

Invloed van dierlijke graverijen op de overstromingskans

Een kwantitatieve inschatting



Invloed van dierlijke graverijen op de overstromingskans

Een kwantitatieve inschatting

Auteur(s)

Andre Koelewijn

Invloed van dierlijke graverijen op de overstromingskans

Een kwantitatieve inschatting

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer R. Stellingwerf
Referenties	KvK-DE12
Trefwoorden	Overstromingskans, graverij, bever, das, mol, vos, konijn, woelrat, muis, erosie, uitspoeling

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	26-05-2023
Projectnummer	11208057-050
Document ID	11208057-050-GEO-0002
Pagina's	49
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	André Koelewijn	

Samenvatting

Graverijen door dieren (muizen, mollen, maar ook bevers en dassen) in dijken worden in de veiligheidsbeoordelingen van dijken nu nog niet vaak meegenomen, vanuit de gedachte dat een goed beheerde dijk geen graverijen kent of dat ze in ieder geval tijdig opgespoord worden en passende maatregelen getroffen worden. In recente jaren is echter gebleken dat lang niet alle graverijen bij inspectie worden opgemerkt, zodat hier ook geen maatregelen tegen getroffen kunnen worden. De grootste gangen worden gegraven door bevers, zie onderstaande foto's.



Bevergraverij – links: uitgegraven beverhol in de dijk bij Wamel (foto: WSRL), rechts: uitzonderlijk grote bever uit de Krimpenerwaard tijdens onderzoek in Naturalis (foto: Peter Franken).

Dit komt onder andere doordat dierlijke graverijen soms pas in de loop van een hoogwater ontstaan, met name terwijl en nadat uiterwaarden met veel natuurwaarden onder water lopen en binnendijs gelegen natuurgebieden vanwege opkomend kwelwater verlaten moeten worden door met name de in holen levende dieren. Het treffen van tegenmaatregelen zoals afdichten van ontstane holtes is rond de piek van een hoogwater echter geen optie. Een voorbeeld hiervan zijn bevergraverijen in het talud aan de rivierzijde van de dijk onder de waterlijn tijdens een hoogwater. Deze kunnen vaak niet eens worden opgemerkt vanwege gebrek aan doorzicht in het water, drijfvuil en stroming.

Voor waterkeringbeheerders roept dit de vraag op, wat de invloed van dergelijke graverijen is op hun kering, onder meer wat betreft de overstromingskans. Gebleken is dat er behoefte bestaat aan enige duiding op dit vlak: is er sprake van een reëel probleem? Zo ja, wanneer treedt dit op en hoe groot zijn de effecten voor de waterveiligheid?

Om aan deze vragen tegemoet te komen, is op basis van veldwaarnemingen, grootschalige proeven, berekeningen en redeneringen van de fysische processen die verwacht mogen worden, een inschatting gemaakt van de bandbreedte van de toename (of afname) van de overstromingskans ten gevolge van een dierlijke graverij die aanwezig is aan de landzijde, de waterzijde of beide zijden van de dijk.

De faalmechanismen die beschouwd zijn, betreffen:

- Binnenwaartse macrostabiliteit.
- Opdrukken van de deklaag.
- Erosie van de deklaag.
- Uitspoeling door een gat in de bekleding.
- Piping (terugschrijdende erosie in de ondergrond).

De volgende diersoorten zijn beschouwd:

- Bevers.
- Dassen.
- Mollen.
- Vossen en konijnen.
- Woelratten en muizen.

Voor iedere combinatie van diersoort, locatie van de graverij en faalmechanisme is een inschatting gemaakt van de bandbreedte waarbinnen de overstromingskans van de dijk kan worden beïnvloed. Dit is vermeld in onderstaande tabel; waarden groter dan 1 betekenen een grotere overstromingskans, dus een verslechtering. Deze inschatting is in de eerste plaats gemaakt voor primaire waterkeringen binnen Nederland, voor regionale waterkeringen en andere dijken kan een vergelijkbare redeneerlijn worden opgesteld.

Dier - graaflocatie	Binnenwaartse macrostabiliteit	Opdrukken deklaag	Erosie deklaag	Uitspoeling door gat in bekleding	Piping (BEP)
Bever					
- landzijde	0.01 – 1	0.000 1 – 1	*	1 – 100 000	1 – 10 000
- waterzijde	1 – 1000	1 – 1000	1 – 100	1 – 100	1 – 100 000
- beide zijden	0.1 – 100	0.001 – 100	1 – 1000	10 – 1 000 000	1 – 10 000 000
Das					
- landzijde	0.01 – 1	0.001 – 1	3 – 1000	1 – 100 000	*
- waterzijde	1 – 10 000	1 – 10 000	3 – 1000	1 – 1000	*
- beide zijden	0.1 – 1000	0.001 – 10 000	3 – 10 000	3 – 10 000 000	*
Mol					
- landzijde	0.1 – 1	0.01 – 1	1 – 100	1 – 1000	*
- waterzijde	1 – 30	1 – 10	1 – 100	1 – 100	*
- beide zijden	1 – 10	0.01 – 10	1 – 1000	1 – 10 000	*
Vos en konijn					
- nabij kruin	0.1 – 3	0.3 – 10	3 – 1000	1 – 100	*
- laag, landzijde	0.01 – 1	0.001 – 1	3 – 1000	1 – 1000	*
- laag, waterzijde	*	*	*	*	*
Woelrat en muis					
- landzijde	0.1 – 1	0.1 – 1	1 – 3	1 – 10	*
- waterzijde	1 – 3	1 – 3	1 – 3	1 – 3	*
- beide zijden	0.1 – 3	0.1 – 3	1 – 3	1 – 30	*

* een dergelijke graverij op deze locatie en/of diepte die invloed heeft op dit faalmechanisme is in het algemeen zeer onwaarschijnlijk

De verschillende kleuren in de tabel hangen samen met de geschatte potentiële impact van de dierlijke graver. Bij alle beschouwde diersoorten geldt dat de graverijen leiden tot een achteruitgang van de veiligheid tegen overstromen. Weliswaar is er voor sommige faalmechanisme soms een gunstige invloed mogelijk (waarde kleiner dan 1), maar daar staat dan een achteruitgang voor andere faalmechanismen tegenover die over het algemeen groter zal zijn.

De wijze van onderbouwing varieert van onderbouwing op basis van zowel waarnemingen als berekeningen, tot alleen op basis van redeneringen. Vaak is er ook vooral vergeleken met andere diersoorten waarvoor wel een getalsmatige onderbouwing beschikbaar was.

De bandbreedte is vaak groot. Dit komt doordat zowel beginnende graverijen in vrij grote kleidijken als uitgebreide graverijen in relatief kleine dijken met een zandkern en een kleibekleding zijn beschouwd. Er is gebruik gemaakt van een nog beperkt aantal concrete cases, vaak voor 'worst case'-situaties, waarbij de bandbreedte naar boven toe mede begrensd is doordat de overstromingskans nooit groter dan 1 kan worden.

Voor de vertaling naar faalkansen is gebruik gemaakt van de kalibratieformules binnen het WBI, dit verklaart de beperking tot alleen primaire waterkeringen binnen Nederland. De systematiek is wel algemeen toepasbaar en komt kort neer op het volgende:

- Welk effect heeft de graverij op de waterremmende lagen, zoals de kleibekleding?
- Wat is de toename van de indringing van buitenwater in de dijk via de graverij, ook beschouwd in de lengterichting van de dijk?
- Wat heeft dit voor effect op het beschouwde mechanisme?

Deze rapportage kan worden gebruikt om in te schatten in hoeverre op specifieke locaties waar dierlijke graverijen in de dijk aanwezig zijn, er ingrepen noodzakelijk zijn om de kans op overstromen acceptabel klein te houden. Volgende stappen die gezet kunnen worden, zijn de combinatie met het veiligheidsraamwerk dierlijke graverijen waarin ook gekeken wordt naar de kans van voorkomen van verschillende graverijen mede op basis van het gedrag van de betreffende dieren, en koppeling aan een handelingsperspectief waarbij beheermaatregelen, noodmaatregelen en versterkingsmaatregelen allemaal tot de mogelijkheden kunnen behoren.

Voor niet beschouwde diersoorten zal een schatting kunnen worden gemaakt op basis van de mate van overeenstemming met de beschouwde diersoorten.

De grote bandbreedte in de tabel zal kunnen worden verkleind door een uitsplitsing te maken naar type dijkopbouw (zand- of kleikern), formaat van de kering en/of de te verwachten hoogwaterduur. In de komende jaren kan de onderbouwing verder worden verbeterd op basis van aanvullende praktijkwaarnemingen en verbeterde analyses.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	9
1.1	Aanleiding	9
1.2	Context en probleemstelling	9
1.3	Doel	10
1.4	Aanpak	10
1.5	Leeswijzer	11
2	Invloed dierlijke graverijen op overstromingskans	12
2.1	Selectie van faalmechanismen	12
2.1.1	Binnenwaartse macrostabiliteit	12
2.1.2	Opdrukken deklaag	13
2.1.3	Erosie deklaag	13
2.1.4	Uitspoeling door een gat in de bekleding	14
2.1.5	Piping	15
2.1.6	Andere mechanismen	16
2.2	Selectie van diersoorten	17
2.3	Tabel met invloed van dierlijke graverijen op de overstromingskans	18
2.4	Onderbouwing	19
2.4.1	Algemene aanpak	19
2.4.2	Bever	21
2.4.2.1	Kenmerken	21
2.4.2.2	Binnenwaartse macrostabiliteit	22
2.4.2.3	Opdrukken deklaag	27
2.4.2.4	Erosie deklaag	27
2.4.2.5	Uitspoeling door gat in bekleding	28
2.4.2.6	Piping (backward erosion piping)	32
2.4.3	Das	33
2.4.3.1	Kenmerken	33
2.4.3.2	Binnenwaartse macrostabiliteit	35
2.4.3.3	Opdrukken deklaag	36
2.4.3.4	Erosie deklaag	36
2.4.3.5	Uitspoeling door gat in bekleding	37
2.4.3.6	Piping (backward erosion piping)	37
2.4.4	Mol	37
2.4.4.1	Kenmerken	37
2.4.4.2	Binnenwaartse macrostabiliteit	38
2.4.4.3	Opdrukken deklaag	38
2.4.4.4	Erosie deklaag	38
2.4.4.5	Uitspoeling door gat in bekleding	39
2.4.4.6	Piping (backward erosion piping)	39
2.4.5	Vos en konijn	39
2.4.5.1	Kenmerken	39
2.4.5.2	Binnenwaartse macrostabiliteit	40

2.4.5.3	Opdrukken deklaag	40
2.4.5.4	Erosie deklaag	40
2.4.5.5	Uitspoeling door gat in bekleding	41
2.4.5.6	Piping (backward erosion piping)	41
2.4.6	Woelrat en muis	41
2.4.6.1	Kenmerken	41
2.4.6.2	Binnenwaartse macrostabiliteit	42
2.4.6.3	Opdrukken deklaag	42
2.4.6.4	Erosie deklaag	42
2.4.6.5	Uitspoeling door gat in bekleding	42
2.4.6.6	Piping (backward erosion piping)	42
3	Conclusies en aanbevelingen	43
3.1	Conclusies	43
3.2	Aanbevelingen	44
	Referenties	46

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In de afgelopen jaren is er in toenemende mate aandacht voor dierlijke graverijen in dijklichamen. Om enkele voorbeelden te noemen: dit najaar haalde de afschot van bevers bij een wiel bij Wamel het landelijke nieuws¹, bij het hoogwater van juli 2021 werd te elfder ure ter plaatse van een dassenburcht langs de Maas bij Linden een noodberm aangelegd² (Popelier & Dijkstra, 2021:6-8) en tussendoor werd de spoorlijn Zwolle – Groningen meerdere keren tijdelijk gesloten vanwege een bevergraverijen in de spoordijk bij Taarlo en De Punt³.

Voor waterkeringbeheerders roept dit de vraag op, wat de invloed van dergelijke graverijen is op hun kering, onder meer wat betreft de overstromingskans. Gebleken is dat er behoefte bestaat aan enige duiding op dit vlak: is er sprake van een reëel probleem? Zo ja, wanneer treedt dit op en hoe groot zijn de effecten voor de waterveiligheid?

1.2 Context en probleemstelling

Sinds de invoering van het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium, begin 2017, wordt er naar gestreefd om de overstromingskans van een dijktraject kleiner te laten zijn dan de daarvoor vastgestelde norm (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016a). Bij de beoordeling volgens de daarvoor aanbevolen en beschikbaar gestelde methoden wordt in de schematisering doorgaans uitgegaan van een goed aangelegde en onderhouden dijk, zonder afwijkingen of beschadigingen. Aspecten als schade veroorzaakt door graverijen worden vanuit het kader van de zorgplicht geacht tijdig door de beheerder te worden opgelost (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2015).

Met de invoering van de Omgevingsregeling, vanaf 2023, zal de beoordeling van de primaire waterkeringen onder de Omgevingswet komen te vallen. Daarin worden graverijen genoemd als een indirect mechanisme, dat leidt tot verzwakkende omstandigheden en de kans vergroot dat een of meer faalmechanismen tot een overstroming leiden. Wanneer een indirect mechanisme de overstromings- of faalkans kan beïnvloeden, dan wordt dit met scenario's voor het optreden ervan in rekening gebracht. De kans van een scenario wordt bepaald door de kans van optreden van het indirecte mechanisme en de kans dat schade wordt waargenomen en op tijd wordt hersteld (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2022:12-13).

Eerder is een studie verschenen naar de mogelijke invloed van graverijen door muskusratten en beverratten op de veiligheid van waterkeringen (Van Hemert & Spoorenberg, 2006). Uitgaande van de toenmalige overschrijdingskansbenadering wordt in deze rapportage een negatieve invloed tot aan een factor 10 ingeschat. Deze diersoorten worden tegenwoordig intensief bestreden en hebben daardoor tegenwoordig minder impact dan voorheen.

Een structureel probleem bij dierlijke graverijen in dijken is dat dijkinspecteurs tijdens een dijkinspectie niet alle graverijen waarnemen. Een optimistische bovengrens is dat 90% van de aanwezige graverijen wordt waargenomen (Klerk, 2022). In het geval van de bever kan de detectie afnemen tot een optimistische waarde van vijftig procent. Dit komt vooral doordat de

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

² <https://www.aanenmaas.nl/actueel/nieuws/2021/juli/dassenhol-linden-gedicht/>

³ <https://www.rtvdrenthe.nl/nieuws/15007007/bever-voelt-zich-thuis-in-noordoost-drenthe-en-dat-merkt-hunze-en-aas-in-de-portemonnee>

bever de ingang van zijn hol onder de waterlijn graaft en geen graverijen boven water in het talud zichtbaar zijn (Van den Berg, 2022a). Onontdekte graverijen vormen daarmee een groot risico, hetgeen een goede reden kan vormen om meer in te zetten op de detectie ervan.

Een ander probleem is dat een deel van de dierlijke graverijen pas bij opkomend hoogwater optreedt, namelijk wanneer gravende dieren overstromende uiterwaarden en eventueel ook binnendijkse gebieden met veel kwel ontvluchten, waarbij ze soms hun toevlucht zullen nemen tot de dijk (Evers & Cornelisse, 2021). Daardoor vormen graverijen ook een risico bij dijken waar bij aanvang van het hoogwater nog geen enkele graverij in aanwezig is.

1.3 Doel

Het doel van deze rapportage is te komen tot een tabel met een bandbreedte van de mogelijke invloed van graverijen van verscheidene diersoorten op de overstromingskans van een dijk, die zo goed mogelijk onderbouwd is met beschikbare kennis op dit vlak.

Deze rapportage is dan bruikbaar om in te schatten in hoeverre op specifieke locaties met dierlijke graverijen in de dijk er ingrepen noodzakelijk zijn om de kans op overstromen acceptabel klein te houden. Het betreft een bijdrage aan het Veiligheidsraamwerk Dierlijke Graverijen (Van den Berg, 2022b) en draagt ook bij aan de invulling van het Raamwerk Dijkerosie (Van Damme & Hardeman, 2022) en het Raamwerk voor Analyse Overstromingskans Geotechnische Instabiliteit van Dijken (Blinde et al., 2022). De variatie van diersoorten is mede zo gekozen dat ook voor andere, niet specifiek genoemde diersoorten er ook een inschatting van de invloed van hun graafactiviteiten op de overstromingskans zal kunnen worden gemaakt op basis van de overeenkomsten met de graverijen van diersoorten die wel in de tabel vermeld staan, rekening houdend met de voor elk faalmechanisme relevante eigenschappen.

1.4 Aanpak

Eerst is een inschatting gemaakt welke faalmechanismen door dierlijke graverijen beïnvloed zouden kunnen worden en welke diersoorten tot een onderling onderscheidende invloed kunnen leiden. Vervolgens is voor alle mogelijke combinaties een inschatting gemaakt van de invloed op de lokale overstromingskans, gebaseerd op beschikbare berekeningen, waarnemingen en correlaties, waar nodig aangevuld met aanvullende redeneringen op basis van proportionaliteit. Dit is samengevat in een tabel.

Om van de uitkomst van een rekenmodel, bijvoorbeeld op het gebied van macrostabiliteit, naar een overstromingskans te geraken is gebruik gemaakt van de kalibratieformules zoals die binnen het WBI zijn afgeleid voor de primaire waterkeringen in Nederland. Om die reden zijn de uitkomsten in de eerste plaats alleen daarvoor geldig (de concrete toepassing van die formules voor een case bij een regionale kering blijkt ook tot ontsporing te leiden). Binnen de categorie 'primaire waterkeringen in Nederland' is er nog een ruime verscheidenheid aan type en formaat dijken, van betrekkelijk kleine dijken die geheel uit klei bestaan, tot grote dijken bestaande uit een zandkern met een relatief dunne kleibekleding. Veel regionale keringen binnen Nederland en ook dijken daarbuiten zullen goed binnen deze bandbreedte passen, maar andere niet.

In de kern komt de aanpak voor elke dijk, voor elke diersoort en voor elk faalmechanisme neer op de beantwoording van de volgende drie vragen:

- Welk effect heeft de graverij op de waterremmende lagen, zoals de kleibekleding?
- Wat is de toename van de indringing van buitenwater in de dijk via de graverij, ook beschouwd in de lengterichting van de dijk?

- Wat heeft dit voor effect op het beschouwde mechanisme?

De effecten kunnen zowel te maken hebben met de veranderde waterdrukken in en onder het dijklichaam, als met erosie ten gevolge van de optredende (grond)waterstroming.

Een eerste versie van de tabel is gepresenteerd tijdens een projectbijeenkomst van het Interreg-project Polder2C's⁴ op 23 en 24 juli 2022 in Lille. Dit heeft geleid tot kleine aanpassingen. De tweede versie is op 26 oktober in Zaltbommel gepresenteerd bij de workshop 'Noodmaatregelen bij graverijschade', georganiseerd door de werkgroep Wiki Noodmaatregelen. Deze rapportage betreft de derde versie en bevat voor het eerst een uitgeschreven onderbouwing.

1.5 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is eerst toegelicht in §2.1 welke initiële faalmechanismen (waar graverijen een impact op kunnen hebben) zijn meegenomen en in §2.2 welke diersoorten zijn beschouwd, daarna is in §2.3 de tabel met bandbreedtes van invloedsfactoren op het gehele proces om tot falen te komen weergegeven (gecategoriseerd naar diersoort en initieel mechanisme, voor de getalswaarden inclusief de vervolgmecanismen via eventueel meerdere faalpaden), in §2.4 gevolgd door een onderbouwing van alle getalswaarden in de bewuste tabel, Tabel 2.2.

In hoofdstuk 3 worden kort de conclusies en aanbevelingen gegeven.

⁴ Interreg 2 Zeeën-programma 2014-2020, subsidiecontractnummer 2S07-023.

2 Invloed dierlijke graverijen op overstromingskans

2.1 Selectie van faalmechanismen

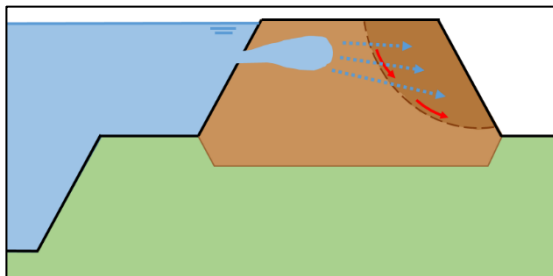
Bij de selectie van de faalmechanismen waar graverijen impact op hebben is rekening gehouden met beschikbare waarnemingen van graverijen en analyses. Daaruit zijn de volgende initiële mechanismen naar voren gekomen:

- Binnenwaartse macrostabiliteit.
- Opdrukken deklaag.
- Erosie deklaag.
- Uitspoeling door een gat in de bekleding.
- Piping.

Bij elk van deze initiële mechanismen is ook gedacht aan de mogelijke vervolgmecanismen, zoals erosie van klei, uitspoeling van zand, instabiliteit, inzakken van de kruin, bresvorming en bresgroei (zowel verdieping als verbreding), waarbij vaak geldt dat er verschillende faalpaden zouden kunnen optreden. Benadrukt wordt dat het steeds gaat om de *invloed* van de dierlijke graverijen op de kans op het uiteindelijk optreden van een overstroming, dus niet slechts op het optreden van het initiële mechanisme.

2.1.1 Binnenwaartse macrostabiliteit

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 2.1. 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 2.1 Graverij aan de waterzijde van een dijk, waardoor gemakkelijker binnenwaartse macroinstabiliteit optreedt (EA, 2019:3).

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 macrostabiliteit 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 diersoort en per situatie. Hierdoor geldt in het algemeen wel dat een langdurig hoogwater een groter gevaar vormt dan een kortdurende

hoogwatersituatie, zoals bij getij of bij het hoogwater langs de Maas in Limburg in juli 2021. In deze rapportage is primair uitgegaan van een hoogwater dat één tot drie weken aanhoudt, zoals langs de Rijntakken en de grote meren (IJsselmeer en Markermeer) voor mogelijk wordt gehouden.

Er is wel voorgesteld om eerst metingen uit te voeren naar de invloed van deze vergrote mate van indringing op de grondwaterstand in dijken. Dit impliceert echter dat een reeds ontdekte graverij in stand wordt gehouden totdat er een hoogwater optreedt, en logischerwijze ook dat er pas ingegrepen wordt als uit analyse van de metingen gebleken is dat er sprake is van een risico. Het valt slechts te hopen dat er dan nog geen bezwijken is opgetreden én dat er dan nog effectieve maatregelen kunnen worden getroffen. Bovendien zal de instrumentatie ruim voorafgaand aan het hoogwater moeten worden aangebracht, omdat er anders sprake kan zijn van verstoring van de meetwaarden als gevolg van het aanbrengen van de instrumenten. Praktisch betekent dit dat de instrumenten al moeten zijn aangebracht voordat zich maar een hoogwater heeft aangediend. Hoewel deze werkwijze vanuit het oogpunt van onderzoek interessante mogelijkheden biedt, wordt dit vanwege het bijbehorende overstromingsrisico toch geen verstandige keuze geacht.

De mogelijkheid van dierlijke graverijen wordt in de schematiseringshandleiding macrostabiliteit (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2021a) in §3.4.4 onder het kopje 'Biologische aantasting' wel genoemd. Als voorbeelden van dieren die gangen of holen graven, worden ratten, muskusratten en mollen genoemd. Van het doorgraven van een afdekkende kleibekleding wordt expliciet aangegeven dat de freatische lijn in het grondlichaam hoger komt te liggen, met nadelige gevolgen voor macrostabiliteit. Vervolgens wordt echter aangegeven:

"Indien er aanwijzingen zijn dat als gevolg van biologische aantasting de doorlatendheid van de bekleding is aangetast, dient dit bij het schematiseren van de waterspanningen in het dijklichaam te worden uitgegaan van normaal beheer." (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2021a:34)."

In deze rapportage wordt hiervan onderbouwd afgeweken, er is dan immers wél sprake van aantasting van de bekleding, waar bij de schematisering dus rekening mee gehouden moet worden.

2.1.2 Opdrukken deklaag

Het opdrukken van de deklaag 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 deklaag. Nadere aanwijzingen hieromtrent zijn te vinden in de schematiseringshandleiding grasbekleding, onder meer in §5.1 en bijlage D, §2 (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2021b). Ook voor dit mechanisme geldt dat een graverij aan de waterzijde leidt 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 deklaag (zie echter §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.

2.1.3 Erosie deklaag

Graverijen in de deklaag, ook de meer oppervlakkige graverijen door bijvoorbeeld honden, leiden tot beschadigingen van de deklaag die (verdere) erosie vergemakkelijken, door verlies

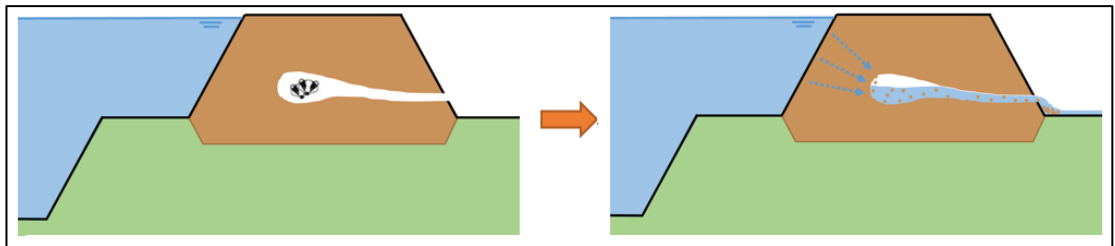
van continuïteit en structuur, en het bieden van aangrijppingspunten voor hydraulische en andere belastingen. Vanwege kenmerkende verschillen in de belasting wordt in de schematiseringshandleiding grasbekleding onderscheid gemaakt tussen enerzijds 'erosie buitentalud' en anderzijds 'erosie kruin en binnentalud' (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2021b:15-18). In deze rapportage worden deze gezamenlijk beschouwd, omdat het initiële mechanisme in beide gevallen verdere erosie van de deklaag betreft.



Figuur 2.2 Erosie van de deklaag (en gelijktijdig van de zandkern eronder) in een vergevorderd stadium.

2.1.4 Uitspoeling door een gat in de bekleding

Wanneer er een gat in de bekleding zit, zal materiaal vanuit de kern gemakkelijker kunnen uitspoelen, zie Figuur 2.3.



Figuur 2.3 Uitspoeling van materiaal door een gat in de bekleding (EA, 2019:3).

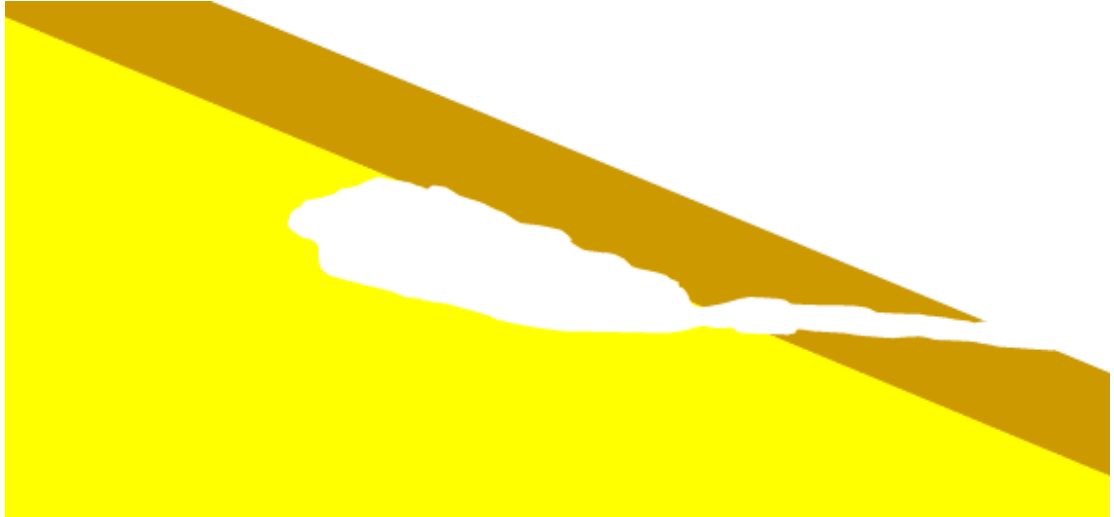
Bijlage D, §2.2, van de schematiseringshandleiding grasbekleding gaat in op het uitspoelen van zand door een kleibekleding (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2021b:85-89). Aangegeven wordt dat hierover weinig validatiemateriaal beschikbaar is. Wel worden enkele handreikingen en formules voor het berekenen van een stabiliteitsfactor gegeven voor de situaties waarbij het gat verticaal is, of loodrecht op het talud (de verschillen daartussen zijn gering, zo wordt aangegeven, al wordt ook aangegeven dat voor de beoordeling gebruik gemaakt moet worden van de formule voor 'loodrecht'). Deze oriëntaties worden "waarschijnlijk" genoemd in het geval dat het uittredekanal een gevolg is van opdrukken of opbarsten van de kleilaag, of het gevolg van een scheur door te nat aangebracht materiaal.

De schematiseringshandleiding grasbekleding geeft in dezelfde passage ook aan (vetgedrukte markering toegevoegd):

*"Als het uittredekanal 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 uittredekanal een oriëntatie heeft die loodrecht op het talud tot verticaal is. **Alleen als het uittredekanal 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 uittredekanal 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***

α denkbaar, zonder dat hiervoor overigens een goede onderbouwing is.” (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2021b:86-87).”

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 2.4). In het laatste geval 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 2.4 Schuin omhoog lopende graverij door de kleibekleding heen, met hol grotendeels in het zand.

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 het meest risicovol geacht.

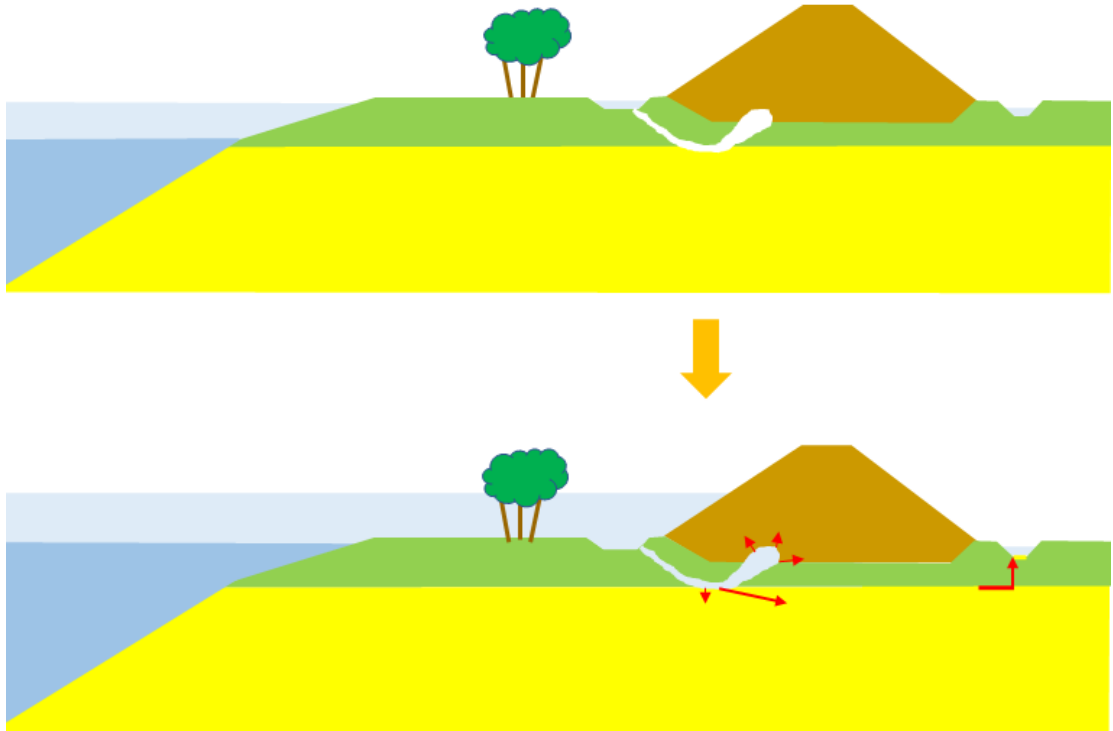
Voorts wordt het in de schematiseringshandeling macrostabiliteit ook niet ondenkbaar genoemd dat zand uit de kern wegspoelt als gevolg van dierlijke graverijen (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2021a:34).

In ICOLD Bulletin 164 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.

2.1.5 Piping

Piping is een verschijnsel dat alleen plaatsvindt in een zandlaag onder de dijkbasis. 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. De detectiemogelijkheden zijn bij

dergelijke droge omstandigheden wel beter, al moeten voor detectie natuurlijk wel inspecties plaatsvinden.



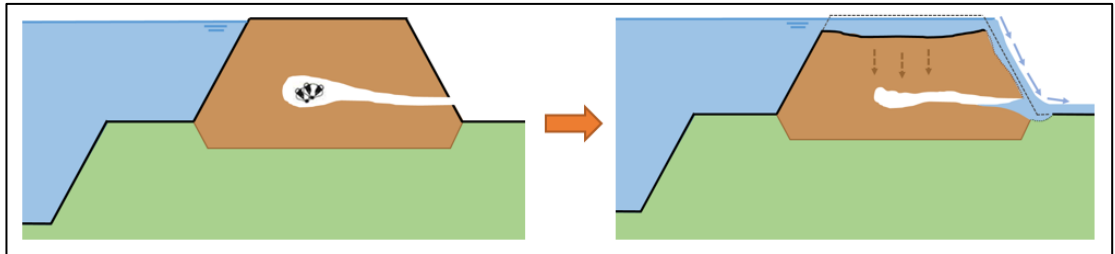
Figuur 2.5 Graverij, eventueel bij extreem laag water, leidend tot terugschrijdende erosie en piping.

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, dan kan de effectieve kwelweglengte wel degelijk zodanig verkleind zijn dat falen door piping kan optreden.

2.1.6 Andere mechanismen

De huidige inschatting is dat dierlijke graverijen geen of slechts een geringe invloed zullen hebben op andere mechanismen die tot daadwerkelijk falen van de waterkering zullen leiden. Het is uiteraard mogelijk dat er mechanismen over het hoofd zijn gezien, of dat er bepaalde processen mogelijk ten onrechte geschaard zijn onder de voornoemde initiële mechanismen.

Door het Engelse Environment Agency wordt verzakking van de kruin, gevolgd door overloop en erosie genoemd, zie Figuur 2.6. Ingeschat wordt dat dit in de Nederlandse situatie, waarin de dijken (veel) intensiever worden gemonitord dan veel keringen in het beheergebied van het EA, niet snel tot problemen zal leiden, al wordt onderkend dat dit bij kleine regionale keringen anders kan liggen, gelet op het graafvermogen van met name de bever in slechts één nacht. Bovendien is het lokale gebrek aan kerende hoogte betrekkelijk eenvoudig met een noodmaatregel te verhelpen, bijvoorbeeld door het aanbrengen van een beperkt aantal zandzakken. De invloed hiervan op de overstromingskans wordt daarom over het algemeen gering geacht.



Figuur 2.6 Graverijen die leiden tot verzakking, waarna overloop en erosie kunnen plaatsvinden (EA, 2019:4).

2.2 Selectie van diersoorten

Voor de selectie van diersoorten is in de eerste plaats gekozen voor de soorten die in de afgelopen jaren door incidenten veel ophef veroorzaakten: de bever en de das (zie ook §1.1). Daarnaast zijn enkele andere soorten gekozen waarvan op basis van kleinschalige en grootschalige proeven, onder meer in de Hedwige-Prosperpolders en elders met de golfoverslagsimulator enige indicaties te geven zijn over de impact op de veiligheid van dijken: de mol, de vos en het konijn, en de woelrat en de muis.

Door differentiatie naar diersoort, locatie van de graverij en het faalmechanisme is geprobeerd om helder te maken wanneer dierlijke graverijen wel of niet een ernstig probleem kunnen vormen.

In een recente risicoanalyse naar de graafschade bij waterkeringen door zoogdieren bij waterschap Aa en Maas is een onderscheid gemaakt naar holengravers onder de waterlijn (zoals de bever, de muskusrat, de beverrat en de bruine rat), holengravers boven de waterlijn (zoals de das, de vos, het konijn, de mol en de muis) en oppervlakkige gravers (zoals het wild zwijn en de hond). Daarin zijn de risico's van de bever, de das en het wild zwijn nader uitgewerkt. Over de vos en het konijn wordt opgemerkt dat deze vergelijkbare schade als de das kunnen veroorzaken. Geconcludeerd wordt dat de risico's van de bever en de das momenteel het grootst zijn, terwijl het wild zwijn geen actueel risico vormt (Larooij, 2022).

In het beverprotocol voor Gelderland en Zuid-Holland is onderstaande, niet eerder gepubliceerde tabel van de hand van Peter Damen (Waterschap Rivierenland) opgenomen over de kenmerken van de graverijen van een negental diersoorten. Voor de bever zijn voor alle kenmerken de grootste getalswaarden opgenomen. Daarbij wordt aangegeven dat de waargenomen diameter van de graafgangen veelal 0,4 tot 0,6 m bedraagt en dat de Zoogdierverseniging aangeeft dat de bever nog dieper in het dijkprofiel kan graven dan de in de tabel opgenomen 12 m, namelijk 15 tot 20 m (UvW, 2020). De waarde van 20 m is recent ook geobserveerd bij een wiel bij Wamel (Kapinga, 2022).

Tabel 2.1 Overzicht potentiële impact van graverij door verschillende diersoorten (UvW, 2020:8).

	Muskusrat	Beverrat	Bever	Konijn	Vos	Das	Mol	Muis	Rivierkreeft
Totale graafinhoud [liters]	250	500	3000	40	500	500	5	1	1
Max. graafdiepte in dijkprofiel [m]	6	8	12	2	3	3	1	1	0,8
Diameter graafpijp [cm]	25	35	45	15	40	35	5	2	3 – 10
Diameter nest-kom [cm]	30	60	80	35	40	60	10	5	

Voor andere diersoorten geldt dat de invloed vergeleken kan worden met één van de geselecteerde diersoorten. In de toekomst kunnen andere diersoorten belangrijker worden,

terwijl de diersoorten die nu tot de grootste zorgen leiden, weer vrijwel zouden kunnen verdwijnen – net zoals eerder het geval was met de bever. Ook de invloed van de muskusrat en de beverrat is kleiner geworden in gebieden waar deze diersoorten intensief bestreden worden.

2.3 Tabel met invloed van dierlijke graverijen op de overstromingskans

Tabel 2.2 hierna geeft een schatting van de bandbreedte van de invloed van diverse dierlijke graverijen, uitgesplitst naar diersoort en graaflocatie, op de lokale overstromingskans voor een vijftal initiële mechanismen, inclusief vervolgmecanismen, en wordt in de volgende paragraaf voor elk onderdeel onderbouwd.

Lokale overstromingskans

Deze 'lokale overstromingskans' wordt in de beoordelingspraktijk vaak aangeduid met de term 'Overstromingskans op doorsnedeniveau' of 'Overstromingskans op dijkvakniveau'. Een waarde groter dan 1 betekent een toename van de overstromingskans en is dus ongunstig, een waarde kleiner dan 1 betekent een afname van de overstromingskans en is dus gunstig. Echter, bij waarden kleiner dan 1 voor het ene mechanisme geldt in het algemeen een verslechtering (waarde groter dan 1) voor een ander mechanisme. Als bovengrens in een concrete situatie geldt natuurlijk altijd dat de faalkans niet groter kan zijn dan 1. Hierdoor zal de invloedsfactor paradoxaal genoeg kleiner worden naarmate de kans op falen zónder graverijen groter is.

Toename overstromingskans

Over alle mechanismen beschouwd zal er netto vrijwel altijd sprake zijn van een toename van de overstromingskans. De vermelding 'onwaarschijnlijk' wil zeggen dat de aanwezigheid van een graverij van de betreffende diersoort op die locatie onwaarschijnlijk wordt geacht. Dit geldt voor een graverij door een vos of een konijn laag aan de waterzijde. Het geldt ook voor alle beschouwde diersoorten behalve de bever op een zodanige locatie dat dit invloed heeft op terugschrijdende erosie in een zandlaag onder de dijk door (piping, of met de internationale term daarvoor: 'backward erosion piping' (BEP). NB: internationaal wordt de term '(general) piping' gehanteerd voor uitspoeling door een gat in het dijklichaam zelf, wat in de Nederlandse voorschriften onderdeel vormt van de mechanismen die onder microinstabiliteit worden geschaard).

Tabel 2.2 Geschatte bandbreedte van de invloed van dierlijke graverijen op de lokale overstromingskans per faalmechanisme voor primaire waterkeringen in Nederland (een getal groter dan 1 betekent een toename van de kans).

Dier - graaflocatie	Binnenwaartse macrostabiliteit	Opdrukken deklaag	Erosie deklaag	Uitspoeling door gat in bekleding	Piping (BEP)
Bever					
- Landzijde	0.01 – 1	0.000 1 – 1	*	1 – 100 000	1 – 10 000
- Waterzijde	1 – 1000	1 – 1000	1 – 100	1 – 100	1 – 100 000
- Beide zijden	0.1 – 100	0.001 – 100	1 – 1000	10 – 1 000 000	1 – 10 000 000
Das					
- Landzijde	0.01 – 1	0.001 – 1	3 – 1000	1 – 100 000	*
- Waterzijde	1 – 10 000	1 – 10 000	3 – 1000	1 – 1000	*
- Beide zijden	0.1 – 1000	0.001 – 10 000	3 – 10 000	3 – 10 000 000	*
Mol					
- Landzijde	0.1 – 1	0.01 – 1	1 – 100	1 – 1000	*
- Waterzijde	1 – 30	1 – 10	1 – 100	1 – 100	*
- Beide zijden	1 – 10	0.01 – 10	1 – 1000	1 – 10 000	*
Vos en konijn					
- Nabij kruin	0.1 – 3	0.3 – 10	3 – 1000	1 – 100	*
- Laag, landzijde	0.01 – 1	0.001 – 1	3 – 1000	1 – 1000	*
- Laag, waterzijde	*	*	*	*	*
Woelrat en muis					
- Landzijde	0.1 – 1	0.1 – 1	1 – 3	1 – 10	*
- Waterzijde	1 – 3	1 – 3	1 – 3	1 – 3	*
- Beide zijden	0.1 – 3	0.1 – 3	1 – 3	1 – 30	*

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

Hierbij is rekening gehouden met een grote mogelijke variatie in afmetingen en opbouw van de dijk, waardoor een ruime bandbreedte een logische uitkomst is. Immers, bij een relatief grote dijk die volledig uit zandige klei bestaat, heeft een bescheiden graverij in het landzijdig talud door een recent (door het hoogwater) verdreven das veel minder (of: geen) invloed, dan een nieuwe graverij door een verdreven bever in het waterzijdig talud terwijl het water nog aan het stijgen is. Ook de duur van het hoogwater maakt uit: het kortdurende hoogwater langs de Maas in juli 2021 had logischerwijs minder invloed dan een hoogwater dat één tot drie weken aanhoudt.

De meer extreme waarden zijn vooral van toepassing bij dijken bestaande uit een zandkern met een kleibekleding. Bij dijken die geheel uit klei bestaan, zal de invloed over het algemeen het kleinst zijn. Een onderbouwing van het voorgaande, en van alle waarden in de tabel, volgt hierna.

2.4 Onderbouwing

2.4.1 Algemene aanpak

De aangegeven bandbreedtes zijn ingeschat op basis van waarnemingen, berekeningen, correlaties en redeneringen (in afnemende volgorde van toegekend belang).

Het meeste gewicht is geschonken aan waarnemingen voorzien van goed onderbouwde berekeningen, waarvan er overigens maar weinig beschikbaar zijn. Voorbeelden van nagerekende situaties waarbij falen is opgetreden als gevolg van dierlijke graverijen, zijn te vinden in Paul & Slaven (2009), Taccari (2015) en Ceccato & Simonini (2023).

In de meeste situaties waarbij falen optreedt als gevolg van dierlijke graverijen zal dit achteraf niet meer waarneembaar zijn, niet alleen omdat alle details zijn weggespoeld, maar ook

doordat de graafschade voorafgaand aan het falen niet is waargenomen. Een uitzondering hierop wordt gevormd door grootschalige proefnemingen, zoals die in bijvoorbeeld in de afgelopen jaren zijn uitgevoerd langs de Hedwige- en Prosperpolders. Daar werd de graafschade overigens ook vaak pas tijdens de uitvoering van een proef ontdekt (Depreiter et al., 2022; Koelewijn, 2021; Tsimopoulou & Koelewijn, 2022).

Veel van de berekeningen met situaties met graafschade die tot dusverre zijn uitgevoerd, vermelden alleen een stabiliteitsfactor. Voor Nederlandse situaties met binnenwaartse macrostabiliteit of piping zijn deze omgerekend naar een faalkans met behulp van correlaties die hiervoor voor primaire waterkeringen zijn afgeleid (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016b:31+40). Dit levert een beperkt aantal getalswaarden op, waar vanwege alle onderweg gemaakte aannames, vereenvoudigingen en andere tekortkomingen natuurlijk veel op af te dingen valt. De gekozen aanpak ligt echter wel in het verlengde van de systematiek waarop vertrouwd wordt en gegeven de behoefte aan enige duiding is gekozen voor het opstellen van deze tabel, zoals in hoofdstuk 1 nader uiteengezet is.

Vervolgens is ingeschat in hoeverre de berekende situaties zich meer aan de hoge kant van hetgeen mogelijk is zullen bevinden, of dat het waarschijnlijk situaties zijn waarbij de invloed nog veel groter is. In het algemeen is dit als betrekkelijk onwaarschijnlijk ingeschat, omdat bij de keuze welke situaties doorgerekend zouden worden, de bovenmatige gevoeligheid voor dierlijke graverijen in de lokale situatie vermoedelijk een belangrijke rol heeft gespeeld. De uiterste grens van de bandbreedte betreft vervolgens een afronding naar de meer extreme kant, zodat de berekende situaties allemaal binnen de bandbreedte vallen en de tabel geen ongerechtvaardigde nauwkeurigheid suggereert.

De overige waarden zijn allereerst afgeleid op basis van beschikbare kennis over graverijen van de verschillende diersoorten, kennis van de mechanismen en waarnemingen bij het optreden van schade en bij falen. Daarmee is nog steeds een aanzienlijk deel van de tabel niet in te vullen. De rest van de aangegeven waarden is afgeleid op basis van redeneringen, waarbij proportionaliteit een grote rol heeft gespeeld: als twee verschillende diersoorten een voor het betreffende mechanisme bijvoorbeeld vergelijkbare schade aanbrengen, dan moet de invloed ook hetzelfde zijn. Is de schade geringer, dan moet de invloed ook geringer zijn.

De bandbreedte richt zich op het geven van een orde van grootte van de mogelijke invloed. Daarom zijn de meeste waarden afgerond op een factor 10. In een aantal gevallen is een factor 3 of een tien(de)voud daarvan gehanteerd. Logaritmisch ligt een factor 3 ongeveer halverwege tussen 1 en 10, en de inschatting was dat afronding op een bescheidener tiental (dichter bij 1) te mager zou kunnen zijn, terwijl afronding naar een extremer tiental te veel invloed zou suggereren, deels ook in samenhang met andere waarden in de tabel. Verder dient bedacht te worden dat het bij lokale overstromingskansen op het optreden van een specifiek mechanisme veelal gaat om kleine tot zeer kleine kansen, waarbij betrekkelijk kleine veranderingen vaak al tot een orde van grootte verschil maken.

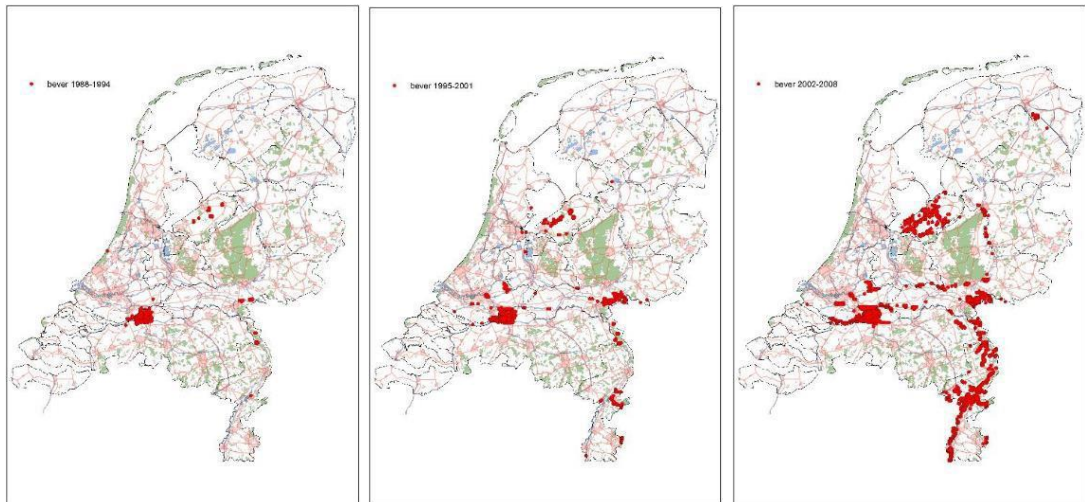
In de meeste gevallen maakt een factor '1' onderdeel uit van de aangegeven bandbreedte. Er zijn voor de meeste graverijen in dijken immers situaties denkbaar waarbij deze geen merkbare invloed zullen hebben op een specifiek mechanisme. Desondanks is hier in enkele gevallen van afgeweken, zoals in de paragrafen hierna is toegelicht.

Eerst wordt de bever behandeld (§2.4.2), dan de das (§2.4.3), vervolgens de mol (§2.4.4), de vos en het konijn (§2.4.5) en tot slot de woelrat en de muis (§2.4.6).

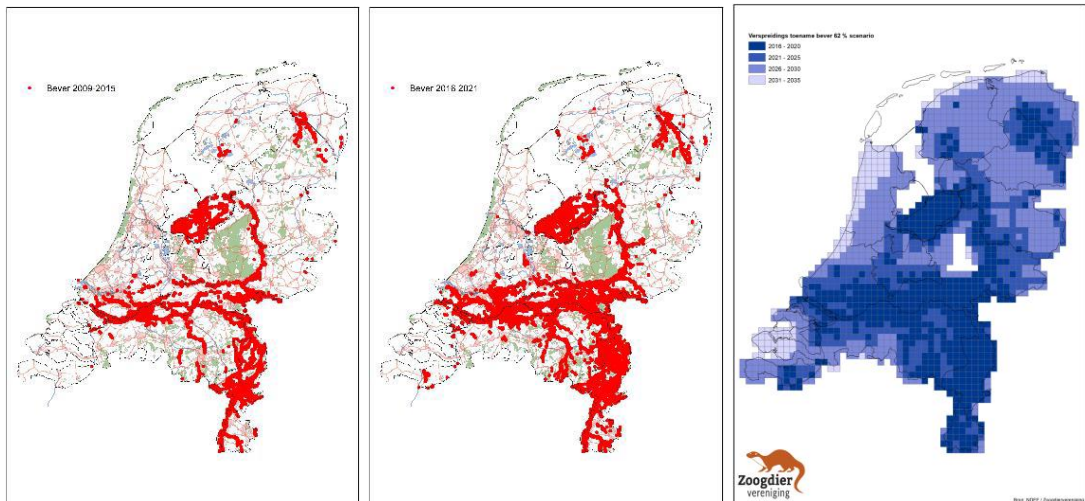
2.4.2 Bever

2.4.2.1 Kenmerken

Een volwassen bever heeft doorgaans een romplengte van 70 tot 100 cm en een gewicht van 15 tot 35 kg (Larooij, 2022), al is recent een exemplaar van 130 cm en 30 kg aangetroffen⁵. De bever is als gevolg van bejaging in 1826 in Nederland uitgestorven. Vanaf 1988 is de soort weer opnieuw geïntroduceerd, te beginnen in de Biesbosch. Sindsdien is de populatie in hoog tempo toegenomen, zie ook de weergave van beverwaarnemingen in tijdvakken van doorgaans 7 jaar in Figuur 2.7 en Figuur 2.8. De laatste figuur betreft een projectie door de Zoogdiervereniging voor de situatie tot aan 2035, ervan uitgaande dat de huidige populatiegroei met 62% in iedere vijf jaar zich doorzet. De problematiek rond graverijen neemt daarbij naar verwachting eveneens sterk toe.



Figuur 2.7 Waarnemingen van de bever in Nederland, links: 1988-1994, midden: 1995-2001, rechts: 2002-2008 (Van der Baan, 2022; ontleend aan de Zoogdiervereniging).



Figuur 2.8 Waarnemingen van de bever in Nederland, links: 2009-2015, midden: 2016-2021, rechts: projectie groei van iedere 5 jaar met 62% vanaf 2016-2020 tot en met 2031-2035 (Van der Baan, 2022; ontleend aan de Zoogdiervereniging).

De eisen die een bever aan zijn leefomgeving stelt, zijn als volgt samengevat door Larooij:

⁵ <https://www.rtvkrimpenerwaard.nl/site/gigantische-overleden-bever-gevonden-in-krimpenerwaard-wel-veertig-kilo/>
<https://www.ad.nl/krimpenerwaard/zo-groot-als-een-kind-van-zeven-jaar-en-dertig-kilo-zwaar-gigantische-bever-wordt-ontleed-voor-de-wetenschap~ace06064c/>

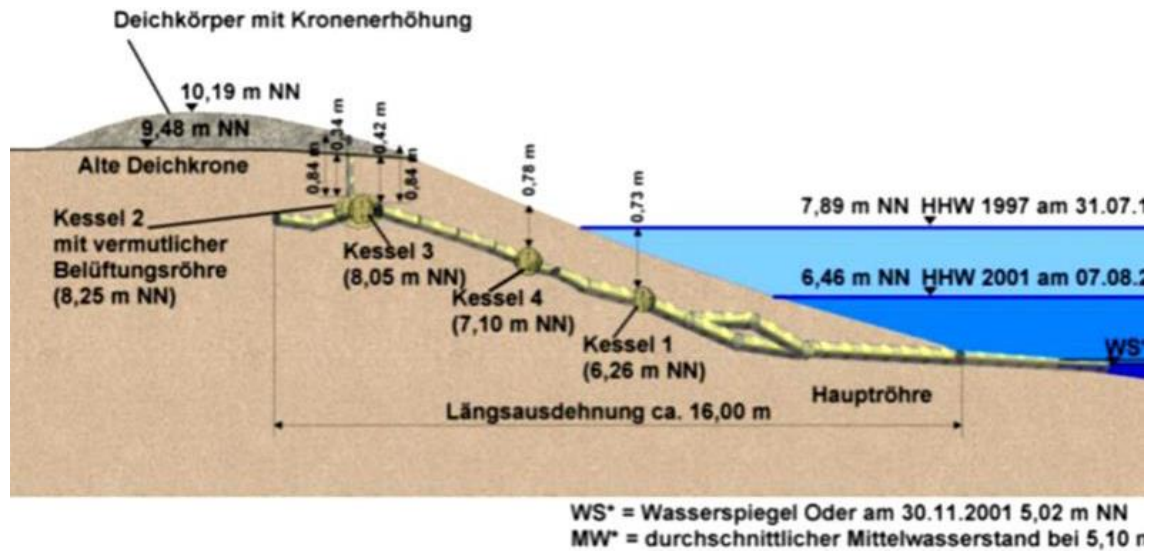
“Een bever is in staat om grote afstanden af te leggen (op zoek naar een territorium ±20 km). Dit hangt af van de populatiegrootte en de kwaliteit van het leefgebied. Een territorium kan bestaan uit kleine gebieden op een kilometer oever, maar ook hele grote gebieden bestaande uit meerdere kilometers oever. Dit betekent dat op plekken waar geschikte vegetatie verder uit elkaar staat, toch voldoende kan zijn voor een bever om zijn territorium te realiseren. Dit kan betekenen dat als pas na 500 meter of 1 kilometer verderop houtige begroeiing staat, het nog steeds voor de bever interessant kan zijn. De gemiddelde omvang van een beverterritorium is ongeveer 3 kilometer aan oever. Daarnaast eet de bever niet alleen houtige vegetatie maar ook veel kruiden, wortels van allerlei kruiden en waterplanten (voornamelijk in de winter). Bestaat een watergang uit veel gele plomp (Nuphar lutea), kikkerbeet (Hydrocharis morsus-ranae), waterlelie (Nymphaea alba) of allerlei andere waterplanten, kan het ook aantrekkelijk zijn voor een bever. In het Nederlandse rivierengebied bouwt de bever voornamelijk op en in de oever van allerlei uiterwaardplassen, kleiputten en oude rivierarmen, maar ook in ooibossen die periodiek onderlopen. De belangrijkste eis van een bever aan zijn habitat is dan ook een voldoende groot areaal aan oeverzones met een gevarieerde begroeiing van bos en moeras/ruigtesoorten. De bever foerageert voornamelijk in helofytenrijke moerasbegroeiingen en wilgenbegroeiing (Salix spec.) op de oevers van rivieren en wateren.”

“Als oevers ingraafbaar zijn, neemt de bever vroeg of laat bezit van waterkeringen. Ook als op een paar locaties een burcht of holencomplex is gevestigd. In het geval van plas-dras oevers is niet veel aan de hand. Steilere oevers die ook onderwater steil zijn vormen een potentieel kwetsbare situatie. De problemen kunnen klein, plaatselijk en overzichtelijk zijn maar kunnen ook uit de hand lopen. Dit hangt af van het landschap. Door te definiëren wat een bever nodig heeft, kunnen de knelpunten in het landschap worden aangewezen. De afstand die een bever over land loopt binnen het territorium is meestal 20 - 30 meter, op uitzonderingen na, als hele specifieke voedselitems niet dicht bij de oever staan. Een bever graaft doorgaans niet verder dan 20 meter de oever in.” (Larooij, 2022:23).

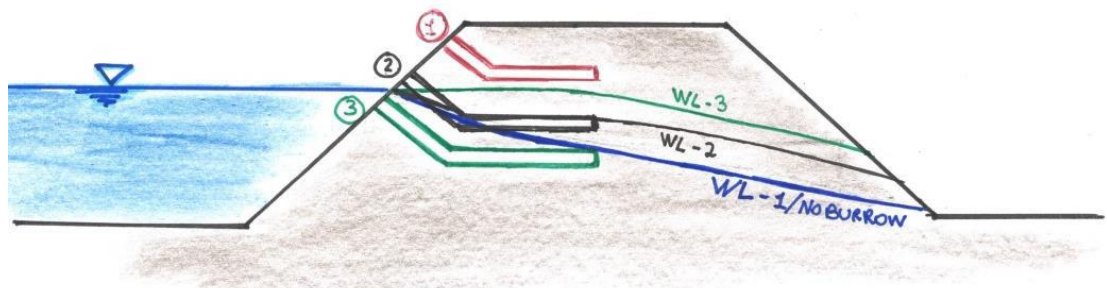
2.4.2.2 Binnenwaartse macrostabiliteit

Voor de potentiële invloed van een bevergraverij op de binnenwaartse macrostabiliteit van een realistische dijk, is een drietal bronnen gecombineerd:

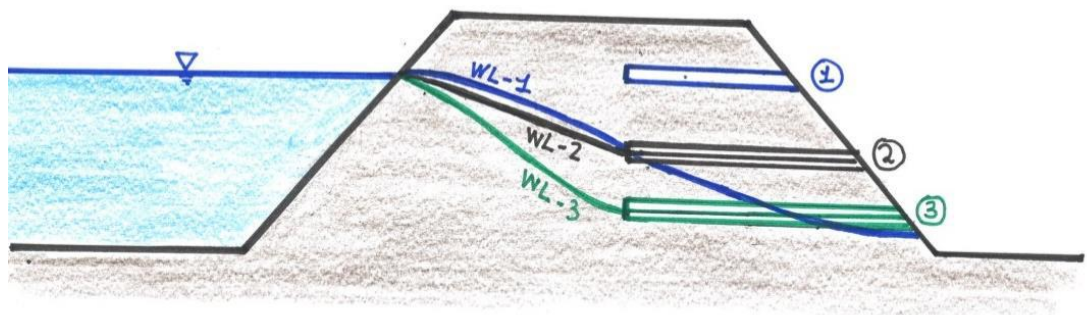
- Waarnemingen aan een stelsel van bevergangen en beverholen in het waterzijdig talud van een circa 7 m hoge zanddijk met een kleibekleding (Hahmann et al., 2004) zoals weergegeven in Figuur 2.9.
- Berekeningen van de invloed op de ontwikkeling van de freatische lijn tijdens hoogwater van een graafgat door de bekleding van een circa 7 m hoge zanddijk met een kleibekleding in Noord-Italië, als onderdeel van het narekenen van een gefaalde situatie (Taccari, 2015), waarvan de principe-schetsen zijn weergegeven in Figuur 2.10 en Figuur 2.11.
- De case van de Drielsedijk langs de Nederrijn, ten westen van Arnhem-Zuid: een circa 7 m hoge zanddijk met een kleibekleding met een groot natuurgebied, geschikt voor bevers, aan de rivierzijde en in beperkte mate geschikte leefgebieden voor bevers, zoals een oud wiel, aan de landzijde (Van den Berg, 2022), waarvan de situatie en de dwarsdoorsnede van de dijk zijn weergegeven in respectievelijk Figuur 2.12 en Figuur 2.13.



Figuur 2.9 Bevergangen en -holen zoals aangetroffen in een dijk langs de Oder (Hahmann et al., 2004).



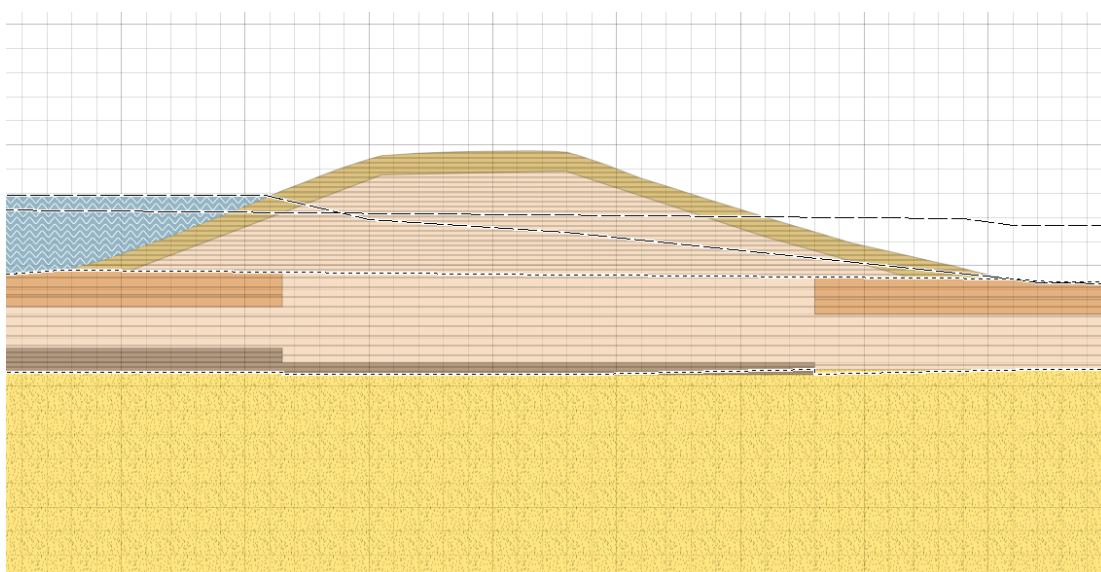
Figuur 2.10 Doorgangen op verschillende hoogtes in het waterzijdig talud en de invloed daarvan op de freatische lijn in de dijk (Taccari, 2015:64).



Figuur 2.11 Doorgangen op verschillende hoogtes in het landzijdig talud en de invloed daarvan op de freatische lijn in de dijk (Taccari, 2015:65).



Figuur 2.12 Locatie van de beschouwde sectie van de Drielsedijk bij Arnhem (Van den Berg, 2022a:12).



Figuur 2.13 Dwarsprofiel Drielse dijk (de afstand tussen de gridlijnen bedraagt 1 m) (Van den Berg, 2022a:13).

De combinatie van bovenstaande drie elementen wordt realistisch geacht. Daarbij geldt bovendien dat er sprake is van een relatief ongunstige situatie (“veel erger zal het niet worden”), zodat hiermee de bovengrens van de impact van de graverij op de overstromingskans benaderd kan worden.

Case Drielse Dijk

De kruinhoogte bedraagt NAP + 14,7 m. Het hydraulisch belastingniveau (HBN) is gesteld op NAP +12,9 m. De waterstand onder dagelijkse omstandigheden bedraagt NAP + 8,8 m. Onder dagelijkse omstandigheden wordt met de CSSM-methode een stabiliteitsfactor van 1,251 berekend, hetgeen volgens de gekalibreerde formule in Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2016b:40) overeenkomt met een faalkans op doorsnedeniveau van $1,03 \times 10^{-8}$ per jaar. In deze situatie, zonder graverijen, neemt deze faalkans toe tot $1,05 \times 10^{-4}$ per jaar bij HBN.

Door Van den Berg (2022a) is de invloed van graverijen uitsluitend berekend via de invloed op de freatische lijn; er is geen reductie van materiaal in de dijk toegepast in deze

berekeningen met een tweedimensionale modellering⁶. Aan de waterzijde is gekeken naar zowel een graverij met een intredepunt net onder HBN (op NAP + 12 m; een uit de uiterwaard gevluchte bever die pas bij HBN niet ver onder de waterlijn een gat in de kering graaft) als een graverij net boven de buitenteen (op NAP + 10 m; een al betrekkelijk vroeg gevluchte bever). Aan de landzijde is zowel een graverij halverwege het talud als net boven de binnenteen gemodelleerd (niet waarschijnlijk voor een bever in deze situatie, maar een mol zou dit ook kunnen verzorgen). In Tabel 2.3 is weergegeven in welke mate de lokale overstromingskans *toeneemt* voor verschillende combinaties van wel of geen graverij in beide taluds.

Tabel 2.3 *Berekende invloed van graverijen op de toename van de lokale overstromingskans (per jaar) voor de Drielsedijk (ontleend aan Van den Berg (2022a)).*

Drielsedijk	Geen graverij	Halverwege talud	Net boven binnenteen
Geen graverij	1	0.95	0.53
Net onder HBN	2.5	2.5	0.95
Net boven buitenteen	111	111	0.95

De situatie zonder graverijen levert vanzelfsprekend een factor 1 op bij HBN, dus de eerdergenoemde faalkans van $1,05 \times 10^{-4}$ per jaar. De meest ongunstige situatie is die met een graverij net boven de buitenteen, zonder effectieve drainage aan de landzijde. In dat geval wordt een 111 maal grotere faalkans gevonden, namelijk $1,17 \times 10^{-2}$ per jaar. Een graverij aan de landzijde, net boven de binnenteen, heeft in alle gevallen een (licht) gunstig effect, maar kan weer tot andere problemen leiden. Voor een voorbeeld daarvan wordt verwezen naar §2.4.2.5.

Case Hunze en Aa's

In opdracht van Waterschap Hunze en Aa's heeft Pater (2019) een analyse gemaakt van de mogelijke invloed van een vanaf de binnen- of buitenteen gegraven bevergang met een hol nabij de buitenkruin op de binnenwaartse macrostabiliteit langs een drietal regionale waterkeringen (IPO-klasse III). Er is gerekend met Plaxis-3D met het Mohr-Coulomb-materiaalmodel, waarbij bestaande Plaxis-2D-berekeningen als basis zijn gebruikt. De graverijen zijn expliciet gemodelleerd als verwijderd materiaal, de voornaamste invloed komt ook hier door de aanpassingen van de berekende waterdrukken.

Ook in dit geval is geen volledige faalpadanalyse uitgevoerd, er is slechts gekeken naar de invloed op het optreden van het initiële mechanisme. Dit vormt wel een indicatie voor de verandering van de overstromingskans.

Hoewel ook verzakkingen van de kruin berekend zijn, is het mechanisme binnenwaartse macrostabiliteit in alle berekeningen dominant. Door Pater (2018) zijn alleen stabiliteitsfactoren gerapporteerd, zie Tabel 2.4, 2^e en 3^e kolom. De term 'BAKWA' verwijst naar de situatie ná versterken. Voor de vertaling naar overstromingskansen is hier de formule voor het Mohr-Coulomb-model uit Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2016b:40) gebruikt, hoewel die uitsluitend is gekalibreerd voor primaire waterkeringen. De resultaten staan

⁶ Het expliciet modelleren van een holte in een 2D-doorsnede is problematisch wanneer naar de fysieke betekenis hiervan wordt gekeken. Een holte zou dan in de derde dimensie, dus in de lengterichting van de dijk, overal aanwezig zijn. In werkelijkheid wordt met een dergelijke berekening een representatieve sectie van een dijk doorgerekend, rekening houdend met 3D-effecten zou bij een dijk met de omvang van de Drielsedijk een afschuiving met een lengte van 20 à 50 m (verwachtingswaarde 30 m) kunnen optreden. Op een dergelijke sectie valt het volume van de bevergangen en -holen relatief gezien mee, zodat een eventueel gunstig effect van de verminderde massa in het actieve gedeelte van het glijvlak praktisch verwaarloosbaar is.

vermeld in de 4^e en 5^e kolom van Tabel 2.4, met in de laatste kolom de factor waarmee de overstromingskans verandert als gevolg van de gemodelleerde graverij.

Tabel 2.4 *Invloed van buitendijkse bevergraverijen op de berekende stabiliteitsfactor voor binnenwaartse macrostabiliteit voor een zestal trajecten van regionale waterkeringen bij Hunze en Aa's (Pater, 2018).*

Traject	Stabiliteitsfactor		Faalkans		
	Geen graverij	Wel graverij	Geen graverij	Wel graverij	Factor
Steendam – Tjuchem	1.03	0.78	$1,16 \times 10^{-5}$	$1,05 \times 10^{-2}$	902
Steendam – Tjuchem (BAKWA)	1.3	0.9	$1,42 \times 10^{-10}$	$6,17 \times 10^{-4}$	$4,36 \times 10^6$
Eemskanaal	1.35	0.78	$1,10 \times 10^{-11}$	$1,05 \times 10^{-2}$	$9,57 \times 10^8$
AG Wildervanckkanaal	0.98	0.67	$6,00 \times 10^{-5}$	$7,19 \times 10^{-2}$	1199

De invloed, uitgedrukt in de berekende stabiliteitsfactor door Pater (2018) is groot tot zeer groot en varieert van 0,21 tot zelfs 0,57. De gehanteerde omrekenformule, die niet voor deze situaties is gekalibreerd maar alleen voor primaire waterkeringen, lijkt hier echter te ontsporen. Echter, ook als alleen naar de stabiliteitsfactoren gekeken wordt, dan lijkt de invloed hier nog groter dan bij de Drielsedijk, hetgeen niet verwonderlijk is gezien de geringere afmetingen van de waterkering terwijl een bevergraverij daar niet navenant kleiner is.

Bevergraverij waterzijde

Deze rapportage in het kader van het Rijkswaterstaat-programma 'Kennis voor Keringen' is in de eerste plaats gericht op primaire waterkeringen en vanwege de beperkte geldigheid van de gebruikte omrekenformule strikt genomen ook alleen daarvoor geldig. Hoewel enkele regionale waterkeringen groter zijn dan veel primaire keringen, geldt over het algemeen dat de regionale keringen wat kleiner zijn. Dat geldt ook voor de hier beschouwde regionale keringen. Daarom wordt een factor 1000 toch als een waarschijnlijke bovengrens gezien voor de invloed van bevergraverijen aan de waterzijde van de dijk op de binnenwaartse macrostabiliteit en bedraagt de geschatte bandbreedte een factor 1 – 1000.

Bevergraverij landzijde

Bij bevergraverijen aan de landzijde geldt dat deze altijd betrekkelijk laag in het dwarsprofiel van de dijk aanwezig zullen zijn. Deze dieren maken hun toegang immers altijd onder de waterlijn. Dit zal dan leiden tot drainage en daarmee tot een verlaging van de freatische lijn in de dijk, dus tot een kleinere overstromingskans. Zonder dat hier verder aan gerekend is, is de verwachting dat de maximale invloed hiervan iets kleiner zal zijn dan de invloed van de verhoging van de freatische lijn als gevolg van een bevergraverij aan de buitenzijde. De kans op een scenario waarbij een binnendijkse bevergraverij aanwezig is en de freatische lijn juist hoger komt te staan, doordat het binnendijkse peil hoger komt te staan bij een hoogwater (zoals bijvoorbeeld het geval kan zijn bij een binnendijks wiel, zie §2.4.2.5 voor een voorbeeld), zónder dat een ander initieel mechanisme dominant is, wordt klein geacht. De geschatte bandbreedte bedraagt daarom 0.01 – 1.

Bevergraverij aan beide zijden

Wanneer er aan beide zijden van de dijk bevergraverijen aanwezig zijn, dan zal de freatische lijn zowel omhoog kunnen gaan als omlaag, en daarmee zal ook de overstromingskans als gevolg van binnenwaartse macrostabiliteit zowel toe- als af kunnen nemen. Beide graverijen zullen hun invloed doen gelden (anders is één van beide verwaarloosbaar), daarom is gekozen voor een bandbreedte van 0.1 – 100. In dit geval mag de aandacht meer uitgaan naar het ontstaan van een doorgaand gat, dwars door de dijk heen (zie §2.4.2.5).

2.4.2.3 Opdrukken deklaag

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 opdrukken van de deklaag 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 indringingsafstand (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 §2.4.2.2, Figuur 2.9) waarbij de bever met het hoogwater mee het indringingsoppervlak gaandeweg vergroot. De bandbreedte van de invloed op de overstromingskans is hierbij ingeschat op 1 tot 1000.

In het geval van een bevergraverij aan de landzijde zal de kans op opdrukken van de deklaag juist afnemen, gelet op de korte afstand zelfs in sterkere mate dan bij een graverij aan de waterzijde. Ook eventuele scenario's als verstopping van een drainagevoorziening die in de dijk aangebracht kan zijn, worden door de graverij minder waarschijnlijk. Weliswaar zullen de bevers niet voor ontstopping zorgen, maar langs andere weg verbetert de drainage alsnog. De bandbreedte van de invloed op de overstromingskans wordt hierom ingeschat op 0.0001 tot 1.

Bij bevergraverijen aan beide zijden van de dijk ontstaat weer een gemengd, maar ook gematigd beeld. De bandbreedte van de invloed op de overstromingskans is daarom ingeschat op 0.001 – 100.

2.4.2.4 Erosie deklaag

Wanneer er eenmaal een gat in de deklaag aanwezig is, kan dit door stroming en golfslag gemakkelijker aangetast worden dan een intacte deklaag. Daar waar een intacte deklaag niet snel zodanig zal eroderen dat juist specifiek deze erosie uiteindelijk tot een overstroming leidt, is dat anders voor een deklaag die al is aangetast door een graverij. De experimentele basis voor de getallen die voor dit faalmechanisme zijn genoemd in Tabel 2.2 wordt gevormd door de ervaringen met mullengaten in dijken bij golfoverslag- en overloopproeven, zoals beschreven door Koelewijn (2021).

Bevers graven grotere gaten dan mollen (zie §2.4.4), maar de beverholen zullen minder onderhevig zijn aan stroming en vooral golven omdat bevers onder de waterlijn beginnen met graven. Vooral schade door golfklappen 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 deklaag 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.

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.

Falen door specifiek erosie van de deklaag 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 vervolgprocessen richting overstroming zullen echter wel gemakkelijker optreden vanwege de aanwezigheid van een bevergraverij aan de landzijde, daarom wordt de bandbreedte van de invloed op de overstromingskans ingeschat op 1 tot 1000.

2.4.2.5 Uitspoeling door gat in bekleding

Ook voor dit faalmechanisme bestaat geen uitgewerkte rekenmethode met gekalibreerde faalkansen. Dat neemt niet weg dat berekeningen soms wel degelijk mogelijk zijn, zoals hierna aan de hand van een concreet praktijkvoorbeeld zal worden getoond. Voor de rest zal moeten worden afgegaan op, al dan niet ruwe, schattingen.

Binnendijkse bevergraverijen bij Wamel

Tijdens de droge zomer van 2022 zijn diverse beverholen aangetroffen in het Oude Wiel bij Wamel, zie Figuur 2.14 voor een overzicht van de locatie en Figuur 2.15 voor een gedeelte van de aangetroffen holen.



Figuur 2.14 Het Oude Wiel bij Wamel, met links op de achtergrond de Waal bij een lage waterstand (Kapinga, 2022).

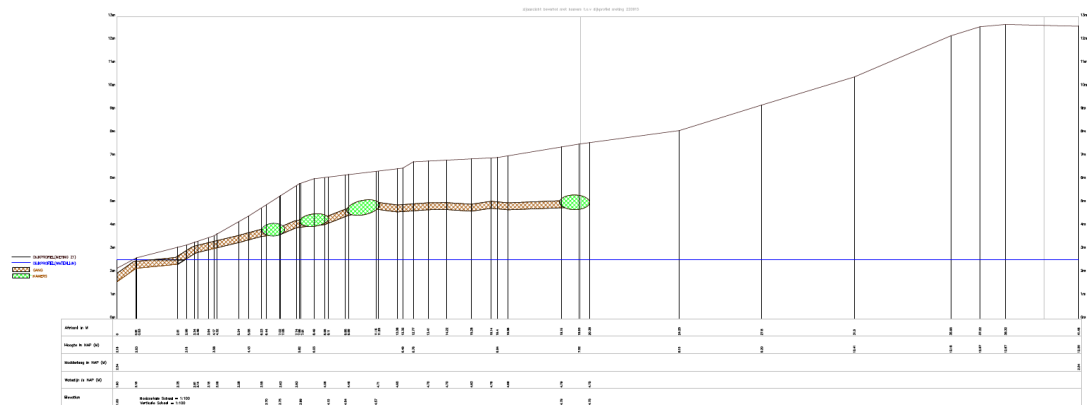


Figuur 2.15 Drooggevallen toegangen van beverholen in de oever van het wiel, aan de kant van de dijk (Kapinga, 2022).

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 2.16 en Figuur 2.17.



Figuur 2.16 Inmetingen van beverholen op een kaart met een gangbare waterstand in het Oude Wiel (Kapinga, 2022).



Figuur 2.17 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 toplaag van zeer siltige klei 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 watervoerend 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 watervoerend 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).

Analyse van het faalproces

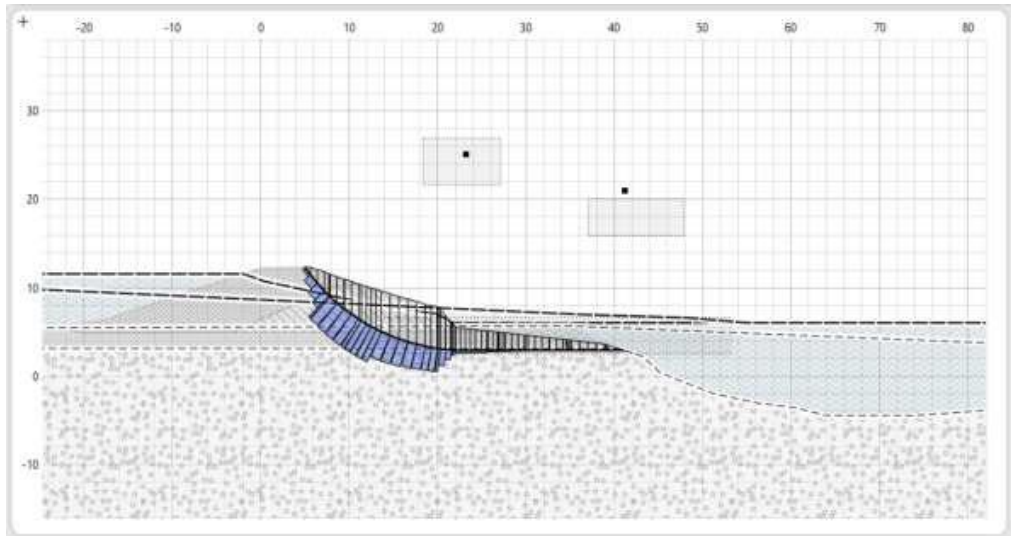
Door Kapinga (2022) is een analyse van het faalpad leidend tot overstroming gemaakt voor deze specifieke situatie voor een bevergraverij aan de landzijde in combinatie met een wiel. In deze analyse zijn ook de vervolprocessen expliciet benoemd. Het proces tot aan overstromen bestaat uit de volgende stappen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

1. Gangenstelsel trekt grondwater aan (in grotere mate dan al het geval is vanwege de onder de binnentoe aanwezige 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.

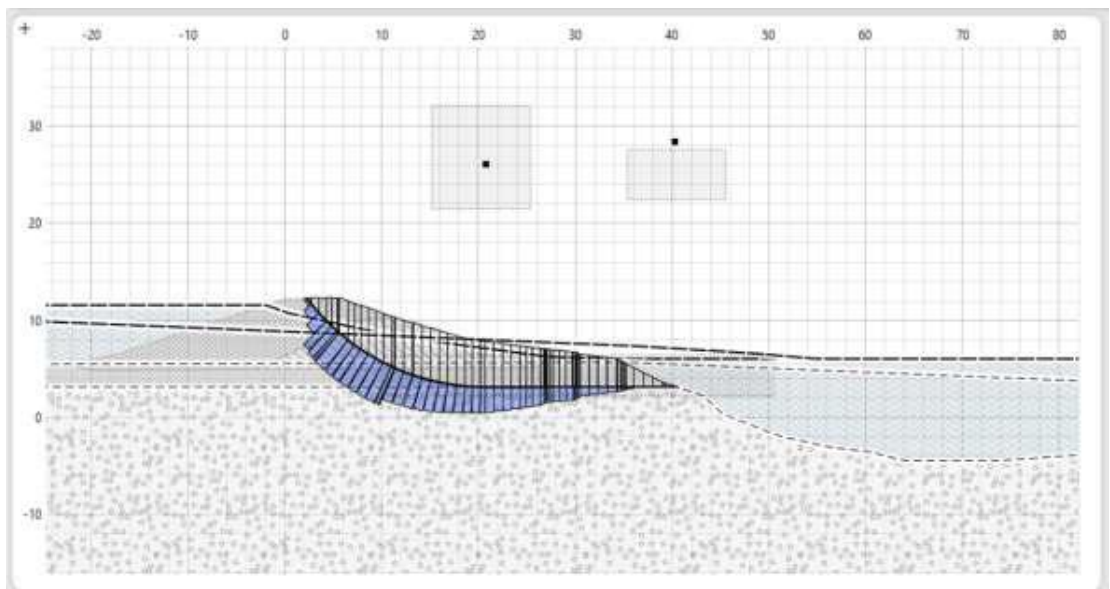
Doordat in stap 3 gerekend kan worden aan macrostabiliteit, kunnen in combinatie met de ingeschatte kansen van optreden van de overige stappen een boven- en ondergrens van de faalkans worden bepaald. Met de hiervoor vermelde kansen van optreden per stap, is voor stap 1, 2, 4 en 5 samen de ondergrens 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 2.18 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 2.19 en bedraagt de berekende faalkans op doorsnede-niveau $3,55 \times 10^{-9}$ per jaar (Kapinga, 2022).



Figuur 2.18 Maatgevend glijvlak voor binnenwaartse macrostabiliteit na verweking en uitspoeling van materiaal rond beverhol (Kapinga, 2022).



Figuur 2.19 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.

Zelfs de ondergrenswaarde heeft hiermee al een forse invloed op de beoordeling. Natuurlijk is dit naar verwachting een betrekkelijk extreme situatie, maar een nóg extremere situatie is niet uit te sluiten. Vandaar dat in Tabel 2.1 als bovengrens een waarde van 100 000 is aangenomen voor een bevergraverij aan de landzijde. Er zullen ook situaties voor kunnen

komen waarbij een beverhol geen noemenswaardige invloed heeft, vandaar dat de ondergrens is gesteld op een factor 1.

Bevergraverij aan de waterzijde

Bij een bevergraverij aan de waterzijde is een bandbreedte van 1 – 100 aangegeven. Dit heeft betrekking op zowel uitspoeling aan de waterzijde, dat vooral zal kunnen optreden bij een relatief snelle waterstandsval, waarbij het dijklichaam via de bevergang zal draineren en waarbij uitspoeling kan ontstaan. Dit zal niet veel bijdragen aan de overstromingskans, omdat een buitenwaartse afschuiving of instorting bij vallend water alleen tot een overstroming leidt als het water nog betrekkelijk hoog staat, of wanneer er binnen korte tijd, sneller dan een (nood)reparatie mogelijk is, een volgend hoogwater langskomt.

Een grotere bijdrage wordt verwacht van de situatie nog bij hoogwater, waarbij via de bevergang veel water binnendringt, wat zeker bij een zandige kern van de dijk tot een snelle toename leidt van de freatische lijn over een dijk lengte van al snel enkele tientallen meters. Wanneer er dan aan de landzijde sprake is van een zandige dijk, of een kleibekleding aanwezig is met één of meer doorgaande openingen ten gevolge van droogte of graverijen door andere dieren, zoals mollen of woelratten, dan kan daardoorheen uitspoeling ontstaan die tot falen (dus: overstroming van het achterland) kan leiden. Hoewel graverijen van kleinere dieren veelvuldig aanwezig zijn in dijktafsluitingen, is de kans op een scenario waarin een waterzijdige bevergraverij aanwezig is in de combinatie met een graverij van een kleiner dier aan de landzijde geen 100%, vandaar de begrenzing op een factor 100. Deze waarde kan op basis van uitgebreide veldwaarnemingen van de aanwezigheid van dergelijke graverijen naar boven of beneden kunnen worden bijgesteld – dit geldt overigens voor de meeste waarden in de tabel en zal niet bij iedere combinatie van dier en faalmechanisme worden herhaald.

Bevergraverijen aan beide zijden

Wanneer aan beide zijden van de dijk een bevergraverij aanwezig is, dan wordt een nadelige invloed op de overstromingskans onontkoombaar geacht, vandaar de ingeschatte bandbreedte van 10 tot 1 000 000. Hierbij is ook de bovengrens verhoogd ten opzichte van 'alleen' een bevergraverij aan de landzijde. 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. Een bij hoogwater gevulde bever zou bij Wamel zijn toevlucht kunnen zoeken bij het buitendijkse bosje (zie Figuur 2.14). 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 2.12. In aanvulling op een bevergraverij aan de landzijde bij dit talud zou hier vanuit de uiterwaarden een bij opkomend hoogwater daaruit gevulde bever onopgemerkt in het waterzijdig talud kunnen graven. Voor twee tot hiertoe gepresenteerde cases is dus al een realistisch scenario met graverijen aan beide zijden van de dijk te bedenken.

2.4.2.6 Piping (backward erosion piping)

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 terugschrijdende erosie, in Nederland vaak kortweg aangeduid met de term 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 dichterbij 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 5 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.

Door Van den Berg (2022a: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 §2.4.2.2 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 Figuur 2.12):

- 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.
- Binnendijks 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. Het voorkomen van nog aanzienlijk extremere situaties binnen Nederland wordt niet erg waarschijnlijk geacht, zodat deze waarde gelijk als een bovengrens kan worden gehanteerd.

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. Op andere locaties zou hiervoor een factor 10.000 denkbaar kunnen zijn.

Gegeven het daadwerkelijk voorkomen van bevergraverijen aan beide zijden van de waterkering, dan is eenvoudigweg vermenigvuldigen van beide bovengrenzen onrealistisch om als bovengrens voor deze gecombineerde situatie te hanteren, omdat een dergelijk extreme situatie hoogstwaarschijnlijk niet voorkomt. Een wezenlijk slechtere situatie als bij de Drielsedijk wordt niet waarschijnlijk geacht, zodat voor bevergraverijen aan beide zijden van de dijk een bovengrens van 10 000 000 aannemelijk wordt geacht voor het faalmechanisme piping. Uiteraard zijn dergelijke grote vermenigvuldigingsfactoren alleen mogelijk als de lokale overstromingskans zonder graverijen zodanig klein is dat de resulterende overstromingskans niet groter wordt dan 1.

2.4.3 Das

2.4.3.1 Kenmerken

Voor de beschrijving van de das is gebruik gemaakt van Larooij (2022:18-19+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 gelijk 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 2.20.



Figuur 2.20 Gedeelte van een dassenburcht in een regionale kering nabij Beilen. Meerdere graafpijpen zijn zichtbaar, maar lang niet alle graafpijpen van deze burcht staan afgebeeld. (eigen foto)

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.

2.4.3.2 Binnenwaartse macrostabiliteit

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 §2.4.2.2).

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 hier ook rekening mee houden. 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 maakt, 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 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 gemakkelijkere instroming aan de waterzijde de overstromingskans minder doen afnemen. De bandbreedte voor deze situatie is ingeschat op 0.1 – 1000.

2.4.3.3 Opdrukken deklaag

De bandbreedten voor dit faalmechanisme zijn eveneens geschat op basis van vergelijkingen met bevergraverijen (zie §2.4.2.3).

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.

2.4.3.4 Erosie deklaag

Bij erosie van de deklaag zijn primair de ervaringen met mollen het uitgangspunt (zie §2.4.4.4). De graafpijpen van dassen (zie bijvoorbeeld Figuur 2.20) 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 mollanden 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 rond de kruin.

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.

2.4.3.5 Uitspoeling door gat in 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 §2.4.2.5). Er is één situatie met waarnemingen bekend: bij het hoogwater van juli 2021 stroomde er nabij de Maasdijk bij Linden water uit een dassenburcht⁷, hierbij werd ook zand meegevoerd (Van Tilborg, 2021).

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 gevolg van golven. Dit komt 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 – 10 000 000.

2.4.3.6 Piping (backward erosion piping)

Ten aanzien van piping is de inschatting gemaakt dat dassen niet diep genoeg zullen graven om door de deklaag heen de pipinggevoelige zandlaag te bereiken, vanwege de doorgaans natte omstandigheden. Deze inschatting is mogelijk te optimistisch, met name in (extreem) droge perioden. Indien de pipinggevoelige zandlaag toch wordt bereikt, dan gebeurt dit onderin een dassenburcht en zal dit niet eenvoudig detecteerbaar zijn voorafgaand aan een hoogwater.

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 alle gevallen een geschikte noodmaatregel te kunnen zijn.

2.4.4 Mol

2.4.4.1 Kenmerken

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.⁸

⁷ <https://www.aanenmaas.nl/actueel/nieuws/2021/juli/dassenhol-linden-gedicht/>

⁸ [https://nl.wikipedia.org/wiki/Mol_\(dier\)](https://nl.wikipedia.org/wiki/Mol_(dier))

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).

2.4.4.2 Binnenwaartse macrostabiliteit

Een mollengang, 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 mollengang aan de waterzijde van een dijk zal de infiltratie van water in de dijk onder hoogwateromstandigheden bevorderen. De invloed zal meestal vrij klein zijn, maar met name bij mollengangen 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 30 kunnen toenemen (bandbreedte: 1 – 30).

Bij mollengangen aan beide zijden van een dijk zullen beide effecten elkaar ten dele teniet doen, de bandbreedte wordt geschat op 1 – 10.

2.4.4.3 Opdrukken deklaag

Voor het opdrukken van de deklaag geldt dat mollengangen die niet tot in een zandscheg of zandkern reiken, de invloed min of meer verwaarloosbaar zal zijn. Indien er wel sprake is van een mollengang die in verbinding staat met het zand, dan zal een mollengang aan de landzijde gunstig uitpakken, mogelijk zelfs een wel significante invloed hebben (bandbreedte 0.01 – 1). Mollengangen aan de waterzijde zullen minder impact hebben op dit faalmechanisme, de infiltratie van water via de mollengang(en) zou dan namelijk tot opdrukken van de deklaag aan de binnenzijde moeten leiden. De bandbreedte is ingeschat op 1 – 10. Wanneer er aan de beide zijden mollengangen zijn, dan kan de invloed van één zijde toch betrekkelijk klein zijn (bijvoorbeeld aan de waterzijde wel tot in de zandkern, maar aan de landzijde niet). De bandbreedte wordt dan geschat op 0.01 – 10.

2.4.4.4 Erosie deklaag

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 deklaag 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 mollen(gang) 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 mollen(gangen) 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 mollen(gangen) 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 mollen(gangen) 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 mollen(gangen) aan beide zijden van de dijk wordt een wat verhoogde factor verwacht, maar geen vermenigvuldiging van beide waarden: een bandbreedte van 1 – 1000.

2.4.4.5 Uitspoeling door gat in bekleding

De waarnemingen die ten grondslag liggen voor de schattingen van de invloed van mollen(gangen) op dit faalmechanisme zijn beschreven in §2.4.4.4. Voor mollen(gangen) aan de landzijde wordt de invloed op basis van de waarnemingen groter geschat als voor erosie van de deklaag, namelijk een factor 1 – 1000. Voor mollen(gangen) aan de waterzijde wordt de bandbreedte ingeschat op 1 – 100 en voor de situatie met mollen(gangen) aan beide zijden op 1 – 10 000.

2.4.4.6 Piping (backward erosion 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.

2.4.5 Vos en konijn

2.4.5.1 Kenmerken

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 zelfgegraven is, 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.⁹

⁹ [https://nl.wikipedia.org/wiki/Vos_\(dier\)](https://nl.wikipedia.org/wiki/Vos_(dier))

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 holen met een uitgebreid gangenstelsel, die meestal wordt aangelegd in een heuvel of een andere helling, zoals een duin.¹⁰ 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 holen in dijken, dit lijkt meer toevallig plaats te vinden.

2.4.5.2 Binnenwaartse macrostabiliteit

Vossen- en konijnenburchten in de buurt van de kruin van de dijk zullen waarschijnlijk slechts een beperkte impact hebben op de binnenwaartse macrostabiliteit. De drainage kan wat verbeteren, waardoor de overstromingskansen iets afnemen, anderzijds kan een kleine instabiliteit nabij de kruin ontstaan of kan een groter glijvlak gemakkelijker ontstaan door de verminderde schuifweerstand in de zone rond de kruin. De bandbreedte wordt ingeschat op 0.1 – 3.

Lagergelegen vossen- en konijnenholen komen in de onderste helft van het landzijdig dijktaalud wel voor (een voorbeeld is gegeven in Tsimopoulou & Koelewijn (2022)) en deze zullen dan een grotere invloed hebben op de drainage van de dijk, waardoor de overstromingskans ten gevolge van binnenwaartse macrostabiliteit afneemt. De bandbreedte wordt ingeschat op 0.01 – 1.

De inschatting is dat dergelijke holen aan de waterzijde, op de onderste helft van het talud, niet of nauwelijks voorkomen.

2.4.5.3 Opdrukken deklaag

Voor het opdrukken van de deklaag 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. Voor burchten rond de kruin zal de invloed vrij beperkt zijn, mede omdat voor een significante invloed er ook een significant hoge waterstand nodig is. De bandbreedte wordt ingeschat op 0.3 – 10.

Voor laaggelegen vossen- en konijnenholen zal de betere drainage de kans op dit faalmechanisme eventueel aanzienlijk verkleinen; de bandbreedte is ingeschat op 0.001 – 1.

Aan de waterzijde zijn laaggelegen vossen- en konijnenholen onwaarschijnlijk, daarom is daarvoor geen invloed op de overstromingskans ingeschat.

2.4.5.4 Erosie deklaag

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 deklaag 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 op een factor 3 gesteld. Mede vanwege de in het algemeen vrij hoge ligging, met name aan de waterzijde, geldt dat doorgaande schade grotendeels moet ontstaan tijdens de hoogste waterstandsniveaus, hetgeen leidt tot enige beperking van de bovengrens. De bandbreedte wordt al met al ingeschat op 3 – 1000.

¹⁰ https://nl.wikipedia.org/wiki/Europees_konijn

Voor lagergelegen graverijen aan de landzijde wordt eenzelfde bandbreedte ingeschat, dus 3 – 1000.

Aan de waterzijde zijn laaggelegen vossen- en konijnenholen onwaarschijnlijk, daarom is daarvoor geen invloed op de overstromingskans ingeschat.

2.4.5.5 Uitspoeling door gat in bekleding

De invloed van uitspoeling door een gat in de bekleding wordt als kleiner ingeschat, met name voor graverijen nabij de kruin. Dit komt zowel doordat de mogelijkheden voor de aanvoer van voldoende water om tot uitspoeling te leiden kleiner zijn, als dat dit faalmechanisme geen kans krijgt omdat in het algemeen bij dergelijke graverijen de erosie van de deklaag als een dominantier faalmechanisme wordt ingeschat. De bandbreedte wordt geschat op 1 – 100.

Voor lagergelegen vossen- en konijnenburchten aan de landzijde is er meer aanvoer van voldoende water denkbaar, de bandbreedte wordt daarom ingeschat op 1 – 1000.

Aan de waterzijde zijn laaggelegen vossen- en konijnenholen onwaarschijnlijk, daarom is daarvoor geen invloed op de overstromingskans ingeschat.

2.4.5.6 Piping (backward erosion piping)

Graverijen door vossen en konijnen nabij dijken zullen hoogstwaarschijnlijk alleen in extreem droge perioden voldoende diep kunnen reiken om door de deklaag in de ondergrond heen een pipinggevoelige zandlaag te bereiken. De kans daarop is klein te achten, terwijl de kans op detectie hiervan door de dijkbeheerder groot is, mede omdat de begroeiing onder dergelijke omstandigheden schaars zal zijn. Tijdige tegenmaatregelen, dus voordat een hoogwater optreedt, liggen in een dergelijke onwaarschijnlijke situatie voor de hand. De invloed op de overstromingskans gerelateerd aan piping wordt dan ook vrijwel nihil geacht.

2.4.6 Woelrat en muis

2.4.6.1 Kenmerken

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.¹¹

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 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.¹²

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

¹¹ <https://nl.wikipedia.org/wiki/Woelrat>

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

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.¹³

2.4.6.2 Binnenwaartse macrostabiliteit

De invloed van deze diersoorten wordt ingeschat als klein en hangt vooral samen met toegenomen infiltratie en drainage. Voor graverijen aan de landzijde wordt de invloed op de overstromingskans ingeschat op 0.1 – 1, voor graverijen aan de waterzijde op 1 – 3 en voor graverijen aan beide zijden hangt het af van wat dominant uitpakt – infiltratie of drainage – en wordt de bandbreedte ingeschat op 0.1 – 3.

2.4.6.3 Opdrukken deklaag

Voor het opdrukken van de kleilaag geldt eveneens dat infiltratie en drainage hiervoor bepalend zijn en worden bovendien dezelfde getalswaarden ingeschat, dus een bandbreedte van 0.1 – 1 voor landzijdige graverijen, 1 – 3 voor waterzijdige graverijen en 0.1 – 3 voor graverijen aan beide zijden.

2.4.6.4 Erosie deklaag

Voor erosie van de deklaag geldt op basis van waarnemingen bij overloop- en golfoverslagproeven dat er zelden enige erosie bij dergelijke kleine hopen is waargenomen (terwijl er in elk geval bij veel van de proeven in de voormalige Hedwige- en Prosperpolders 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.

2.4.6.5 Uitspoeling door gat in 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, hetgeen in vergelijking met graverijen door andere diersoorten overigens nog steeds betrekkelijk gering is.

2.4.6.6 Piping (backward erosion piping)

Voor deze diersoorten geldt in nog sterkere mate dat een invloed op de overstromingskans ten gevolge van piping uiterst klein mag worden geacht dan voor vossen en konijnen (zie §2.4.5.6). Daarom is hiervoor geen getalswaarde opgenomen in Tabel 2.2.

¹³ <https://nos.nl/artikel/2003804-muizenplaag-kost-friese-boeren-miljoenen>

3 Conclusies en aanbevelingen

3.1 Conclusies

Voor een vijftal faalmechanismen van dijken is een inschatting gemaakt van de invloed van graverijen door verschillende diersoorten (bevers, dassen, mollen, vossen en konijnen, en woelratten en muizen) op verschillende plaatsen in de dijk (land- of waterzijde, of beide zijden) op de lokale overstromingskans. De resultaten zijn vermeld in Tabel 3.1, waarbij met verschillende kleuren is aangegeven hoe de genoemde waarden zijn onderbouwd.

Tabel 3.1 *Geschatte bandbreedte van de invloed van dierlijke graverijen op de lokale overstromingskans per faalmechanisme voor primaire waterkeringen in Nederland – lichtgroen: op basis van waarnemingen en berekeningen, blauw: op basis van waarnemingen en redematies, donkergroen: alleen op basis van berekeningen, geel: alleen op basis van redematies, oranje: alleen op basis van vergelijking met andere diersoorten.*

Dier - graaflocatie	Binnenwaartse macrostabiliteit	Opdrukken deklaag	Erosie deklaag	Uitspoeling door gat in bekleding	Piping (BEP)
Bever					
- Landzijde	0.01 – 1	0.000 1 – 1	*	1 – 100 000	1 – 10 000
- Waterzijde	1 – 1000	1 – 1000	1 – 100	1 – 100	1 – 100 000
- Beide zijden	0.1 – 100	0.001 – 100	1 – 1000	10 – 1 000 000	1 – 10 000 000
Das					
- Landzijde	0.01 – 1	0.001 – 1	3 – 1000	1 – 100 000	*
- Waterzijde	1 – 10 000	1 – 10 000	3 – 1000	1 – 1000	*
- Beide zijden	0.1 – 1000	0.001 – 10 000	3 – 10 000	3 – 10 000 000	*
Mol					
- Landzijde	0.1 – 1	0.01 – 1	1 – 100	1 – 1000	*
- Waterzijde	1 – 30	1 – 10	1 – 100	1 – 100	*
- Beide zijden	1 – 10	0.01 – 10	1 – 1000	1 – 10 000	*
Vos en konijn					
- Nabij kruin	0.1 – 3	0.3 – 10	3 – 1000	1 – 100	*
- Laag, landzijde	0.01 – 1	0.001 – 1	3 – 1000	1 – 1000	*
- Laag, waterzijde	*	*	*	*	*
Woelrat en muis					
- Landzijde	0.1 – 1	0.1 – 1	1 – 3	1 – 10	*
- Waterzijde	1 – 3	1 – 3	1 – 3	1 – 3	*
- Beide zijden	0.1 – 3	0.1 – 3	1 – 3	1 – 30	*

De getalswaarden van de invloed op de lokale overstromingskans zijn groot; dit is inherent aan het rekenen met (bij voorkeur kleine) faalkansen, anders dan bij berekeningen waarmee bijvoorbeeld een stabiliteitsfactor wordt berekend, waarbij veranderingen van orde 30% vaak al groot zijn.

De genoemde waarden worden voornamelijk toepasbaar geacht voor Nederlandse primaire waterkeringen, waarbij geldt dat voor uitzonderlijk grote dijken de meest extreme waarde niet benaderd zullen worden, terwijl deze bij een enkele dijk met bescheiden afmetingen wellicht toch overschreden zullen worden. Dit komt doordat de graverijen slechts in beperkte mate meeschalen met de schaal van de dijk. Ook geldt dat voor dijken met een zandkern en een kleibekleding gemakkelijk grotere waarden gerealiseerd zullen worden, met name als de bekleding betrekkelijk dun is. Voor dijken die volledig uit klei bestaan, zal de invloedsfactor in het algemeen dicht bij 1 liggen.

Toepassing op andere dijken, zoals regionale waterkeringen, is met enige voorzichtigheid ook mogelijk. Hierbij zal vooral rekening moeten worden gehouden met de schaal van de dijk. Als de dijk qua afmetingen en opbouw vergelijkbaar is met de gemiddelde primaire waterkering, dan zal toepassing zonder meer mogelijk zijn, anders is een vertaalslag noodzakelijk.

Een vertaalslag is ook nodig voor de toepassing voor andere diersoorten. Hierbij zal per faalmechanisme bedacht kunnen worden in hoeverre de effecten van de graverijen door het betreffende dier lijken op de effecten van de graverijen van de genoemde diersoorten. De algemene werkwijze blijft echter hetzelfde:

- Welk effect heeft de graverij op de waterremmende lagen, zoals de kleibekleding?
- Wat is de toename van de indringing van buitenwater in de dijk via de graverij, ook beschouwd in de lengterichting van de dijk?
- Wat heeft dit voor effect op het beschouwde mechanisme?

Uit de tabel komt naar voren dat met name voor bevers, maar ook voor dassen en in veelal wat mindere mate mollen, vossen en konijnen er een (zeer) significante invloed van de graverijen van deze dieren op de overstromingskans mogelijk is. Tijdige detectie is daarom van groot belang. Gelet op de beperkingen van de thans gehanteerde detectiemethoden, in hoge mate visuele inspectie, is verbetering van de detectiemogelijkheden noodzakelijk.

3.2 Aanbevelingen

De gepresenteerde tabel geeft een eerste onderscheid naar welke soorten graverijen de grootste impact hebben, uitgesplitst naar faalmechanisme. Ook is duidelijk welke soorten graverijen naar verwachting een relatief kleine impact hebben. Hiermee kan risicogestuurd vervolgonderzoek worden ingezet.

Dit vervolgonderzoek betreft een tweetal verschillende vormen van onderzoek:

- Onderzoek op vooral de meer kwetsbare locaties om daar tot een goede inventarisatie te kunnen komen en gerichte maatregelen te kunnen nemen. Hierbij vormen de huidige beperkingen in de detectiemethoden een struikelblok.
- Onderzoek gericht op de verbetering van kennis en inzicht in de problematiek, waar ook aspecten als de verbetering van detectiemethoden en een nadere inperking van de nu soms zeer grote bandbreedtes een plaats hebben.

Voor de inperking van de bandbreedtes zal het al helpen om de tabel te splitsen in een deeltabel voor dijken met een zandkern en een kleibekleding, een deeltabel voor dijken die geheel uit klei bestaan, en andere deeltabellen voor andersoortige samenstellingen. Ook kan een uitsplitsing naar het formaat van de kering en/of de hoogwaterduur worden gemaakt. Dergelijke uitsplitsingen zullen ook helpen voor de prioritering van het hiervoor genoemde vervolgonderzoek.

Een specifieke aanbeveling betreft het benutten van de internationaal beschikbare kennis met betrekking tot uitspoeling uit een gat, om dit aspect van het faalmechanisme 'microinstabiliteit' dat zeer relevant kan zijn bij dierlijke graverijen concreter te kwantificeren.

Deze rapportage geeft inzicht in de potentiële invloed van een dierlijke graverij in een dijk op de overstromingsveiligheid, *gegeven dat zo'n graverij aanwezig is*. Daarmee biedt deze rapportage de concrete invulling van één aspect uit het veiligheidsraamwerk voor dierlijke graverijen in waterkeringen (Van den Berg, 2022b), wat gebaseerd is op de systematiek zoals die is gevolgd bij kabels en leidingen en niet-waterkerende objecten en geaccordeerd is door het ENW. Deze concretisering van het veiligheidsraamwerk biedt ook zicht op de consequenties van realistische graverijen. Het raamwerk geeft aanknopingspunten om hier

een uitvoerbaar handelingsperspectief aan te koppelen, waarbij beheermaatregelen, noodmaatregelen en/of versterkingsmaatregelen allemaal tot de mogelijkheden kunnen behoren om tot een voldoende veilige waterkering te komen.

Referenties

- Blinde et al., 2022. Jan Blinde, Alexander van Duinen, Han Knoeff & Alfons Smale, *Raamwerk voor analyse overstromingskans geotechnische instabiliteit van dijken*, conceptrapport, projectnummer 11208057-032, Deltares, Delft, 5 oktober 2022, 40 pp.
- De Boer, 2021. Abel de Boer, persoonlijke mededeling, Hedwigepolder, juni 2021.
- 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
- 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. Regimont & H-P. Trömel, *Biberbaue im Oderdeich*. *Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg*, **13** (1): 22-26.
- ICOLD, 2017. *Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations*. International Commission on Large Dams, Paris, 2017.
- 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.
- Kapinga, 2022. Sander Kapinga, *Invloed dierlijke graverijen op waterveiligheid*, presentatie op Landelijke Ontwerp- en Beoordelingsdag, Utrecht, 1 december 2022, 18 sheets.
- Klerk, 2022. Wouter Jan Klerk, *Decisions on life-cycle reliability of flood defence systems*, proefschrift, Technische Universiteit Delft, Delft, 28 maart 2022, 269 pp, doi.org/10.4233/uuid:877bed45-d775-40bb-bde2-d2322cb334f0.
- Koelewijn, 2021. *Waargenomen invloed van mollengangen op dijkveiligheid*, rapport, Interreg 2 Zeeën project Polder2C's, 5 mei 2021.
- Koelewijn et al., 2022. André R. Koelewijn, Stephan J.H. Rikkert, Patrik Peeters, Davy Depreiter, Myron van Damme & Wouter Zomer, *Overflow tests on grass-covered embankments at the Living Lab Hedwige-Prosperpolder: an overview*, *Water* **14**:2859, 13 September 2022, 13 pp., doi.org/10.3390/w14182859.
- Larooij, 2022. Alieke Larooij, *Risicoanalyse graafschade waterkeringen door zoogdieren bij waterschap Aa en Maas, "Van Aandoenlijk tot Zorgen"*, Bachelorscriptie Toegepaste Ecologie, Van Hall Larenstein, Arnhem, 13 juni 2022, 66 pp.

- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2015. *Kader Zorgplicht Primaire Waterkeringen*, versie 2, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Den Haag, maart 2015, 2 pp.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016a. *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Sterkte en Veiligheid*, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Den Haag, 2016.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016b. *Handreiking ontwerpen met overstromingskansen, Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansnormen*, Versie OI2014v4, december 2016, 71 pp.
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2021a. *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit, WBI 2017*, versie 4, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 28 mei 2021, 155 pp.
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2021b. *Schematiseringshandleiding grasbekleding, WBI 2017*, versie 5, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 28 mei 2021, 153 pp.
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2022. *Bijlage XXXIIB bij de artikelen 12.2b en 12.2c (Randvoorwaarden beoordeling primaire waterkeringen)*, concept, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 28 februari 2022, 16 pp.
- Pater, 2019. W.H. Pater, *Verkenning beverschade aan dijken*, rapport, State of the Art Engineering, 26 juni 2019, 11 pp.
- Paul & Slaven, 2009. Dave Paul & Chris Slaven, *Potential failure modes of the Truckee Canal failure at Fernley, Nevada*, Proceedings 29th Annual USSD Conference, Nashville, 20-24 April 2009, pp. 947-968.
- Popelier & Dijkstra, 2021. Ton Popelier & Vilmar Dijkstra, *Hoogwater en dassenholen in de Maasdijk*, notitie N2021.028, Zoogdiervereniging, Nijmegen, 20 augustus 2021, 11 pp.
- 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.
- Van Tilborg, 2021. Rick van Tilborg, persoonlijke mededeling, Prosperpolder, najaar 2021.
- 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.
- UvW, 2020. *Beverprotocol voor de waterbeheerders in de provincies Gelderland en Zuid-Holland*, Unie van Waterschappen, januari 2020, 68 pp.
- Van Damme & Hardeman, 2022. Myron van Damme & Bianca Hardeman, *Raamwerk voor analyse overstromingskansen dijkerosie*, conceptrapport, projectnummer 11208057-049, Deltares, Delft, 21 november 2022, 28 pp.
- Van den Berg, 2022a. Frans van den Berg, *Effect bevergraverij op faalmechanismen dijken*, rapport 11207915-001-GEO-0002, Deltares, Delft, 20 mei 2022.
- Van den Berg, 2022b. Frans van den Berg, *Veiligheidsraamwerk, dierlijke graverijen in waterkeringen*, rapport 11208018-002-GEO-0001, Deltares, Delft, december 2022.

- Van den Berg & Koelewijn, 2022. Van den Berg, F.P.W., Koelewijn, A.R, *Degradatie van dijken door dieren en droogte, Uitwerking observaties graverijen en scheuren & handelingsperspectief*, rapport 11208034-002-ZWS-0001, Deltares, Delft, 28 november 2022.
- Van der Baan, 2022. Jan van der Baan, *Wiki Noodmaatregelen, Hoe houden we Nederland droog?* presentatie bij Workshop Wiki Noodmaatregelen, Noodmaatregelen bij graverijschade van bevers, Zaltbommel, 26 oktober 2022, 26 sheets.
- 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.

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