dagelijkse hoogwaterlijn met uitzondering van een enkele mollengang, en geen significante graverijen boven die hoogwaterlijn (bijvoorbeeld wel her en der muizen en mollen, maar niet veel, en ook geen graverijen van bevorratten of vossenholen). Dit geldt in grote lijnen ook voor de soortgelijke tabellen hierna.
- Een middenpositie waarbij met name reeds bestaande graverijen onder de waterlijn, dus vooral van bevers, muskusratten en mollen, vanwege de slechte detecteerbaarheid niet uit te sluiten zijn. Deze mogelijkheid zal een voortdurende bron van onzekerheid blijven, totdat betrouwbare en betaalbare detectiemethoden zijn ontwikkeld.

A.2.1.2. Afdrukken bekleding

Bij afdrukken van de bekleding gaat het om het evenwicht van de bekleding loodrecht op het talud. Deze krachtenbalansen kunnen analytisch opgesteld en uitgerekend worden aan de hand van de illustratie in Figuur bijlage A.19. De formules zijn gegeven door Van Hoven (2022:82-85). De kritische waarde van Δx kan hierbij ook analytisch bepaald worden. Vertaald naar het verhaal van de dijk, gaat het om drukopbouw onder de bekleding, die leidt tot opbollen van de bekleding, waarna er scheuren ontstaan in de bekleding, gevolgd door uitspoelen van het zand. Dit kan alleen bij een groot verschil in doorlatendheid tussen zandkern en kleibekleding en vereist een intacte bekleding, zodat er geen drukverlies mogelijk is door uitspoeling via bestaande gaten of scheuren (Van Dam, 2024:18).



Figuur bijlage A.19 Schematische weergave krachten op een grondmoot voor beschrijving evenwicht loodrecht op talud (Van Hoven, 2022:83).

Het afdrukken van de kleibekleding speelt alleen bij dijken met een kleibekleding op een zandkern of een zandscheg, niet bij dijken met een kleikern of zandige dijken zonder kleibekleding, omdat alleen dan overdrukken kunnen worden opgebouwd onder de bekledingslaag. Ook voor dit mechanisme geldt dat een graverij aan de waterzijde kan leiden tot een grotere instroming van water dan zonder graverij, met een snellere stijging van de freatische lijn (met name in het zand) tot gevolg. Daardoor kan er sprake zijn van een significante toename van de overstromingskans. Graverijen onderaan het landzijdig talud leiden bij dit mechanisme tot een verkleining van de overstromingskans doordat het water uit het zand kan wegstromen en zich geen druk opbouwt onder de kleibekleding (zie echter §A.2.1.4 over uitspoeling door een gat in de bekleding). Hoger gelegen graverijen aan de landzijde kunnen bij golfoverslag en/of overloop van water nog wel tot een vergroting van de faalkans leiden als gevolg van toegenomen infiltratie.

Voor dit faalmechanisme geldt dat er nog geen algemeen probabilistisch model beschikbaar is, daarom zijn berekeningen zoals in de paragraaf hiervoor waarbij een concrete getalswaarde voor de overstromingskans wordt vastgesteld, hier niet aan de orde. De getalswaarden die hier desondanks gegeven worden voor de invloed van graverijen, zijn dan ook afgeleid uit een inschatting van hoeveel gemakkelijker uiteindelijk falen zal kunnen optreden als gevolg van een graverij, naar analogie van de faalkansontwikkeling bij mechanismen waarbij daar wel aan gerekend kan worden.

Het afdrucken van de bekleding zal gemakkelijker optreden als de freatische lijn in de dijk meer stijgt dan verwacht, bij hoogwater met name aan de landzijde van de dijk. Dit zal kunnen gebeuren bij een bevergraverij aan de waterzijde. Hoe lager in het dwarsprofiel die aanwezig is, hoe eerder tijdens een hoogwatergolf de invloed zich kan doen gelden, al is de vereiste indringingafstand (tot aan het binnentalud) natuurlijk wel groter. De aanwezigheid van graafgangen kan deze afstand echter flink bekorten, helemaal als zich een scenario voordoet zoals rond de eeuwwisseling langs de Oder (zie Figuur bijlage A.6 in §A.2.1) waarbij de bever met het hoogwater mee het indringingsoppervlak stapsgewijs vergroot.

Ontwerp en beoordeling

In het geval van een bevergraverij aan de landzijde geldt dat deze ergens laag op het talud aanwezig zal zijn, in verband met de toegang onder de waterlijn. Het beverhol in de dijk zal wel boven de waterlijn liggen, daarom zal in veel gevallen er onder de teen door een verbinding ontstaan tussen het water aan de landzijde (bijvoorbeeld een sloot of een wiel) en de zandkern. Het effect is in alle gevallen dat er geen drukopbouw meer kan plaatsvinden in de zandkern en het mechanisme niet meer mogelijk zal zijn.

De invloed van de verandering door een bevergraverij aan de waterzijde is sterk afhankelijk van de doorlatendheden van de kleibekleding aan beide zijden van de dijk en de doorlatendheid van de zandkern. Deze zijn bepalend voor de mate waarin het verval over de bekleding aan de landzijde toeneemt (dus $(h-z)$ in Figuur bijlage A.19). Invullen in de formule gegeven door Van Hoven (2022:84), bijvoorbeeld in een spreadsheet, geeft direct de invloed op de stabiliteitsfactor voor dit mechanisme. Ingeschat wordt dat dit met realistische parameters kan leiden tot een afname van de stabiliteitsfactor tot 30 procent; en in extreme situaties wellicht tot 50 procent, met name in situaties met een relatief dikke kleibekleding aan de waterzijde, waarbij een graverij daadwerkelijk tot een forse afname van de effectieve doorlatendheid aan de waterzijde leidt. Als ondergrens geldt een invloed van 0%, voor situaties met een goed doorlatende bekleding aan de landzijde. De bandbreedte van de invloed op de overstromingskans *door dit mechanisme* is hierbij, op basis van engineering judgement met vergelijking met andere mechanismen, ingeschat op 1 tot 1000, waarbij de invloed meestal beperkt zal zijn tot hooguit een factor 100.

Bij bevergraverijen aan beide zijden van de dijk (binnen elkaars invloedssfeer voor de beïnvloeding van de drukverdeling, dus binnen maximaal 30 m van elkaar in lengterichting van de dijk) geldt, net als bij een bevergraverij alleen aan de landzijde, dat er geen drukopbouw meer kan plaatsvinden in de zandkern, waardoor het mechanisme niet meer mogelijk zal zijn.

Dit is samengevat in Tabel bijlage A.4 – voor iedere combinatie van diersoort en mechanisme wordt eenzelfde tabel gegeven.

Tabel bijlage A.4 *Geschatte bandbreedte van de invloedsfactoren van bevergraverijen op afdrucken van de bekleding aan de landzijde per dijkvak voor een zanddijk met kleibekleding of een kleidijk met zandscheg, voor ontwerp en beoordeling, dus voor waterstand bij norm (WBN), om te gebruiken voor oriënterende analyses naar het effect van dierlijke graverijen op de faalkans van de waterkering op vakniveau, ter ondersteuning in de afweging van maatregelen bij dierlijke graverijen in dijken. NB: de getalswaarden zijn hoofdzakelijk gebaseerd op expert judgement. De overstromingskans kan nooit groter worden dan 1, als uitgangspunt kunnen de berekeningen volgens het ontwerp of de laatste beoordeling dienen.*

Bevergraverij – afdrucken bekleding landzijde (ontwerp en beoordeling)	ΔSF	$P_f \times$
Graverij aan landzijde	Mechanisme kan niet meer optreden	0 (niet meer mogelijk)
Graverij aan waterzijde	-50% - 0%	1 – 1000
Graverij aan beide zijden	Mechanisme kan niet meer optreden	0 (niet meer mogelijk)

Concrete hoogwatersituaties

Met dezelfde uitgangspunten als beschreven voorafgaand aan Tabel bijlage A.3, is ingeschat dat de invloed op de stabiliteitsfactor bij een gangbaar hoogwater maximaal een achteruitgang van 30% zal zijn – de omvang van de graverij is beperkter en de tijdsduur voor de opbouw van de waterdrukken is korter. De bandbreedte van de invloed op de faalkans wordt daarbij geschat op 1 tot 100, zie Tabel bijlage A.5.

Tabel bijlage A.5 *Geschatte bandbreedte van de invloedsfactoren van bevergraverijen op afdrucken van de bekleding aan de landzijde per dijkvak voor een zanddijk met kleibekleding of een kleidijk met zandscheg, voor een gangbaar hoogwater (50-75% van WBN), om te gebruiken voor oriënterende analyses naar het effect van dierlijke graverijen op de faalkans van de waterkering op vakniveau, ter ondersteuning in de afweging van maatregelen bij dierlijke graverijen in dijken. NB: de getalswaarden zijn hoofdzakelijk gebaseerd op expert judgement. De overstromingskans kan nooit groter worden dan 1, als uitgangspunt kunnen de berekeningen volgens het ontwerp of de laatste beoordeling dienen.*

Bevergraverij – afdrucken bekleding landzijde (gangbaar hoogwater, nieuwe graverij)	ΔSF	$P_f \times$
Graverij aan landzijde	Mechanisme kan niet meer optreden	0 (niet meer mogelijk)
Graverij aan waterzijde	-30% - 0%	1 – 100
Graverij aan beide zijden	Mechanisme kan niet meer optreden	0 (niet meer mogelijk)

A.2.1.3.

Erosie bekleding

Graverijen in de kleibekleding, ook de meer oppervlakkige graverijen door bijvoorbeeld honden, leiden tot beschadigingen van deze kleibekleding die (verdere) erosie vergemakkelijken, door verlies van continuïteit en structuur, en het bieden van aangrijpingspunten voor hydraulische en andere belastingen. Vanwege kenmerkende verschillen in de belasting wordt in de schematiseringshandleiding grasbekleding onderscheid gemaakt tussen enerzijds ‘erosie buitentalud’ en anderzijds ‘erosie kruin en binnentalud’ (Van Hoven, 2022:15-18). Dit betreft respectievelijk de toetsporen GEBU en GEKB. In deze rapportage worden deze gezamenlijk beschouwd, omdat het initiële mechanisme in beide gevallen erosie van de kleibekleding betreft.



Figuur bijlage A.20 Erosie van de kleibekleding (en gelijktijdig van de zandkern eronder) in een vergevorderd stadium (foto's van een proef in de Hedwige-Prosperpolders).

Wanneer er eenmaal een gat in de kleibekleding aanwezig is, kan dit door stroming en golfslag gemakkelijker aangetast worden dan een intacte kleibekleding. Daar waar een intacte kleibekleding niet snel zodanig zal eroderen dat juist specifiek deze erosie uiteindelijk tot een overstroming leidt, is dat anders voor een kleibekleding die al is aangetast door een graverij. De experimentele basis voor de getallen voor dit faalmechanisme, wordt gevormd door de ervaringen met mollengaten in dijken bij golfoverslag- en overloopprouven, zoals beschreven door Koelewijn (2021).

Bevers graven grotere gaten dan mollen (zie §A.2.5), maar de beverholen zullen minder onderhevig zijn aan stroming en vooral golven omdat bevers onder de waterlijn beginnen met graven. Vooral schade door golflappen zal dan pas ontstaan wanneer de waterstand alweer aan het dalen is en de ingang aan de oppervlakte komt. De reeks aan stappen om daadwerkelijk tot overstroming te komen met erosie van de kleibekleding is dan echter nog lang. Ook bestaan er dan meer mogelijkheden tot detectie en tijdig ingrijpen, hoewel de kans daarop niet groot geschat moet worden wanneer het hoogwater elders al tot (zeer) ernstige situaties heeft geleid; de mogelijkheden voor inspectie kunnen dan beperkt zijn door gebrek aan capaciteit en door beperkte toegankelijkheid.

Bij een meertoppig hoogwater is de kans op dit faalmechanisme groter, doordat de graverij dan wel de kans loopt op schade door golven (en drijfvuil) bij een tijdelijk lagere waterstand en er dan vervolgens nog wel sprake is van een hogere waterstand.

Ontwerp en beoordeling

Falen door specifiek erosie van de kleibekleding bij een bevergraverij aan de landzijde wordt onwaarschijnlijk geacht, omdat bevers altijd onder de waterlijn graven en er dan zelden aanleiding zal zijn voor erosie door stroming of golfslag (NB: Bevers zullen niet gaan graven op een locatie waar de condities voor erosie al aanwezig zijn). Bij een hoogwater zal een graverij aan de landzijde door kwel en eventueel golfoverslag of overloop eerder dieper onder water komen te liggen, dan ondieper.

Aan de waterzijde wordt de bandbreedte ingeschat op een factor 1 tot 100. Dit is even groot als bij mollen. Enerzijds leidt de typische ligging onder de waterlijn tot een lagere kans, anderzijds leidt de grotere omvang weer tot een hogere kans.

Bij bevergraverijen aan beide zijden van de dijk geldt dat de graverij aan de landzijde in eerste instantie niet van wezenlijke invloed is, dus wordt de invloed op de overstromingskans in de eerste plaats bepaald door de graverij aan de waterzijde. De vervolprocessen richting overstroming zullen echter wel gemakkelijker optreden vanwege de aanwezigheid van een bevergraverij aan de landzijde, waardoor de situatie daar minder stabiel is. Daarom wordt de bandbreedte van de invloed op de overstromingskans ingeschat op 1 tot 1000, dus maximaal een factor 10 groter dan bij alleen een bevergraverij aan de waterzijde.

Dit is weer samengevat in een tabel; zie Tabel bijlage A.6.

Tabel bijlage A.6 Geschatte bandbreedte van de invloedsfactoren van bevergraverijen op erosie van de bekleding per dijkvak voor een zanddijk met kleibekleding of een kleidijk met zandscheg, voor ontwerp en beoordeling, dus voor waterstand bij norm (WBN), om te gebruiken voor oriënterende analyses naar het effect van dierlijke graverijen op de faalkans van de waterkering op vakniveau, ter ondersteuning in de afweging van maatregelen bij dierlijke graverijen in dijken. NB: de getalswaarden zijn hoofdzakelijk gebaseerd op expert judgement. De overstromingskans kan nooit groter worden dan 1, als uitgangspunt kunnen de berekeningen volgens het ontwerp of de laatste beoordeling dienen.

Bevergraverij – erosie bekleding (ontwerp en beoordeling)	ΔSF^{**}	$P_f \times$
Graverij aan landzijde	-	1*
Graverij aan waterzijde	-	1 – 100
Graverij aan beide zijden	-	1 – 1000

* Een dergelijke graverij op deze locatie en/of diepte met invloed op dit mechanisme is onwaarschijnlijk.

** Voor dit mechanisme is er geen rekenmodel waarbij een stabiliteitsfactor wordt berekend.

Concrete hoogwatersituaties

Bij gangbare hoogwatersituaties is de maximale invloed naar schatting een factor 10 kleiner, vooral vanwege de bescheidener condities en de kortere duur. Zie Tabel bijlage A.7.

Tabel bijlage A.7 Geschatte bandbreedte van de invloedsfactoren van bevergraverijen op erosie van de bekleding per dijkvak voor een zanddijk met kleibekleding of een kleidijk met zandscheg, voor een gangbaar hoogwater (50-75% van WBN), om te gebruiken voor oriënterende analyses naar het effect van dierlijke graverijen op de faalkans van de waterkering op vakniveau, ter ondersteuning in de afweging van maatregelen bij dierlijke graverijen in dijken. NB: de getalswaarden zijn hoofdzakelijk gebaseerd op expert judgement. De overstromingskans kan nooit groter worden dan 1, als uitgangspunt kunnen de berekeningen volgens het ontwerp of de laatste beoordeling dienen.

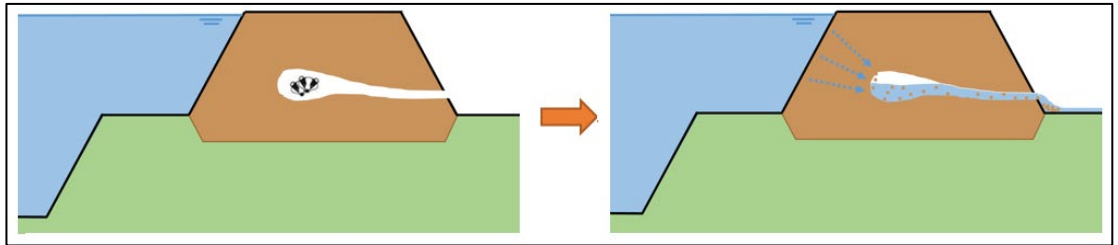
Bevergraverij – erosie bekleding (gangbaar hoogwater, nieuwe graverij)	ΔSF^{**}	$P_f \times$
Graverij aan landzijde	-	1*
Graverij aan waterzijde	-	1 – 10
Graverij aan beide zijden	-	1 – 100

* Een dergelijke graverij op deze locatie en/of diepte met invloed op dit mechanisme is onwaarschijnlijk.

** Voor dit mechanisme is er geen rekenmodel waarbij een stabiliteitsfactor wordt berekend.

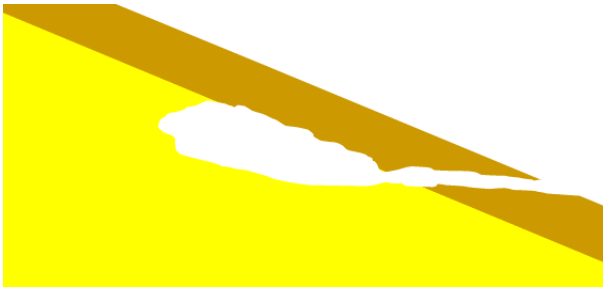
A.2.1.4. Uitspoeling door een gat in de bekleding

Wanneer er een gat in de bekleding zit, bijvoorbeeld als gevolg van een graverij, zal materiaal vanuit de kern gemakkelijker kunnen uitspoelen, zie Figuur bijlage A.21.



Figuur bijlage A.21 Uitspoeling van materiaal door een gat in de bekleding (EA, 2019:3).

De oriëntatie van de ingangen van holen varieert in de praktijk tussen min of meer loodrecht op het talud tot licht omhoog hellend (zie Figuur bijlage A.22 en Figuur bijlage A.23). Bij een licht omhooglopende helling de bekleding in is uitspoeling van materiaal hoofdzakelijk afhankelijk van of het in beweging kan komen, gegeven de hydraulische druk. Eenmaal in beweging zal het doorgaans ook uitspoelen.



Figuur bijlage A.22 Schuin omhooglopende graverij door de kleibekleding heen, met hol grotendeels in het zand.



Figuur bijlage A.23 Door een bever doorgegraven regionale kering (Zijkade bij Vianen; foto Waterschap Rivierenland)

Voor de bepaling van de invloed van dierlijke graverijen op de overstromingskans, waar het in deze rapportage om gaat, worden alle voorkomende oriëntaties relevant geacht, al worden de oriëntaties met een naar binnen toe licht omhooglopende helling als de meest risicovolle ingeschat.

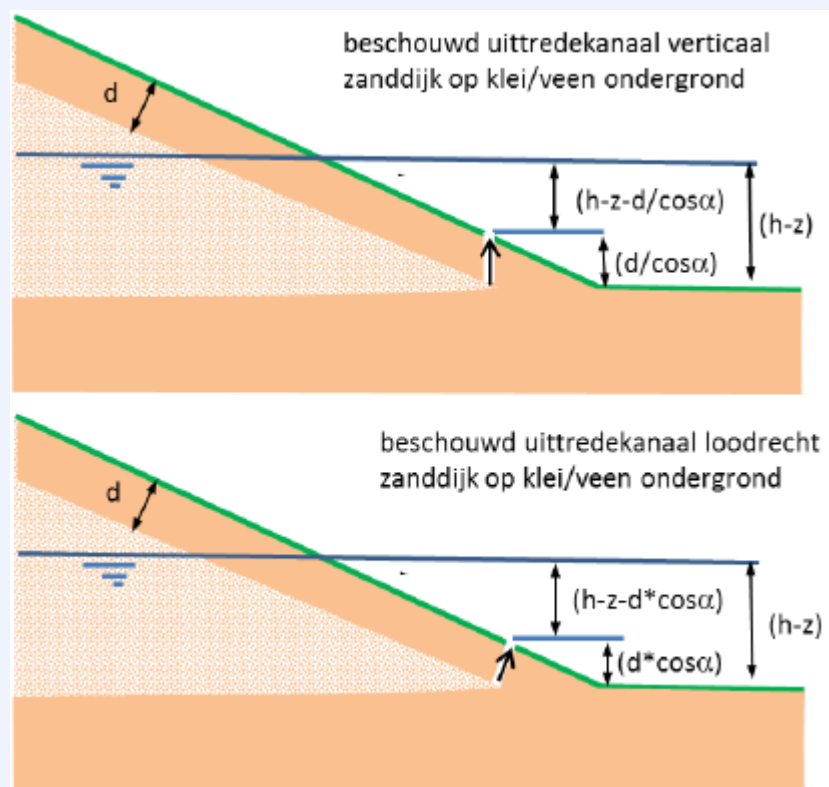
In de schematiseringshandeling grasbekleding wordt vooral ingegaan op de situatie met een gat in de bekleding dat verticaal is of loodrecht op het talud staat. De tekst in onderstaand kader is daaraan ontleend (Van Hoven, 2022:86-88).

Het uitspoelen van zand uit de kleilaag kan worden gemodelleerd door het optredende verhang te vergelijken met een kritisch verhang. Het optredend verhang kan worden geschat door het verschil tussen de grondwaterstand in de zandkern en de ligging van de bovenkant van het uittredekanaal, gedeeld door de lengte van het uittredekanaal. Hierbij heeft de oriëntatie van het uittredekanaal een zekere invloed.

Opgemerkt wordt dat voeding van water vanuit een verzadigd medium (zandkern) anders, langzamer, werkt dan vanuit vrij buitenwater. Dit zou met behulp van grondwaterstromingsberekeningen en eventueel experimenteel onderzoek kunnen worden onderzocht.

Het kritisch verhang is het verhang waarbij zandtransport optreedt. In theorie zal bij een verticaal gericht verhang in een zandpakket gelijk aan $(\rho_s - \rho_w) / \rho_w$ drijfzand ontstaan. Voor normaal gepakt zand met $\gamma_s = 2000 \text{ kg/m}^3$ levert dit een kritisch verhang op van 1. De korrelspanning is in deze situatie 0 Pa, het korrelskelet zweeft als het ware in het water. Bij het opbarsten van een horizontaal klei- en of veenpakket kan in de praktijk eerder zandtransport optreden, namelijk bij een verhang van circa 0,8-1. Een tot nu toe geaccepteerd veilig criterium voor verticaal zandtransport is 0,5⁷ (TAW, 1985).

Als het uittredekanaal een gevolg is van opdrukken of opbarsten van de kleilaag of het gevolg van een scheur door te nat aangebracht materiaal, dan is het waarschijnlijk dat het uittredekanaal een oriëntatie heeft die loodrecht op het talud tot verticaal is. Alleen als het uittredekanaal een gevolg is van graverij, of een slechte inkassing van de kleilaag op de ondergrond dan kan de oriëntatie flauwer worden. Voor sterk van verticaal afwijkende oriëntaties van het uittredekanaal is onbekend in hoeverre het kritisch verhang afneemt. Het verdient de aanbeveling om de kans op voorkomen van deze situaties en de gevolgen voor de veiligheid te onderzoeken. Op dit moment wordt het echter buiten beschouwing gelaten. Bij een kleine afwijking van de verticaal is een correctie met een $\cos \alpha$ denkbaar, zonder dat hiervoor overigens een goede onderbouwing is.



Schematische weergave oriëntatie uittredekanaal met verval gegeven een grondwaterstand $(h-z)$ in de zandkern

Het verhang over het uittredekanaal voor de drie bovenstaande gevallen is gelijk aan:

⁷ Hierbij wordt aangetekend dat voor de vergelijkbare situatie van zandtransport in een wel bij piping een coëfficiënt van 0,3 wordt gebruikt, in de formule die vaak aangeduid wordt als 'de 0,3D-regel'.

$$i_{\text{vertikaal}} = \frac{h-z - \frac{d}{\cos \alpha}}{\frac{d}{\cos \alpha}} = \frac{(h-z)}{d} \cos \alpha - 1$$

$$i_{\text{loodrecht}} = \frac{h-z - d \cos \alpha}{d} = \frac{h-z}{d} - \cos \alpha$$

Voor het kritisch verhang kan bijvoorbeeld, zonder verdere onderbouwing of onderzoek, bij benadering worden uitgegaan van:

$$i_{k,\text{vertikaal}} = 0.5$$

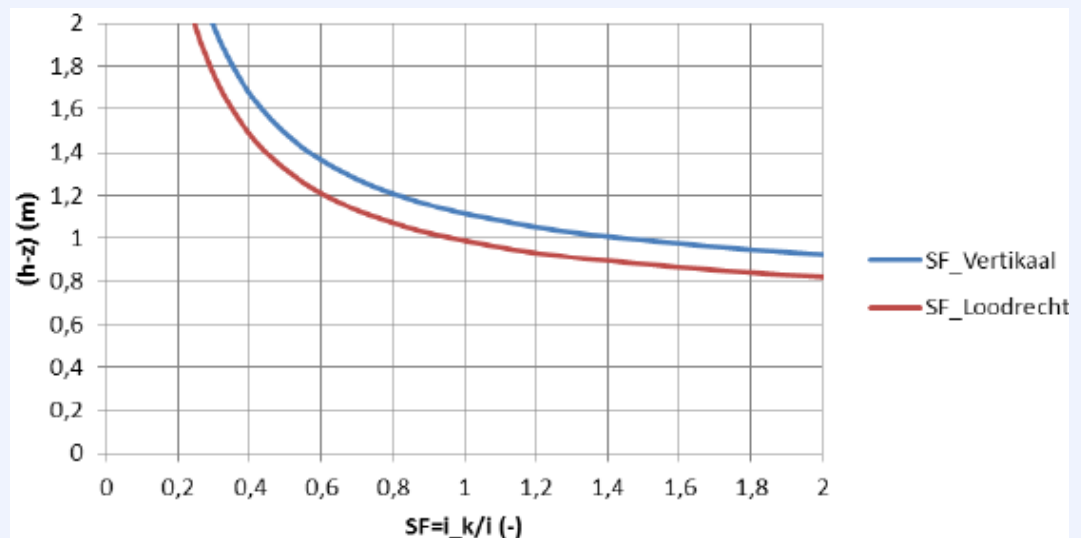
$$i_{k,\text{loodrecht}} = \cos \alpha \cdot 0.5$$

Door het kritische verhang te delen door het optredende verhang kan een veiligheidsfactor (SF; safety factor) worden berekend. Dit leidt tot de volgende formules:

$$SF_{\text{vertikaal}} = \frac{i_{k,\text{vertikaal}}}{i_{\text{vertikaal}}} = \frac{0.5}{\frac{(h-z)}{d} \cos \alpha - 1} = \frac{0.5d}{(h-z) \cos \alpha - d}$$

$$SF_{\text{loodrecht}} = \frac{i_{k,\text{loodrecht}}}{i_{\text{loodrecht}}} = \frac{0.5 \cos \alpha}{\frac{h-z}{d} - \cos \alpha} = \frac{0.5 \cdot d \cdot \cos \alpha}{(h-z) - d \cdot \cos \alpha}$$

Het effect van deze formules is inzichtelijk gemaakt voor een gangbaar talud 1:2,8 van een zanddijk met een kleibekleding van 0,7 m dikte. Voor de twee scenario's is de veiligheidsfactor (SF) uitgezet tegen de belasting ($h-z$), zie onderstaande figuur.



SF tegen $(h-z)$ voor twee scenario's: verticaal uittredekanal en loodrecht uittredekanal

De kritische stijghoogte ($h-z$) in de zandkern bij verticaal uittreden is gelijk aan 1,1 m en bij loodrecht uittreden 1,0 m. De verschillen tussen 'verticaal' en 'loodrecht' zijn gering. Voor de beoordeling moet gebruik worden gemaakt van de formule voor 'loodrecht'.

Boven de kritische waarden van $(h-z)$ zal uitspoelen van zand mogelijk zijn, mits er een scheur of gat aanwezig is in de bekleding, ofwel door bodemstructuurvormende processen en graverij, ofwel als gevolg van opbarsten. Opgemerkt wordt dat voor het kritische verhang de veilige waarde van 0,5 is aangehouden.

Bij een licht omhooglopende helling, zoals in Figuur bijlage A.22 en Figuur bijlage A.23, geldt $\alpha > 90^\circ$ en ontspreken de in het voorgaande kader gegeven formules. De daar genoemde notie dat voeding van water vanuit een verzadigd medium zoals een zandkern anders, langzamer, werkt dan vanuit vrij oppervlaktewater is in dit verband zeker van belang. Er is een criterium nodig waarmee kan worden bepaald of materiaaltransport wel of niet zal optreden. In ICOLD Bulletin 164, over interne erosie, worden enkele methoden uit de literatuur voor uitspoeling uit een gat of een scheur aangegeven onder de noemer 'concentrated leak erosion' (ICOLD, 2017:77-87), hetgeen overeenkomt met de hiergenoemde uitspoeling vanuit een gat. De daar genoemde variatie in eigenschappen en de resulterende erosiesnelheid is echter (zeer) groot. De aangegeven methoden vormen wel een geschikt startpunt om te komen tot een concretisering voor de Nederlandse situatie waar die nu nog ontbreekt, maar dat zal een onderzoek op zichzelf zijn en valt buiten de scope van de huidige rapportage.

Bij uitspoelen wordt in feite de teen van de dijk uitgehold onder de bekleding door. Dit wordt ook wel ondermijning of uitholling genoemd. Door het ontstaan van een holte onder de bekleding raakt de bekleding zelf ook lokaal instabiel, en kan deze barsten, indeuken en uiteindelijk afbrokkelen waardoor de dijk kern blootgesteld wordt. Daarna kunnen erosie, verder uitspoelen of vervolgfascuivingen het dijklichaam verder afbreken.

Voor dit faalmechanisme bestaat er nu geen uitgewerkte rekenmethode met gekalibreerde faalkansen. Dat neemt niet weg dat berekeningen met ook de invloed op de faalkans soms wel degelijk mogelijk zijn, zoals hierna aan de hand van een case bij Wamel zal worden getoond. Voor de rest zal moeten worden afgegaan op schattingen, al dan niet in ruwe mate, zoals de drie buitenlandse praktijkvoorbeelden laten zien.

Case Wamel: landzijdige bevergraverijen

Tijdens de droge zomer van 2022 zijn diverse beverholen aangetroffen in het Oude Wiel bij Wamel, zie Figuur bijlage A.24 voor een overzicht van de locatie en Figuur bijlage A.25 voor een gedeelte van de aangetroffen hollen.



Figuur bijlage A.24 Het Oude Wiel bij Wamel, met links op de achtergrond de Waal bij een lage waterstand (Kapinga, 2022).

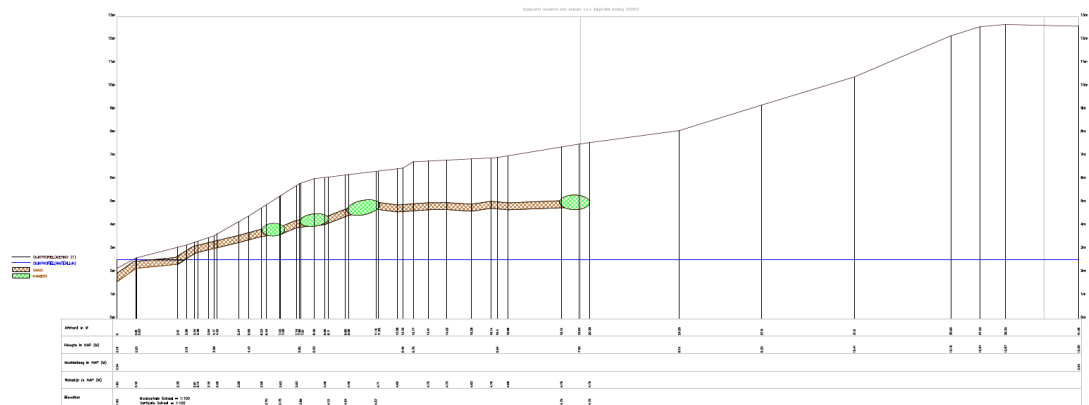


Figuur bijlage A.25 Drooggevallen toegangen van beverholen in de oever van het wiel, aan de kant van de dijk (Kapinga, 2022).

Op basis van zorgen omtrent de veiligheid tegen overstromen ter plaatse is besloten om de hopen uit te graven en op te vullen. Inmetingen zijn weergegeven in Figuur bijlage A.26 en Figuur bijlage A.27.



Figuur bijlage A.26 Inmetingen van beverholen op een kaart met een gangbare waterstand in het Oude Wiel (Kapinga, 2022).



Figuur bijlage A.27 Ingemeten graafgangen en hollen in het dwarsprofiel van de dijk (Kapinga, 2022).

Tijdens de graafwerkzaamheden bleek dat de gang zich in een fijne zandlaag bevond. Uit eerder grondonderzoek is bekend dat de bodem ter plaatse bestaat uit een laag van zeer siltige klei vanaf het maaiveld tot een niveau van NAP + 5,3 m, daaronder een fijne zandlaag van circa 1,2 m dikte en een geschatte doorlatendheid van 1 à 2 m/dag, gevolgd door een dunne zandige kleilaag van ongeveer 1 m dikte. Het watervoerende zandpakket begint op NAP + 3,1 m. Deze laagopbouw is kenmerkend voor een locatie met een oude dijkdoorbraak. De bodem van het Oude Wiel ligt op circa NAP - 4,5 m. Het wiel maakt daarmee rechtstreeks contact met het watervoerende zandpakket. Op basis van lokale waarnemingen kan worden gesteld dat het waterpeil in het Oude Wiel tijdens hoogwaterperioden stijgt tot circa NAP + 6,0 m. De waterstand ten tijde van het ontgraven van het gangenstelsel bedroeg NAP + 2,54 m. Op bestekstekeningen is de waterstand in normale zomers NAP + 4,5 m (Kapinga et al., 2022).

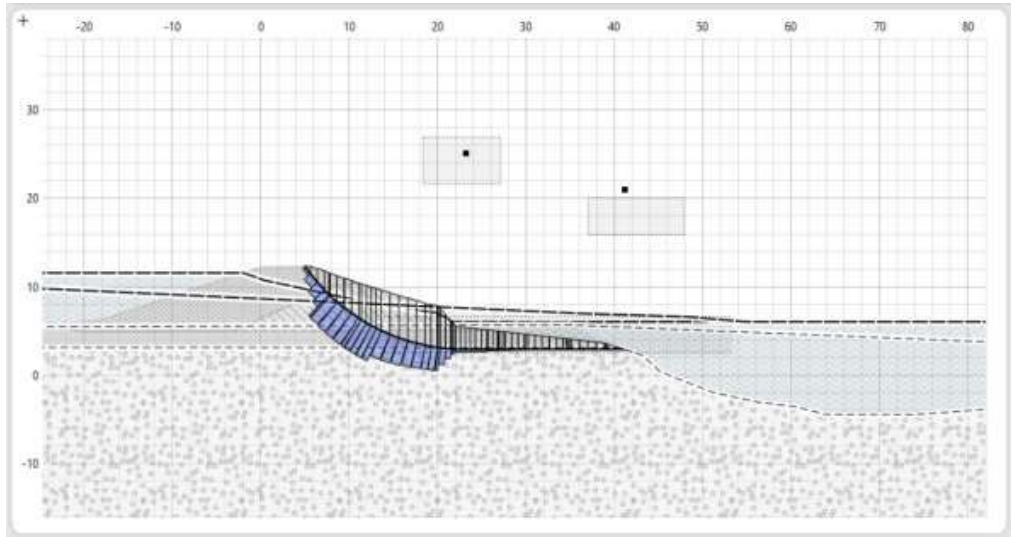
Door Kapinga (2022) is een analyse van het faalpad leidend tot overstroming gemaakt voor deze specifieke situatie voor een bevergraverij aan de landzijde in combinatie met een wiel. In deze analyse zijn ook de vervolgprocessen expliciet benoemd. Het proces tot aan overstromen bestaat uit de volgende stappen met daarbij de ingeschatte kans van optreden:

1. Gangenstelsel trekt grondwater aan (in grotere mate dan al het geval is vanwege de onder de binnentoeaanwezige drainkoffer) – kans van optreden 0,5 tot 0,8.
2. Verweking en/of uitspoeling, waarbij het talud van de insteek van het Oude Wiel bezwijkt – kans van optreden 0,1 tot 0,5.
3. Optreden van binnenwaartse macrostabiliteit van het dan aanwezige profiel – kans van optreden kan worden berekend.
4. Verder falen van het restprofiel – kans van optreden 0,5 tot 0,9.
5. Falen van getroffen noodmaatregelen – kans van optreden 0,3 tot 0,6.

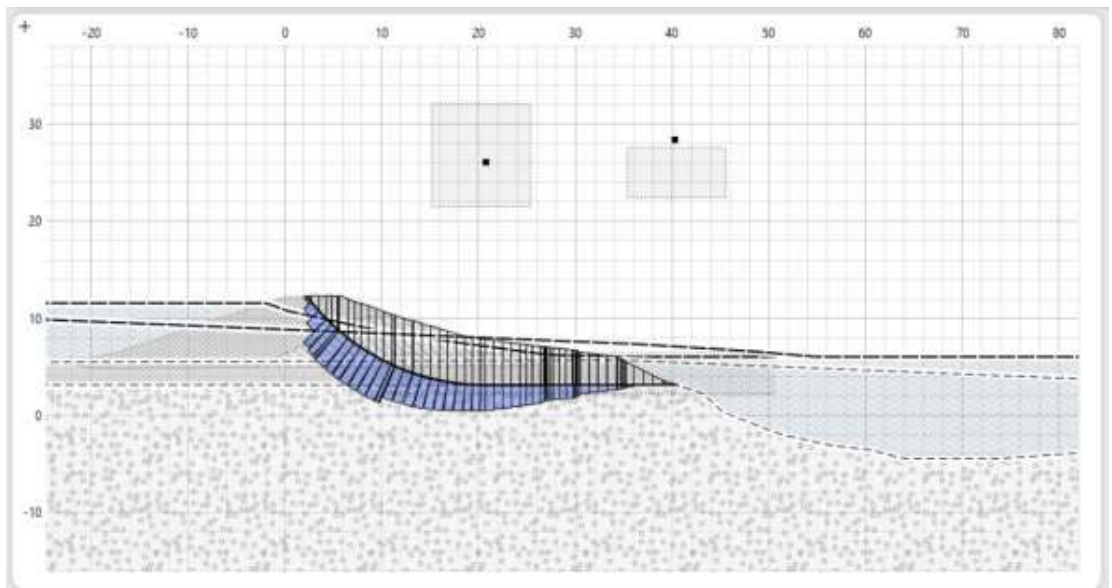
Doordat in stap 3 gerekend kan worden aan macrostabiliteit, kunnen in combinatie met de ingeschatte kansen van optreden van de overige stappen een boven- en ondergrens van de faalkans worden bepaald. Met de hiervoor vermelde kansen van optreden per stap, is voor stap 1, 2, 4 en 5 samen de ondergrens van de scenariokans 0,75%, terwijl de bovengrens 21,6% bedraagt.

Hierbij wordt aangetekend dat het inschatten van dergelijke scenariokansen meestal tamelijk arbitrair is. De bandbreedte van de kans van optreden voor stap 5 komt daarbij nogal krap over; de kans dat getroffen noodmaatregelen falen kan ook worden ingeschat als variërend tussen 0,1 en 0,9. In de praktijk zal dit sterk afhangen van de bereikbaarheid van de locatie en de mate waarin er ook elders, op kleine of op grote schaal, noodmaatregelen worden toegepast. Met deze aangepaste waarden bedraagt de bandbreedte van stap 1, 2, 4 en 5 samen 0,25% tot 32,4%.

In Figuur bijlage A.28 is het maatgevend glijvlak weergegeven voor de situatie zoals die na stap 2 verwacht wordt. De voor deze doorsnede berekende faalkans bedraagt $1,48 \times 10^{-4}$ per jaar. Voor de onaangetaste doorsnede is het maatgevend glijvlak weergegeven in Figuur bijlage A.29 en bedraagt de berekende faalkans op doorsnede-niveau $3,55 \times 10^{-9}$ per jaar (Kapinga, 2022).



Figuur bijlage A.28 *Maatgevend glijvlak voor binnenwaartse macrostabiliteit na verweking en uitspoeling van materiaal rond beverhol (Kapinga, 2022).*



Figuur bijlage A.29 *Maatgevend glijvlak voor binnenwaartse macrostabiliteit voor de onaangetaste situatie (Kapinga, 2022).*

Zonder tussentijds afronden bedraagt de scenario-ondergrens van de faalkans uitgaande van de door Kapinga gegeven bandbreedte voor de 5^e stap $1,11 \times 10^{-6}$ per jaar en is de bovengrens $3,20 \times 10^{-5}$ per jaar, dus ongeveer 300 à 9000 maal groter dan in de onaangetaste situatie. Met de aangepaste waarden voor de 5^e stap worden deze getallen respectievelijk $3,74 \times 10^{-7}$ per jaar en $4,80 \times 10^{-5}$ per jaar, dat is zo'n 100 à 14000 maal groter dan in de onaangetaste situatie.

Ontwerp en beoordeling

De beschreven case heeft betrekking op een naar verwachting betrekkelijk extreme situatie, waarvoor zelfs de ondergrenswaarde al een forse invloed op de veiligheidsbeoordeling.

Daarbij geldt echter ook dat een nóg extremere situatie niet is uit te sluiten. Vandaar dat als bovengrens een waarde van 100 000 kan worden aangenomen voor een bevergraverij aan de landzijde. Er zullen echter ook situaties voor kunnen komen waarbij een beverhol geen noemenswaardige invloed heeft, vandaar dat de ondergrens wordt gesteld op een factor 1.

Door het ontbreken van een algemeen hanteerbare rekenmethode (de situatie in de case kon alleen door de stap met de invloed op de landzijdige macrostabiliteit worden gekoppeld aan de faalkans), is er ook bij dit mechanisme geen invloed op de stabiliteitsfactor te geven.

Bij een bevergraverij aan de waterzijde zal uitspoeling van materiaal door een gat in de bekleding niet in directe zin snel tot problemen met de waterveiligheid leiden. Immers, deze uitspoeling is vooral te verwachten bij een snelle waterstandsval, met drainage van het dijklichaam via de bevergang. Vanwege de relatief grote omvang van een bevergang is het niet waarschijnlijk dat er daadwerkelijk erosie zal optreden. Een bijdrage aan de overstromingskans is vervolgens pas te verwachten bij een nieuw hoogwater. Wanneer het om een tijdens het hoogwater nieuw gegraven beverhol gaat, van een voor het hoogwater gevluchte bever, zal de ingang onder dagelijkse omstandigheden bovendien goed zichtbaar zijn op het talud. De kans op detectie en tijdige reparatie is dan zeer groot en bijgevolg is er dan ook op een volgend hoogwater geen impact meer. Dit geldt echter niet voor een diepgelegen ingang van een beverhol, die onder dagelijkse omstandigheden nog steeds onder de waterlijn ligt. Om bijzondere omstandigheden niet bij voorbaat al uit te sluiten, wordt de bandbreedte van de invloed gesteld op 1 tot 10.

Wanneer aan beide zijden van de dijk een bevergraverij aanwezig is, dan wordt een nadelige invloed op de overstromingskans onontkoombaar geacht. Er ontstaat dan immers een zeer ongunstige situatie, waarbij de waterkerende functie alleen nog door de zandkern moet worden gewaarborgd. De kans op een scenario dat aan beide zijden van de dijk door bevers wordt gegraven lijkt weliswaar over het algemeen niet groot, maar is in specifieke gevallen zeker bij hoogwater niet denkbeeldig. Kijkend naar de twee tot nu toe gepresenteerde cases:

- Een bij hoogwater vanuit de uiterwaard gevluchte bever zou bij Wamel zijn toevlucht kunnen zoeken bij het buitendijkse bosje (zie Figuur bijlage A.24).
- Bij de Drielsedijk bevindt een bij de huidige populatiedruk realistische vestigingsplaats zich in het binnendijkse wiel net ten oosten van de rode cirkel in Figuur bijlage A.15. In aanvulling op een bevergraverij aan de landzijde bij dit talud zou hier vanuit de uiterwaarden een bij opkomend hoogwater daaruit gevluchte bever onopgemerkt in het waterzijdig talud kunnen graven.

Binnen de hier gekozen opzet om de invloed van graverijen te bepalen *gegeven* dat deze aanwezig zijn, is het bovendien vanzelfsprekend om deze situatie te beschouwen. Daarbij geldt ook dat beide graverijen niet per se in elkaars verlengde hoeven te liggen: bij een onderlinge afstand van maximaal enkele tientallen meters in de lengterichting van de dijk is er al een merkbare invloed te verwachten. De ondergrens wordt geschat op een factor 10, terwijl de bovengrens nog een factor 10 hoger zal kunnen uitvallen dan in de case bij Wamel met alleen een binnendijkse graverij, dus een bandbreedte van 10 – 1 000 000.

Het voorgaande is samengevat in Tabel bijlage A.8.

Tabel bijlage A.8 *Geschatte bandbreedte van de invloedsfactoren van bevergraverijen op uitspoeling door een gat in de bekleding per dijkvak voor een zanddijk met kleibekleding of een kleidijk met zandscheg, voor ontwerp en beoordeling, dus voor waterstand bij norm (WBN), om te gebruiken voor oriënterende analyses naar het effect van dierlijke graverijen op de faalkans van de waterkering op vakkniveau, ter ondersteuning in de afweging van maatregelen bij dierlijke graverijen in dijken. NB: de getalswaarden zijn hoofdzakelijk gebaseerd op expert judgement. De overstromingskans kan nooit groter worden dan 1, als uitgangspunt kunnen de berekeningen volgens het ontwerp of de laatste beoordeling dienen.*

Bevergraverij – uitspoeling door een gat in de bekleding (ontwerp en beoordeling)	ΔSF^{**}	$P_f \times$
Graverij aan landzijde	-	1 – 100 000
Graverij aan waterzijde	-	1 – 10
Graverij aan beide zijden	-	10 – 1 000 000

** Voor dit mechanisme is er geen rekenmodel waarbij een stabiliteitsfactor wordt berekend.

Concrete hoogwatersituaties

Bij gangbare hoogwatersituaties, zoals beschreven vlak vóór Tabel bijlage A.3, zou de invloed op de overstromingskansen qua orde van grootte ruwweg kunnen worden gehalveerd (een factor 100 wordt daarmee een factor 10, een factor wordt daarmee een factor 3).

Voor de case bij Wamel kan een inschatting worden gemaakt van een korter durend hoogwater, dat bovendien minder hoog staat. De vijf factoren die bijdragen, zijn als volgt ingeschat:

1. Gangenstelsel trekt grondwater aan (in grotere mate dan al het geval is vanwege de onder de binnenteen aanwezige drainkoffer) – kans van optreden niet meer 0,5 tot 0,8, maar ingeschat als 0,3 tot 0,7.
2. Verweking en/of uitspoeling, waarbij het talud van de insteek van het Oude Wiel bezwijkt – kans van optreden niet meer 0,1 tot 0,5, maar ingeschat als 0,1 tot 0,3.
3. Optreden van binnenwaartse macrostabiliteit van het dan aanwezige profiel – kans van optreden was berekend als een factor 41690 groter, ingeschat wordt dat dit een factor 10 kleiner wordt, dus een factor 4169 (een herberekening bij een lagere rivierwaterstand is binnen het kader van dit rapport niet uitgevoerd).
4. Verder falen van het restprofiel – kans van optreden niet meer 0,5 tot 0,9, maar 0,2 tot 0,7.
5. Falen van getroffen noodmaatregelen – kans van optreden oorspronkelijk ingeschat als 0,3 tot 0,6, al eerder aangepast naar 0,1 tot 0,9, voor deze situatie ongewijzigd.

De bandbreedte voor de case Wamel varieert dan van $(0,3 \cdot 0,1 \cdot 4169 \cdot 0,2 \cdot 0,1 =)$ 2,5 tot 552, opnieuw naar boven afgerond op veelvouden van 3 en 10 wordt dit dan een bandbreedte tot 1000.

In Tabel bijlage A.9 is de invloed samengevat.

Tabel bijlage A.9 *Geschatte bandbreedte van de invloedsfactoren van bevergraverijen op uitspoeling door een gat in de bekleding per dijkvak voor een zanddijk met kleibekleding of een kleidijk met zandscheg, voor een gangbaar hoogwater (50-75% van WBN), om te gebruiken voor oriënterende analyses naar het effect van dierlijke graverijen op de faalkans van de waterkering op vakniveau, ter ondersteuning in de afweging van maatregelen bij dierlijke graverijen in dijken. NB: de getalswaarden zijn hoofdzakelijk gebaseerd op expert judgement. De overstromingskans kan nooit groter worden dan 1, als uitgangspunt kunnen de berekeningen volgens het ontwerp of de laatste beoordeling dienen.*

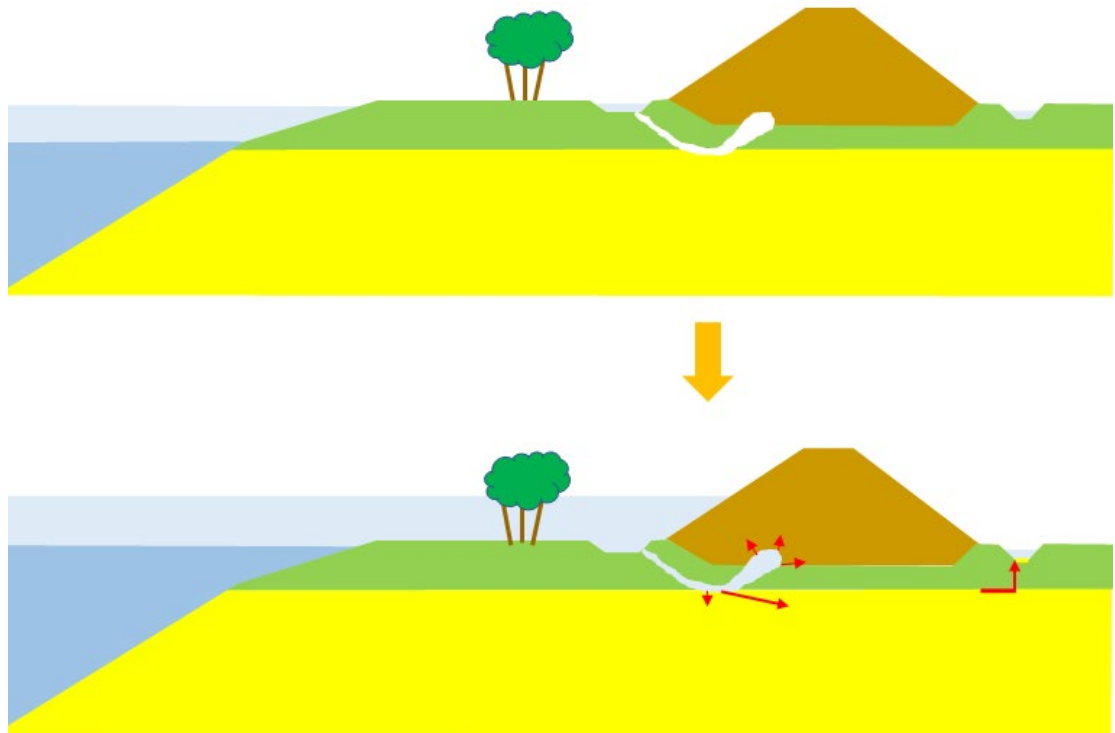
Bevergraverij – uitspoeling door een gat in de bekleding (gangbaar hoogwater, nieuwe graverij)	ΔSF^{**}	$P_f \times$
Graverij aan landzijde	-	1 – 1000
Graverij aan waterzijde	-	1 – 3
Graverij aan beide zijden	-	3 – 1000

** Voor dit mechanisme is er geen rekenmodel waarbij een stabiliteitsfactor wordt berekend.

A.2.1.5. Piping

Piping is een verschijnsel dat alleen plaatsvindt in een zandlaag onder de dijkbasis⁸. Een hol of ingang van een burcht aan de buiten- of binnenzijde van de dijk kan leiden tot verkorting van de kwelweglengte wanneer de deklaag boven de pipinggevoelige zandlaag geheel wordt doorgraven. Dit is daarom alleen relevant voor diersoorten die diep genoeg graven. In de meeste gevallen zal de bovenkant van een pipinggevoelige zandlaag onder de grondwaterstand liggen en vormen alleen holengravers die onder de waterlijn graven een potentieel risico, zoals de bever, de beverrat, de bruine rat en de muskusrat (Larooij, 2022:15). Er moet echter ook worden gedacht aan situaties waar de pipinggevoelige zandlaag onder normale omstandigheden droog bereikbaar is en aan graverijen in (extreem) droge periodes, wanneer de (grond)waterstand erg laag is. Hierdoor kan dit in de praktijk ook een risico vormen bij bijvoorbeeld dassen (zie verder §A.2.3.5). De detectiemogelijkheden zijn bij dergelijke droge omstandigheden wel beter, al moeten voor de detectie natuurlijk wel inspecties plaatsvinden.

⁸ Met andere woorden: terugschrijdende erosie onder de dijk door, met een zandmeevoerende wel aan de landzijde. In de Engelstalige literatuur wordt dit over het algemeen aangeduid als 'backward erosion piping', in sommige gevallen afgekort tot 'piping'. De term 'piping', of 'general piping', wordt daar echter vooral gebruikt voor situaties met ondergrondse erosie door het dijklichaam heen, zoals bijvoorbeeld uitspoeling door een gat, zie ook ICOLD (2017).



Figuur bijlage A.30 Graverij, eventueel bij extreem laag water, leidend tot terugschrijdende erosie en piping.

Bij dit faalmechanisme geldt dat één enkel uittredepunt voldoende kan zijn om tot falen te komen: één enkele graverij aan de landzijde van de dijk kan daarom onder ongunstige omstandigheden al fataal zijn. Hierbij is wel voldoende toevoer van water nodig om tot erosie te leiden. Aan de waterzijde is een enkel gat in de deklaag over het algemeen onvoldoende om tot falen te kunnen leiden, maar wanneer er achter dat enkele gat een langgerekte gang (al dan niet evenwijdig aan de dijk) of een groot hol/nestruimte aanwezig is, zie Figuur bijlage A.30, dan kan de effectieve kwelweglengte wel degelijk zodanig verkleind zijn dat falen door piping kan optreden.

In het geval van een deklaag met een dikte van niet meer dan enkele meters is het goed denkbaar dat deze door een bever wordt doorgraven, zelfs wanneer er geen sprake is van uitzonderlijk droge omstandigheden. Een graverij die contact maakt met de daaronder gelegen zandlaag veroorzaakt een verkorting van de kwelweglengte. Als deze zandlaag gevoelig is voor piping, dan kan de overstromingskans hierdoor sterk toenemen.

Het is in het algemeen belangrijk om bij verkorting van de kwelweglengte, dus de afstand tussen het intrede- of instroompunt (of: de zone van instroming) en het uittredepunt onderscheid te maken aan welke kant van de waterkering dit plaatsvindt. Instromend water kan zich over een breder gebied verdelen, terwijl bij uitstroming juist concentratie plaatsvindt in één punt. Daardoor leidt een graverij met een diameter van een paar decimeter aan de landzijde van de dijk, maar dicht bij de dijk dan het oorspronkelijke uittredepunt, in het algemeen tot een verlegging van het uittredepunt tot aan de graverij. Een vergelijkbare graverij aan de waterzijde van de dijk leidt wel tot een grotere instroming van water, maar leidt niet per se tot een vergelijkbare verkorting van de kwelweglengte. Bij een bevergraverij, met een typische diameter van 3 tot 7 decimeter, is de toestroming mogelijk groot genoeg om van een concreet intredepunt te spreken, vooral wanneer er bovendien sprake is van een graafgang van meerdere meters lengte en/of een verblijfhol waarbij de zandlaag bloot is komen te liggen en het bij een hoogwater binnenstromende water gemakkelijk in de zandlaag kan infiltreren.

Case Drielse dijk – voor piping

Door Van den Berg (2022:21-24) is in detail ingegaan op de faalpaden bij buitendijkse en binnendijkse graverijen door de deklaag heen, en is ook de impact onderzocht op de situatie bij de Drielsedijk, die in §A.2.1.1 al aan de orde is gekomen voor de impact van een bevergraverij op de binnenwaartse macrostabiliteit. Voor piping is hier sprake van een in potentie extreem ongunstige situatie (zie ook Figuur bijlage A.15):

- Ruime mogelijkheden voor de vestiging van bevers in de uiterwaarden, die onder normale omstandigheden daar zullen graven en bij hoogwater kunnen uitwijken naar de dijk.
- Binnendijs hier en daar ook mogelijkheden voor de vestiging van een bever, bijvoorbeeld bij een oud wiel.
- Een doorgraafbare dikte van de deklaag.

Voor het dijkprofiel DR 185 zal de kwelweglengte bij een bevergraverij in de buitenteen van de dijk afnemen van circa 180 m tot circa 85 m. De kans op piping neemt dan tot van 1:22 000 000 per jaar naar 1:264 per jaar: een toename met een factor 83 333 – naar boven af te ronden tot een factor 100 000. Bij een binnendijkse graverij zal de verkorting van de kwelweglengte beperkt blijven tot maximaal ruim 10% van de kwelweglengte, hetgeen zich in termen van kansen vertaalt tot een toename met ruwweg een factor 100. Bij graverijen aan beide zijden van de dijk zal de kans op falen van deze dijk door piping zeer waarschijnlijk worden. Rekening houdend met het feit dat een faalkans niet groter kan worden dan 1, en dat bijvoorbeeld noodmaatregelen ook nog enig effect kunnen hebben, kan hiervoor een bovengrens worden gegeven van een factor 10 000 000.

Case Upper Jones Tract

Op 3 juni 2004 brak de westelijke dijk van Upper Jones Tract, langs de Middle River in de Californische Delta niet ver van Sacramento. Dit gebeurde tijdens springvloed en bij een hoge, maar niet ongebruikelijke, rivierafvoer. Het was daarbij onbewolkt weer, met praktisch geen wind. Deze dijkdoorbraak wordt toegeschreven aan piping, hoewel door erosie alle bewijs is weggespoeld. Een dag eerder was deze dijk nog geïnspecteerd. In de wijde omgeving werden bevers vanwege hun graafgewoonten aangewezen als de directe oorzaak voor dit falen (Suddeth et al., 2008).

Ontwerp en beoordeling

De case van de Drielse dijk wordt als leidend aangenomen, bij gebrek aan concrete alternatieven. Dit is vermoedelijk binnen Nederland wel één van de meest extreme situaties die denkbaar zijn, hoewel voor alleen een binnendijkse graverij elders nog wel een grotere mate van kwelwegverkorting mogelijk zou kunnen zijn, zodat hiervoor een bovengrens van 10 000 wordt aangehouden. Als ondergrens is een factor 1 (geen invloed) aannemelijk. Voor alleen een buitendijkse graverij wordt bovengenoemde factor 100 000 als bovengrens overgenomen, terwijl een ondergrens van 1 in het algemeen eveneens aannemelijk is – mede omdat voor piping aan de waterzijde een forse mate van infiltratie vereist is om daadwerkelijk bij te dragen aan de kans op piping. Voor graverijen aan beide zijden tot in de pipinggevoelige zandlaag wordt de hiervoor genoemde bovengrens van 10 000 000 aannemelijk geacht, met de kanttekening (die voor deze hele rapportage geldt) dat de faalkans natuurlijk nooit groter kan worden dan 1, zodat zeker deze bovengrens zelden van toepassing zal kunnen zijn. Als ondergrens kan opnieuw 1 worden aangenomen.

Het voorgaande is samengevat in Tabel bijlage A.10.

Tabel bijlage A.10 Geschatte bandbreedte van de invloedsfactoren van bevergraverijen op piping per dijkvak voor een zanddijk met kleibekleding of een kleidijk met zandscheg, voor ontwerp en beoordeling, dus voor waterstand bij norm (WBN), om te gebruiken voor oriënterende analyses naar het effect van dierlijke graverijen op de faalkans van de waterkering op vakniveau, ter ondersteuning in de afweging van maatregelen bij dierlijke graverijen in dijken. NB: de getalswaarden zijn hoofdzakelijk gebaseerd op expert judgement. De overstromingskans kan nooit groter worden dan 1, als uitgangspunt kunnen de berekeningen volgens het ontwerp of de laatste beoordeling dienen.

Bevergraverij – piping (ontwerp en beoordeling)	ΔSF^{**}	$P_f \times$
Graverij aan landzijde	-	1 – 10 000
Graverij aan waterzijde	-	1 – 100 000
Graverij aan beide zijden	-	1 – 10 000 000

** Voor dit mechanisme is er geen rekenmodel waarbij een stabiliteitsfactor wordt berekend.

Concrete hoogwatersituaties

Bij gangbare hoogwatersituaties, zoals beschreven vlak vóór Tabel bijlage A.3, geldt voor graverijen aan de landzijde dat een voor hoogwater gevluchte bever, als die aan de landzijde gaat graven, dan dezelfde schade kan aanrichten. De lagere piekwaterstand en de kortere duur van het hoogwater maken wel een significant verschil, geschat wordt dat de bovengrens daarmee op een factor 100 kan worden gesteld.

Aan de waterzijde zal er in een concrete hoogwatersituatie niet door de deklaag heen worden gegraven. Van bevergraverijen aan de waterzijde gaat voor dit mechanisme dan geen invloed meer uit. Daarmee maakt het bij alleen een graverij aan de waterzijde geen verschil, en geldt bij een graverij aan beide zijden dezelfde bandbreedte als bij alleen een graverij aan de landzijde.

Dit is in Tabel bijlage A.11 samengevat.

Tabel bijlage A.11 Geschatte bandbreedte van de invloedsfactoren van bevergraverijen op piping per dijkvak voor een zanddijk met kleibekleding of een kleidijk met zandscheg, voor een gangbaar hoogwater (50-75% van WBN), om te gebruiken voor oriënterende analyses naar het effect van dierlijke graverijen op de faalkans van de waterkering op vakniveau, ter ondersteuning in de afweging van maatregelen bij dierlijke graverijen in dijken. NB: de getalswaarden zijn hoofdzakelijk gebaseerd op expert judgement. De overstromingskans kan nooit groter worden dan 1, als uitgangspunt kunnen de berekeningen volgens het ontwerp of de laatste beoordeling dienen.

Bevergraverij – piping (gangbaar hoogwater, nieuwe graverij)	ΔSF^{**}	$P_f \times$
Graverij aan landzijde	-	1 – 100
Graverij aan waterzijde	-	1*
Graverij aan beide zijden	-	1 – 100

* Een dergelijke graverij op deze locatie en/of diepte met invloed op dit mechanisme is onwaarschijnlijk.

** Voor dit mechanisme is er geen rekenmodel waarbij een stabiliteitsfactor wordt berekend.

A.2.2 Muskusrat

Deze deelparagraaf is grotendeels gebaseerd op Van Hemert & Spoorenberg (2006).

De muskusrat bouwt net als de bever ondergrondse holen, met een toegang onder de waterlijn. Dit bemoeilijkt de detectie. Ze maken een uitgebreid stelsel van pijpen (diameter: circa 0,15 tot 0,20 m) en enkele nestkommen (diameter circa 0,35 m). De graverij beperkt zich overwegend tot een diepte van 0,5 tot 0,75 m onder het maaiveld, met uitschieters tot 1 m, over de taludzone van iets (< 0,35 m) onder het laagwaterniveau tot boven de gemiddelde hoogwaterstand. Dit resulteert in een intensief vergraven bovenste laag van het talud, met gemiddeld één pijp of gang per strekkende meter dijk, over een aanzienlijke strekkende lengte (meer dan 50 m).

Belangrijke voorwaarden voor de keuze van een vestigingsplaats zijn de aanwezigheid van open water en voedsel (hoofdzakelijk waterplanten, gras en riet). De keuze wordt ogenschijnlijk niet beïnvloed door een bepaalde grondsoort of oevervorm. Rond hun hol, of bouw, creëren zij een eigen territorium, dat ze verdedigen tegen soortgenoten. Voedsel wordt in een ruimer leefgebied dan het territorium gezocht. De diameter van een territorium varieert van 45 tot 200 m. Het leefgebied is veel groter en heeft een diameter van ongeveer 2 km. Het gemiddeld aantal nakomelingen van een paartje muskusratten ligt rond de 10 per jaar (na neststerfte). Gedurende het jaar blijven de jongen, die uit meerdere worpen kunnen voortkomen, binnen het ouderlijk territorium, om tijdens de najaarstrek een eigen territorium te bezetten. De migratieafstand kan wel 70 km bedragen. De kop-romplengte van volwassen dieren bedraagt 25 tot 40 cm en kan tot 1,7 kg wegen.⁹

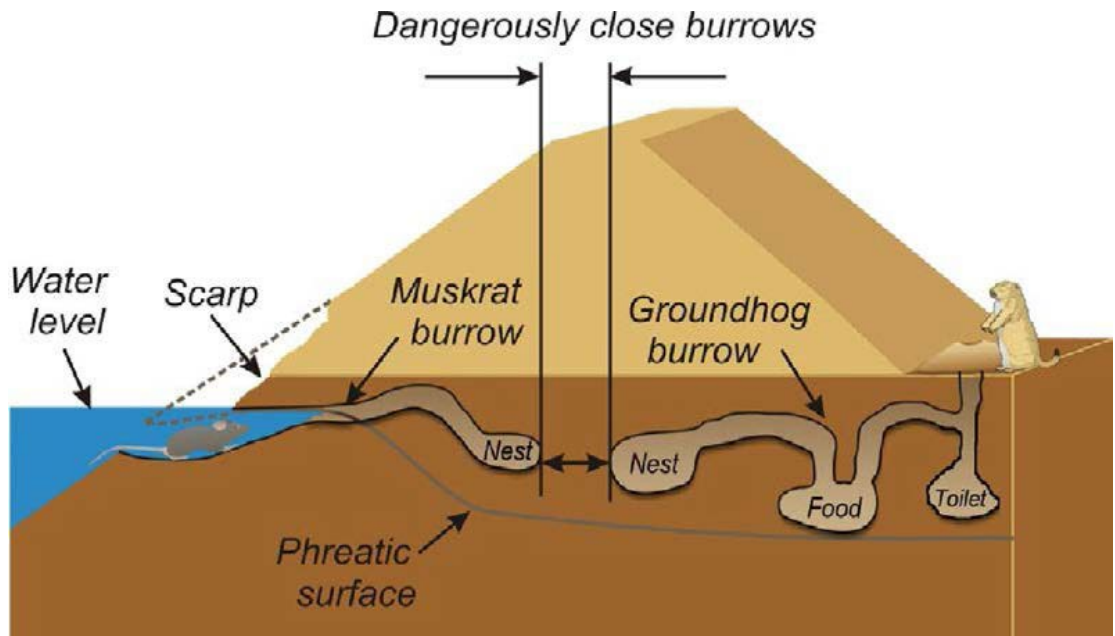
Muskusratten vallen in Nederland onder de plaagdieren. In veel waterschappen is daarom een muskusrattenbeheerorganisatie actief, veelal al sinds het midden van de vorige eeuw. Deze richt zich overigens sinds begin deze eeuw meestal ook op beverratten. Vanuit met name Duitsland, maar ook vanuit België komen veel muskusratten Nederland binnen. Mede daardoor is de populatie onverminderd groter dan uit oogpunt van waterveiligheid wenselijk wordt geacht. De muskusrat is een exoot en heeft weinig natuurlijke vijanden of concurrentie met inheemse diersoorten om zijn biotoop. De bestrijding is verreweg de belangrijkste doodsoorzaak van muskusratten.

Bayoumi & Meguid (2011) schrijven het falen op 27 juni 2008 van de Pin Oak-dijk langs de Mississippi, nabij Winfield, Missouri, toe aan muskusratten. Diverse holen van muskusratten op het later bezwaken dijkvak waren gedicht, maar de locatie bleek bij hoogwater niet meer met noodmaatregelen te houden, zoals ook blijkt uit een nieuwsverslag.¹⁰

Een ander voorbeeld uit de Verenigde Staten waarbij de muskusrat een rol speelt, is weergegeven in Figuur bijlage A.31.

⁹ <https://nl.wikipedia.org/wiki/Muskusrat>

¹⁰ <https://www.cbsnews.com/news/missouri-citizens-scramble-as-levee-breaks/>



Figuur bijlage A.31 Voorbeeld van dicht bij elkaar gelegen nesten van een muskusrat en een marmot (USBR, 2017:2).

A.2.2.1.

Afschuiven landzijde dijk

Door de mogelijke verzwakkingen van de dijk door de vergravingen door muskusratten komen Van Hemert & Spoorenberg (2006) tot een toename van faalkans met een factor 10 voor meerdere typen dijken. Dit geldt voor zowel graverijen aan de landzijde en aan de waterzijde afzonderlijk, als graverijen aan beide zijden.

A.2.2.2.

Afdrukken bekleding

Van Hemert & Spoorenberg (2006) beschrijven hoe de aantasting van de bekleding door muskusratgraverijen aan de waterzijde, leiden tot een toename van de freatische lijn aan de landzijde, waardoor afdrukken van de bekleding tot een factor 10 waarschijnlijker wordt geacht.

Landzijdige graverijen door muskusratten zouden er juist toe kunnen leiden dat dit mechanisme niet meer mogelijk is.

Bij graverijen aan beide zijden lijken beide uitersten mogelijk, vanwege de mogelijke ruimtelijke spreiding.

A.2.2.3.

Erosie van bekleding

Van Hemert & Spoorenberg (2006) beschrijven ook hoe de aantasting van het waterzijdig talud door muskusratgraverijen tot ernstige schade en gemakkelijke erosie kan leiden, met een niet-kwantificeerbare invloed op de waterveiligheid, die wel gemakkelijker tot bresvorming kan leiden.

Aanvullend hierop kan worden gesteld dat ook een muskusratgraverij aan de landzijde een vergelijkbaar effect zal hebben op de erosiebestendigheid van de bekleding en de veiligheid van de waterkering. Bij graverijen aan beide zijden kunnen beide effecten elkaar versterken.

Getalsmatig wordt de invloed als vergelijkbaar met die van mollen (zie §A.2.5.3) ingeschat: een factor 1 tot 100 op de overstromingskans voor graverijen aan één zijde en een factor 1 tot 1000 voor graverijen aan beide zijden.

A.2.2.4. Uitspoeling door een gat in de bekleding
Tevens beschrijven Van Hemert & Spoorenberg (2006) hoe graverijen van muskusratten in het waterzijdig talud tot meer instroom van water in het dijklichaam kunnen leiden, met erosie door uitspoeling aan de landzijde tot gevolg. Dit kan een tot een factor 10 hogere overstromingskans leiden. De oriëntatie van de gaten (licht hellend omhoog naar binnen) en de diepte (met name de nestkamers kunnen door de bekledingslaag heen steken) maken het bij graverijen aan de landzijde waarschijnlijker dat er hierdoor een gat aanwezig is, waardoor de uitspoeling kan plaatsvinden (eveneens tot een factor 10). Vanwege ruimtelijke spreiding kan het effect bij graverijen aan beide zijden nog wat versterkt worden (tot een factor 30).

A.2.2.5. Piping
Gelet op de graafdiepte en de vorm van de graverijen kan een landzijdige graverij door muskusratten tot een uittredepunt dicht bij de dijk leiden, daarmee tot een verkorting van de kwelweglengte en dus ook tot een grotere overstromingskans. Hiervoor geldt hetzelfde als voor bevers (zie §A.2.1.5), dus een toename van de overstromingskans tot een factor 10000. Bij waterzijdige graverijen door muskusratten is het onwaarschijnlijk te achten dat deze effectief tot een verkorting van de kwelweglengte leiden, aangezien het indringingsoppervlak van de gangen die tot in de pipinggevoelige zandlaag steken naar verwachting te klein is om een merkbaar verschil te maken. Bij graverijen aan beide zijden blijft de toename dan ook maximaal een factor 10 000.

A.2.3 Das

Voor de beschrijving van de das is gebruik gemaakt van Larooij (2022:18-19 en 25-26), voor nadere bronvermelding wordt hier verder daarnaar verwezen.

De gemiddelde kopromplengte van een das is 60 – 80 cm. Mannetjes hebben een gemiddeld gewicht van 9 – 17 kg, vrouwtjes 6 – 14 kg. De poten en buik zijn zwart of donkerbruin, de staart wigvormig of ovaal en bruinachtig of peper- en zoutkleurig. De rug en de flanken van de das zijn ruig behaard en hebben vrij dikke en stugge haren van 7 – 9 cm, die grotendeels gelig van kleur zijn met een zwarte band en een grijsachtige punt.

De das leeft in gebieden die bestaan uit een combinatie van verschillende soorten biotopen. Dit zijn hoog- en laaggelegen gronden die niet ver uit elkaar liggen, zoals akkers, kleinschalige graslanden met voldoende struiken, hagen, houtwallen, singels en bosjes. Deze landschapselementen kunnen dienen als beschutting en oriëntatie. Belangrijke habitatcondities zijn:

- Groot voedselaanbod.
- Goed vergraafbare bodem (die regenwater snel afvoert).
- Voldoende dekking.
- Nauwelijks verstoring.

De territoriale omvang is afhankelijk van voedselvoorziening en kwaliteit van het leefgebied. De grootte van het territorium varieert in optimaal gebied van 30 tot 150 hectare, maar is bij minder gunstige voedselomstandigheden groter. Het foerageergebied van een das ligt tot op een afstand van 1,5 tot 12 km van de burcht. Bemeste graslanden met gras korter dan 5 cm waar het hele jaar eten te vinden is, bieden gemakkelijk veel wormen voor een das. Ook zijn er gebieden die een deel van het jaar geschikt zijn, zoals (maïs)akkers, hoogstamboomgaarden en ruigten. Deze landschapstypen zijn voornamelijk van belang voor het opbouwen van een vetlaag om de winterperiode door te komen.

Dassen hebben vergraafbaar zand nodig om een burcht te kunnen maken. Daarnaast moet de drainage van de bodem ook goed zijn, zodat de burcht niet volloopt. Daarom bevinden dassenburchten zich vaak in terreinverhogingen en hellingen. De burcht ligt vaak in een

houtwal, bosrand of singel, in de buurt van akker- en weiland. En soms in een dijk, zie Figuur bijlage A.32.



Figuur bijlage A.32 Gedeelte van een dassenburcht in een regionale kering nabij Beilen. Meerdere graafpijpen zijn zichtbaar, maar lang niet alle graafpijpen van deze burcht staan afgebeeld (foto: André Koelewijn).

Dassenburchten kunnen tot 4 m diep zijn. Het zichtbare bovengrondse deel is maar een klein deel van de gehele burcht. De maximale omvang kan vaak worden geschat door ongeveer 20 m op te tellen bij de buitenste pijpen. De burchtgrootte wordt niet bepaald door het aantal dassen dat zich daarin bevindt, maar door ouderdom, vergraafbaarheid en ligging.

Dassen maken binnen hun territorium vaak gebruik van vaste paden, wissels geheten, die de gemeenschappelijke geur aannemen en ook wel worden gebruikt om de grenzen van een territorium aan te geven (in combinatie met latrines). Dit gebeurt vooral in gebieden met een grote dichtheid aan dassen. Dassen mijden water, maar als het moet kunnen ze goed zwemmen.

De das is vooral 's nachts en bij schemering actief. De das is honkvast en leeft in familiegroepen van gemiddeld 3 tot 6 dieren (in gebieden met veel voedselaanbod en voldoende dekking tot wel 20 dieren), geleid door een dominant mannetje. Vaak blijven paartjes levenslang bij elkaar.

Graafactiviteiten worden geregeld ondernomen, of er wordt nestmateriaal verzameld. De das gaat gezamenlijk met soortgenoten of individueel op voedseltocht. Tegen zonsopkomst keren ze weer terug naar de burcht. Tegenover andere dassenfamilies of individuen zijn dassen territoriaal.

De das is een omnivoor, maar de minst vleesetende marterachtige van Europa. Regenwormen vormen een belangrijke voedselbron voor dassen. Ook slakken, kevers en muizen staan soms op het menu. Een groot deel van het voedsel bestaat echter uit

plantaardige bronnen, zoals bessen, eikels, noten, knollen en (onrijpe) maïskorrels. Voedsel wordt verzameld door te graven en te wroeten.

De das geniet wettelijke bescherming in Nederland. Naast de zorgplicht die geldt voor alle in het wild voorkomende soorten, is de das beschermd op grond van hoofdstuk 3 van de Wet Natuurbescherming (Wnb). Deze bescherming is gebaseerd op de verantwoordelijkheid van iedereen die een handeling begaat die in strijd is met de verbodsbepalingen. In die zin spreekt men van 'passieve' bescherming van soorten: autoriteiten grijpen alleen in als de overheid een besluit eist of als handhavend moet worden opgetreden. Het uitgangspunt van de Wnb is dat het verboden is om schade aan de das toe te brengen, tenzij hiervoor uitdrukkelijk toestemming is verleend, het 'nee, tenzij'-principe. Overtredingen van de verbodsbepalingen kunnen echter worden toegestaan door middel van een ontheffing die door de minister van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV) wordt goedgekeurd. De goedkeuring van de gedragscode of de behandeling van ontheffingsverzoeken is afhankelijk van het bevoegde gezag. Het goedkeuren van de gedragscode is toebedeeld aan de minister van LNV. De ontheffing is alleen mogelijk op grond van wettelijke belangen die genoemd zijn in de bijbehorende artikelen van de Wnb.

A.2.3.1. Afschuiven landzijde dijk

De invloed van graverijen door dassen op de overstromingskans ten gevolge van binnenwaartse macrostabiliteit is ingeschat op basis van een vergelijking met graverijen door bevers (zie §A.2.1.1).

Een dassenburcht aan de landzijde in of nabij een dijk zal leiden tot een betere drainage onder hoogwateromstandigheden. Weliswaar graven dassen vooral in grond waarvan de drainage onder dagelijkse omstandigheden al goed op orde is, dat neemt niet weg dat de hoogwateromstandigheden waar het in het kader van de overstromingsveiligheid om gaat, dusdanig zeldzaam zijn dat er niet vanuit mag worden gegaan dat de dassen rekening houden met hoogwater. De mate waarin de dassengraverijen van invloed zijn op de overstromingskans is vermoedelijk van dezelfde orde van grootte als een bevergraverij. Een dassenburcht kent doorgaans meer graafpijpen dan een bever, deze zijn kleiner dan bij een bever en de uitstroomopening is niet beneden de waterlijn onder dagelijkse omstandigheden, maar hoger, toch zal de bulkweerstand van de ondergrond hierdoor aanzienlijk afnemen en mogelijk wateren één of meer graafpijpen ook direct af. Net als bij bevergraverijen wordt de bandbreedte van de invloed op de overstromingskans daarom ingeschat op 0.01 tot 1; dus een *afname* van de overstromingskans met maximaal een factor 100.

Een dassenburcht aan de waterzijde heeft een met bevers vergelijkbare invloed of zelfs een nog wat grotere invloed, door de vele toegangen die een dassenburcht doorgaans kent. De toestroming is daardoor over een grotere zone verdeeld, met sneller en mogelijk meer impact op de binnenwaartse macrostabiliteit tot gevolg. De bandbreedte van de invloed op de overstromingskans is daarom ingeschat op 1 tot 10 000.

Wanneer een dassenburcht aan beide zijden van de waterkering aanwezig is, zichtbaar aan de openingen, dan zal de drainerende werking de bandbreedte aan de bovenzijde wat beperken, anderzijds zal de gemakkelijker instroming aan de waterzijde de overstromingskans door binnenwaartse macrostabiliteit minder doen afnemen. De bandbreedte voor deze situatie is ingeschat op 0.1 – 1000.

A.2.3.2. Afdrukken bekleding

De bandbreedten voor dit faalmechanisme zijn eveneens geschat op basis van vergelijkingen met bevergraverijen (zie §A.2.1.2).

Een dassenburcht aan de landzijde zal minder diepe uitstroomopeningen hebben dan een bevergraverij aan de landzijde; onder dagelijkse omstandigheden heeft een dassenburcht de graafpijpen immers boven water terwijl de opening van een bevergraverij onder de waterlijn wordt aangelegd. Desalniettemin kan de invloed op dit faalmechanisme fors zijn, de bandbreedte is daarom ingeschat op 0.001 – 1.

Een dassenburcht aan de waterzijde zal bij (een extreem) hoogwater op meerdere plaatsen gemakkelijker water laten toestromen in het dijklichaam. De graafpijpen zijn weliswaar kleiner dan bij een bevergraverij, maar doorgaans groter in aantal en mede daardoor verspreid over een bredere zone. De bandbreedte is daarom ook voor dit faalmechanisme ingeschat op nog iets groter dan bij bevergraverijen, namelijk 1 – 10 000.

Wanneer een dassenburcht aan beide zijden van de waterkering aanwezig is, dan hangt het in grote mate af van de precieze positionering van de burcht als geheel of er (vooral) sprake is van een drainerende werking, of juist van een belastingverhogende werking. De uitersten van de bandbreedte zijn daarom hetzelfde gekozen als bij een dassenburcht aan slechts één van beide zijden van de dijk, dus 0.001 – 10 000.

A.2.3.3. Erosie van bekleding

Bij erosie van de bekledingslaag zijn primair de ervaringen met mollen het uitgangspunt (zie §A.2.5.3). De graafpijpen van dassen (zie bijvoorbeeld Figuur bijlage A.32) zijn dusdanig dat dit altijd ongunstig uitpakt voor dit faalmechanisme, daarom is de ondergrens van de invloed op een factor 3 gesteld. De grotere omvang van de gaten ten opzichte van mollengaten maakt dat de invloed van dassengraverijen als groter wordt ingeschat. Daarom is de bovengrens voor graverijen aan ofwel de landzijde, ofwel de waterzijde ingeschat op een factor 1000. Dit zijn dezelfde waarden als voor een vossen- en konijnengraverij (zie §A.2.6.3).

Wanneer een dassenburcht zich aan beide zijden uitstrekt (en wel wat groter is dan alleen aan beide zijden net voorbij de kruin), dan wordt een factor 10 000 mogelijk geacht.

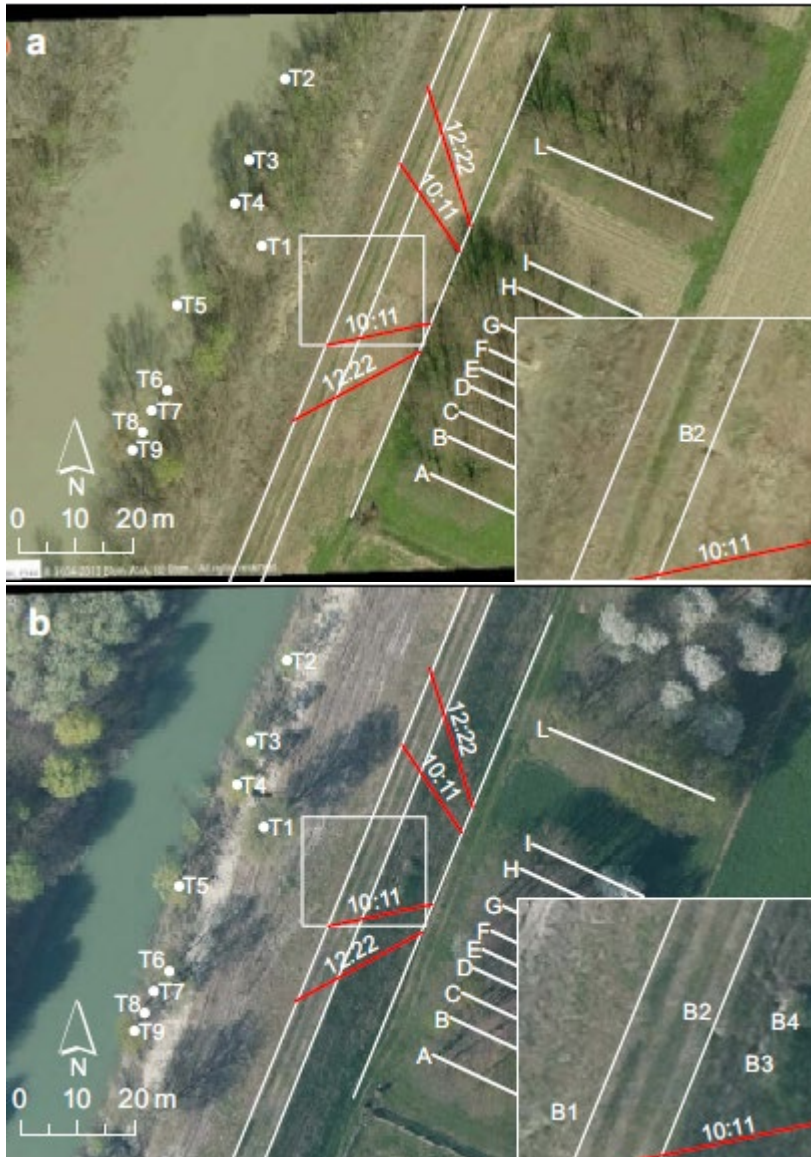
A.2.3.4. Uitspoeling door een gat in de bekleding

Voor de uitspoeling door een gat in de bekleding geldt op hoofdlijnen een verhaal dat vergelijkbaar is met dat voor graverijen door bevers (zie §A.2.1.4). Er zijn twee situaties met waarnemingen bekend. De eerste betreft het hoogwater van juli 2021 in de Maas. Toen stroomde er nabij de Maasdijk bij Linden water uit een dassenburcht¹¹, hierbij werd ook zand meegevoerd (Van Tilborg, 2021). De tweede situatie is hierna meer in detail beschreven.

Case San Matteo (Italië)

Orlandini et al. (2015) en Taccari & Van der Meij (2016) beschrijven een dijkdoorbraak langs de Secchia bij San Matteo (Italië). Dit betreft een circa 7 m hoge dijk met een zandige kern en een kleibekleding. Hier zijn sporen aangetroffen van vier gravende diersoorten: dassen, stekelvarkens, vossen en bevorratten. Op deze locatie was eerder een hol van een stekelvarken gedicht en er zijn in de voorafgaande jaren in toenemende mate toegangspijpen van de drie eerstgenoemde diersoorten aangetroffen, deels ook zichtbaar op luchtfoto's, zie Figuur bijlage A.33.

¹¹ <https://www.aenmaas.nl/actueel/nieuws/2021/juli/dassenhol-linden-gedicht/>



Figuur bijlage A.33 Luchtfoto van de dijk langs de Secchia nabij San Matteo, a) 27 maart 2010, b) 29 maart 2012 (Orlandini et al., 2015).

Uit de analyses beschreven in beide papers komt naar voren dat de uitspoeling van dijk materiaal door het gat in het landzijdig talud de meest waarschijnlijke aanleiding is geweest voor het falen. In diverse scenario's die uitgaan van macrostabiliteit blijkt falen niet plausibel te zijn.

Impact op de overstroomingsveiligheid

Aan de landzijde geldt dat de graafpijpen van dassen weliswaar kleiner zijn, maar dat staat het doorgaans grotere aantal gaten weer als ongunstige factor tegenover. De gaten bevinden zich wel hoger op het talud, boven de waterlijn onder dagelijkse omstandigheden, maar de erosie langs de graafpijp zal gemakkelijk voortzetten (samenhangend met de neiging om in goed graafbare omstandigheden te graven) en het meegevoerde sediment zal door de hogere positie niet snel tot een blokkade leiden. Vandaar dezelfde bandbreedte als bij bevergraverijen: 1 – 100 000.

Aan de waterzijde geldt dat de gaten bij verhoogde waterstand op een gegeven moment rond de waterlijn zullen liggen en dan extra gevoelig zullen zijn voor erosie door golven en door in- en uitstromend water ten gevolge van golven. Dit komt aanvullend bij de argumentatie die al voor bevergraverijen is gegeven, de bandbreedte wordt daarom geschat op 1 – 1000.

Bij een dassenburcht aan weerszijden van de dijk is enige invloed op de overstromingskans onvermijdelijk, vandaar een minimum van een factor 3. Wanneer er sprake is van een omvangrijke burcht, met onderling verbonden graafpijpen aan weerszijden van de waterkering, dan zal de overstromingskans zeer sterk toenemen, vergelijkbaar met de situatie bij bevergraverijen. De bandbreedte wordt daarom gesteld op 3 – 1 000 000.

A.2.3.5. Piping

Met name bij relatief hooggelegen dekklagen in het bovenrivierengebied blijken dassen door de deklaag heen te graven, tot in de pipinggevoelige zandlaag. Eventueel gebeurt dit alleen in droge perioden, maar dit zal dan onderin de dassenburcht gebeuren. Vanwege de strenge wet- en regelgeving zal dit niet eenvoudig detecteerbaar zijn voorafgaand aan een hoogwater.

Aan de landzijde is verkorting van de kwelweglengte hierdoor een reële mogelijkheid. Hiervoor geldt hetzelfde als voor bevers (zie §A.2.1.5), dus een toename van de overstromingskans tot een factor 10 000. Bij waterzijdige graverijen door dassen is het lastig in te schatten of er alles bij elkaar sprake zal zijn van voldoende indringingsoppervlak van de gangen die tot in de pipinggevoelige zandlaag steken om een merkbaar verschil te maken. Voorzichtigheidshalve wordt ervan uitgegaan dat dit soms wel degelijk mogelijk zal zijn. Dit leidt dan ook tot dezelfde factoren als bij bevergraverijen: 1 – 100 000 voor waterzijdige dassenburchten en 1 – 10 000 000 voor dassenburchten aan beide zijden van de dijk.

Ten tijde van een hoogwater kan uitstromend water uit een dassenburcht die in een dijk gevestigd is, zowel wijzen op stroming door het dijklichaam heen, als op kortsluiting met de pipinggevoelige zandlaag. Afhankelijk van de lokale situatie zal dit meer of minder duidelijk zijn. Opkisten lijkt in beide gevallen een geschikte noodmaatregel te kunnen zijn.

A.2.4. **Beverrat**

Deze deelparagraaf is grotendeels gebaseerd op Van Hemert & Spoorenberg (2006).

De beverrat leeft voornamelijk in moerassige gebieden en ook langs traagstromende rivieren, estuaria en langs de kustlijn. Ze hebben een voorkeur voor stilstaande wateren met dichte begroeiing. Als hol graaft hij een gang in een steile rivieroever of dijk, met een toegang bóven de waterlijn. De aanwezigheid is daardoor gemakkelijker te detecteren en de dijk is daardoor tijdig te herstellen. Beverratten graven op of boven het waterniveau één of meer pijpen, met een diameter van 0,2 tot 0,7 m, met ingangen op verschillende hoogten bij wisselende waterstanden. Het aantal ingangen kan variëren van een tot tien. Deze gaan ondergronds naar een drooggelegen nestkom (2 tot 10 m vanaf de ingang), vanwaar soms gangen naar het maaiveld lopen. Bij hoogwater bouwen beverratten takkenplatforms in struikvormige wilgen.

De kop-romplengte van volwassen dieren bedraagt 35 tot 65 cm en het gewicht van de dieren is tussen de 4 en 9 kg.¹²

Beverratten vallen in Nederland onder de plaagdieren, net als muskusratten. Sinds begin deze eeuw worden ze ook structureel bestreden (daarvoor alleen incidenteel), doorgaans door de muskusrattenbeheerorganisatie.

Van Hemert & Spoorenberg (2006:23-24) noemen een voorbeeld uit 2003 waarbij in de primaire waterkering langs de Ooijpolder forse schade door beverratten is geconstateerd, in voormalige holen van muskusratten. Langs de oeverlijn zijn over een lengte van 30 m diverse holen aangetroffen. Het gangenstelsel liep gemiddeld tot 7 m door in het dijklichaam. De

¹² <https://nl.wikipedia.org/wiki/Beverrat>

afdekkende kleilaag van 1 à 1,5 m dikte was geheel doorgraven, waardoor het gangenstelsel zich ook in het (kleiachtige) kernmateriaal van het dijklichaam bevond.

- A.2.4.1. Invloed op de beschouwde faalmechanismen
In navolging van Van Hemert & Spoorenberg (2006) wordt aan graverijen van beverratten in grote lijnen dezelfde impact toegeschreven als aan graverijen van muskusratten, óók ten aanzien van erosie van de bekledingslaag. Op pagina 38 van Van Hemert & Spoorenberg (2006) wordt dit gemotiveerd door te wijzen op de lagere graafintensiteit (aantal gangen per m²) van graverijen door beverratten, waarna dit consequent in alle tabellen terug te zien is. Echter, voorafgaand aan een foto van graafwerk van een beverrat op pagina 48 wordt in de tekst juist betoogd dat de graverijen van beide diersoorten tot erosie van het waterzijdig talud kan leiden. Daarom wordt in deze rapportage op het punt van de potentiële invloed van de graverijen uiteindelijk geen verschil gemaakt tussen beide diersoorten. De kans dat beverratgraverijen niet tijdig worden opgemerkt én de dijk niet tijdig hersteld wordt is overigens wel wezenlijk kleiner dan bij muskusratgraverijen, vanwege de gunstiger ligging van de toegang: boven de waterlijn.

A.2.5 Mol

Mollen zijn wijdverspreide plaagdieren en komen overal in Nederland voor, behalve op de Waddeneilanden. De kop-romplengte varieert van 11 tot 16 cm, het gewicht tussen 65 en 140 g. De mol leeft meestal solitair, maar in territoria die elkaar kunnen overlappen. De mol graaft zowel oppervlakkige gangen als dieper gelegen gangen, tot op een diepte van circa 120 cm. De gangen hebben een diameter van rond de 5 cm en kunnen tot 200 m lang zijn.¹³

In dijken graven mollen meestal een gang van kruin tot teensloot, met zijvertakkingen en meerdere toegangen tot aan het oppervlak. Soms graven ze ook door tot aan de teen aan de andere zijde van de dijk (Tsimopoulou & Koelewijn, 2022).

- A.2.5.1. Afschuiven landzijde dijk
Een mollenlang, inclusief zijvertakkingen, aan de landzijde van een dijk zal eventueel de drainage van de dijk wat verbeteren. Daardoor neemt de overstromingskans ten gevolge van dit faalmechanisme eventueel licht af. De bandbreedte wordt geschat op 0.1 – 1.

Een mollenlang aan de waterzijde van een dijk zal de infiltratie van water in de dijk onder hoogwateromstandigheden bevorderen. De invloed zal meestal vrij klein zijn, ook ten opzichte van de invloed van bodemstructurering (zie ook §A.2 vóór §A.2.1), maar met name bij mollenlangen die tot aan de zandkern reiken in het geval van een dijk met een zandkern met een kleibekleding kan de invloed merkbaar zijn en zou de overstromingskans met een factor 10 kunnen toenemen (bandbreedte: 1 – 10).

Bij mollenlangen aan beide zijden van een dijk zullen beide effecten elkaar ten dele teniet doen, de bandbreedte wordt geschat op 1 – 3.

- A.2.5.2. Afdrukken bekleding
Voor het afdrukken van de bekleding geldt dat mollenlangen die niet tot in een zandscheg of zandkern reiken, de invloed min of meer verwaarloosbaar zal zijn. Indien er wel sprake is van een mollenlang die in verbinding staat met het zand, dan zal een mollenlang aan de landzijde gunstig uitpakken, mogelijk zelfs een wel significante invloed hebben (bandbreedte 0.01 – 1). Mollenlangen aan de waterzijde zullen praktisch geen impact hebben op dit faalmechanisme, de infiltratie van water via de mollenlang(en) zou dan namelijk tot afdrukken van de bekledingslaag aan de binnenzijde moeten leiden. De bandbreedte is ingeschat op 1 – 3. Wanneer er aan de beide zijden mollenlangen zijn, dan kan de invloed

¹³ [https://nl.wikipedia.org/wiki/Mol_\(dier\)](https://nl.wikipedia.org/wiki/Mol_(dier))

van één zijde toch betrekkelijk klein zijn (bijvoorbeeld aan de waterzijde wel tot in de zandkern, maar aan de landzijde niet). De bandbreedte wordt daarom geschat op 0.01 – 3.

A.2.5.3. Erosie van bekleding

Bij enkele tientallen overloop- en golfoverslagproeven in Nederland en Vlaanderen is gebleken dat beschadiging of zelfs falen van de grasbekleding daarbij relatief vaak optrad in combinatie met de aanwezigheid van mollengangen. Voor de golfoverslagproeven tot en met de winter van 2020/2021 is dit gerapporteerd door Van Dijk (2021). Voor de overloopproeven in de winter van 2020/2021 in de voormalige Prosperpolder in België is dit in detail terug te vinden in Koelewijn (2021) en voor alle 27 overloopproeven in die polder en de aangrenzende Hedwigepolder in Nederland is dit op hoofdlijnen te vinden in Koelewijn et al. (2022) en Depreiter et al. (2022). In het kort: zonder mollengangen treedt bezwijken na 12 tot ruim 30 uur beproeven niet op, tenzij er andere anomalieën aanwezig zijn (zoals de overgang naar een harde bekleding of een vossenhol), terwijl er met mollengangen soms al na een uur falen is opgetreden en in ruim de helft van de gevallen binnen 14 uur.

Bij enkele proeven in de Hedwige- en Prosperpolders is het gehele proces van schade van nabij gevolgd door visuele waarnemingen (deels vastgelegd met foto's). Dit betrof drie proeven met mollengangen (waarvan twee met een boom in de binnenteen van de dijk) en twee proeven met een vossen- en konijnenhol. Soms had daarbij het proces van erosie van de kleibekleding de overhand, soms het proces van uitspoeling van zand uit de zandkern van de dijk door een gat in de bekleding, vaak wisselden deze processen elkaar in de bezwijkfase af. Daarnaast is bij meerdere proeven (ook bij andere proeven in de Hedwige- Prosperpolders, en bij golfoverslagproeven op andere locaties) geprobeerd om het proces van falen te bespoedigen door de grasbekleding met spades te beschadigen door er een ondiep gat in aan te brengen, of lokaal de kleibekleding zelfs geheel te verwijderen, of door met een grondboor meerdere, onderling verbonden, gaten in de bekleding aan te brengen. Dit had in de meeste gevallen geen of amper een merkbaar effect, in enkele gevallen was het effect wel merkbaar maar waren aanwezige natuurlijke graverijen (door dieren) dominant voor het bezwijkproces.

Wat de hoeveelheid mollen(gangen) betreft, geldt dat bij de overloop- en overslagproeven één enkele mollengang al van bepalende invloed kon zijn. De proeven kenden echter ook een beperkte breedte, doorgaans 2 tot 4 meter. Daardoor is het ook weer goed voorstelbaar dat er ook maar een beperkt aantal mollengangen in de proefstrook aanwezig was. In dit verband wordt gewezen op een ervaring bij het waterzijdig talud van de dijk net ten westen van Noordschans, langs het Hollands Diep. Daar zijn in 2022 over een afstand van 150 m in totaal 150 mollen verwijderd (en in een natuurgebied verderop weer uitgezet): een dichtheid van 1 mol per strekkende meter dijk (Van den Berg & Koelewijn, 2022).

Op basis van deze waarnemingen wordt de toename van de overstromingskans bij de aanwezigheid van mollengangen aan de landzijde van een dijk geschat op een factor 1 – 100; wat kleiner dan bij vossen- en konijnenholen en ook dassenburchten, maar duidelijk groter dan bij holen van woelratten en muizen.

Voor mollengangen aan de waterzijde is de inschatting dat de invloed uiteindelijk hetzelfde is (hoewel het faalproces wel anders verloopt dan aan de landzijde): een bandbreedte van 1 – 100.

Voor mollengangen aan beide zijden van de dijk wordt een wat verhoogde factor verwacht, maar geen vermenigvuldiging van beide waarden: een bandbreedte van 1 – 1000.

A.2.5.4. Uitspoeling door een gat in de bekleding
De waarnemingen die ten grondslag liggen voor de schattingen van de invloed van mollen op dit faalmechanisme zijn beschreven in §A.2.5.3. Voor mollen aan de landzijde wordt de invloed op basis van de waarnemingen groter geschat als voor erosie van de bekleding, namelijk een factor 1 – 1000. Voor mollen aan de waterzijde wordt de bandbreedte ingeschat op 1 – 100 en voor de situatie met mollen aan beide zijden op 1 – 10 000.

A.2.5.5. Piping
Het is uiterst onwaarschijnlijk dat een mollen gang de kwelweglengte zal bekorten. Mollen maken volgens Abel de Boer van Wetterskip Fryslân graag ondergronds verbinding met een teensloot om aan water te komen (De Boer, 2021), maar dit zal niet (of nauwelijks) leiden tot verkorting van de kwelweglengte, aangezien de mol minder diep zal graven dan de slootbodem. Daarom zal graverij door een mol op dit faalmechanisme de overstromingskans ook niet beïnvloeden.

A.2.6 Vos en konijn

Vossen hebben een schouderhoogte van 35 tot 40 cm en een kop-romplengte van 50 tot 80 cm, bij een gewicht van 6 tot 15 kg. Ze jagen meestal 's nachts en in de schemering, in rustige gebieden soms ook overdag. Jagen doen ze meestal alleen, terwijl ze meestal in groepen van zo'n zes dieren leven. Ze leven in een hol, dat het zelf gegraven heeft, of overgenomen van een konijn of een das. De toegangspijp heeft een diameter van zo'n 20 cm. Het hol zelf is groter en heeft tot vier toegangspijpen.¹⁴

Het Europees konijn heeft een kop-romplengte van 35 tot 50 cm en weegt 1 tot 2,5 kg. Konijnen leven in (grote) groepen in hollen met een uitgebreid gangenstelsel, die meestal wordt aangelegd in een heuvel of een andere helling, zoals een duin.¹⁵ Dijken met een zandkern en een lage freatische lijn blijken ook geschikt te zijn (Tsimopoulou & Koelewijn, 2022).

Zowel vossen als konijnen hebben geen speciale voorliefde voor het graven van hollen in dijken, dit lijkt meer toevallig plaats te vinden.

A.2.6.1. Afschuiven landzijde dijk
Vossen- en konijnenburchten zijn vaak te vinden in de buurt van de kruin van de dijk zullen waarschijnlijk geen impact hebben op de binnenwaartse macrostabiliteit. Lagergelegen vossen- en konijnenholen komen in de onderste helft van het landzijdig dijktaalud wel voor (een voorbeeld is gegeven in Tsimopoulou & Koelewijn (2022)). Deze kunnen wel een merkbare invloed hebben op de drainage van de dijk, waardoor de overstromingskans ten gevolge van binnenwaartse macrostabiliteit wat afneemt. De bandbreedte wordt ingeschat op 0.1 – 1.

De inschatting is dat dergelijke hollen aan de waterzijde, op de onderste helft van het taalud, niet of nauwelijks voorkomen. Bovendien zullen deze dan geen wezenlijke impact hebben op de binnenwaartse macrostabiliteit. Voor graverijen aan beide zijden geldt dan alleen de invloed van de landzijdige laaggelegen graverijen: 0.1 – 1.

A.2.6.2. Afdrukken bekleding
Voor het afdrukken van de bekledingslaag spelen zowel betere drainage als betere infiltratie een rol. De betere drainage is gunstig, in de zin dat de overstromingskans hierdoor afneemt, maar de betere infiltratie is juist weer ongunstig en leidt tot een hogere overstromingskans.

¹⁴ [https://nl.wikipedia.org/wiki/Vos_\(dier\)](https://nl.wikipedia.org/wiki/Vos_(dier))

¹⁵ https://nl.wikipedia.org/wiki/Europees_konijn

Vossen- en konijnenholen zitten aan de waterzijde doorgaans wat hoger op het talud, zodat infiltratie pas bij relatief hoge waterstanden hierlangs plaatsvindt. Aan de landzijde kunnen deze holen over de hele hoogte van het talud voorkomen, maar alleen de lageregelegen holen dragen natuurlijk bij aan de drainage, terwijl de hogeregelegen holen bij overslaand of overlopend water tot sterke infiltratie kunnen leiden.

Voor landzijdige graverijen wordt de bandbreedte van de invloed op de overstromingskans ingeschat op 0.001 – 10. Voor graverijen aan de waterzijde is de invloed naar schatting 1 – 30. Bij graverijen aan beide zijden maakt de hoogteligging zeer veel uit of er sprake is van versterking of nivellering. De bandbreedte wordt geschat op 0.001 – 100.

A.2.6.3. Erosie van bekleding

De waarnemingen bij het herhaaldelijk opengegraven hol in de Scheldedijk van de voormalige Hedwigepolder (waarin zowel vossen als konijnen zijn gezien) lieten zien dat een bekledingslaag in zo'n situatie gemakkelijk erodeert bij overlopend water – en waarschijnlijk eveneens bij overslaand water (Depreiter et al., 2022; Koelewijn, 2021; Tsimopoulou & Koelewijn, 2022).

Enige schade en daardoor versnelling van een overstroming wordt onvermijdelijk geacht, daarom is de ondergrens bij een graverij aan de landzijde op een factor 3 gesteld. Doorgaande schade vanuit dit initiële mechanisme zal grotendeels moeten ontstaan bij de hoogste waterstandsniveaus, hetgeen de bovengrens beperkt, tot pakweg een factor 1000.

Bij graverijen aan de waterzijde zal falen van de waterkering als geheel wat moeilijker kunnen ontstaan door dit mechanisme, daarom wordt hiervoor de bandbreedte ingeschat op 1 – 100.

Bij graverijen aan beide zijden zal de landzijde hiervoor een dominante invloed hebben, al zal de graverij aan de waterzijde wel een wat versnellende werking hebben. De bandbreedte hiervoor wordt daarom geschat op 3 – 10 000.

A.2.6.4. Uitspoeling door een gat in de bekleding

Voor uitspoeling door een gat in de bekleding geldt dat het gat betrekkelijk laag op het talud moet liggen: de freatische lijn in het dijklichaam moet immers minstens zo hoog liggen als dit gat. Verder geldt hiervoor naar verwachting hetzelfde als voor graverijen door beverratten (zie §A.2.4.1, en daarmee hetzelfde als bij muskusratten, zie §A.2.2.4).

A.2.6.5. Piping

Het is hoogst onwaarschijnlijk dat graverijen door vossen en konijnen nabij dijken door de deklaag heen tot in een pipinggevoelige zandlaag zullen reiken. De invloed op de overstromingskans gerelateerd aan piping wordt dan ook vrijwel nihil geacht.

Overigens is de kans op tijdige detectie en herstel groot, mocht een dergelijke graverij toch plaatsvinden.

A.2.7 **Woelrat en muis**

De woelrat of watterrat is een knaagdier dat voornamelijk in de buurt van water leeft. Een volwassen woelrat is 12 – 23 cm lang en weegt 60 tot 300 g. Woelratten wonen normaal gesproken langs een rivieroever.¹⁶

Veldmuizen, die door niet-kenners net als andere muizensoorten wel met kleinere rattensoorten als de woelrat worden verward, zijn 9 – 13 cm lang en wegen 25 – 30 g. Een veldmuis woont meestal in een nest, dat op een diepte van ongeveer 50 cm kan liggen in een

¹⁶ <https://nl.wikipedia.org/wiki/Woelrat>

zelfgegraven gangenstelsel. Vanuit het nest lopen lange gangen met meerdere uitgangen naar de oppervlakte, sommige gangen wel zes meter lang. Ook zijn er één of meerdere kamers in het gangenstelsel te vinden, waarin voedsel wordt opgeslagen. Veldmuizen leven gewoonlijk alleen, 's zomers wel in paartjes, en soms in kolonieverband, met name 's winters.¹⁷

In de Scheldedijk van zowel de Hedwige- als de Prosperpolder zijn vele hollen aangetroffen van deze dieren. Op twee van de drie plaatsen waar in 2021 met behulp van groutinjectie gevolgd door ontgraven na verhard nader onderzoek is uitgevoerd, is een geconcentreerde burcht met meerdere nestkamers aangetroffen tot op een diepte van 50 – 80 cm (Holscher & Zomer, 2021).

De invloed van een enkel muizenhol zal verwaarloosbaar zijn. Grote aantallen muizen- en/of rattenholen zullen echter wél invloed kunnen hebben, met name als de hiervoor genoemde burchten gangbaar blijken te zijn, en ook ten tijde van een plaag zoals die zo nu en dan voor kan komen.¹⁸ De schade aan de grasmat kan dan groot zijn, zie Figuur bijlage A.34.



Figuur bijlage A.34 Gevolgen van een muizenplaag (Van Dam, 2024:12).

- A.2.7.1. Afschuiven landzijde dijk
De invloed van deze diersoorten wordt ingeschat als klein en hangt vooral samen met toegenomen drainage, met name bij de genoemde diepere burchten. Voor graverijen aan de landzijde wordt de invloed op de overstromingskans daarom ingeschat op 0.3 – 1. Voor graverijen aan de waterzijde zal zelfs de invloed van enkele diepere burchten op dit faalmechanisme verwaarloosbaar zijn (immers, dit vereist een verhoogd freatisch vlak over enkele tientallen meters). Voor graverijen aan beide zijden is de invloed hetzelfde als voor alleen graverijen aan de landzijde: 0.3 – 1.
- A.2.7.2. Afdrukken bekleding
Voor het afdrukken van de kleilaag geldt eveneens dat infiltratie en drainage hiervoor bepalend zijn en worden bovendien dezelfde getalswaarden ingeschat, dus een bandbreedte van 0.3 – 1 voor landzijdige graverijen, geen merkbare invloed voor waterzijdige graverijen en 0.3 – 1 voor graverijen aan beide zijden.
- A.2.7.3. Erosie van bekleding
Voor erosie van de bekledingslaag geldt op basis van waarnemingen bij overloop- en golfoverslagproeven dat er zelden enige erosie bij dergelijke kleine hollen is waargenomen (terwijl er in elk geval bij veel van de proeven in de voormalige Hedwige- en Prosperpolders

¹⁷ <https://nl.wikipedia.org/wiki/Veldmuis>

¹⁸ <https://nos.nl/artikel/2003804-muizenplaag-kost-friese-boeren-miljoenen>

wel uitdrukkelijk naar gekeken is). De bandbreedte van de invloed op de overstromingskans wordt daarom ongeacht de locatie in het dijkprofiel ingeschat op 1 – 3.

A.2.7.4. Uitspoeling door een gat in de bekleding
Voor uitspoeling door een gat in de bekleding geldt dat ook deze kleine hopen hieraan kunnen bijdragen wanneer deze door een kleibekleding heen contact maken met de zandige kern van de dijk (mits aanwezig). Hiervoor maakt de locatie in het dijkprofiel wel uit. Voor landzijdige hopen wordt de bandbreedte ingeschat op een factor 1 – 10, voor waterzijdige hopen op een factor 1 – 3 en voor hopen aan beide zijden op een factor 1 – 30.

A.2.7.5. Piping
De genoemde diepere burchten zullen niet door de deklaag heen steken (tenzij deze al te dun is om überhaupt nog weerstand te bieden tegen opbarsten), daarom is de invloed van deze dierlijke graverijen op het faalmechanisme piping nihil.

A.2.8 Combinatie van meerdere diersoorten

Bij de combinatie van graverijen door meerdere diersoorten mag de situatie uit Figuur bijlage A.31 als een schrikbeeld gelden. In de meeste gevallen zal de invloed van aanvullende graverijen door een diersoort met geringere impact waarschijnlijk beperkt zijn en is vergroting van de bandbreedte met een factor 10 naar verwachting al aan de conservatieve kant.

In concrete gevallen zouden de effecten wellicht groter kunnen zijn. Beschrijving van dergelijke praktijksituaties worden door de auteurs verwelkomd om op dit punt een betere inschatting te kunnen bieden.

A.3 Kleidijk

Voor de impact van dierlijke graverijen op kleidijken is in Van den Berg & Koelewijn (2023) een eerste inschatting gegeven. Algemeen geldt dat als een dijk geheel uit klei is opgebouwd, het effect van een graverij door de bekleding heen tot aan de kern aanzienlijk kleiner is dan bij een dijk met een zandkern en een kleibekleding. Nog steeds wordt het grootste effect op de waterveiligheid verwacht van de veranderingen in de (tijdsafhankelijke) waterdrukverdeling, maar dit effect zal een stuk kleiner zijn.

Voornamelijk vanuit het buitenland zijn er wel situaties bekend waarbij dierlijke graverijen bij een kleidijk tot ernstige schade of zelfs een dijkdoorbraak hebben geleid. Hierna wordt eerst ingegaan op deze cases, daarna worden enkele karakteristieke overeenkomsten en verschillen per faalmechanisme besproken.

A.3.1 Cases

Er is een viertal buitenlandse cases waar dierlijke graverijen naar alle waarschijnlijkheid een belangrijke rol speelden bij een (bijna-)doorbraak.

Pischieri Lake Dam

Deze case is al beschreven in §A.2.1. Dit betrof een 'homogene aarden dam', gelet op de beheersbaarheid van het erosieproces was deze waarschijnlijk relatief kleilig.

Water's Edge Dam

Ook deze case is beschreven door Bayoumi & Meguid (2011). Dit betreft een 6,9 m hoge dam ten noorden van Cincinnati in Ohio (VS), met een reservoirvolume van $112 \times 10^3 \text{ m}^3$. Op 26 november 1992, tijdens Thanksgiving, kwam een melding binnen dat het reservoirpeil erg hoog was en er een draaikolk zichtbaar was aan de waterzijde. Bij inspectie bleek dat er water in een graafpijp in het waterzijdig talud stroomde. Vervolgens stroomde het bijna horizontaal door de dijk, naar een hol nabij het landzijdig talud, dicht onder kruinniveau. Daarvandaan stroomde het water naar een ander hol toe, vanwaar het nabij de teen

uitstroomde. Het hooggelegen hol in het landzijdig talud is vervolgens opgevuld met stobalen, waardoor de stroming verminderde, evenals de erosie. Het reservoirpeil is verlaagd tot onder het niveau van de graafpijp in het waterzijdig talud en een doorbraak is uitgebleven.

Foenna dijk, nabij Sinalunga

De doorbraak van de dijk langs de Foenna nabij Sinalunga (Italië) op Nieuwjaarsdag 2006 is beschreven door Bayoumi & Meguid (2011) en nader geanalyseerd door Camici et al. (2017).

In het voorafgaande jaar meldden omwonenden de aanwezigheid van graverijen in de dijk. Daarop is onderhoud gepleegd, inclusief het verwijderen van de zichtbare graverijen. Op 1 januari 2006, tijdens een niet-uitzonderlijke hoogwatersituatie, stroomde water een graafpijp op het waterzijdig talud in en brak de dijk door, zoals weergegeven in Figuur bijlage A.35. Uit het onderzoek achteraf is vastgesteld dat het om graverijen door stekelvarkens ging.



Figuur bijlage A.35 Faalproces van de dijk langs de Foenna. a) graafpijp aan de waterzijde waarin water wegstroomt, b) door gravende dieren verwijderde grond aan de landzijde, c) uitstroom van kwelwater uit het landzijdig talud, d) begin van verzakking van de kruin, e) en f) ontwikkeling van de bres (Camici et al., 2017).

Panaro nabij Castelfranco Emilia (Italië)

Van de dijk langs de Panaro bij Castelfranco Emilia zijn twee verschillende cases beschreven, één in januari 2014 waarbij tijdig reparatie heeft plaatsgevonden (Orlandini et al., 2015) en één in december 2020, bij een lagere waterstand dan in 2014, waarbij falen is opgetreden (Ceccato & Simonini, 2023). Overigens betrof dit verschillende dijkvakken.

In 2014 werd uitstromend water in het landzijdige talud geconstateerd, zie Figuur bijlage A.36. Hierop is tijdig actie ondernomen. Dit betrof een hol van een stekelvarken.



Figuur bijlage A.36 Dijk langs de Panaro nabij Castelfranco Emilia, vanaf de landzijde, met detail van de uitstroming van water. Let ook op de zichtbaar hoge rivierwaterstand aan de andere kant van de dijk (Orlandini et al., 2015).

De analyse van Ceccato & Simonini (2023) concludeert dat er waarschijnlijk sprake was van een graverij vanaf de waterzijde voorbij het midden van de dijk, waarbij vermoed wordt dat de toestroming en infiltratie van water leidde tot macrostabiliteit aan de landzijde, waarna erosie door stroming via de vervolgens ontstane verbinding via de graafgang snel leidde tot bezwijken, zie ook Figuur bijlage A.37. De diersoort was hier niet bekend.



Figuur bijlage A.37 Doorbraak langs de Panaro, 6 december 2020 om 8:40 (Ceccato & Simonini, 2023).

A.3.2 Binnenwaartse macrostabiliteit

De gravers van grotere gangenstelsel, met name vanaf de waterzijde, hebben nog steeds een ongunstige invloed op de overstromingskans, zoals ook uit de hiervoor aangehaalde cases blijkt. Anderzijds hebben graverijen aan de landzijde door drainage nog wel een gunstige invloed.

A.3.3 Afdrukken bekleding

Hoewel een kleidijk (grotendeels) uit klei bestaat, wordt er in de richtlijnen en handreikingen wel onderscheid gemaakt tussen de kern van de dijk en de bekleding, onder andere ten aanzien van de eisen bij aanleg. Bij dit faalmechanisme gaat het om het afdrukken van de bekledingslaag door waterdruk van binnenuit (zie ook §A.2.1.2), in dit geval niet zozeer vanuit een goed doorlatende zandkern, maar vanuit een achterliggend hol.

A.3.4 Erosie bekledingslaag

Bij dit faalmechanisme gaat het nog steeds primair om erosie vanaf het oppervlak. Hierbij maakt het voor de impact op de overstromingskans veel uit dat de dijk kern uit klei bestaat in plaats van zand, zodat gaande het proces de erosie (met name de bloksgewijze erosie over de hele hoogte van de bekledingslaag) niet vergemakkelijkt wordt vanuit het zand. Verder is het van wezenlijk belang dat ná verlies van de bekledingslaag de resterende kleikern meer weerstand zal bieden dan een zandkern.

A.3.5 Uitspoeling door een gat in de bekleding

Bij een kleidijk zal de aanvoer van water vanuit de kern aanzienlijk kleiner zijn dan bij een dijk met een zandkern, tenzij er via graafgangen feitelijk een directe verbinding met het buitenwater bestaat. Bij wisselende waterstanden kan er ook gemakkelijker materiaal uitspoelen indien er een groot open volume aan hopen en graafgangen achter het gat aanwezig is.

A.3.6 Piping

De invloed van een aanwezig te achten dierlijke graverij op de overstromingskans door piping verandert niet door de samenstelling van de dijk.

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