

Effect bevergraverij op faalmechanismen dijken



Effect bevergraverij op faalmechanismen dijken

Effect bevergraverij op faalmechanismen dijken

Opdrachtgever	Waterschap Rivierenland
Contactpersoon	Jasmijn van Eeden
Referenties	
Trefwoorden	Faalpaden, dierlijke graverij, bevers, faalmechanismen, dijken

Documentgegevens

Versie	2.0
Datum	20-05-2022
Projectnummer	11207915-001
Document ID	11207915-001-GEO-0002
Pagina's	34
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Frans van den Berg	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Frans van den Berg	André Koelewijn	Harm Aantjes	
2.0	Frans van den Berg 	André Koelewijn 	Harm Aantjes 	

Samenvatting

Dieren zoals de mol, bever, konijn en muskus- en beverrat graven gangen in de (afdekkende kleilaag van de) waterkeringen. Door Waterschap Rivierenland worden diverse beheer- en herstelmaatregelen toegepast om schade te beperken. Met name graverij van bevers is lastig te beheersen, mede doordat de bever een beschermde diersoort is en de toegang tot diens hol doorgaans onder water ligt, waardoor deze slecht te detecteren is.

Gevraagd is om het aanvullend risico (effect) van bevergraverij op de faalmechanismen van de dijken te bepalen. Hierbij is gebruik gemaakt van een case in het beheergebied van het Waterschap, te weten een locatie langs de Drielsedijk ten zuidwesten van Arnhem.

Voor deze locatie is voor de volgende faalmechanismen een onderzoek uitgevoerd:

- (gebrek aan) Hoogte.
- Macrostabieliteit.
- Interne erosie (microstabieliteit).
- Piping.
- Falen (gras)bekleding.

Dit onderzoek is gedaan door het beschrijven van mogelijke optredende situaties per faalmechanisme, het opstellen van een faalpadenanalyse inclusief kennisvragen en kwalitatieve analyse. Voor zo ver mogelijk is ook een kwantitatieve bepaling voor de faalmechanismen uitgevoerd.

Hierna zijn de resultaten per faalmechanisme beschreven.

(gebrek aan) Hoogte

Door de bevergraverijen is het mogelijk dat door de gangen of hopen het talud of de kruin verzakt. Dit speelt voornamelijk bij hoogwater en/of zandkernen. Beide gevallen komen bij de Drielsedijk voor. Voor dit mechanisme is een faalpad uitgewerkt, waarbij de volgende kennisvragen te onderkennen zijn:

- Hoeveel moet de waterstand stijgen en hoe groot moet de graverij zijn voordat hopen en gangen instorten?
- Hoeveel moet de kruin verlaagd worden voordat overloop/overslag optreedt?
- In welke mate neemt de kans op falen door overloop/overslag bij dit profiel concreet toe bij een lagere kruinhoogte?
- Welke (nood)maatregelen kunnen worden getroffen en wanneer?

Macrostabieliteit binnenwaarts

Voor STBI is zowel bevergraverij aan de binnenzijde als aan de buitenzijde van de dijk beschouwd. Per dijkzijde is een beschouwing uitgevoerd naar een graafgang in de teen, een graafgang net onder MHW en geen graafgang. Het effect van een combinatie van graafgangen (zowel aan de binnen- als buitenzijde) is bepaald middels stabiliteitsberekeningen van de case aan de Drielsedijk.

Indien de ingang van een bevergang nabij de buitenteen aanwezig is en in het binnentalud geen graverijen nabij de binnenteen zijn, volgt dat de invloed van een bevergraverij bij MHW significant is op macrostabieliteit in negatieve zin. Voor de doorgerekende situatie scheelt dit bijna een kwart in de berekende stabiliteitsfactor, hetgeen al snel één tot twee orden van grootte kan schelen in de faalkans (dus pakweg 10 tot 100 keer zo veel kans op falen),

hetgeen ingrijpend is. Indien er in voornoemd geval ook aan de binnenteen een graverij is zal deze drainerend werken en zal er geen significante invloed op de binnenwaartse stabiliteit zijn. Voor andere faalmechanismen kan het dan wel een rol van betekenis spelen, met name voor interne erosie (microstabiliteit).

Bij een graverij net onder het MHW in het buitentalud is er een licht negatieve invloed op STBI als er in het binnentalud geen graverijen nabij de teen zijn. Indien er zowel in het buitentalud als aan de binnenteen een graverij is, zal deze drainerend werken en zal dit een licht positieve invloed hebben op de binnenwaartse stabiliteit. Op andere faalmechanismen kan het nog wel een rol van betekenis spelen.

Indien er geen graverij in het buitentalud is, maar wel een hoger gelegen graverij aan de binnenzijde, zal dit drainerend werken en zal dit een licht positief effect hebben op de binnenwaartse macrostabiliteit. Indien er geen graverij in het buitentalud is, maar wel aan de binnenteen een graverij is, zal deze drainerend werken en zal dit aanvullend een licht positieve invloed hebben op de binnenwaartse stabiliteit.

Uit het opgestelde faalpad volgen de volgende kennisvragen:

- Hoe de dierlijke graverijen te detecteren?
- Hoeveel wordt de freatische lijn beïnvloed door graverijen en wat is het effect op macrostabiliteit?

Macrostabiliteit buitenwaarts

Voor macrostabiliteit buitenwaarts (STBU) geldt dat er geen verslechtering optreedt bij een buitenwaartse bevergraverij, er wordt immers een berekening gemaakt met een val na hoogwater. Indien bij een buitenwaartse bevergraverij aan de binnenzijde een graverij aanwezig is, kan dit een drainerend effect hebben en leiden tot een positief effect op de STBU.

Interne erosie (microstabiliteit)

Wanneer het waterpeil in de rivier de ingang van een hol in het buitenwaartse talud overschrijdt, stroomt het water het hol in en vult dit met water. Dit leidt tot een snellere verhoging van de freatische lijn binnen de dijk en kan leiden tot het afdrukken van de bekleding aan de binnenzijde.

Bij graverijen aan de buitenzijde én ook aan de binnenzijde in deze zandige dijk treedt er mogelijk uitspoeling op vanuit de binnendijkse graverij. Deze vorm van interne erosie is echter niet beschreven in het WBI (Wettelijk Beoordelings Instrumentarium) en is ook in de internationale vakliteratuur slechts met weinig concrete formules beschreven. Wel kan gesteld worden dat deze situatie een verslechtering ten opzichte van de situatie zonder graverijen zal opleveren.

Piping

Een hol of ingang van een burcht aan de buiten- of binnenzijde van de dijk leidt tot verkorting van de kwelweglengte wanneer de deklaag boven de pipinggevoelige zandlaag wordt doorgraven. Voor dit mechanisme is een tweetal faalpaden uitgewerkt. Ten behoeve van een kwantitatieve analyse is het in dit stadium alleen mogelijk om een eenvoudige inschatting te maken door de verkorting van de kwelweglengte te bepalen ten gevolge van dierlijke graverijen. Het is mogelijk dat hierdoor een afname van ca. 75 [m] kwelweglengte kan optreden. Dit is een afname van circa 55% ten opzichte van de situatie zonder graverijen, waardoor er bij een gelijkblijvend verval een grotere kans op piping is.

Net naast de locatie van de case van de Drielsedijk is een aanvullende berekening uitgevoerd, waarbij een bevergraverij wordt gesimuleerd in de buitenteen van de dijk. Hierdoor zal een verkorting van de kwelweglengte optreden. De resultaten van deze faalkansberekening zijn:

Huidige situatie: Kwelweglengte = 195[m], $\beta = 5,35$, met een overschrijdingskans van 1:22.000.00

Situatie met bevergraverij: Kwelweglengte 100 [m], $\beta=2,67$ met een overschrijdingskans van 1:264. Dit is een aanzienlijke toename in de faalkans ten gevolge van de bevergraverij in de buitenteen van de dijk.

Falen (gras)bekleding

Zoals reeds bij microstabiliteit genoemd is, kunnen holen buitendijks leiden tot afdrukken van de kleibekleding binnendijks doordat de freatische lijn in de zandkern sneller zal stijgen, waardoor gemakkelijker verweking van het binnentalud ontstaat of afschuiving van het binnentalud door verlaging van de korreldruk (en daarmee verlies van schuifsterkte) en toename van het gewicht. Het gevolg is voortschrijdende erosie mede via het hol/de holen gecombineerd met toenemende kwel.

Voor dit mechanisme is een faalpad uitgewerkt, waarbij de volgende kennisvraag naar voren is gekomen: hoeveel wordt de freatische lijn beïnvloed door graverijen en wat is het effect op erosie?

De grasbekleding van het talud, in de onderhavige studie naar de Drielsedijk, kan door de bevergraverij beschadigd worden. Normaliter zal een bevergraverij aanvagen net onder de waterlijn van een teensloot, zodat de grasbekleding niet wordt beschadigd. Echter in gevallen van hoogwater is het mogelijk dat een bever het halverwege het talud graaft en zodoende de grasmat beschadigt. Tevens is het mogelijk dat door instortende gangen en nestkommen, de bovenliggende grasmat beschadigd kan worden.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Introductie	8
1.2	Doel	8
1.3	Uitgangspunten	8
1.4	Aanpak	8
2	Analyse	10
2.1	Inleiding	10
2.2	Beschrijving bevergraverij	11
2.3	Case Drielsedijk	12
2.4	(Gebrek aan) hoogte	13
2.5	Macrostabieliteit	14
2.6	Interne erosie / microstabieliteit	19
2.7	Piping	21
2.8	Falen (gras)bekleding	25
3	Conclusies en aanbevelingen	26
3.1	Conclusies	26
3.2	Aanbevelingen	28
	Literatuur	30
A	Effect bevergraverij op faalkans piping	32

1 Inleiding

1.1 Introductie

Dieren zoals de mol, bever, konijn en muskus- en beverrat graven gangen in de (afdekkende kleilaag van de) waterkeringen. Door WSRL worden diverse beheer- en herstelmaatregelen toegepast om schade te beperken. Met name graverij van bevers is lastig te beheersen, mede doordat de bever een beschermde diersoort is en de toegang doorgaans onder water ligt, waardoor deze slecht te detecteren is. Binnen WSRL rijst de vraag wat het aanvullend risico (effect) is van bevergraverij op de faalmechanismen van de dijken. In het kader van kennisontwikkeling wil WSRL met behulp van een faalpadanalyse, inclusief verkennende berekeningen, het effect van graverij beter in context plaatsen en het effect van graverij op verschillende faalmechanismen van de dijk ook kwantitatief inschatten.

In de huidige situatie worden preventieve maatregelen tegen bevergraverij alleen genomen als het dijktraject t.g.v. de huidige stabiliteitstoetsing niet voldoet en moet worden versterkt. Afhankelijk van de uitkomst van het onderzoek, kan blijken dat bevergraverij leidt tot stabiliteitsproblemen (ook voor trajecten die volgens de huidige toetsingscriteria voldoen). Dit kan leiden tot een nieuwe inzichten m.b.t. de huidige toetsingscriteria.

1.2 Doel

Door middel van een faalpadanalyse wil WSRL inzicht krijgen in de risico's van bevergraverij op de faalmechanismen van de dijk. Voor het faalmechanisme Macrostabiliteit zal een kwantitatieve analyse gebaseerd op berekeningen, waarbij de (eventuele) afname van de veiligheid van de dijk door bevergraverij kwantitatief wordt aangegeven.

WSRL wil in deze analyse focussen op bevergraverij in de buitenteen / het buitentalud van de dijk. Aan de binnenzijde is bevergraverij minder vaak aanwezig.

Onderzoeksvraag

Wat is het effect van bevergraverij aan de buitenteen op de verschillende faalmechanismen van de dijken (in welke mate draagt bevergraverij bij aan falen van de dijk)?

1.3 Uitgangspunten

Bij het opstellen van het rapport zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- De analyse is d.m.v. een faalpadanalyse uitgevoerd.
- De analyse leidt tot voor zo ver mogelijk kwantitatieve resultaten.
- De analyse is uitgevoerd voor een representatieve doorsnede van een primaire waterkering in het beheergebied van WSRL. Dit profiel is door WSRL aangeleverd.
- De analyse is gefocust op graverij door bevers.

1.4 Aanpak

Aan de hand van het gekozen representatieve dwarsprofiel in het beheergebied van WSRL zijn de verschillende faalmechanismen voor waterkeringen doorlopen die worden beïnvloed door buitendijkse bevergraverij.

Het betreft de volgende faalmechanismen:

- (gebrek aan) Hoogte.
- Macrostabieleit.
- Interne erosie (microstabieleit).
- Piping.
- Falen (gras)bekleding.

2 Analyse

2.1 Inleiding

Beschrijving faalpadanalyse (generieke gebeurtenissenboom)

Om tot een aanpak te komen van een inschatting van de overstromingskans, wordt vaak gebruik gemaakt van gebeurtenissenbomen oftewel faalpaden. Een faalpad beschrijft een opeenvolging van gebeurtenissen die leiden tot een overstroming. Bij deze methode geldt dat alle gebeurtenissen in het faalpad moeten optreden om een overstroming te veroorzaken. De opeenvolging van gebeurtenissen (knopen) kan worden weergegeven in een gebeurtenissenboom. In de *Handreiking Niet Waterkerende Objecten in de Veiligheidsanalyse van primaire waterkeringen* [van den Ham et al, 2021] worden de indirecte mechanismen die tot falen kunnen leiden beschreven middels een faalpad. Een algemeen voorbeeld voor NWO's is opgenomen in Figuur 2.1.



Figuur 2.1 Generieke gebeurtenissenboom voor het beoordelen van een waterkering met invloed van een falend NWO en beschouwing van de gelijktijdigheid van NWO-falen en hoogwater [van den Ham et al., 2021]

Gesteld kan worden dat graverijen in waterkeringen ook als een indirect faalmechanismen beschouwd kan worden.

Analoog aan deze gebeurtenissenboom kan het algemene faalpad voor een graverij in een waterkering worden beschreven:

- Graverij treedt op en leidt tot schade aan de kering.
- Schade wordt op tijd opgemerkt en hersteld voordat een hoogwater optreedt.
- Schade heeft invloed op een direct mechanisme.
- Directe mechanisme met schade heeft een significante bijdrage aan de overstromingskans.

In [Koelewijn et al., 2020] is al een aantal faalpaden beschreven voor graverijen. Deze zijn als basis gebruikt voor de in onderhavig rapport beschreven case. Uit de faalpaden volgen diverse kennisvragen, die in een later stadium mogelijk nader uitgewerkt kunnen worden.

2.2 Beschrijving bevergraverij

De bever is een zoogdier die gangen en nestholen in waterkeringen graaft. In de onderstaande tabel (Figuur 2.2) uit het beverprotocol [UvW, 2020] is een overzicht gegeven van de potentiële impact van graverij door verschillende diersoorten. Van de gravende diersoorten in waterkeringen geeft de bever de hoogste waarde op alle onderscheiden parameters.

	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 nestkom [cm]	30	60	80	35	40	60	10	5	

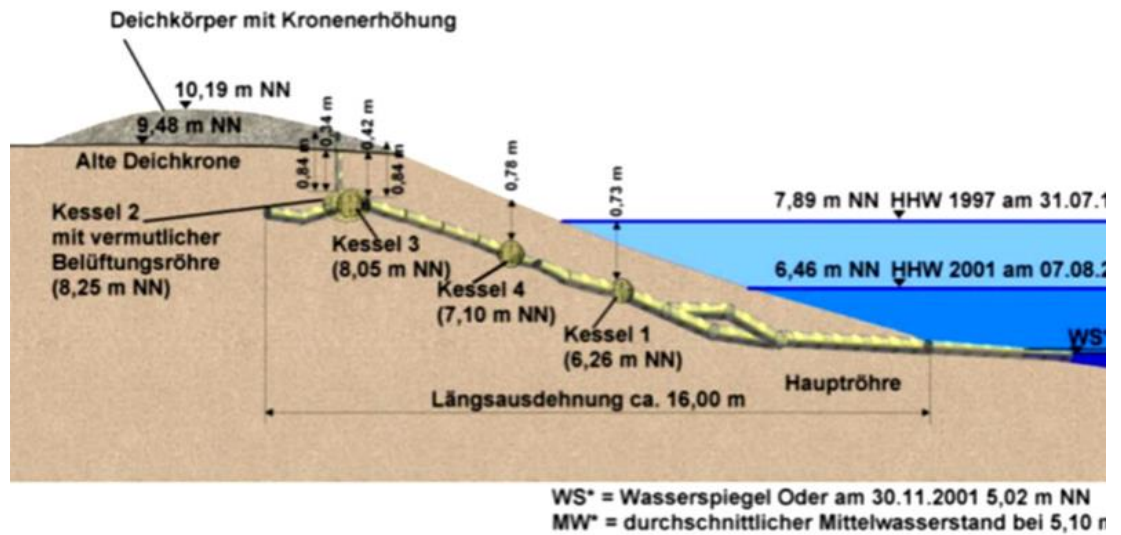
Figuur 2.2 Overzicht potentiële impact van graverij door verschillende diersoorten (bron: P. Damen, 2017, niet gepubliceerde data, opgenomen in [UvW, 2020])

Uit deze tabel worden de parameters gehaald voor de beschouwing van de invloed van de bevergraverij op de verschillende faalmechanismen:

- Gemiddelde diameter graafpijp: 0,45 [m].
- Gemiddelde diameter nestkom: 0,80 [m].

Uit een overleg met de dijkbeheerder Wim Cornelisse (Waterschap Rivierenland) blijkt dat er ook regelmatig nestkommen aangetroffen zijn met een afmeting van 1,5 [m²] vloeroppervlak en een hoogte van 1 [m].

Voor de beschouwing van de invloed van de bevergraverij is ook de geometrie van het gangenstelsel van belang. In Figuur 2.3 is een schematische weergave gegeven van een gangenstelsel vervaardigd door bevers, waarbij verschillende nestkommen op verschillende hoogten zijn aangebracht. Dit betreft een gangenstelsel zoals dat langs de Elbe in Duitsland daadwerkelijk is aangetroffen.



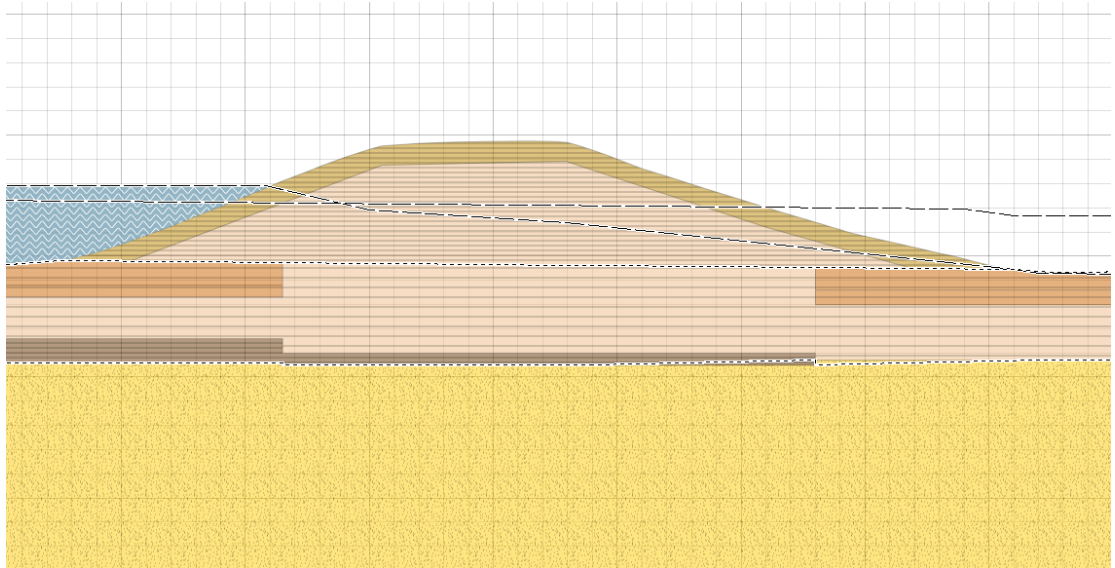
Figuur 2.3 Geometrie van een uitgegraven bever gangenstelsel aan de buitenzijde van de kering [Hahmann, 2004]

2.3 Case Drielsedijk

Door het Waterschap is profiel DV-45-13.38 ter beschikking gesteld om de invloed van bevergraverij vaststellen. Dit profiel bevindt zich op het traject Sterrenschans – Heteren op de Drielsedijk langs de Nederrijn. Profiel DV45 ligt in dijkvak 45 langs het traject Sterrenschans – Heteren, maatgevende profiel is van de locatie bij dijkpaal DR172.+09.0. Zie Figuur 2.4 voor de locatie en voor het dwarsprofiel Figuur 2.5.



Figuur 2.4 Locatie van dwarsprofiel DR172.+09.0 weergegeven in de rode cirkel



Figuur 2.5 Dwarsprofiel DR172.+09.0 (tijdens MHW) (de afstand tussen 2 gridlijnen bedraagt 1 m)

De kentallen van dit dwarsprofiel zijn:

- Hoogte teen buitendijks: 9,8 [m +NAP].
- Hoogte teen binnendijks: 9,4 [m +NAP].
- Kruinhoogte: 14,7 [m +NAP].
- Kruinbreedte: ca. 7,5 [m].
- Waterstand onder dagelijkse omstandigheden 8,8 [m + NAP].
- Maatgevend Hoogwater 12,9 [m +NAP].

De kering heeft een zandige kern en een kleibekleding. In algemene zin betekent deze opbouw dat er sprake is van een solide dijk, zolang de zandkern goed gedraineerd is en de kleibekleding intact blijft. De globale afmetingen van dit profiel zijn vergelijkbaar met het profiel van de Elbedijk (Figuur 2.3).

2.4 (Gebrek aan) hoogte

Impact op mechanisme

Door de bevergraverijen is het mogelijk dat door de gangen of hopen het talud of de kruin verzakt. Dit speelt voornamelijk bij hoogwater en/of zandkernen. Beide gevallen komen bij de Drielsedijk voor.

Faalpadanalyse

Voor dit mechanisme worden de volgende faalpaden afgeleid voor de aanwezigheid van bevers in de Drielsedijk, zie Figuur 2.6. Hierbij wordt er als stap 0 van uitgegaan dat graverijen aanwezig zijn. Hierbij spelen meerdere kennisvragen een rol. Deze zijn in het faalpad vermeld.



Figuur 2.6 Faalpad bevergraverij op (gebrek) aan hoogte

Toelichting kennisvragen:

- 2: Afhankelijk van eigenschappen als de cohesie van de materialen waarin de graverijen zich bevinden, zal een graverij gemakkelijker instorten. In schoon zand zal dit sneller gebeuren dan in stijve klei.
- 4: Vanuit het ontwerp (of de beoordeling) is het verband tussen de kans op een zekere waterstand en de benodigde kruinhoogte voor voldoende veiligheid bekend. Een lokale verlaging van de kruinhoogte leidt tot een hogere faalkans, zowel door overloop/overslag als door tweede-orde effecten als de invloed van meer overloop/overslag op binnenwaartse macrostabiliteit.

Deze kennisvragen kunnen mogelijk in een later stadium verder worden uitgewerkt.

Kwantitatieve analyse

Zoals uit de faalpadanalyse volgt zijn overslag en overloop de van belang zijnde faalmechanismen voor het gebrek aan hoogte. Overslag wordt later in dit hoofdstuk behandeld in paragraaf 2.8. Door het instorten van de gangen en hopen kan er een gebrek aan hoogte ontstaan. De huidige kruinhoogte is 14,7 [m+ NAP]. Door het instorten van gangen en hopen wordt een maximale zakking van de kruin verwacht van max. 0,2 - 0,3 [m] over een breedte van ca. 3 [m]. De hoogste verwachte waterstand waarmee gerekend is, bedraagt volgens opgave van WSRL 13,41 [m + NAP] met een kans van voorkomen van $3 \cdot 10^{-4}$. Hierdoor is de kans op overloop door instortende hopen/ graverijen vrijwel nihil. In gevallen dat er wel overloop is door graverijen, dan zijn deze locaties met een minimale omvang snel te herstellen middels noodmaatregelen door bijvoorbeeld het aanbrengen van zandzakken.

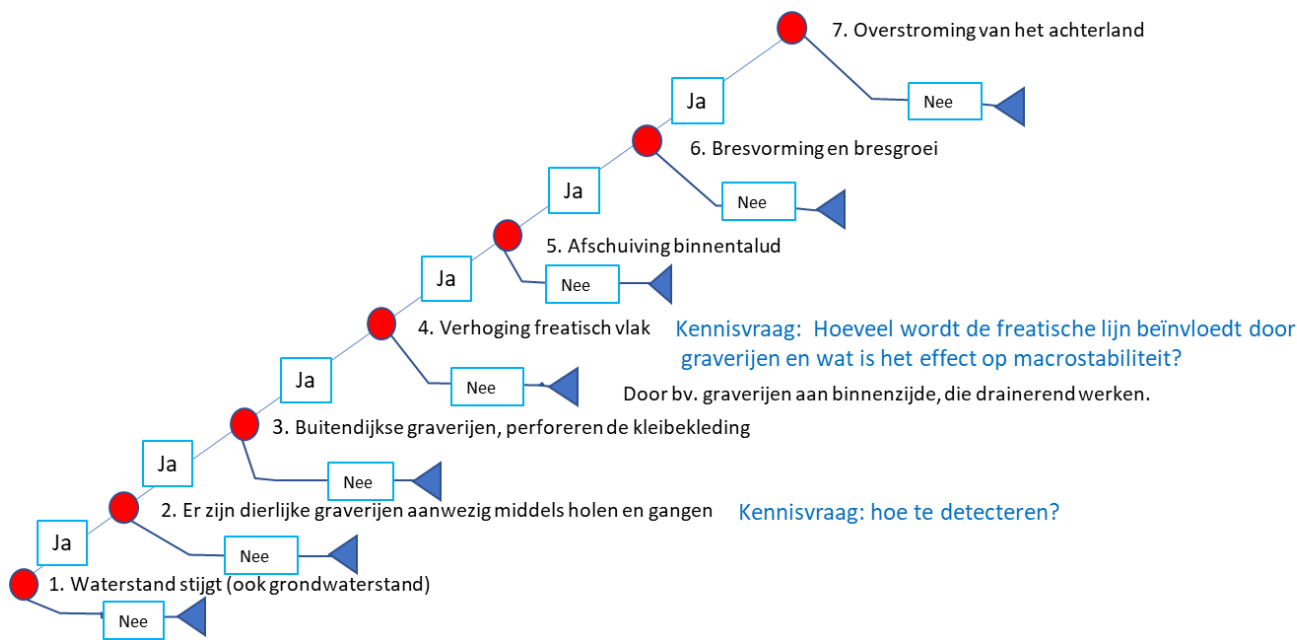
2.5 Macrostabiliteit

Impact op mechanisme

Door de graverijen bestaat de mogelijkheid dat het verloop van het freatische vlak verandert en hierdoor van invloed kan zijn op de macrostabiliteit binnen- en buitenwaarts. Tevens zal de heterogeniteit toenemen en het aantal holtes in de kering toenemen. De invloed van bevergraverij kan hierdoor zorgen voor een lokale afname van de schuifweerstand in de kering met tot gevolg een invloed op de macrostabiliteit.

Faalpadanalyse

Voor dit mechanisme worden de volgende faalpaden afgeleid voor de aanwezigheid van bevers in de Drielsedijk, zie Figuur 2.7. Hierbij wordt er als stap 0 van uitgegaan dat er graverijen aanwezig zijn. Hierbij spelen meerdere kennisvragen een rol. Deze zijn in het faalpad vermeld.



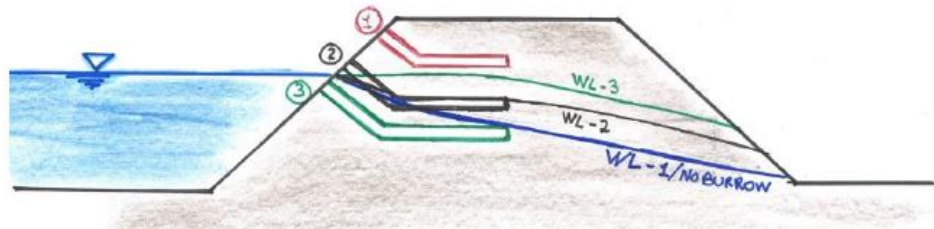
Figuur 2.7 Faalpad bevergraverij macrostabiliteit

Kwantitatieve analyse Macrostabiliteit binnenwaarts (STBI)

Voor het kwantitatief bepalen van de invloed van bevergraverijen is er momenteel geen eenduidige methode beschikbaar. Het simpelweg schematiseren van een graverij middels een ontgraving in de waterkering is geen juiste methode, omdat onder andere schaafeffecten en 3D-effecten een rol spelen. In het onderzoek naar actuele sterkte waarbij de dijk bij Bergambacht gecontroleerd tot bezwijken is gebracht, is ook onderzoek gedaan naar de invloed van het 3D-effect en tijdsafhankelijke effecten bij bezwijken [Lindenberg et al., 2002]. De 3D-invloed betreft de invloed van de graverijen op de omvang van het glijvlak. Met name de weerstand van één van de zijkanten van het glijvlak kan door graverijen worden verlaagd, waardoor een kleiner glijvlak gemakkelijker op kan treden. De tijdsafhankelijkheid betreft met name de doorwerking van de waterspanningen.

In een masterthesis [Taccari, 2015] is een studie verricht naar een dijkdoorbraak door dierlijke graverijen in Italië. Voor deze case met een dijk met een zandkern zijn PLAXIS-berekeningen uitgevoerd, waarbij door middel van een aanpassing van de freatische lijn simulaties zijn weergegeven van een dierlijke graverij. De gangen en nestkomen zijn in de berekening dus niet als holten gemodelleerd, maar alleen als verandering in de freatische lijn.

Bij een graverij aan de **buitenzijde** van de waterkering, zal tijdens Maatgevend Hoogwater (MHW) de graverij een verhogend effect hebben op de freatische lijn. In [Taccari, 2015] zijn verschillende berekeningen voor een zanddijk uitgevoerd om dit te kwantificeren. De resultaten van deze berekeningen zijn geschetst in Figuur 2.8. De geschetste loop van de graverijen 1), 2) en 3) uit deze figuur uit de studie komen niet overeen met de werkelijkheid. De bever zal namelijk na het graven van de ingang, zich omhoog bewegen in plaats van omlaag. De loop van de hopen is niet gesimuleerd in PLAXIS en heeft dus geen invloed gehad op de bepaalde grondwaterstroming in dit figuur.

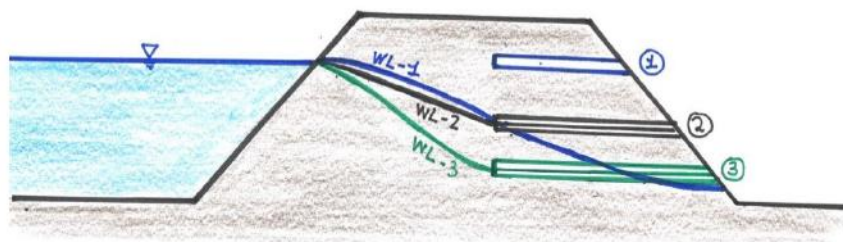


Figuur 2.8 Invloed van buitenwaartse graverij op verloop van freatische lijn [Taccari, 2015]

Voor graverij aan de buitenzijde zijn 3 situaties in de berekeningen beschouwd. Deze situaties zijn hieronder kort beschreven:

- 1) Graverij geheel boven de buitenwaterstand. Deze heeft geen invloed op het verloop van de freatische lijn zonder graverij (WL-1/ No burrow).
- 2) Graverij net onder de buitenwaterstand. Deze heeft een invloed op de opbolling van het freatische vlak in de waterkering (WL-2).
- 3) Graverij geheel onder de buitenwaterstand. Deze heeft een significante invloed op de opbolling van het freatische vlak.

Bij een graverij aan de **binnenzijde** zullen deze graverijen een drainerend effect hebben. De opbolling van de freatische lijn zal verlaagd worden. Voor deze situaties is in [Taccari, 2015] ook een aantal berekeningen uitgevoerd. De resultaten van deze berekeningen zijn weergegeven in Figuur 2.9.



Figuur 2.9 Invloed van binnenwaartse graverij op verloop van freatische lijn [Taccari, 2015]

Voor graverij aan de binnenzijde zijn 3 situaties in de berekeningen beschouwd. Deze situaties zijn hieronder kort beschreven:

- 1) Graverij geheel boven buitenwaterstand. Deze heeft geen invloed op het verloop van de freatische lijn zonder graverij (WL-1).
- 2) Graverij halverwege het talud. Deze heeft een matige invloed op de opbolling van het freatische vlak in de waterkering (WL-2).
- 3) Graverij in de teen van het talud. Deze heeft een grote invloed op de opbolling het freatische vlak.

Door het waterschap is een deterministische berekening uitgevoerd op de dwarsprofiel DV-45-13.38 om zowel de binnen- als buitenwaartse macrostabiliteit (STBI en STBU) te bepalen.

De volgende scenario's van graverijen zijn doorgerekend c.q. gecombineerd om vervolgens de invloed op de macrostabiliteit binnenwaarts (STBI) te bepalen. De aanname van de aanpassing van de freatische lijn voor deze case is gebaseerd op grondwaterstromingsberekeningen uitgevoerd voor de case van de San Matteo dijk langs de rivier de Secchia in Italië [Taccari, 2015]. Voor deze eerste verkenning wordt dit een acceptabele aanname geacht.

Bu-A: Buitenwaarts MHW zonder graverij.

Bu-B: Buitenwaarts MHW graverij intredepunt net onder MHW, ca. 12 [m +NAP]:

- Verhoging freatische lijn buitenkruin 1 m.
- Verhoging freatische lijn binnenkruin 1 m.

Bu-C: Buitenwaarts MHW graverij intredepunt net boven buitenteen ca. 10 [m+ NAP]:

- Verhoging freatische lijn buitenkruin 2 m.
- Verhoging freatische lijn binnenkruin 2 m.

Bi-A: Binnenwaarts zonder graverij.

Bi-B: Binnenwaarts graverij halverwege talud:

- Verlaging freatische lijn buitenkruin 0,5 m.
- Verlaging freatische lijn binnenkruin 0 m.

Bi-C: Binnenwaarts graverij net boven binnenteen:

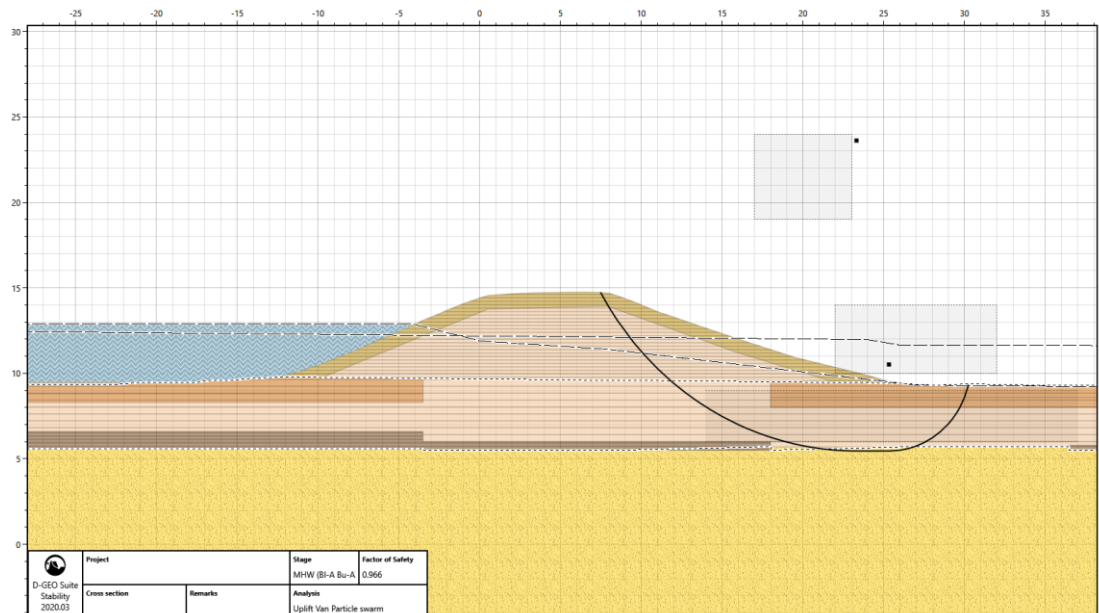
- Verlaging freatische lijn buitenkruin 0,5 m.
- Verlaging freatische lijn binnenkruin 1 m.

In Tabel 2.1 staan de berekeningsresultaten van de gecombineerde scenario's. In deze tabel worden niet de berekende stabiliteitsfactoren weergegeven, maar deze worden weergegeven als percentage van de berekende stabiliteitsfactor van de situatie zonder graverij in de kering. De combinatie van *Bu-A* en *Bi-A* geeft de situatie aan zonder graverij, hiervoor geldt per definitie 100%.

Tabel 2.1 Resultaten berekeningen scenario's op STBI

		Binnentalud		
		Geen graverij Bi-A	Graverij halverwege talud Bi-B	Graverij net boven binnenteen Bi-C
Buitentalud	Geen graverij Bu-A	100%	100% *)	102%
	Graverij net onder MHW Bu-B	96%	96%	100% *)
	Graverij net boven buitenteen Bu-C	78%	78%	100% *)

*) Het percentage voor deze gecombineerde scenario's is een fractie hoger dan 100,0%, maar bedraagt afgerond 100%



Figuur 2.10 Grafische weergave van de maatgevende glijcirkel bij de gecombineerde scenario's Bu-A en Bi-A (geen graverij)

Bespreking resultaten

Uit Tabel 2.1 volgt dat de invloed van een bevergraverij bij MHW significant is op STBI in negatieve zin, indien de ingang van een bevergang nabij de buitenteen aanwezig is en in het binnentalud geen graverijen nabij de binnenteen zijn (*situatie Bu-C en Bi-A*). Voor de doorgerkende situatie scheelt dit bijna een kwart in de berekende stabiliteitsfactor, hetgeen al snel één tot twee orden van grootte kan schelen in de faalkans (dus pakweg 10 tot 100 keer zo veel kans op falen), hetgeen ingrijpend is.

Indien er in de buitenteen en aan de binnenteen een graverij is (*situatie Bu-C en Bi-C*) zal deze drainerend werken en zal er geen invloed van op de binnenwaartse stabiliteit zijn. Wel zal er dan gemakkelijk een probleem ontstaan met interne erosie (microstabiliteit), zie paragraaf 2.6.

Bij een graverij in het buitentalud net onder het MHW is er een negatieve invloed op STBI als er in het binnentalud geen graverijen nabij de teen zijn (*situatie Bu-B en Bi-A*). Hoger gelegen graverijen in het binnentalud zijn dan niet van invloed. Indien er zowel een graverij in het buitentalud net onder MHW als een graverij aan de binnenteen is (*situatie Bu-B en Bi-C*), zal deze drainerend werken en zal dit een (heel) licht positieve invloed hebben op de binnenwaartse stabiliteit. Ook hier is een negatieve invloed op interne erosie / microstabiliteit mogelijk.

Indien er geen graverij in het buitentalud, maar er wel een graverij aan de binnenzijde is, zal dit drainerend werken en zal dit een licht positief effect hebben op de binnenwaartse macrostabiliteit. Dit effect is het sterkst als de binnendijkse graverij zich nabij de binnenteen bevindt (*situatie Bu-A en Bi-C*), hogerop het binnentalud is de invloed kleiner (*situatie Bu-A en Bi-B*).

Kwantitatieve analyse macrostabiliteit buitenwaarts (STBU)

Voor macrostabiliteit buitenwaarts (STBU) geldt dat er geen verslechtering optreedt bij een buitenwaartse bevergraverij, daarvoor wordt immers een berekening gemaakt met een val na hoogwater. Indien bij een buitenwaartse bevergraverij ook aan de binnenzijde een graverij

aanwezig is, kan dit een drainerend effect hebben en leiden tot een positief effect op de buitenwaartse macrostabiliteit.

2.6 Interne erosie / microstabiliteit

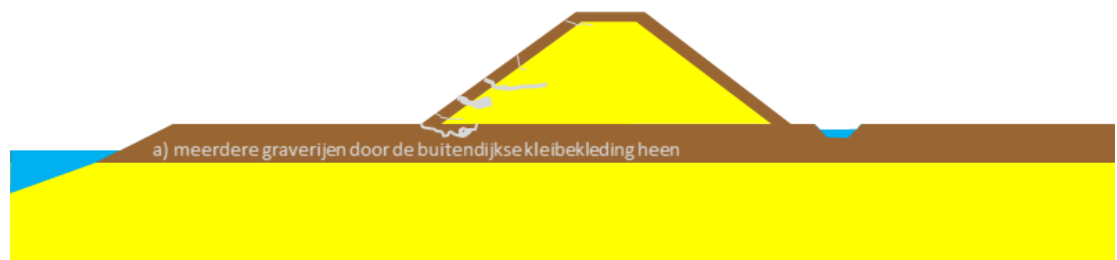
Impact op mechanisme

Wanneer het waterpeil in de rivier de ingang van een hol in het buitenwaartse talud overschrijdt, stroomt het water het hol in en vult dit met water. Wanneer er kortsluiting optreedt met gangen aan het binnenwaartse talud, ontstaat er een drukverschil tussen de buiten- en binnenuitgang. De kwelkrachten die langs het oppervlak werken, kunnen de deeltjes eroderen en meenemen, waardoor het mechanisme van "interne erosie" binnen het dijklichaam wordt ontwikkeld. Dit wordt binnen de Nederlandse vakliteratuur ook wel 'micro(in)stabiliteit' genoemd. Internationaal wordt dit vaak aangeduid met de termen 'concentrated leak erosion', 'piping' of 'general piping' (niet te verwarren met terugschrijdende erosie door zandmeevoerende wellen onder de dijk door, hetgeen binnen Nederland 'piping' wordt genoemd en in de internationale vakliteratuur wordt aangeduid met de term 'backward erosion piping').

Faalpadanalyse

In [Van, M.A et al., 2022], [Koelewijn & Remmerszaal, 2022] en [Koelewijn et al., 2020] zijn de faalpaden beschreven voor interne erosie ten gevolge van dierlijke graverijen. Het faalpad voor bevergraverij aan de buitenzijde van de kering is hieronder grafisch uitgewerkt voor de case Drielsedijk. In eerste instantie wordt het buitentalud effectief geperforeerd door bevergraverij (Figuur 2.11 en Figuur 2.12). Hierna is het faalpad voor microstabiliteit weergegeven (Figuur 2.13 en Figuur 2.14).

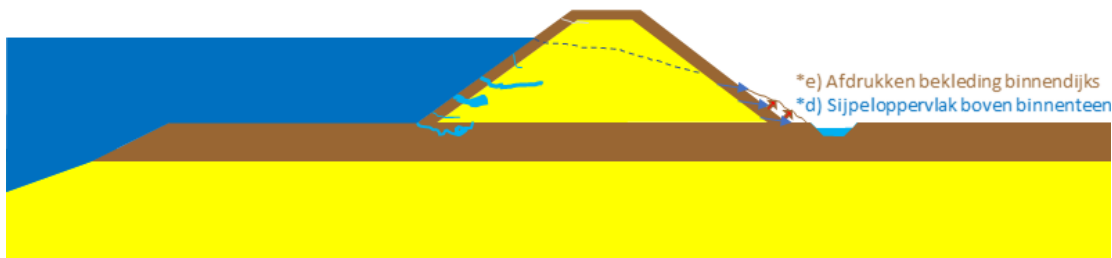
- a. Graverijen buitendijks perforeren de kleibekleding – met name lager op het talud, zodat al bij lagere hoogwaters instroming kan optreden. Weinig grote hopen of meer middelgrote hopen of vele kleine holletjes maakt hierbij niet wezenlijk uit.
- b. Uitspoeling van zand buitendijks.
- c. Verhoging freatisch vlak.
- d. Verzadiging van de dijk met sijpeloppervlak bij binnenteen en hoger.
- e. Afdrukken van de bekleding binnendijks.
- f. Micro-instabiliteit aan de binnenteen: uitvloeiën van zand.
- g. Voortgaande vervloeiing/ uitspoeling.
- h. Verzakken van de kruin.



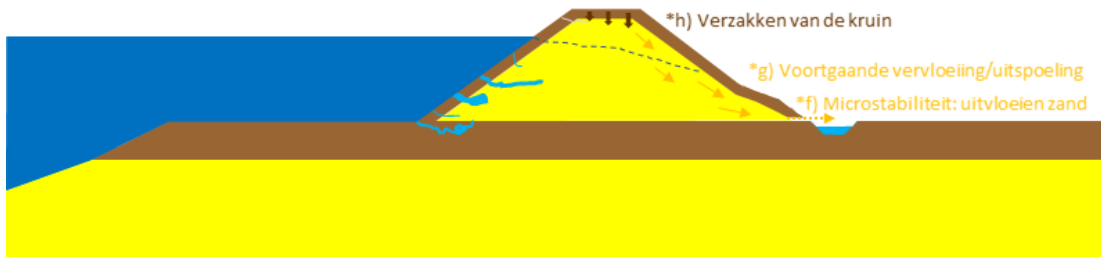
Figuur 2.11 Buitendijkse graverijen: eerste stap bij laag water



Figuur 2.12 Buitendijkse graverijen: sterkere indringing van water in de kern van de dijk bij hoogwater

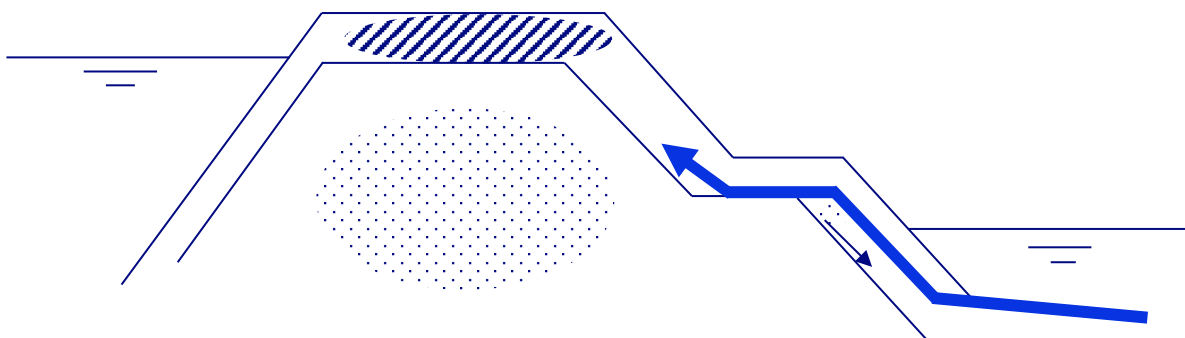


Figuur 2.13 Buitendijkse graverijen: vervolg met faalpad microstabiliteit



Figuur 2.14 Buitendijkse graverijen: vervolg van faalpad microstabiliteit

Wim Cornelisse, dijkbeheerder van WSRL, heeft ook een aantal observaties gedaan van de situatie, waarbij aan de binnenzijde van de dijk een ingraving plaatsvindt, met tot gevolg dat aan de onderzijde van de afdeklaag, zand uit de kern wordt uitgespoeld in de gang, zie de schets in Figuur 2.15. De dikke blauwe lijn met de pijl is de bevergang in de richting waarin deze gegraven wordt. De kleine zwarte pijl geeft de uitspoeling van zand aan.



Figuur 2.15 Uitspoeling van zand door bevergraverij

Kwantitatieve analyse

Bij graverijen aan de buitenzijde én aan de binnenzijde in deze zandige dijk is het mogelijk dat er interne erosie optreedt. Dit zal in de vorm zijn van een geconcentreerd gat, immers de uitspoeling zal plaatsvinden uit een graverij. Voor de beoordeling van microstabiliteit conform het WBI zijn er zeven verschillende voorschriften, waaraan de gestelde situatie moet voldoen. Deze situatie met graverijen in de dijk is echter niet beschreven en is niet onder één van de zeven voorschriften te scharen. In de internationale literatuur is hier ook weinig over te vinden. Hetgeen gevonden is in een Bulletin van de internationale commissie op het gebied van grote dammen berust op verkennend onderzoek van rond de eeuwwisseling in Frankrijk, Australië en de Verenigde Staten [ICOLD, 2017:81-87]. De gegeven formule en de parameters daarin zijn opgesteld voor een zeer ruime range aan grondmaterialen, waarbij geldt dat nog een vertaalslag nodig is naar de parameters zoals die voor de materialen van Nederlandse dijken bekend zijn. Aanbevolen wordt om een literatuurstudie uit te voeren om zo tot een goede beoordelingsmethode te komen. Wel kan gesteld worden dat deze situatie beslist een verslechtering ten opzichte van de situatie zonder graverijen zal opleveren.

2.7 Piping

Impact op mechanisme

Hol of ingang burcht aan buitenzijde van dijk leidt tot verkorting van de kwelweglengte, zeker wanneer de deklaag boven de pipinggevoelige zandlaag wordt doorgraven.

Faalpadanalyse

In [Koelewijn et al., 2020] en [Koelewijn & Remmerszaal, 2022] zijn twee faalpaden beschreven voor piping (backward erosion) ten gevolge van dierlijke graverijen in een dijk met een zandkern en een kleibekleding. Op basis van deze faalpaden is het faalpad voor bevergraverij aan de buitenzijde van de kering nader uitgewerkt voor de case Drielsedijk voor het faalmechanisme piping.

Als eerste is het risico onderkend van een buitendijkse graverij door een bever, waardoor piping kan ontstaan (Figuur 2.16 t/m Figuur 2.20). Hierbij is onderscheid gemaakt tussen overstrooming door piping respectievelijk zonder en met instorten van de kruin. Het is hierbij echter de vraag of de instrooming via een beperkt aantal dierlijke graverijen buitendijks tot voldoende aanvoer van water kan leiden om het pipingproces aan de landzijde op gang te krijgen en te houden.



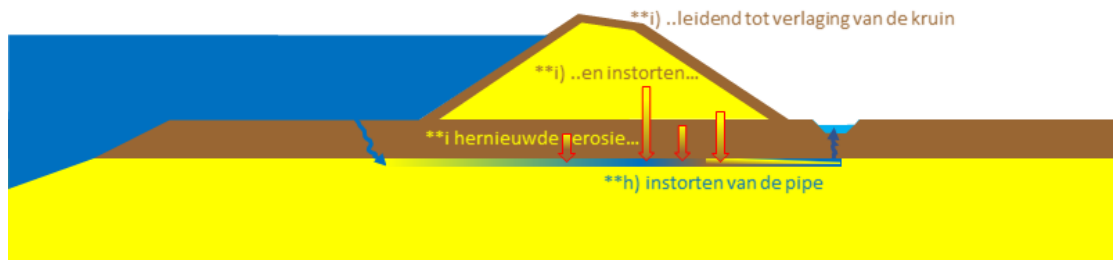
Figuur 2.16 Buitendijkse graverij door middelgroot of groot dier, eerste vier stappen



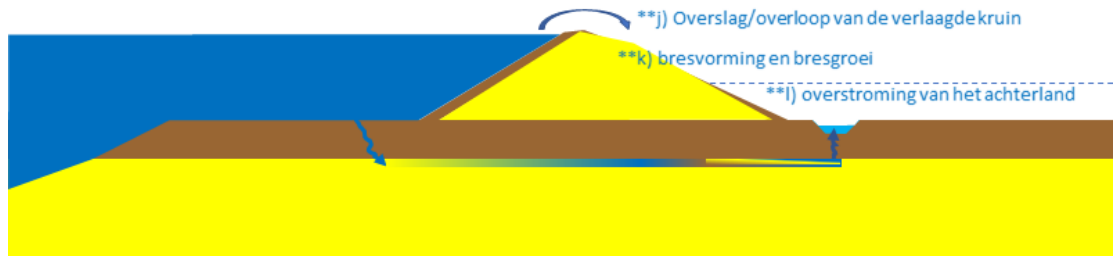
Figuur 2.17 Buitendijkse graverij, vervolgstappen met piping inclusief ruimen van de pipe



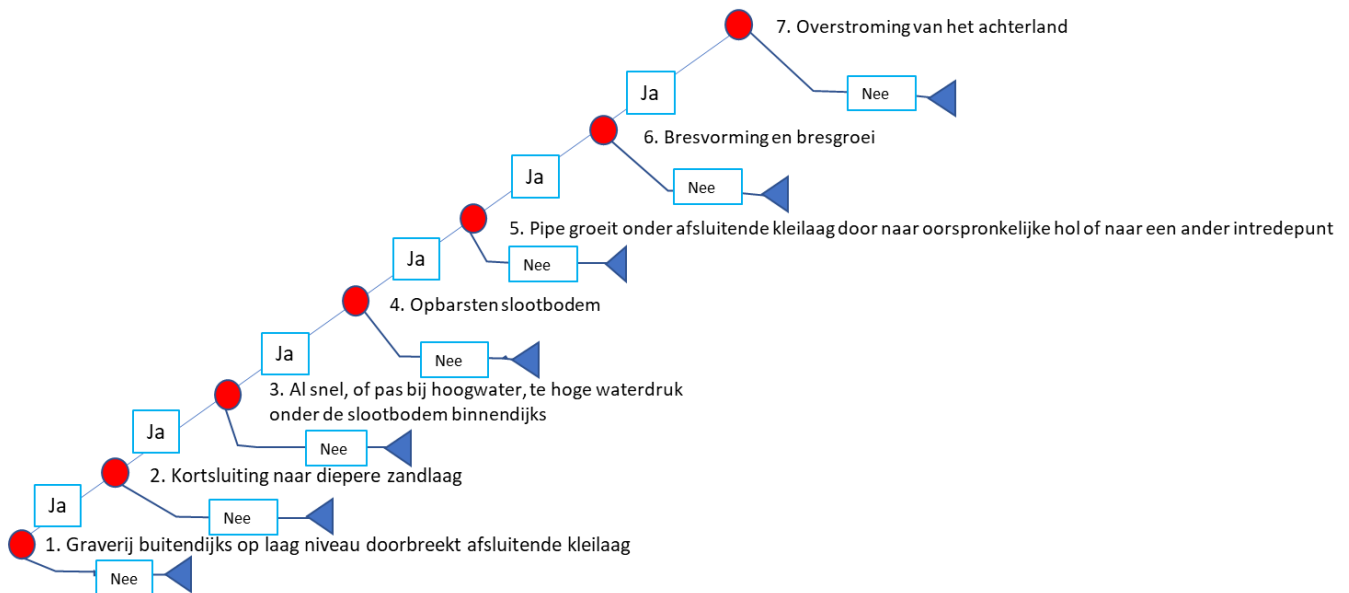
Figuur 2.18 Buitendijkse graverij, faalpad met falen door piping



Figuur 2.19 Buitendijkse graverij, faalpad met falen door herhaald instorten van de pipe, tot aan kruinverlaging



Figuur 2.20 Buitendijkse graverij, faalpad met falen door herhaald instorten van de pipe, tot aan inundatie van het achterland



Figuur 2.21 Faalpad bevergraverij piping

Kwantitatieve analyse

Kwelweglengte

De buitendijkse toegang vergroot de toestroom in de pipinggevoelige zandlaag. Vanwege de beperkte omvang van de toegang zal de instroom ook beperkt zijn (kleiner dan een langsgreppel buitendijks die de kwelweglengte over een grotere dijkstrekkung bekort). Het is daardoor niet zo dat het gehele voorland in de pipinganalyse wegvalt, dat vormt een bovengrensbenadering van de invloed op dit faalmechanisme. Desondanks geldt wel: als er voldoende toestroom is naar een binnendijks uitredepunt om daar een zandmeevoerende wel te doen ontstaan die richting het buitenwater groeit, dan zal die groei slechts tot aan het beverhol hoeven plaats te vinden om tot doorslag te leiden, hetgeen wel een aanzienlijke verkorting betekent. Door het 3D-karakter is dit echter niet eenvoudig te kwantificeren. Wel kan een eenvoudige inschatting gemaakt worden door de verkorting van de kwelweglengte te bepalen ten gevolge van dierlijke graverijen. In de situatie bij dagelijkse omstandigheden is

de kwelweglengte ca. 140 [m]. Hierbij is uitgegaan dat het intredepunt bij de insteek van waterpartij buitendijks ligt en het uitredepunt aan de binnenzijde in de langssloot nabij de binnentee van de dijk.

Bij een graverij aan de buitentee van de dijk, die deklaag doorboort kan een kwelweg ontstaan van ca. 65 [m]. Hierdoor zal een afname van circa 75 [m] in de kwelweglengte optreden (-55%), waardoor bij een gelijkblijvend verval er een grotere kans op piping zal zijn.

Deklaag

Het risico op kortsluiting hangt echter nauw samen met de deklaagdikte in het voorland, en met de inrichting van het voorland. Onderstaande tabel geeft voor de graverijen een indicatie in welke situaties kortsluiting verwacht kan worden. De categoriegrenzen in onderstaande tabel slaan op verwachte deklaagdikte. Enige mate van spreiding zal in de praktijk te verwachten zijn.

	0-0,5 m	Dikte deklaag		
		0,5-1 m	1-2 m	> 2m
Grondmechanisch: grondbreuk boven de pipe	Niet relevant, onvoldoende fictieve voorlandlengte voor pipegroei onder het voorland			
Bestaande gaten door invloed van flora en fauna en structuurvorming		grote dierlijke gaten via scenario's		
Bestaande gaten door landgebruik		Bij bouwvoor dieper dan 0,5 m risico kortsluiting.		
Sloten en andere ontgravingen		Meenemen in schematisatie, kopsloten als scenario		

Figuur 2.22 Risico op kortsluiting (aanwezig - geel, verwaarloosbaar – groen, groot - oranje) (Rosenbrand et al. 2021)

Faalkans

Een nadere beschouwing van bevergraverij op het faalmechanisme piping is hieronder beschreven.

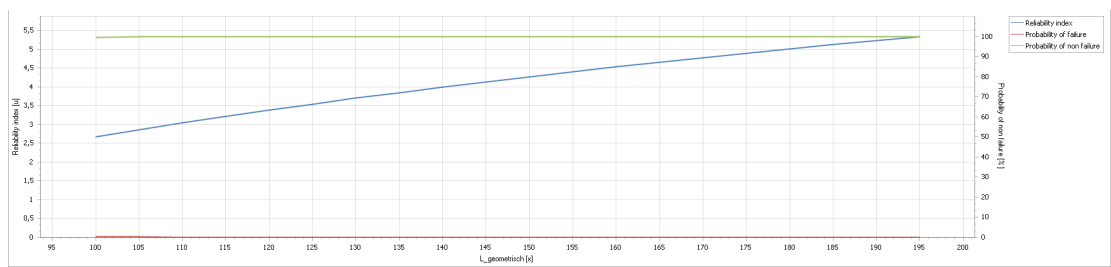
Met behulp van de, door Waterschap Rivierenland, ontwikkelde PipingTool [Methorst et al, 2021] zijn er verschillende pipingberekeningen uitgevoerd ter beoordeling van de dijk. Ten behoeve van de onderhavige studie is door het Waterschap, op basis van de berekeningen in de PipingTool, een probabilistische berekening gemaakt met behulp van de Probabilistische Toolkit (PTK)¹. In deze berekening wordt ervan uitgegaan dat het MHW een determinist is en een waarde (hoogte) heeft van 13,6 [m +NAP].

De faalkansberekening is uitgevoerd voor een profiel op een afstand van ca. 180 [m] van de case van de Drielsedijk, namelijk profiel DR 185. Voor profiel DR 185 is uitgegaan van een aanwezige kwelweglengte van 195 [m]. Om de invloed van een bevergraverij te simuleren, zal de kwelweglengte worden verkort tot alleen de dijkbasis (insteek sloot buitenwaarts – insteek sloot binnenwaarts) met een lengte van 100 [m]. Immers, door een buitenwaartse graverij in de teen van het dijklichaam, zal het voorland niet mee worden genomen in de aanwezige kwelweglengte.

Voor de huidige situatie is de berekende β in dit geval: 5,35, met een overschrijdingskans van 1:22.000.00. Wanneer voor dit profiel uitgegaan wordt van een dijkbasis van 100 [m], ten gevolge van de bevergraverij in de buitentee, zal er een afname zijn in de kwelweglengte van 95 [m]. De bijbehorende β is in dit geval: 2,67, met een overschrijdingskans van 1:264. Dit is een aanzienlijke toename in faalkans.

¹ De Probabilistic Toolkit is een (stand-alone) applicatie die de gevolgen van onzekerheden toevoegt aan (Deltares-) modellen. Deze modellen beschrijven hydrologische, geotechnische of een ander fysische verschijnselen.

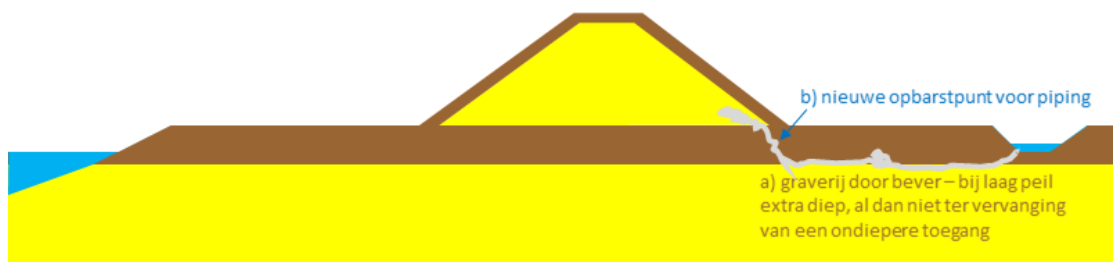
In Figuur 2.23 (en in Bijlage A op groter formaat) is op grafische wijze de relatie tussen de kwelweglengte en de bijbehorende β weergegeven.



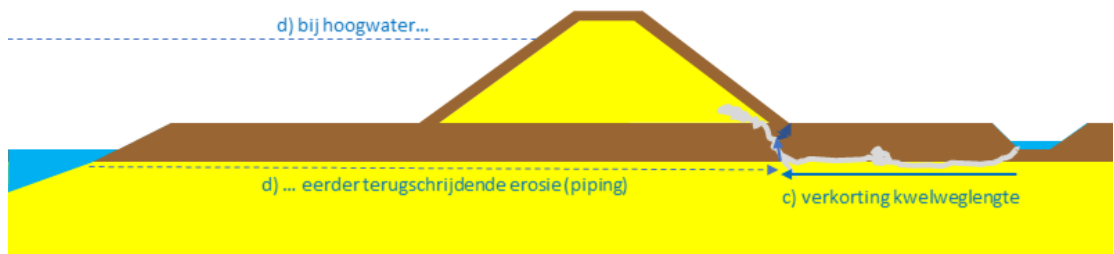
Figuur 2.23 Effect bevergraverij op faalkans piping

Geconcludeerd kan worden dat het effect van een bevergraverij in de buitenteen op het faalmechanisme piping in de onderhavige case zeer aanzienlijk is.

De tweede situatie gerelateerd aan piping uit [Koelewijn et al., 2020] en [Koelewijn & Remmerszaal, 2022] betreft een graverij door een bever aan de binnendijkse kant, waardoor de kwelweglengte aanzienlijk kan worden verkort (zie Figuur 2.24 en Figuur 2.25). Het voorbehoud van beperkte stromingscapaciteit dat hiervoor gemaakt is bij buitendijkse graverijen, geldt niet voor een uittredepunt. Door 3D-effecten is één uittredepunt dichterbij de dijk dan de hier wat verder gelegen langssloot zelfs extra ongunstig.



Figuur 2.24 Graverij door bever nabij binnenteen door kleideklaag, eerste stappen (bij laag water)



Figuur 2.25 Graverij door bever nabij binnenteen door kleideklaag, effect op kwelweglengte en gevolg bij hoogwater (zie verder de figuren behorende bij de eerste situatie)

In de situatie bij de Drielsedijk is de verkorting van de kwelweglengte aan de binnenzijde van de dijk niet zo dramatisch als getekend, namelijk circa 15 tot 25 m. Op het smalste gedeelte, nabij de binnendijkse bomerrij, betekent dit een afname met 15 m: van 140 m naar 125 m (-10%). Nu is er sprake van een situatie bij een uittredepunt dat rivierwaarts is verlegd, waar de stroming naar toe geconcentreerd zal raken.

Indien beide situaties tegelijkertijd optreden, dan is de situatie dramatisch verslechterd ten opzichte van het scenario 'geen graafschade', maar de kans dat aan beide zijden op ongeveer dezelfde dijklocatie bevergraverijen aanwezig zullen zijn, mag dan wel weer duidelijk kleiner worden geacht.

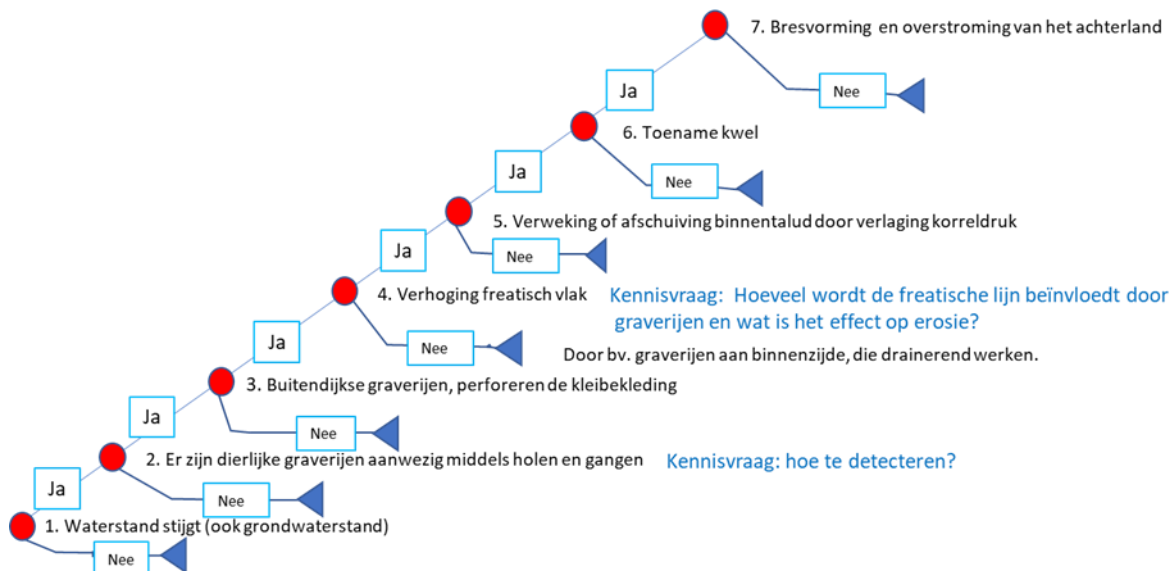
2.8 Falen (gras)bekleding

Impact op mechanisme

Holen buitendijks kunnen leiden tot afdrukken van de kleibekleding binnendijks doordat de freatische lijn in de zandkern sneller zal stijgen, waardoor gemakkelijker verweking van het binnentalud ontstaat of afschuiving van het binnentalud door verlaging van de korreldruk (en daarmee verlies van schuifsterkte) en toename van het gewicht. Het is gevolg is voortschrijdende erosie mede via het hol/de holen gecombineerd met toenemende kwel.

Faalpadanalyse

Voor dit mechanisme worden de volgende faalpaden afgeleid voor de case Drielsedijk:



Figuur 2.26 Faalpad bevergraverij grasbekleding

Kwantitatieve analyse

De grasbekleding van het talud in de voor de onderhavige studie naar de Drielsedijk kan door de bevergraverij beschadigd worden. Normaliter zal een bevergraverij aanvagen net onder de waterlijn van een teensloot, zodat de grasbekleding niet wordt beschadigd. Echter in gevallen van hoogwater is het mogelijk dat een bever het halverwege het talud graaft en zodoende de grasmat beschadigt. Tevens is het mogelijk dat door instortende gangen en nestkommen, de bovenliggende grasmat beschadigd kan worden. Bij het onderdeel interne erosie/ microstabiliteit in paragraaf 2.6 is het afdrukken van de grasmat besproken.

3 Conclusies en aanbevelingen

3.1 Conclusies

Het effect van bevergraverij op de verschillende faalmechanismen van dijken is in dit rapport onderzocht door middel van het beschrijven van mogelijke optredende situaties per faalmechanisme en voor het faalmechanisme macrostabiliteit zijn tevens berekeningen uitgevoerd. Voor het onderzoek is uitgegaan van een case aan de Drielsedijk ten zuidwesten van Arnhem. Hieronder zijn de resultaten per faalmechanisme beschreven.

(gebrek aan) Hoogte

Door de bevergraverijen is het mogelijk dat door de gangen of holen het talud of de kruin verzakt. Dit speelt voornamelijk bij hoogwater en/of zandkernen. Beide gevallen komen bij de Drielsedijk voor. Voor dit mechanisme is een faalpad uitgewerkt, waarbij de volgende kennisvragen te onderkennen zijn:

- Hoeveel moet de waterstand stijgen en hoe groot moet de graverij zijn voordat holen en gangen instorten?
- Hoeveel moet de kruin verlaagd worden voordat overloop/overslag optreedt?
- In welke mate neemt de kans op falen door overloop/overslag bij dit profiel concreet toe bij een lagere kruinhoogte?
- Welke (nood)maatregelen kunnen worden getroffen en wanneer?

Uit de kwantitatieve analyse voor de Drielsedijk volgt dat de huidige kruinhoogte voldoende overhoogte heeft om de maximale zakking van 0,2 - 0,3 [m] op te vangen ten gevolge van het mogelijk instorten van gangen en holen. In de gevallen dat er wel overloop is door graverijen, dan zijn deze locaties met een minimale omvang snel te herstellen middels noodmaatregelen door bijvoorbeeld het aanbrengen van zandzakken.

Macrostabiliteit binnenwaarts

Uit de berekeningen volgt dat indien de ingang van een bevergang nabij de buitenteen aanwezig is en in het binnentalud geen graverijen nabij de binnenteen zijn, de invloed van een bevergraverij bij MHW significant is op macrostabiliteit in negatieve zin. Voor de doorgerekende situatie scheelt dit bijna een kwart in de berekende stabiliteitsfactor, hetgeen al snel één tot twee orden van grootte kan schelen in de faalkans (dus pakweg 10 tot 100 keer zo veel kans op falen), hetgeen ingrijpend is. Indien er in voornoemd geval ook aan de binnenteen een graverij is zal deze drainerend werken en zal er geen significante invloed op de binnenwaartse stabiliteit zijn. Voor andere faalmechanismen kan het dan wel een rol van betekenis spelen, met name voor interne erosie (microstabiliteit).

Bij een graverij net onder het MHW in het buitentalud is er een licht negatieve invloed op STBI als er in het binnentalud geen graverijen nabij de teen zijn. Indien er zowel in het buitentalud als aan de binnenteen een graverij is zal deze drainerend werken en zal dit een licht positieve invloed hebben op de binnenwaartse stabiliteit. Op andere faalmechanismen kan het nog wel een rol van betekenis spelen.

Indien er geen graverij in het buitentalud is, maar er wel een hoger gelegen graverij aan de binnenzijde, zal dit drainerend werken en zal dit een licht positief effect hebben op de binnenwaartse macrostabiliteit. Indien er geen graverij in het buitentalud is, maar wel aan de binnenteen een graverij is zal deze drainerend werken en zal dit aanvullend een licht positieve invloed hebben op de binnenwaartse stabiliteit.

Uit het opgestelde faalpad volgen de volgende kennisvragen:

- Hoe de dierlijke graverijen te detecteren?
- Hoeveel wordt de freatische lijn beïnvloed door graverijen en wat is het effect op macrostabiliteit?

Macrostabiliteit buitenwaarts

Voor macrostabiliteit buitenwaarts (STBU) geldt dat er geen verslechtering optreedt bij een buitenwaartse bevergraverij, er wordt immers een berekening gemaakt met een val na hoogwater. Indien bij een buitenwaartse bevergraverij aan de binnenzijde een graverij aanwezig is, kan dit een drainerend effect hebben en leiden tot een positief effect op de buitenwaartse macrostabiliteit.

Interne erosie (microstabiliteit)

Wanneer het waterpeil in de rivier de ingang van een hol in het buitenwaartse talud overschrijdt, stroomt het water het hol in en vult dit met water. Dit leidt tot een snellere verhoging van de freatische lijn binnen de dijk en kan leiden tot het afdrukken van de bekleding aan de binnenzijde.

Bij graverijen aan de buitenzijde én ook aan de binnenzijde in deze zandige dijk treedt er mogelijk uitspoeling op vanuit de binnendijkse graverij. Deze vorm van interne erosie is echter niet beschreven in het WBI en is ook in de internationale vakliteratuur slechts met weinig concrete formules beschreven. Wel kan gesteld worden dat deze situatie een verslechtering ten opzichte van de situatie zonder graverijen zal opleveren.

Piping

Een hol of ingang van een burcht aan de buiten- of binnenzijde van de dijk leidt tot verkorting van de kwelweglengte wanneer de deklaag boven de pipinggevoelige zandlaag wordt doorgraven. Voor dit mechanisme is een tweetal faalpaden uitgewerkt. Ten behoeve van een kwantitatieve analyse is het in dit stadium alleen mogelijk om een eenvoudige inschatting te maken door de verkorting van de kwelweglengte te bepalen ten gevolge van dierlijke graverijen. Het is mogelijk dat hierdoor een afname van ca. 75 [m] kwelweglengte kan optreden. Dit is een afname van circa 55% ten opzichte van de situatie zonder graverijen, waardoor er bij een gelijkblijvend verval een grotere kans op piping is.

Voor profiel DR 185 (180 m naast de case van de Drielsedijk) is een aanvullende faalkansberekening uitgevoerd met de Probabilistic Toolkit. Hierbij is uitgegaan van een aanwezige kwelweglengte van 195 [m]. De bijbehorende berekende β is in dit geval: 5,35, met een overschrijdingskans van 1:22.000.00. Wanneer voor dit profiel uitgegaan wordt van een dijkbasis van 100 [m] ten gevolge van een bevergraverij in de buitenteen van de dijk zal er een afname zijn in de kwelweglengte van 95 [m] de bijbehorende β is in dit geval: 2,67 met een overschrijdingskans van 1:264. Dit is een aanzienlijke toename in faalkans door een bevergraverij in de buitenteen van de dijk.

Falen (gras)bekleding

Holen buitendijks kunnen leiden tot afdrukken van de kleibekleding binnendijks doordat de freatische lijn in de zandkern sneller zal stijgen, waardoor gemakkelijker verweking van het binnentalud ontstaat of afschuiving van het binnentalud door verlaging van de korreldruk (en daarmee verlies van schuifsterkte) en toename van het gewicht. Het gevolg is voortschrijdende erosie mede via het hol/de hopen gecombineerd met toenemende kwel. Voor dit mechanisme is een faalpad uitgewerkt, waarbij de volgende kennisvragen naar voren zijn gekomen:

- Hoe zijn de graverijen te detecteren?
- Hoeveel wordt de freatische lijn beïnvloed door graverijen en wat is het effect op erosie?

De grasbekleding van het talud in de voor de onderhavige studie naar de Drielsedijk kan door de bevergraverij beschadigd worden. Normaliter zal een bevergraverij aanvagen net onder de waterlijn van een teensloot, zodat de grasbekleding niet wordt beschadigd. Echter in gevallen van hoogwater is het mogelijk dat een bever het halverwege het talud graaft en zodoende de grasmat beschadigt. Tevens is het mogelijk dat door instortende gangen en nestkommen, de bovenliggende grasmat beschadigd wordt.

3.2 Aanbevelingen

Graverijen van bevers in waterkeringen leveren een risico op voor de verschillende faalmechanismen van de waterkering en dus op de overstromingskans. Om een beter inzicht te krijgen in de risico's van de graverijen worden de volgende aanbevelingen gedaan.

Vanuit de faalpaden voor de verschillende faalmechanismen zijn de volgende kennisvragen naar voren gekomen:

- Hoeveel moet de waterstand stijgen en hoe groot moet de graverij zijn voordat hopen en gangen instorten?
- Hoeveel moet de kruin verlaagd worden voordat overloop/overslag optreedt?
- In welke mate neemt de kans op falen door overloop/overslag bij dit profiel concreet toe bij een lagere kruinhoogte?
- Welke (nood)maatregelen kunnen worden getroffen en wanneer?
- Hoe de dierlijke graverijen te detecteren?
- Hoeveel wordt de freatische lijn beïnvloed door graverijen en wat is het effect op macrostabiliteit en erosie?

Het verdient de aanbevelingen om deze vragen nader uit te werken.

Voor het faalmechanisme piping (backward erosion) is nog geen kwantitatieve analyse uitgevoerd om de invloed van bevergraverij te bepalen. Het wordt aanbevolen om voor dit faalmechanisme deze analyse uit te voeren om ook voor dit faalmechanisme een gedegen uitspraak te kunnen doen over de risico's van graverijen.

Voor het faalmechanisme interne erosie/ microstabiliteit vindt er geconcentreerd uitspoeling plaats uit de graverij, vanuit de (inter)nationale literatuur is hier weinig over beschreven. Aanbevolen wordt om hier nader onderzoek naar uit te voeren.

Vanuit [Van den Berg, 2021] worden ook de volgende aanbevelingen gedaan om de risico's van dierlijke graverijen te verminderen middels een aantal maatregelen. Deze maatregelen kunnen worden onderverdeeld in 4 categorieën:

Proactief

Maatregelen die de blootstelling aan het risico op dijkdoorbraken door dieractiviteit verminderen, zoals:

- Zodanig ontwerp van dijken dat dierlijke graverij afschrikt, denk hier aan aanbrengen van gaas of taluds van een klei-kalkmengsel.
- Dieren voorzien van een aantrekkelijk alternatieve locatie, in de buurt van een waterkering die een dijkomgeving kan vervangen

Preventie

Maatregelen die de kans op dijkdoorbraak door dieractiviteit verkleinen, zoals:

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

Wees voorbereid

Maatregelen die vooraf kunnen worden genomen om de impact te verminderen bij het bezwijken van een dijk door dieractiviteit

- Pas (tijdelijke) maatregelen toe op door dieren veroorzaakte graverijen die grote gevolgschade tijdens een overstromingsramp kunnen verminderen of vertragen.

Repressie

Maatregelen die snel kunnen worden toegepast tijdens een overstroming

Voor concrete situaties kan worden nagegaan hoe dit uitpakt, hoe haalbaar dit is en de algemene lessen hieruit kunnen vervolgens in bijvoorbeeld een factsheet worden samengevat.

Literatuur

[Hahmann, 2004]

Biberbaue im Oderdeich. - Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg,
Hahmann T, Möbes, S., Regiment, J. & H.-P. Trömel, 2004, Jg.13, H. 1, S. 22-26

[ICOLD, 2017]

Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations. International commission on large dams, Paris, 2017.

[Koelewijn et al., 2020]

Graverij door dieren Invloed op de veiligheid van waterkeringen, André Koelewijn, Annette Kieftenburg & Lieke Hüsken, Deltares, d.d. 14-12-2020 KPP rapport 11205235-003-ZWS-0001

[Koelewijn & Remmerswaal, 2022]

Faalpaden vervolprocesen, een inventarisatie, Praktijkonderzoek Opbarsten bij Dijken - document 3, André Koelewijn & Guido Remmerswaal, rapport 11207357-008-GEO-0001(in concept), maart 2022

[Lindenberg et al., 2002]

Proefvak Bergambacht Eindrapport, Lindenberg, J., Van, M.A., Koelewijn, A.R., Zwanenburg, C., Lambert, J.W.M., Van der Meer, M.T. & Teunissen, P.A.A., rapportage CO-710301/334, GeoDelft, Delft, juni 2002.

[Methorst et al, 2021]

Onderzoek probabilistisch rekenen en lengte-effect Piping, Combineren van probabilistische pipingberekeningen met de uittredepuntenmethode, Ard-Jan Methorst, Willem Leeuwdront, Sander Kapinga rapport Waterschap Rivierenland d.d. 18 maart 2021, Versie 1.0

[Rosenbrand et al., 2021]

Kennis voor Keringen 2021:Achtergrondrapport Voorlanden, Esther Rosenbrand, Ligaya Wopereis, Ane Wiersma (A.P.), Wim Kanning, Adam Bezuijen, Jan Blinde, Deltares, d.d. 2-12-2021, rapport 11206817-010-GEO-0003

[Taccari, 2015]

Thesis van M.L. Taccari (TUDelft, Deltares), *Study upon the possible influence of animal burrows on the failure of the levee of San Matteo along the Secchia river*, Maria Luisa Taccari, d.d. 13 July 2015

[UvW, 2020]

Beverprotocol voor de waterbeheerders in de provincies Gelderland en Zuid-Holland januari 2020, samenwerking van Waterschap Vallei en Veluwe, Waterschap Rijn en IJssel, Waterschap Hollandse Delta, Waterschap Rivierenland, Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden, Waterschap Amstel, Gooi en Vecht, Rijkswaterstaat, Faunabeheereenheid Gelderland, Faunabeheereenheid Zuid-Holland, Provincie Gelderland, Provincie Zuid-Holland, Unie van Waterschappen, Zoogdiervereniging

[Van, M.A et al., 2022]

Van, M.A., Rosenbrand, E., Tourment, R., Smith, P. and Zwanenburg, C.
Failure paths for levees. International Society of Soil mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE) – Technical Committee TC201 'Geotechnical aspects of dikes and levees', February 2022. Download <https://doi.org/10.53243/R0006>

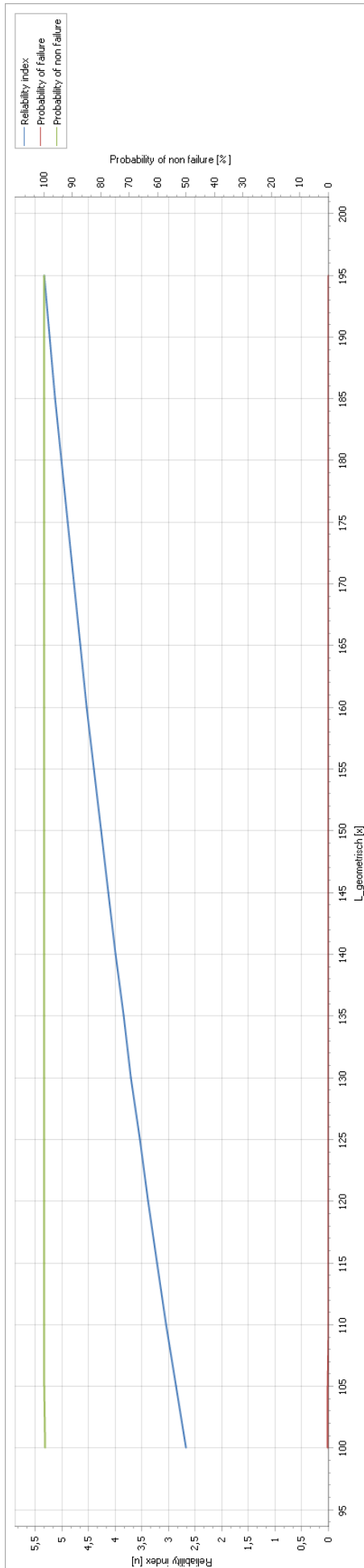
[Van den Berg, 2021]

Graverij door dieren in waterkeringen, Een kwantitatieve analyse en overzicht huidige kennis, Frans van den Berg, Deltares rapport met kenmerk 11206793-002-ZWS-002, 02-12-2021

[Van den Ham et al., 2021]

Handreiking NWO's in de veiligheidsanalyse van primaire waterkeringen in LBO1, Geeralt van den Ham, Theo Stoutjesdijk, Peter Kraaijenbrink, uitgegeven Rijkswaterstaat, 28 mei 2021, versie 2.0 definitief

A Effect bevergraverij op faalkans piping



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