

## Beslissingsondersteunend raamwerk piping

Beschrijving en factsheets



## **Beslissingondersteunend raamwerk piping**

Beschrijving en factsheets

### **Auteur(s)**

Lisa van der Linde

Wim Kanning

Vera van Beek

## Beslissingsondersteunend raamwerk piping

Beschrijving en factsheets

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	de heer H. van Hemert
<b>Referenties</b>	
<b>Trefwoorden</b>	Piping, nieuwe kennis, BRP, BOI, KvK

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	02-07-2024
<b>Projectnummer</b>	11209268-021
<b>Document ID</b>	11209268-021-GEO-0001
<b>Pagina's</b>	26
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Lisa van der Linde	
	Wim Kanning	
	Vera van Beek	

# Samenvatting

Voor het bepalen van de overstromingskans geeft het BOI handvatten. Met beslisregels kan de relevantie van het faalmechanisme worden onderbouwd. Voor bepaling van de overstromingskans door piping wordt de werkelijkheid echter geschematiseerd. Voor een zuivere beschouwing van het pipingmechanisme is het belangrijk ook de aspecten te beschouwen die niet in de rekenregels zijn meegenomen. Het Beslissingsondersteunend Raamwerk Piping (BRP) geeft hiervoor een aanpak.

Het effect van deze aspecten op de berekende overstromingskans kan significant zijn, afhankelijk van locatie-specifieke kenmerken. Het beslissingsondersteunend raamwerk piping (BRP) is bedoeld als een middel om de beoordeling en het ontwerp van dijken kwalitatief te ondersteunen voor het omgaan met aspecten die niet in de rekenregels worden meegenomen in beoordeling en ontwerp. Het BRP bestaat uit drie stappen: (1) het creëren van overzicht en begrip, (2) inzicht en handelingsperspectief en (3) verificatie en plausibiliteit. Dit rapport geeft een beschrijving van deze drie stappen en geeft de gebruiker handvatten voor het creëren van overzicht en begrip (stap 1) in de vorm van factsheets .

In totaal zijn 14 factsheets opgesteld van aspecten die piping (opbarsten en terugschrijdende erosie) beïnvloeden, zoals bijvoorbeeld tijdsafhankelijkheid, voorlanden en heterogeniteit in de baan van de pipe. Hierin zijn de volgende onderdelen behandeld:

- Een beschrijving van het aspect.
- Een inschatting van het effect op de overstromingskans op basis van lokale omgevingseigenschappen.
- Een inschatting van het kennisniveau: theorie, experimenten, model en toepasbaarheid;
- Welke nadere analyses uitgevoerd kunnen worden voor beter onderbouwing van de impact op de overstromingskans.

Het grafisch in kaart brengen van de aspecten helpt de gebruiker om begrip en overzicht te krijgen. Op basis hiervan en eventueel aanvullende analyses kan tot een weloverwogen handelingsperspectief worden gekomen. Tot slot is het van belang om te evalueren, voldoet het ontwerp nu aan de veiligheidseis? Is het resultaat plausibel?

Door voortdurende kennisontwikkeling zijn ook de factsheets aan verandering onderhevig. Uit evaluatie met gebruikers is tevens de wens gebleken om meer handvatten te geven voor kwantificatie van de effecten van aspecten op de overstromingskans. Vervolgstappen zullen zich op updates en kwantificering van aspecten in het BRP richten.

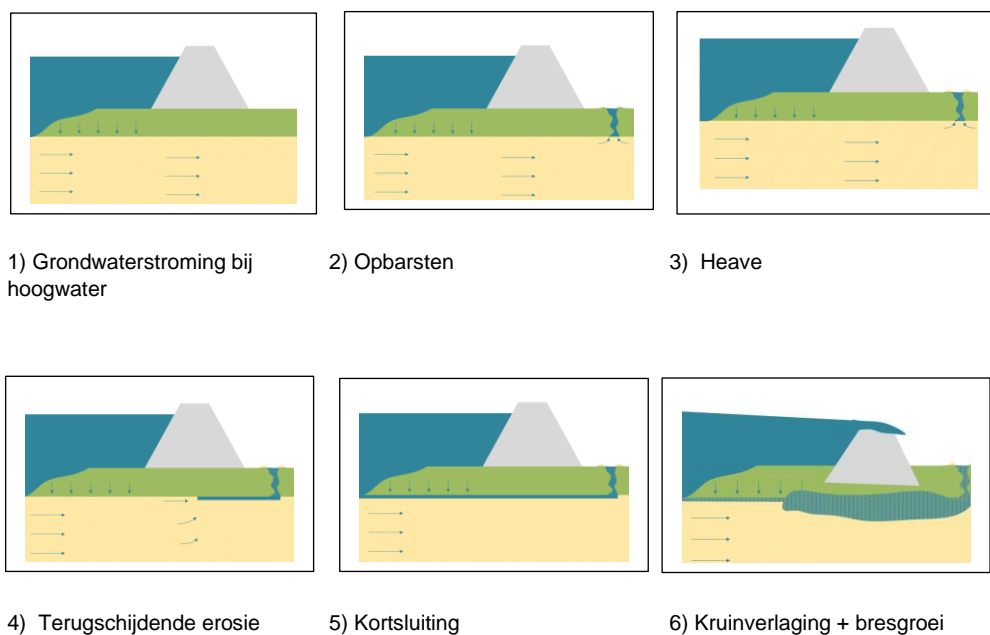
# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>6</b>
1.1	Aanleiding en doel	6
1.2	Totstandkoming	7
1.3	Beheer factsheets	7
1.4	Afbakening	7
1.5	Leeswijzer	8
<b>2</b>	<b>Over het BRP</b>	<b>9</b>
2.1	Wat is het BRP?	9
2.1.1	Stap 1: Overzicht en begrip	9
2.1.2	Stap 2: Inzicht en handelingsperspectief	11
2.1.2.1	Stap 2a: Gevoeligheidsanalyses	11
2.1.2.2	Stap 2b: Afweging van handelingsperspectieven	12
2.1.3	Stap 3: Verificatie en plausibiliteitscontrole	12
2.2	Welke beslissing ondersteunt het BRP?	13
2.3	Voorbeelden	13
<b>3</b>	<b>Aanpak opstellen factsheets</b>	<b>14</b>
3.1	Afwegingen welke aspecten te behandelen in factsheet	14
3.2	Aspecten behandeld in factsheets	14
3.3	Algemene opzet factsheets	14
3.4	Toelichting op beoordeling relatief effect op de overstromingskans	16
3.5	Toelichting op beoordeling kennisniveau	16
<b>4</b>	<b>Referenties</b>	<b>18</b>
<b>A</b>	<b>Hoe past het BRP binnen het veiligheidsraamwerk?</b>	<b>20</b>
A.1	Ministeriële regeling en onderliggende documenten	20
A.2	Aandachtspunten	20
<b>B</b>	<b>Toelichting kennisniveau per factsheet</b>	<b>21</b>
<b>C</b>	<b>Afbakening factsheets</b>	<b>24</b>
C.1	Afwegingen voor het wel meenemen van aspecten	24
C.2	Afwegingen voor het niet meenemen van aspecten	24
<b>D</b>	<b>De factsheets</b>	<b>25</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding en doel

Piping is een faalmechanisme van waterkerende constructies waarbij, door grondwaterstroming en erosie, holle kanaaltjes onder de dijk vormen. Indien deze doorgroeien kunnen ze leiden tot het inzakken van de dijk en het overstromen van het achterland. Voordat piping tot een overstroming leidt, moeten er een aantal gebeurtenissen achter elkaar optreden (Figuur 1.1). De mechanismen opbarsten, heave en terugschrijdende erosie worden in de huidige systematiek beschouwd voor de bepaling van de overstromingskans door piping. Voor opbarsten en heave wordt hiervoor de drukval over de deklaag beschouwd. Terugschrijdende erosie wordt in Nederland beoordeeld met de rekenregel van Sellmeijer et al. (2011), conform de Schematiseringshandleiding piping WBI 2017 v4.0 (2021).



Figuur 1.1 Keten van gebeurtenissen bij piping.

In de regel van Sellmeijer zitten meerdere aannames en vereenvoudigingen. De regel is gebaseerd op een versimpelde situatie (2-dimensionale en stationaire stroming door een homogeen en isotroop watervoerend pakket, geen stroming naar het achterland), terwijl de praktijk vaak complexer is. In de praktijk zijn er veel meer aspecten die invloed hebben op de weerstand tegen piping. De beschikbare kennis over deze aspecten varieert van een conceptuele beschrijving tot een gevalideerd rekenmodel. Het effect van de verschillende aspecten op de overstromingskans kan (onafhankelijk van het kennisniveau) relevant zijn, maar is sterk afhankelijk van locatie-specifieke kenmerken.

Ook voor opbarsten zijn er aspecten die niet worden meegenomen met een generieke analyse uit het BOI (Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium voor primaire waterkeringen), zoals de sterkte van de deklaag en het effect van de geohydrologie. Vervolgprocessen in het faalpad van piping worden over het algemeen ook niet meegenomen in de analyse.

Om met deze aspecten, aanvullend op de regels uit het BOI, om te kunnen gaan is het zogenaamde Beslissingsondersteunend Raamwerk Piping (BRP) ontwikkeld (zie Rosenbrand et al. (2023) en Hoofdstuk 2). Het BRP helpt de gebruiker bij het wegen van de relevantie van de aspecten in het licht van de overstromingskans en bestaat uit drie stappen:

1. Overzicht en begrip creëren, door het bepalen welke aspecten belangrijk zijn, indien nodig en mogelijk door nauwkeuriger schematisatie of nadere analyses.
2. Inzicht en handelingsperspectief, door het beschouwen van aspecten in het licht van de beslissing en de afweging van handelingsperspectieven.
3. Verificatie en plausibiliteitscontrole, door (in het geval van een maatregel) vast te stellen of het ontwerp voldoet aan de overstromingskansen en vragen te stellen bij de plausibiliteit van het uiteindelijke resultaat.

Om het overzicht en begrip te creëren is het nodig om van alle relevante aspecten te kunnen inschatten wat het kennisniveau en het mogelijke effect op de overstromingskans is. Per aspect is deze informatie samengevat in een factsheet. In deze rapportage zijn de factsheets weergegeven, evenals de aandachtspunten bij de totstandkoming ervan. Daarnaast wordt een doorkijk gegeven hoe deze factsheets kunnen helpen bij stap 2 en 3 van het BRP. Het BRP sluit aan bij de Handleiding Veiligheidsontwerp (RWS, 2024) en de DIV publicatie aanpak en afwegekader pipingmaatregelen (DIV, 2024).

## 1.2 Totstandkoming

Het BRP is ontwikkeld door Kennis voor Keringen in samenwerking met het U.S. Army Corps of Engineers en het SITO-IS programma van Deltares. In 2022 en 2023 zijn in het kader van De Innovatieversneller (DIV) enkele pilots uitgevoerd bij versterkingsprojecten in het Hoogwaterbeschermingsprogramma.

In 2023 en 2024 is het beslissingsraamwerk respectievelijk met ingenieursbureaus en waterschappen, en samen met het U.S. Army Corps of Engineers geëvalueerd. Uit de laatste workshop volgde de wens om de factsheets beter in te passen in het veiligheidsraamwerk en om handvatten te bieden om het meenemen van aspecten in kwantitatieve zin te faciliteren. Het beter kunnen kwantificeren van het effect van aspecten op de overstromingskans wordt in een volgende stap beoogd, evenals het beter inpassen in het veiligheidsraamwerk.

## 1.3 Beheer factsheets

Kennisontwikkeling is een voortdurend proces, daarom worden de factsheets en deze bijbehorende rapportage actief beheerd. Een aanbeveling is om een jaarlijks evaluatie/update moment te organiseren om nieuwe kennis op te halen en ervaringen te delen om op basis daarvan de factsheets aan te scherpen.

Deze eerste versie van de factsheets zal naar verwachting de komende jaren verder worden ontwikkeld op basis van ervaringen. Een van de eerste beoogde doorontwikkelingen is het verzamelen van ervaringen uit projecten en onderzoeken, op basis waarvan gebruikers een betere inschatting kunnen maken van het effect van een aspect. Daarnaast wordt beoogd om handvatten te bieden om aspecten in kwantitatieve zin beter te kunnen beoordelen.

## 1.4 Afbakening

Het BRP en de daartoe behorende factsheets focussen op het faalmechanisme piping. Hierbij wordt vooral gekeken naar opbarsten en terugschrijdende erosie.

Het BRP focust op het fysische proces van piping in de situatie zonder versterkingsmaatregelen. Het is mogelijk dat door versterkingsmaatregelen andere mechanismen dan terugschrijdende erosie een rol zullen spelen. Het faalpad piping en de

fysische processen zijn bijvoorbeeld anders indien een heavescherm of filter aanwezig is, aspecten met betrekking tot maatregelen worden daarom niet behandeld in stap 1 van de BRP aanpak.

Hoewel probabilistische aspecten zoals probabilistisch rekenen, bewezen sterkte, correlaties tussen parameters en het lengte-effect worden mogelijk een invloed hebben op de overstromingskans, worden deze buiten beschouwing, omdat deze geen onderdeel zijn van het fysische pipingproces. Ook worden geen suggesties geven voor monitoringstechnieken, wanneer aanvullende parameters/analyses benodigd zijn. In Bijlage C wordt verder ingegaan op de afbakening.

## 1.5 Leeswijzer

Voor meer informatie over de toepassing van het BRP wordt verwezen naar hoofdstuk 2, hierin wordt de methode toegelicht en ingegaan op het stappenplan. Voor meer diepgang wordt verwezen naar hoofdstuk 3, hierin wordt de opbouw van de factsheets beschreven. Bijlage A beschrijft hoe het BRP in het veiligheidsraamwerk past en in Bijlage B wordt een toelichting gegeven op de bepaling van het kennisniveau in de factsheets. Bijlage C gaat dieper in op de afbakening welke factsheets wel of niet zijn behandeld. Voor ondersteuning bij stap 1 van het BRP wordt verwezen naar Bijlage D, hierin worden de factsheets gegeven.



## 2 Over het BRP

In dit hoofdstuk wordt de toepassing van het BRP beschreven in het huidige veiligheidsraamwerk, BOI2023.

### 2.1 Wat is het BRP?

Voor het bepalen van de overstromingskans geeft het BOI handvatten. Met beslisregels kan de relevantie van het faalmechanisme piping worden onderbouwd. Wanneer het mechanisme relevant is, kan een eerste analyse worden uitgevoerd met rekenregels voor opbarsten en heave, en de rekenregel van Sellmeijer. Voor bepaling van de opgave door piping met deze rekenregels moet de werkelijkheid sterk worden geschematiseerd. Voor een zuivere beschouwing van de pipingopgave is het belangrijk ook de aspecten te beschouwen die niet in de rekenregels zijn meegenomen.

Het Beslissingsondersteunend Raamwerk Piping (BRP) geeft hiervoor een aanpak. Daarbij worden drie stappen onderscheiden, zie Figuur 2.1. In de eerste stap wordt vanuit het faalmechanisme (gehele faalpad tot overstromen) gekeken welke aspecten van belang zijn voor de beschouwde locatie (verhaal van de kering). In de tweede stap worden deze relevante aspecten nader beschouwd in het licht van de beslissing die voorligt. Indien nodig kunnen voor de tweede stap nadere analyses worden uitgevoerd of extra gegevens worden ingewonnen. De laatste stap betreft een verificatie en plausibiliteitscontrole.

In dit hoofdstuk wordt het Beslissingsondersteunend Raamwerk Piping (BRP) uitgewerkt voor de bepaling van de veiligheidsopgave. De factsheets (Bijlage D) zijn bedoeld als hulpmiddel voor het invullen van stap 1 van het BRP.



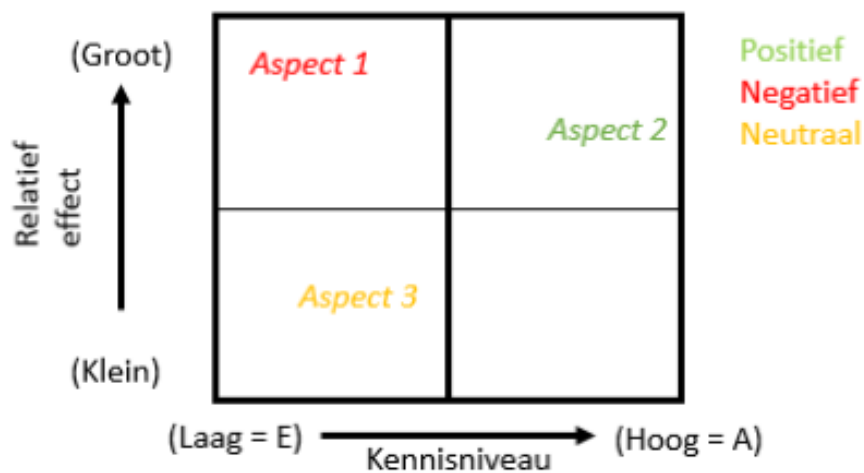
Figuur 2.1 Stappen in een BRP analyse.

#### 2.1.1 Stap 1: Overzicht en begrip

De gebruikelijke analyse voor piping bestaat uit rekenregels voor het bepalen van de overstromingskans voor opbarsten, heave en piping, zoals beschreven in het BOI.

Voor opbarsten bestaat de gebruikelijke analyse uit een eenvoudige rekenregel op basis van het verticaal evenwicht, waarbij sterkte van de deklaag en geohydrologische aspecten niet of niet volledig meegenomen zijn. Met de rekenregel van Sellmeijer kan een eerste analyse van de overstromingskans door piping, gegeven opbarsten en heave, worden uitgevoerd. De rekenregel betreft een eenvoudig model dat niet met alle aspecten van terugschrijdende

erosie rekening houdt. Voor analyse van het faalmechanisme piping bij van dijken is meer kennis beschikbaar en spelen meer aspecten een rol dan in een gebruikelijke analyse met de rekenregel van Sellmeijer worden beschouwd, bijvoorbeeld de invloed van meerlaagsheid. Na het optreden van terugschrijdende erosie zijn er nog verschillende vervolprocessen die niet worden meegenomen in de analyse. Er zijn dus veel aspecten die niet worden meegenomen in de analyse, maar wel effect kunnen hebben op de overstromingskans. In de eerste stap van het BRP wordt een overzicht gegeven van het effect van deze aspecten op de overstromingskans (of op onderliggende parameters, zoals het kritiek verval) en het kennisniveau, ten opzichte van de analyse met de rekenregel. Het effect van een aspect op de overstromingskans is locatie-afhankelijk en kan positief en negatief zijn. In stap 1 worden de verschillende aspecten ingeschaald op basis van het kennisniveau en het verwachte relatief effect (ten opzichte van elkaar) op de overstromingskans. Door deze aspecten te positioneren in de kwadranten in Figuur 2.2 wordt inzichtelijk in welke mate de aspecten van belang zijn voor het handelsperspectief. In kleur is aangegeven of een aspect de overstromingskans verkleint (positief effect) of vergroot (negatief effect). Initieel worden alle aspecten meegenomen bij het invullen van het kwadrant, zodat een volledig overzicht wordt gekregen.



*Figuur 2.2 BRP kwadranten geven aan wat het kennisniveau is en wat het relatieve effect is op de overstromingskans (of op onderliggende parameters, zoals het kritiek verval). Of dit effect positief of negatief is volgt niet uit de positie in een kwadrant, maar uit de kleur van dit aspect.*

Het overzicht geeft aan hoe goed, gegeven de actuele kennis, de overstromingskans met een gebruikelijke analyse kan worden bepaald. Hoe om te gaan met aspecten die niet in de gebruikelijke analyse zijn meegenomen is afhankelijk van het kwadrant waarin het aspect valt.

De aspecten in de onderste kwadranten hebben relatief weinig effect op de overstromingskans, zodat vooral gefocust kan worden op de aspecten in de bovenste kwadranten, tenzij de verwachting is dat deze gezamenlijk toch een significant effect op de overstromingskans hebben. Aspecten met een laag kennisniveau, die in de linker kwadranten vallen, zijn moeilijker mee te nemen in de analyse en meer onzeker in kwantitatieve zin dan aspecten met een hoger kennisniveau. Het effect van aspecten in het kwadrant rechtsboven kan met nadere analyses gekwantificeerd worden. Voor de aspecten in het kwadrant linksboven kan een schatting worden gemaakt van het effect op de overstromingskans op basis van beschikbare literatuur.

Wanneer de groene en rode aspecten in de bovenste twee kwadranten redelijk verdeeld zijn en de verwachting is dat de positieve en negatieve aspecten elkaar in kwantitatieve zin compenseren en geeft de berekende overstromingskans waarschijnlijk een reëel beeld.

Voor het afwegen van aspecten die niet zijn meegenomen in de rekenregels zijn factsheets opgesteld. Deze factsheets zijn weergegeven in Bijlage D. De factsheets geven ondersteuning in het schatten of analyseren van het effect op de overstromingskans voor een specifieke locatie.. Tevens geven de factsheets inzicht in de ontwikkelstatus / kennisniveau en toepassingsgebied van de beschikbare kennis. In hoofdstuk 3 is meer informatie gegeven over de aanpak voor het opstellen van de factsheets en welke aspecten hierin worden behandeld.

### 2.1.2 **Stap 2: Inzicht en handelingsperspectief**

De tweede stap bestaat uit het beschouwen van aspecten in het licht van de beslissing en de afweging van handelingsperspectieven, eventueel ondersteund door aanvullende analyses. Stap 2a is een optionele stap bestaat uit het uitvoeren van gevoeligheidsanalyses om het effect van relevante aspecten op de overstromingskans te bepalen, hiermee wordt een groter inzicht verkregen in de onzekerheden die spelen in de veiligheidsanalyse. Hiermee kunnen vervolgens in stap 2b handelingsperspectieven worden afgewogen.

#### 2.1.2.1 **Stap 2a: Gevoeligheidsanalyses**

Met gevoeligheidsanalyses of hoekpuntenanalyses (= een kleine gevoeligheidsanalyse waarin enkel de meest extreme scenario's worden getoetst) kan het effect van de verschillende aspecten worden bepaald. Dit helpt bij het verkrijgen van inzicht in het effect dat een specifiek aspect heeft op de beslisvraag. De aspecten in de onderste kwadranten hebben minder effect op de overstromingskans. Nadere analyse van deze aspecten wordt alleen aanbevolen wanneer deze kunnen bepalen of er een opgave is. Indien dit niet het geval is wordt, vanwege de geringe impact, aanbevolen voor deze aspecten te werken met veilige en robuuste uitgangspunten.

In de gevoeligheidsanalyse (verkenning gevoeligheid voor verschillende situaties inclusief mate van waarschijnlijkheid) of hoekpuntenanalyse (verkenning van de extremen) worden onder- en bovengrenzen voor het effect van de te onderzoeken aspecten geschat. Informatie waarmee de bandbreedte van het effect op de overstromingskans (of op onderliggende parameters als kritiek verval) kan worden bepaald voor een specifieke locatie wordt op termijn in de factsheets gegeven. Op dit moment moet hiervoor achterliggende literatuur worden geraadpleegd, DIV kan hierbij ondersteuning bieden. In deze analyses worden:

- Onafhankelijke scenario's gedefinieerd waarin per aspect wordt gevarieerd (overige parameters worden gelijk gesteld aan de set die hoort bij de meest realistische basisschematisering voor de aspecten).
- Indien nodig combinaties van scenario's onderzocht. Meestal wordt er geen relatie tussen de te onderzoeken scenario's verondersteld. Wanneer dit wel logisch zou zijn, kunnen ook combinaties van scenario's worden onderzocht. De factsheets geven aan tussen welke aspecten een correlatie verwacht kan worden.

De gevoeligheidsanalyse helpt om uiteindelijk te komen tot inzicht in het effect op de overstromingskans van de verschillende aspecten. De gevoeligheidsanalyse lijkt op een beperkte vorm van een probabilistische analyse maar heeft een ander doel. Het doel is niet om de resultaten van alle combinaties van parameterwaarden te onderzoeken, of om een overstromingskans uit te rekenen. In een gevoeligheidsanalyse worden de parameters gevarieerd waarvan de onzekerheid een effect kan hebben op de overstromingskans, om de bandbreedte te bepalen waarbinnen de overstromingskans valt.

Bij het uitvoeren van de gevoeligheidsanalyse of hoekpuntenanalyse kan gebruik gemaakt worden van aanvullend grondonderzoek, monitoringsdata, andere beschikbare modellen, zoals bijvoorbeeld D-Geo Flow of sterktefactoren. Voor de uitvoering van deze analyses bevatten de factsheets suggesties en verwijzingen naar literatuur.

### 2.1.2.2 Stap 2b: Afweging van handelingsperspectieven

Met de resultaten van stap 1 en mogelijk 2a, kan in stap 2b afgewogen worden wat dit betekent voor het handelingsperspectief.

Er zijn verschillende mogelijkheden om om te gaan met het effect van de aspecten op de overstromingskans:

1. Het treffen van een fysieke maatregel.
2. Meer onderzoek doen, om onzekerheden te verkleinen.
3. Beheer.

Een combinatie van de bovenstaande opties is uiteraard ook mogelijk.

Meer onderzoek om onzekerheden te verkleinen kan bestaan uit:

- Aanvullend grondonderzoek of monitoring, bijvoorbeeld het plaatsen van peilbuizen.
- Onderzoek naar de toepasbaarheid van alternatieve modellen.
- Kennisontwikkeling.

Voor welke optie wordt gekozen hangt naast de uitkomsten van de gevoeligheidsanalyse ook af van het kennisniveau. Als er al veel kennis is, kan de gevoeligheidsanalyse uit stap 2a met een groter detail niveau en meer zekerheid uitgevoerd worden, en indien nodig kan een maatregel ontworpen worden. Als er weinig kennis beschikbaar is, kan worden besloten om meer onderzoek te doen. Dit hangt onder meer af van de verwachtingen van het extra onderzoek (de kans dat kennisontwikkeling een bepaald resultaat heeft) en hoe groot het veiligheidstekort is (gerelateerd aan de consequenties van uitstellen of onterecht versterken).

Voor de duiding is het belangrijk om de impact van de onzekerheid in relatie tot de doelmatigheid van een investering in een maatregel te beschrijven. Daarbij geldt in het algemeen dat bij ontwerpen robuuste keuzes beter te verantwoorden zijn dan bij beoordelen.

### 2.1.3 Stap 3: Verificatie en plausibiliteitscontrole

Als laatste stap wordt gekeken of het gekozen handelingsperspectief plausibel is en voldoet aan de overstromingskansen. Indien gekozen is voor een maatregel wordt de ontwerpverificatie uitgevoerd zoals beschreven in de Handleiding Veiligheidsontwerp (RWS, 2024). In deze ontwerpverificatie wordt het overzicht van gebeurtenissen die kunnen leiden tot overstroomingen geëvalueerd. De aspecten die in stap 1 zijn gedefinieerd kunnen worden gebruikt voor het bepalen van gebeurtenissen die betrekking hebben op het veronderstelde gedrag van de kering. Eventuele nieuwe (ongewenste gebeurtenissen) die het gevolg zijn van gemaakte keuzes worden aan het overzicht van gebeurtenissen toegevoegd. De verificatie is afgerond wanneer de overstromingskans van het totaal aan gebeurtenissen kleiner is dan de vereiste overstromingskans.

Tenslotte wordt voor de verificatie opgemerkt dat het belangrijk is dat altijd de context van de waterkering centraal staat. Onzekerheden bij een schaaldijk hebben voor piping een andere betekenis dan dezelfde onzekerheden bij een kering met een breed voorland. In situaties met een meervoudige opgave (de overstromingskans door meerdere faalmechanismen is te hoog) is een globale onderbouwing vaak al voldoende. Indien gekozen is om geen maatregel te treffen wordt enkel een plausibiliteitscontrole aanbevolen.

In alle gevallen wordt plausibiliteitscontrole aanbevolen. Daarbij worden de volgende vragen gesteld:

1. Heb ik alle kennis gebruikt? Zou meer informatie tot een ander resultaat leiden?
2. Heb ik de kennis op een goede manier geïnterpreteerd? Is het resultaat logisch en verklaarbaar?

3. Heb ik niet vanuit een tunnelvisie geredeneerd? Ben ik voldoende uitgedaagd, bijvoorbeeld vanuit kwaliteitsborging en vier-ogen-principe, check door De Innovatieversneller of challenge door het Adviesteam Dijkontwerp?

## 2.2 Welke beslissing ondersteunt het BRP?

Het BRP heeft verschillende mogelijke toepassingen, en afhankelijk van de toepassing verschilt de beslissing:

- A. **Beoordelen:** bij beslissingen over onderbouwen of aan de veiligheidseisen kan worden voldaan, waar meer energie in te steken, hoe stabiel is je scope, wanneer stop je met analyseren, wanneer gaat een project naar het HWBP.
- B. **Ontwerpen:** heb ik alle kennis meegenomen? Afwegen hoe het meenemen van nieuwe kennis mijn ontwerp kan beïnvloeden.
- C. **Zorgplicht:** hoe beïnvloedt nieuwe kennis mijn monitoring (hoe prioriteer ik mijn monitoring) en beheer (ik zie wellen, hoe erg is dit en is dit verwacht of onverwacht)?

Het BRP helpt bij deze beslissingen door onzekerheden in kennis gestructureerd te inventariseren. Het resultaat is een overzicht van relevante aspecten die een te schatten of een onbekende invloed hebben op de berekende overstromingskans. In eerste instantie helpt het BRP door te bepalen welke aspecten nadere analyse verdienen. En vervolgens helpt het BRP om te gaan met deze nadere analyses.

## 2.3 Voorbeelden

Er is inmiddels enige ervaring opgedaan met het BRP. Deze voorbeelden zijn te raadplegen op de wiki van De Innovatieversneller (<https://publicwiki.deltares.nl/display/HWBPPiping/HWBP-DIV+Gebruikersplatform+Piping>).

I

## 3 Aanpak opstellen factsheets

In dit hoofdstuk wordt behandeld hoe de factsheets zijn opgesteld, de factsheets staan in Bijlage D.

### 3.1 Afwegingen welke aspecten te behandelen in factsheet

Het doel van de factsheets is om overzicht te creëren in de belangrijkste aspecten die een invloed kunnen hebben op de overstromingskans. De aspecten die in de factsheets zijn opgenomen zijn de aspecten waarvan ten tijde van het opstellen van dit rapport de verwachting is dat deze nog niet of onvoldoende meegenomen worden in generieke analyses met het BOI.

De afgelopen jaren is de analysemethode van piping enigszins veranderd. Door numerieke berekeningen kunnen gebruikers al complexere geometrieën doorrekenen, daarnaast is het mogelijk om rekening te houden met aspecten als anisotropie en meerlaagsheid. Voor enkele aspecten die worden behandeld in de factsheets zijn modellen/methodes beschikbaar, die hun weg in de praktijk al beginnen te vinden. De lijst met factsheets zal in de tijd veranderen. De afwegingen voor het wel/niet meenemen van aspecten is nader beschreven in Bijlage B.

### 3.2 Aspecten behandeld in factsheets

Hieronder staan de 14 aspecten die nader behandeld zijn in de factsheets:

1. Opbarsten: Sterkte deklaag.
2. Opbarsten: Tijdsafhankelijke stroming.
3. Opbarsten: Geohydrologische invloeden.
4. Terugschrijdende erosie: Aanwezigheid voorland (> 1 keer dijkbasis).
5. Terugschrijdende erosie: Fijne fractie.
6. Terugschrijdende erosie: Slechte sortering.
7. Terugschrijdende erosie: Drukval in opbarstkanaal (hoger of lager dan 0.3d).
8. Terugschrijdende erosie: Heterogeniteit korrelgrootte in baan van de pipe.
9. Terugschrijdende erosie: Fluctuatie van de diepte of helling van de deklaag in de baan van de pipe.
10. Terugschrijdende erosie: 3D concentratie van stroming naar de pipe.
11. Terugschrijdende erosie: Tijdsafhankelijkheid.
12. Terugschrijdende erosie: Anisotropie van de doorlatendheid.
13. Terugschrijdende erosie: Meerlaagsheid watervoerend pakket (ten opzichte van gewogen gemiddelde).
14. Vervolgprocessen: Duur van het bezwijkproces.

In Bijlage B is een toelichting gegeven op de keuze voor deze aspecten.

### 3.3 Algemene opzet factsheets

De factsheets zien eruit zoals het voorbeeld in Figuur 3.1. De factsheets bestaan uit 5 onderdelen:

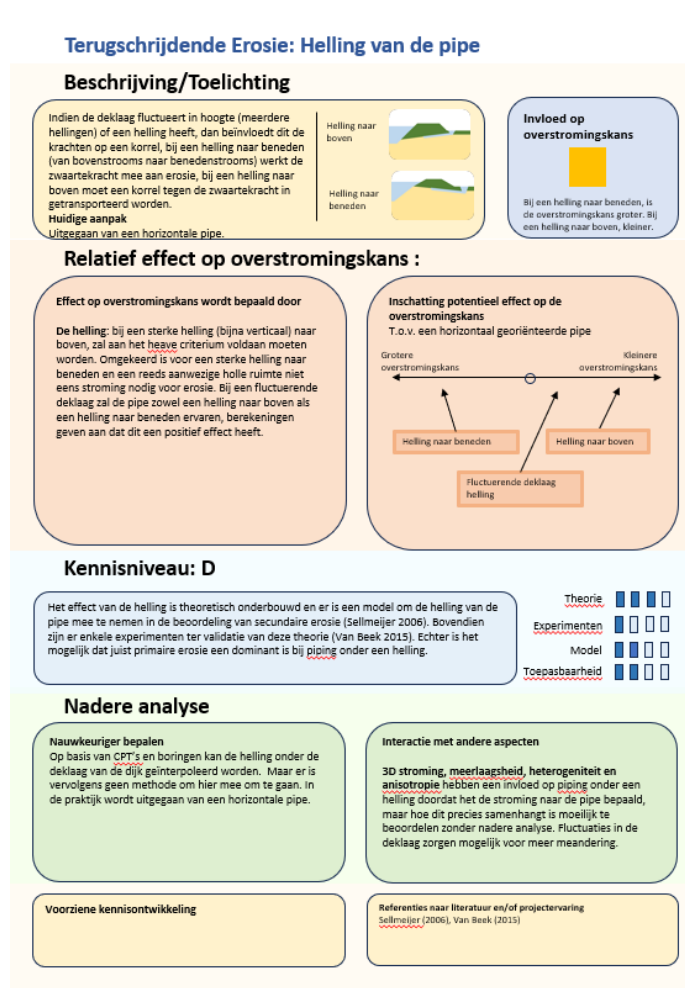
#### 1) Beschrijving

Een beknopte beschrijving van het aspect en de huidige aanpak in de pipinganalyse worden genoemd. Er is ook een figuur ter illustratie toegevoegd. Vervolgens wordt genoemd of een positief of negatief effect op de overstromingskans verwacht wordt door het meenemen van dit aspect (t.o.v. de huidige aanpak). Een positief effect betekent een kleinere overstromingskans. Bij het invullen van het BRP is het van belang om vanuit de

initieel uitgevoerde analyse (vaak de analyses gemaakt voor de wettelijke beoordeling) te redeneren, zodat het effect van een aspect niet dubbel meegenomen wordt (1x in de originele analyse en 1x als extra effect).

2) Relatief effect op de overstromingskans

Hierin wordt beschreven welke omgevingsfactoren relevant zijn voor het beschouwde aspect en hoe het aspect de overstromingskans, afhankelijk van de omgevingsfactoren, beïnvloedt. Dit deel wordt gebruikt om het aspect op de y-as van de BRP kwadranten te plaatsen. In paragraaf 3.4 wordt dit nader toegelicht.



Figuur 3.1 Voorbeeld van een factsheet.

3) Kennisniveau

Het kennisniveau wordt beschreven aan de hand van experimenten, theorie, model en toepasbaarheid. Het kennisniveau is in principe niet locatie-afhankelijk. Dit onderdeel wordt gebruikt om het aspect op de x-as van de BRP kwadranten te schalen. In paragraaf 3.4 wordt dit nader toegelicht.

4) Nadere analyse

Indien ervoor gekozen wordt om een aspect verder te analyseren dan staan in dit onderdeel enkele suggesties om de invloed van het aspect beter in te schatten. Ook wordt de interactie/samenhang met andere aspecten hier benoemd.

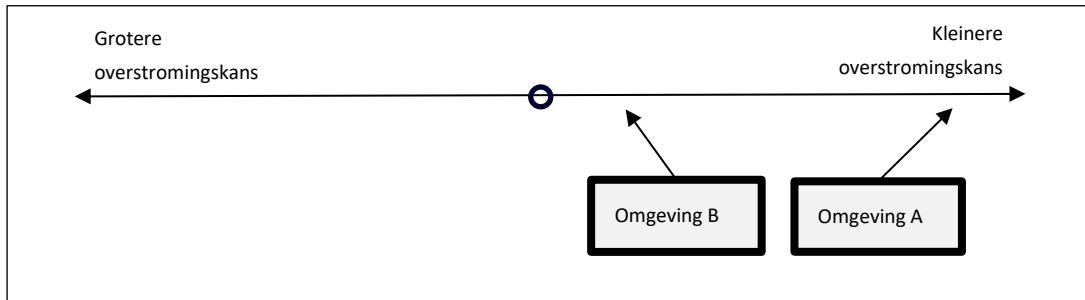
5) Voorziena kennisontwikkeling en referenties naar literatuur en/of projecten.

In dit onderdeel zijn referenties gegeven naar reeds uitgevoerde onderzoeken naar het aspect en zijn beoogde onderzoeken/onderzoeksresultaten genoemd.

Van deze onderdelen worden onderdeel 2 (beoordeling relatief effect) en onderdeel 3 (beoordeling kennisniveau) in respectievelijk paragraaf 3.4 en paragraaf 3.5 verder toegelicht. De factsheets staan in Bijlage D weergegeven.

### 3.4 Toelichting op beoordeling relatief effect op de overstromingskans

De aspecten worden relatief ten opzichte van elkaar in op de y-as van het BRP overzicht geplaatst. Waar een aspect belandt in het overzicht is afhankelijk van de locatie. Omgevingskenmerken, zoals de ondergrond, de dijkgeometrie en hydraulische belastingen variëren sterk met locatie. Daarom is het altijd van belang om locatie-specifiek te analyseren welke omgevingskenmerken een invloed hebben op het te evalueren aspect in het beschouwde gebied.



*Figuur 3.2 Omgevingskenmerken die bepalen hoeveel effect het aspect heeft op de overstromingskans. Omgeving A heeft andere omgevingskenmerken dan Omgeving B.*

Het effect dat een bepaald aspect heeft op de overstromingskans is dus sterk afhankelijk van de omgeving. Het simpelste voorbeeld is dat in een omgeving zonder voorland, er geen effect is van het voorland op de overstromingskans. Bij een lang voorland met een dikke en slecht doorlatende deklaag zal het voorland echter een groot effect hebben op de overstromingskans.

Het is aan de gebruiker om te bepalen of/in welke mate relevante omgevingskenmerken aanwezig zijn op de projectlocatie. De invloed van de omgeving op de overstromingskans is visueel weergegeven in de factsheet, zoals in Figuur 3.2. Er is geen maat aangegeven in de figuur: de inschatting van het effect op de overstromingskans is relatief t.o.v. andere aspecten. Hoe de aspecten zich tot elkaar verhouden is aan de gebruiker om in te schatten.

### 3.5 Toelichting op beoordeling kennisniveau

Het kennisniveau is bepaald aan de hand van reeds uitgevoerd onderzoek. Hierin is het kennisniveau beoordeeld op basis van 4 criteria:

1. Theorie: Is de conceptuele beschrijving goed uitgewerkt? En is de theorie breed toepasbaar?
2. Experimenten: Zijn er observaties uit experimenten of veldmetingen ter validatie van de theorie? Zijn de resultaten te duiden?
3. Model: Is er een analytische/numerieke uitwerkingsmethode, en is deze gevalideerd?
4. Toepasbaarheid: kan de kennis gebruikt worden? kan er voorspeld worden wanneer het voorkomt? Zijn de benodigde parameters te bepalen?

Per criterium kunnen 4 punten worden toegekend en het totaal aan punten leidt tot een kennisniveau van A (veel kennis) tot E (weinig kennis). In de factsheets staat de beoordeling per criterium evenals de totaalbeoordeling. De beoordeling van het kennisniveau is hieronder beschreven:

- A. Er zijn experimenten/veldmetingen op verschillende schalen uitgevoerd in verschillende



- omstandigheden/grondtypen/geometrieën, en er is ondersteuning door goed onderbouwde theorie/numerieke berekeningen. Daarnaast is er een handelingsperspectief waar gebruikers mee aan de slag kunnen. (>14 punten).
- B. Er zijn experimenten/veldmetingen op verschillende schalen en er zijn numerieke berekeningen/goed onderbouwde theorie. Maar het kan zijn dat deze niet alles omvattend zijn, een aantal veel voorkomende scenario's zijn nog niet geanalyseerd, of er zijn een aantal onverwachte resultaten. Situatie waarin hoofdzakelijk de grondwaterstroming veranderd vallen ook onder deze groep, omdat grondwaterstroming een dermate bekend fenomeen is, dat experimentele validatie overbodig lijkt. (10-14 punten).
  - C. Er zijn enkele experimenten en er zijn numerieke berekeningen/goed onderbouwde theorie, echter is er nog niet genoeg kennis aanwezig om de effecten te kwantificeren. Het kan ook zijn dat er veel onverwachte resultaten zijn. (6-9 punten).
  - D. Er is een theorie, en deze wordt onderbouwd door enkele experimenten of berekeningen.  
Echter is er nog niet genoeg over bekend om het te generaliseren, er is niet bekend welke factoren een invloed hebben op dit aspect en het is niet te kwantificeren. (3-6 punten)
  - E. Er is een theorie die nog niet onderbouwd is door onderzoek, op dit punt betreft het nog een hypothese. Of er zijn enkel observaties, maar zonder theoretische onderbouwing. (<3 punten).

Het huidige kennisniveau is in principe een gegeven in de factsheet. Het is echter mogelijk dat een bepaald aspect meer onderzocht is in een bepaalde omgeving. Daarom is het mogelijk om hier in beperkte mate vanaf te wijken indien dit ook is aangegeven in de beschrijving van het actuele kennisniveau. Omdat onderzoek uitgevoerd zal blijven worden naar piping is het belangrijk om de factsheets regelmatig bij te werken, zodat deze actueel blijven. In Bijlage B staat het kennisniveau per factsheet beschreven.

## 4 Referenties

- Allan, R. (2018). *Backward erosion piping* (Doctoral dissertation, UNSW Sydney).
- Van Beek, V. M. (2015). Backward erosion piping: initiation and progression.
- Van Beek, V. M., Van Essen, H. M., Vandenboer, K., & Bezuijen, A. (2015). Developments in modelling of backward erosion piping. *Géotechnique*, 65(9), 740-754.
- Van Beek, V., Hogendoorn, R., Rosenbrand, E., Hijma, M., (2020) Kennis voor Keringen: Syntheserapport pipingonderzoek 2018-2019.
- Van Beek, V., Robbins, B., Rosenbrand, E., & van Esch, J. (2022). 3D modelling of backward erosion piping experiments. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 31, 100375.
- Brinkhuis, M., Hoogewoud, J., Niele, H., Van Rinsum, G., Kok, H., (2020), HWBP Projectgebonden Innovatie Naar een geohydrologische aanpak voor piping' – Synthese rapport.
- De Bruijn, H., Van Beek, V., Knoeff, H., Koelewijn, A., (2015), Analyserapport IJkdijk pipingproeven, Deltares rapport, 1200375-002-GEO-0002.
- Chen, S. S., Zhong, Q. M., & Shen, G. Z. (2019). Numerical modeling of earthen dam breach due to piping failure. *Water Science and Engineering*, 12(3), 169-178.
- Van Goor, G., Hijma, M., De Bart, H., Pruijn, N., Van Beek, V., (2023). Eindrapport Piping in Getijdenzand v3.0.
- Kanning, W. (2012). The weakest link: spatial variability in the piping failure mechanism of dikes.
- Kanning, W., Hijma, M.P., Van Meerten, J.J., (2019) KvK piping deelproject 014: Anisotropie.
- Kok, H., Bor, M. (2020) Beschrijving referentie grondwatermodel. Achtergrond bij syntheserapport.
- Leidraad zandmeevoerende wellen. (1984).
- Lucker, S.L., Robbins, B.A., (2023), Backward erosion piping through silty sand mixtures. Symposium "Management for Safe Dams"- 91<sup>st</sup> Annual ICOLD meeting, Gothenburg 13-14 June.
- Marchi, M., Martínez, M. F. G., Gottardi, G., & Tonni, L. (2021). Field measurements on a large natural sand boil along the river Po, Italy.
- Ministeriële regeling (2023) Regeling van de Minister van Infrastructuur en Waterstaat, van 12 april 2023, nr. IENW/BSK-2023/94660, houdende vaststelling van regels inzake de beoordeling van de veiligheid van primaire waterkeringen (Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2023).
- Pol, J. C. (2022). Time-dependent development of Backward Erosion Piping.
- Rijkswaterstaat (2023). Handleiding Overstromingskansanalyse Dijken/dammen.
- Deel 2 Piping. <https://iplo.nl/publish/pages/220440/20230713-handleiding-overstromingskansanalyse-dijken-dammen-deel-2-piping.pdf>.

DIV 2024, Publicatie aanpak en afweegkader pipingmaatregelen v1, De Innovatieversneller augustus 2024.

Rijkswaterstaat (2024). Handleiding Veiligheidsontwerp.

Robbins, B. A. (2022). *Finite Element Modeling of Backward Erosion Piping* (Doctoral dissertation, Colorado School of Mines).

Robbins, B. A., Stephens, I. J., Van Beek, V. M., Koelewijn, A. R., & Bezuijen, A. (2020). Field measurements of sand boil hydraulics. *Géotechnique*, 70(2), 153-160.

Rosenbrand, E. Kanning, W. Van Beek, V.M., De Vries, G., Aantjes, B.A. (2023) Omgaan met piping onzekerheden, Deltares rapport, 11209268-021-GEO-0001.

Sellmeijer, J. B. (2006). Numerical computation of seepage erosion below dams (piping). In Third International Conference on Scour and Erosion (pp. 596-601).

Sellmeijer, H., de la Cruz, J. L., van Beek, V. M., & Knoeff, H. (2011). Fine-tuning of the backward erosion piping model through small-scale, medium-scale and IJkdijk experiments. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 15(8), 1139-1154.

Schematiseringshandleiding piping WBI 2017 v4.0 (2021). Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Milieu.

Schmertmann, J. H. (2000). The no-filter factor of safety against piping through sands. In *Judgment and innovation: the heritage and future of the geotechnical engineering profession* (pp. 65-132).

Stoop (2018) The effects of anisotropy and heterogeneity in the piping sensitive layer. Master thesis, TUDelft.

Tao, Y., (2020) Opdrijven, Opbollen, Opbarsten, MSc thesis, TU Delft.

De Visser, M. M., Kanning, W., Koopmans, R., & Niemeijer, J. (2015). Determination of Spatial Variability in d<sub>70</sub> Grain Size Values Using High Density Site Measurements. In *Geotechnical Safety and Risk V* (pp. 215-220). IOS Press.

# A Hoe past het BRP binnen het veiligheidsraamwerk?

Het BRP is een middel dat kan worden toegepast in het Nederlandse veiligheidsraamwerk. Het veiligheidsraamwerk is gedefinieerd als het Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium – BOI (Rijkwaterstaat, 2023) en alle onderliggende handleidingen. Het BRP is voornamelijk gericht op primaire keringen.

## A.1 Ministeriële regeling en onderliggende documenten

Voor de bepaling van de veiligheidsopgave is de wettelijke beoordeling het vertrekpunt. Hoe moet worden omgegaan met piping voor het beoordelen, ontwerpen en beheer van waterkeringen is vastgelegd in het Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium – BOI (Rijkwaterstaat, 2023) en alle onderliggende handleidingen. Kennisontwikkeling voor piping vindt plaats binnen het Kennis voor Keringen programma van Rijkwaterstaat en Deltares, waar ook dit rapport onderdeel van is. Voldoende uitgekristalliseerde nieuwe kennis vindt daarna zijn weg naar het BOI. Voor piping geldt dat in het BOI vooral wordt gefocust op het toepassen van de rekenregel van Sellmeijer. Een deel van de aspecten, aanvullend op de rekenregel van Sellmeijer, die beschreven worden in dit rapport zijn al opgenomen in BOI documenten zoals de schematiseringshandleiding piping (Technische Leidraad in het nieuwe BOI), bijvoorbeeld voorlandten. Andere aspecten zoals het 3D effect zijn nog niet beschreven in het BOI.

Het omgaan met nieuwe kennis is vastgelegd in artikel 7.2 van de ministeriële regeling (Ministeriële regeling 2023), hierin staat o.a.: *“De keringbeheerder maakt een expliciete afweging rondom het moment van de beoordeling van een dijktraject in de beoordelingsperiode in relatie tot het beschikbaar komen van nieuwe kennis en andere relevante overwegingen.”*

Het BRP is een hulpmiddel om invulling te geven aan de ministeriële regeling. De stappen in het BRP sluiten aan bij de Handleiding Veiligheidsontwerp (RWS, 2024) en de DIV publicatie aanpak en afweegkader pipingmaatregelen (DIV, 2024). Indien wordt overgegaan tot maatregelen wordt verwezen naar de Handleiding Veiligheidsontwerp en DIV om invulling te geven aan stap 3 in het BRP.

## A.2 Aandachtspunten

Idealiter wordt een overstromingskans bepaald op basis van alle beschikbare informatie. Dus zowel met inachtnaam van de beschikbare rekenregels (hier zijn uitgewerkte methodes voor in het BOI) als de in dit rapport behandelde aanvullende aspecten. Deze laatste kunnen niet in een probabilistische analyse worden meegenomen. Op basis van de inschattingen van de effecten van de aanvullende aspecten en gevoeligheidsanalyses kan de impact aannemelijk worden gemaakt en onderbouwd worden of aan de veiligheidseisen wordt voldaan.

Als aspecten in het BOI expliciet worden meegenomen worden deze onderdeel van de gebruikelijke analyse van de overstromingskans. Aangezien dit soort aanpassingen niet frequent worden doorgevoerd en het ontwikkelen van kennis langdurige inspanning vergt, zal de hier beschreven aanpak op basis van gevoeligheidsanalyses in de praktijk nodig blijven.

## B Toelichting kennisniveau per factsheet

### 1. Opbarsten: Sterkte deklaag (E)

Het is erg aannemelijk dat de deklaag enige weerstand tegen scheuren biedt. Met de huidige data is de scheurbestendigheid echter nog niet te kwantificeren. In de MSc thesis Tao (2020) is een theoretisch model uitgewerkt en ondersteund door numerieke berekeningen van een versimpelde laag. Echter is deze geometrie vereenvoudigd en is er geen experimentele onderbouwing. In 2023 zijn verschillende proeven uitgevoerd zowel in de geocentrifuge van Deltares als bij Reevediep. De resultaten zijn hiervan nog niet beschikbaar. Daarom wordt het kennisniveau op dit moment op E gezet: er is op dit moment geen gevalideerd model, en de “kennis” kan nog niet toegepast worden.

### 2. Opbarsten: Tijdsafhankelijke stroming (B)

Grondwaterstroming is een bekend en goed bestudeerd fenomeen. Met numerieke berekeningen kan het effect van een kortdurend hoogwater op de stijghoogte worden bepaald. Indien met de onverzadigde grondwaterstroming gerekend wordt is vooral correcte parameterbepaling lastiger. De specifieke relatie met spanningen onder de deklaag aan de binnendijkse zijde is op veel plekken in Nederland onderzocht met peilbuismetingen op verschillende locaties. De theoretische onderbouwing en met name de link met de onverzadigde zone is weinig onderzocht.

### 3. Opbarsten: Geohydrologische invloeden (B)

Grondwaterstroming is een bekend en goed bestudeerd fenomeen, ook in 3D. Met numerieke berekeningen en meten/monitoren kan de waterdruk onder de deklaag goed voorspeld worden. Er zullen grondwaterstromingsberekeningen uitgevoerd moeten worden met lokaal gemeten parameters en monitoring ter kalibratie/validatie. Ondanks dat er geen experimenten zijn uitgevoerd, is met uitgebreid monitoren het valideren van modellen wel mogelijk, zie ook Brinkhuis et al. (2020).

### 4. Terugschrijdende erosie: Aanwezigheid voorland (> 1 keer dijkbasis) (B)

Het meenemen van voorlanden sluit aan op de algemeen bekende grondwaterstromingstheorie. Het voorland kan al meegenomen in de piping analyse conform het BOI, er is een uitwerkingsmethode en benodigde parameters kunnen worden bepaald door meten en monitoren. Daarnaast is mogelijk numerieke sommen te maken en er is een methode om het analytisch mee te nemen. Voor het stappenplan om het voorland mee te nemen zie: (Rosenbrand et al. 2021). Echter heeft het meenemen van het voorland geen kennisniveau A, dit komt doordat er geen experimenten zijn van piping met een voorland, daarnaast is experimentele validatie voor de bepaling van de kritieke pipe lengte beperkt.

### 5. Terugschrijdende erosie: Fijne fractie (B)

De weerstand tegen erosie van zand met veel fijne fractie is theoretisch onderbouwd. Specifiek voor piping in getijdenzand zijn er in Nederland op verschillende schalen ca. 35 experimenten uitgevoerd om de hypothese te bewijzen en kwantificeren (Van Goor et al. 2023). Een groot deel van deze experimenten was uitgevoerd op rivierzand met toegevoegde fijne fractie. Naast de experimenten in Nederland zijn er ook 10 experimenten in de VS uitgevoerd met fijne fractie (“fines”) die dit beeld nogmaals bevestigen (Lucker and Robbins, 2023). De exacte oorzaak voor de extra weerstand tegen pipe-vorming is echter niet bekend.

### 6. Terugschrijdende erosie: Slechte sortering (korrelgrootteverdeling) (D)

Er zijn experimentenseries met variaties in uniformiteitscoëfficiënt (Cu). In Sellmeijer et al. (2011), is Cu ook meegenomen als variabele, de correlatie die hier uit kwam is echter klein,

mogelijk doordat er geen grote onderlinge verschillen zijn onderzocht. In tegenstelling tot dit onderzoek lijken Schmettmann (2000) en Robbins (2022) een groot verband tussen de uniformiteitscoëfficiënt en primaire erosie aan te tonen. De theoretische onderbouwing voor deze verschillen is niet uitgebreid en zou daarom verder onderzocht moeten worden.

#### **7. Terugschrijdende erosie: Drukval in opbarstkanaal (hoger of lager dan 0.3d) (C)**

De theorie dat er weerstand in het opbarstkanaal aanwezig is, is met veldmetingen en experimenteel onderbouwd Robbins et al. (2020). Echter is in de praktijk moeilijk te voorspellen hoe groot de weerstand zal zijn. Gedurende het piping proces zal de weerstand in het kanaal veranderen doordat de stroomsnelheid toeneemt en de korrels uit het opbarstkanaal spoelen. De vorm van het opbarstkanaal is ook van grote invloed, echter is het formaat van het opbarstkanaal eveneens moeilijk te voorspellen. Meer over de 0,3d regel is te vinden in Van Beek et al. (2020).

#### **8. Terugschrijdende erosie: Heterogeniteit korrelgrootte in baan van de pijp (D)**

Het is algemeen bekend dat de ondergrond op korrelschaal heterogeen is. De pipe volgt de weg van de minste weerstand en meandert hierdoor. In dit proces is primaire erosie van belang, echter is dit moeilijk te voorspellen. Er zijn voor zover bekend geen experimenten met sterk heterogene ondergronden. Wel zijn er proefvelden met metingen. Ook zijn er numerieke berekeningen met heterogeniteit waaruit blijkt dat de sterkste korrel in het zwakste pad ongeveer overeen komt met de gemiddelde  $d_{70}$ . In de praktijk is het ook moeilijk om de heterogeniteit goed in kaart te brengen of te karakteriseren, dit maakt de inschatting van het effect moeilijk.

#### **9. Terugschrijdende erosie: Fluctuatie van de diepte of helling van de deklaag in de baan van de pipe (D)**

Het effect van de helling is theoretisch onderbouwd en er is een erosie model (Sellmeijer, 2006) dat ook in de rekenregel toegepast zou kunnen worden. Daarnaast zijn er enkele experimenten ter validatie van deze theorie (Van Beek, 2015). Toch is deze kennis nog niet algemeen toepasbaar en te generaliseren, omdat het slechts enkele experimenten betreft.

#### **10. Terugschrijdende erosie: 3D concentratie van stroming naar de pipe (D)**

In een aantal kleine schaal laboratoriumproeven is het kritieke verval in 3D ca. 1/2 zo groot als met de 2D regel van Sellmeijer wordt voorspeld. In deze proeven vormt één pipe en is geen afstroming naar het achterland.

Er is weinig informatie over het effect op grotere schaal, al wordt op basis van theorie verwacht dat de invloed van 3D stroming groter kan zijn leidend tot lagere  $H_c$ . Op basis van de geohydrologie en experimenten wordt verwacht dat de invloed van het 3D effect kleiner wordt bij doorlatendere achterlanden.

#### **11. Terugschrijdende erosie: Tijdsafhankelijkheid (C)**

In het promotie onderzoek van Joost Pol is uitgebreid onderzoek gedaan naar tijdsafhankelijke pipegroei met kleine en grote schaal experimenten, numerieke modellen en er is een statistisch uitgewerkte methode voorgesteld. Voor de toepassing op grotere schaal zijn er nog onzekerheden. Het is soms lastig vast te stellen of er nog oude pipes aanwezig zijn en 3D numerieke modellen geven op grote schaal onverwachte resultaten voor het kritiek verval.

#### **12. Terugschrijdende erosie: Anisotropie van de doorlatendheid (B)**

Grondwaterstromingstheorie met anisotropie is goed bekend: voor het bepalen van het effect op stroming kunnen daarom numerieke berekeningen uitgevoerd worden. Daarnaast is er een toevoeging op de rekenregel van Sellmeijer, waarmee een eerste inschatting gemaakt kan worden van de invloed van anisotropie (Stoop, 2018, persoonlijke communicatie in Van Beek et al. 2020). Experimentele validatie met anisotrope ondergrond ontbreekt tot op heden.

### **13. Terugschrijdende erosie: Meerlaagsheid watervoerend pakket (ten opzichte van gewogen gemiddelde) (B)**

Grondwaterstroming is een bekend fenomeen, met weinig onzekerheden. Zo geldt dat ook voor meerlaagse stroming. De stroming naar de pipe toe is numeriek (met D-GeoFlow) goed te bepalen. Echter is het zo dat er slechts enkele fysieke experimenten zijn die de invloed van meerlaagsheid op piping bevestigen. Het is mogelijk dat een verandering in verticale instroming de secundaire en primaire erosie beïnvloed op een manier die niet in numerieke analyses meegenomen wordt.

### **14. Vervolgprocessen: Duur van het bezwijkproces (E)**

Op globale lijn zijn de vervolgprocessen bekend. Tijdens de IJkdijkproeven (2011) is het proces geobserveerd. De duur en observaties staan beschreven in De Bruijn et al. (2015) Maar deze resultaten zijn niet te generaliseren, er is geen hypothese of model voor de duur van deze vervolgprocessen bij dijken in de praktijk. Internationaal zijn er numerieke modellen waarmee de duur van het bezwijkproces bij dammen berekend kan worden (Chen et al., 2019), echter zijn deze niet gevalideerd voor dijken zoals we die in Nederland hebben en daarom niet met vertrouwen toe te passen.

## C Afbakening factsheets

De keuze voor welke factsheets wel en niet zijn meegenomen is ontstaan vanuit vragen die de afgelopen jaren naar boven zijn gekomen vanuit de kennisprogramma's en helpdesk. Daarnaast is het in overleg met verschillende partijen afgestemd. Hieronder staan de afwegingen bij het wel/niet meenemen van aspecten.

### C.1 Afwegingen voor het wel meenemen van aspecten

Bij het opstellen van de factsheets en de keuze van aspecten is voornamelijk gekeken naar fysische aspecten die naar verwachting de overstromingskans significant kunnen beïnvloeden, maar waarbij het op dit moment niet per definitie gebruikelijk is dat dit aspect wordt meegenomen in de beoordeling of het ontwerp. Het gaat hierbij om aspecten waarnaar onderzoek is uitgevoerd in de afgelopen jaren en/of waar observaties van zijn. Hierin is de focus gelegd op aspecten waarvan de verwachting is dat (indien voldoende kennis aanwezig is) hier praktische navolging aan gegeven kan worden.

Bij het opstellen van de BRP is zoveel mogelijk uitgegaan van aspecten die nu nog niet gangbaar worden meegenomen. Dit is echter niet altijd eenduidig. Er kan een geleidelijke verschuiving zijn van 'nieuw inzicht' naar 'gangbaar toepassen in de praktijk'. De komende jaren zullen de beschouwde aspecten naar verwachting dus nog veranderen, waarbij zowel nieuwe aspecten kunnen worden opgenomen als aspecten kunnen vervallen.

### C.2 Afwegingen voor het niet meenemen van aspecten

Zoals benoemd in paragraaf 1.4 worden enkel de fysische processen met relatie tot het faalpad piping beschouwd. Naast aspecten met betrekking tot maatregelen (omdat deze tot een ander faalpad leiden) en probabilistische aspecten (omdat dit geen fysische processen zijn) zijn fundamentele onzekerheden t.a.v. de rekenregels buiten beschouwing gelaten. Onder fundamentele onzekerheden wordt verstaan: de erosie- en depositieprocessen op korrelniveau, het effect van verticale stroming op het korrel evenwicht, het stromingsregime in het kanaaltje en de vorm van het kanaaltje. Van deze aspecten is verwacht dat het deels is opgevangen door de kalibratie van Sellmeijer et al. (2011). Bovendien zijn deze aspecten moeilijk meetbaar en voorspelbaar, waardoor er geen praktische navolging aan gegeven kan worden.

Ook inherente onzekerheden van het Sellmeijer model zoals de invloed van de korrelvorm, het erosie model van White, en hoe om te gaan met de rekenregel buiten de kalibratie range zijn niet nader beschouwd. Over het meenemen van de relatieve dichtheid is uitgebreid overlegd, mocht dit aspect noodzakelijk/gewenst blijken in de komende jaren dan kan deze factsheet worden toegepast.

Het scherp schematiseren van verschillende typen dijken (zoals bijvoorbeeld schaaldijken) is niet apart meegenomen als factsheet. Tijdens de workshop is een introdeweerstand of sliblaag genoemd als mogelijke oorzaak van extra sterkte bij schaaldijken. Hier zou in de toekomst een factsheet over gemaakt kunnen worden.



## D De factsheets

# Beslissingsondersteunend Raamwerk Piping (BRP)

## Beschrijving/Toelichting

Het Beslissingsondersteunend raamwerk piping (BRP) is bedoeld als aanvulling op de huidige rekenregels voor piping. De rekenregels zijn gebaseerd op vereenvoudigingen en aannames, terwijl er in de praktijk verschillende aanvullende aspecten spelen die de weerstand tegen piping beïnvloeden. Door onderzoek is inmiddels veel meer kennis over piping in deze complexe omstandigheden bekend. Het BRP is bedoeld als een methode om met deze complexere werkelijkheid om te gaan, op basis van een inschatting van het relatieve effect op de overstromingskans en het kennisniveau. Met de BRP methode worden de verschillende aspecten geplaatst in kwadranten op basis van kennisniveau en de lokaal verwachte impact, om inzichtelijk te maken welke aspecten het belangrijkste zijn. De factsheets zijn een hulpmiddel om de aspecten in de kwadranten te plaatsen. Bij het opstellen is in principe geredeneerd met het BOI als startpunt, tenzij anders aangegeven.

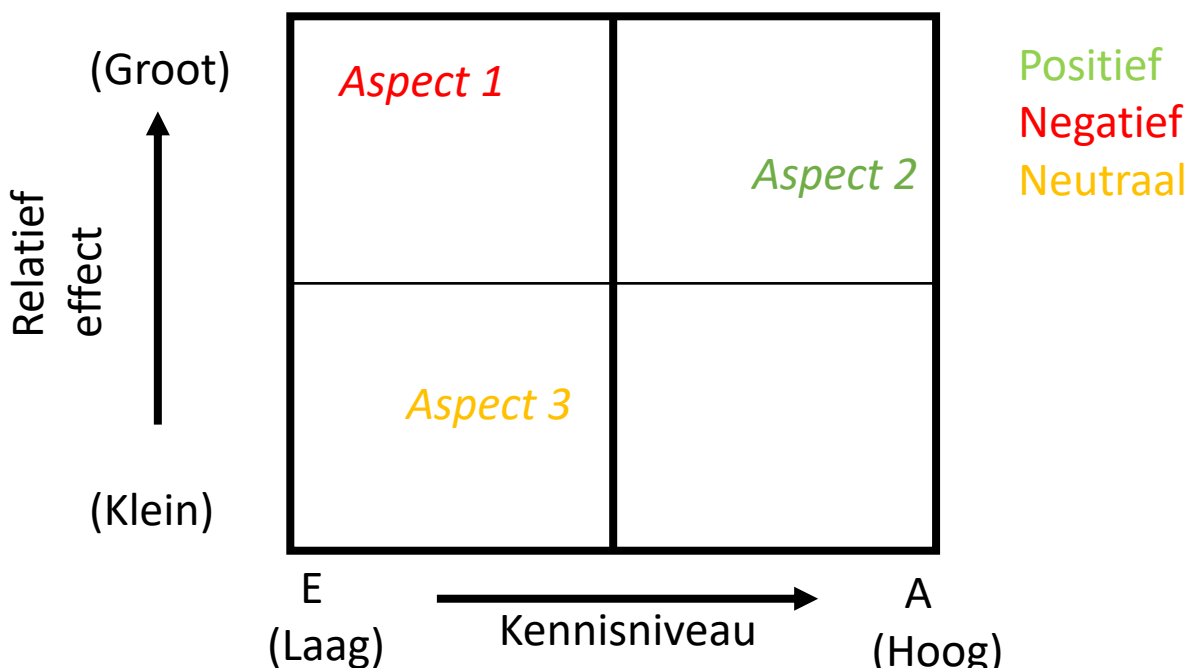
## Relatief effect op overstromingskans :

Het relatief effect van de aanvullende aspecten wordt bepaald op basis van locatie-specifieke eigenschappen. Het is aan de gebruiker om ondersteund door kennis van de dijk en zijn omgeving een inschatting te maken of en in welke mate het aspect op deze locatie van toepassing is. Er is voor gekozen om de impact niet te kwantificeren, omdat dit bij veel van de aspecten niet mogelijk is.

## Kennisniveau:

Het kennisniveau wordt beoordeeld aan de hand van theorie, experimenten/veldmetingen, beschikbare modellen en toepasbaarheid van de bovenstaande onderwerpen. Het kennisniveau is ingeschaald van A tot E waarbij A het hoogste kennisniveau is.

- A) Er zijn experimenten of veldmetingen in verschillende omstandigheden en schalen uitgevoerd, daarnaast is de theorie goed onderbouwd met bijvoorbeeld numerieke berekeningen. De kennis is rijp om toegepast te worden.
- B) Er zijn experimenten op verschillende schalen en er zijn numerieke berekeningen/goed onderbouwde theorie. Maar het kan zijn dat niet alle voorkomende situaties gevalideerd zijn. Aspecten die voornamelijk grondwaterstroming-gerelateerd zijn vallen ook onder deze groep. Aspecten met dit kennisniveau kunnen vaak toegepast worden.
- C) Er zijn enkele experimenten en er zijn numerieke berekeningen/goed onderbouwde theorie, echter is er nog niet genoeg kennis aanwezig om de effecten te kwantificeren of het is onbekend wanneer de situatie optreedt. Het kan ook zijn dat er veel onverklaarbare resultaten zijn.
- D) Er is een theorie en deze wordt onderbouwd door enkele experimenten of berekeningen. Echter is er nog niet genoeg over bekend om het te generaliseren, er is niet bekend welke factoren een invloed hebben op dit aspect en het is niet te kwantificeren.
- E) Er is een theorie die nog niet onderbouwd is door onderzoek. Op dit punt betreft het nog een hypothese.



Opbarsten

# Opbarsten: Sterkte deklaag

## Beschrijving/Toelichting

Wanneer de deklaag wordt belast, hoeft dit niet altijd tot scheurvorming/opbarsten te leiden. De deklaag heeft naast het eigengewicht enige mate van weerstand tegen opbarsten door schuifsterkte, dit is zichtbaar wanneer de deklaag opbolt, voorafgaande aan het opbarsten.

### Huidige aanpak

Evenwicht tussen opwaartse druk en het eigengewicht van de deklaag (opdrifanalyse)

Opdrijven



Opbollen door sterke deklaag



## Invloed op overstromingskans



Sterkte in de deklaag verkleint de overstromingskans t.o.v. opdrifanalyse.

## Relatief effect op overstromingskans :

### Effect op overstromingskans wordt bepaald door

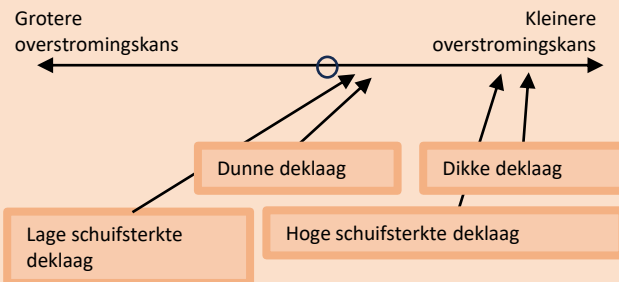
**Dikte deklaag:** Bij dunne deklaagen zal het effect niet zo relevant zijn, omdat er van nature (of door mensen) waarschijnlijk al scheuren/openingen aanwezig zijn. Daarnaast is opbarsten bij dunne deklaagen waarschijnlijk niet het maatgevende subfaalmechanisme. Dit wordt uitgezocht in het Opbarsten bij Dijken project.

**Materiaal:** De sterkte van de deklaag wordt bepaald door de schuifsterkte, indien deze hoog is wordt er veel sterkte verwacht. De stijfheid van de deklaag bepaald de mate van vervorming door de waterdruk.

**Meerlaagsheid deklaag:** bij een meerlaagse deklaag is de sterkte van de deklaag mogelijk minder groot of juist groter, maar dit moet nader onderzocht worden.

### Inschatting potentieel effect op de overstromingskans

T.o.v. opdrifanalyse.



## Kennisniveau: E

De sterkte van de deklaag tegen opbarsten is theoretisch onderbouwd, maar op dit moment zijn er nog geen geanalyseerde proefresultaten of betrouwbare numerieke berekeningen.

Op dit moment is het een (theoretisch onderbouwde) hypothese.

Theorie	■ ■ ■ ■
Experimenten	□ □ □ □
Model	□ □ □ □
Toepasbaarheid	□ □ □ □

## Nadere analyse

### Nauwkeuriger bepalen

Er is op dit moment nog geen uitwerkingsmethode om de sterkte van de deklaag mee te nemen. Hiervoor zal experimenteel onderzoek afgewacht moeten worden. Het is echter al wel mogelijk om op locatie na te gaan of er een dikke deklaag aanwezig is, en daarmee of de sterkte van de deklaag een potentieel effect heeft op de overstromingskans. Bij een deklaag met grotere schuifsterkte zal het effect ook groter zijn.

### Interactie met andere aspecten

De manier van opbarsten en het resulterende opbarstkanaal hebben grote invloed op de terugschrijdende erosie. De weerstand in het opbarstkanaal (**0,3d regel**) is sterk afhankelijk van de vorm en afmetingen van het opbarstkanaal. Daarnaast beïnvloedt de vorm van het opbarstkanaal (en de hoeveelheid kanaaltjes) het **3D effect**.

### Voorziene kennisontwikkeling

Praktijkproef Opbarsten bij Dijken: in de zomer van 2023 zijn proeven uitgevoerd bij Reevediep. In de aanloop hiernaartoe zijn ook verschillende centrifugeproeven uitgevoerd. De resultaten hiervan zijn nog niet beschikbaar.

### Referenties naar literatuur en/of projectervaring

Tao (2020)

# Opbarsten: Tijdsafhankelijke grondwaterstroming

## Beschrijving/Toelichting

Wanneer een hoogwatergolf optreedt duurt het even totdat de drukken in de ondergrond zich aanpassen. Hierdoor kan het zijn dat de druk onder de deklaag lager is dan wordt aangenomen bij een stationaire berekening.

### Huidige praktijk

In de huidige praktijk wordt uitgegaan van stationaire omstandigheden.



## Invloed op overstromingskans



Tijdsafhankelijkheid verkleint de overstromingskans t.o.v. stationair.

## Relatief effect op de overstromingskans :

### Effect op overstromingskans wordt bepaald door:

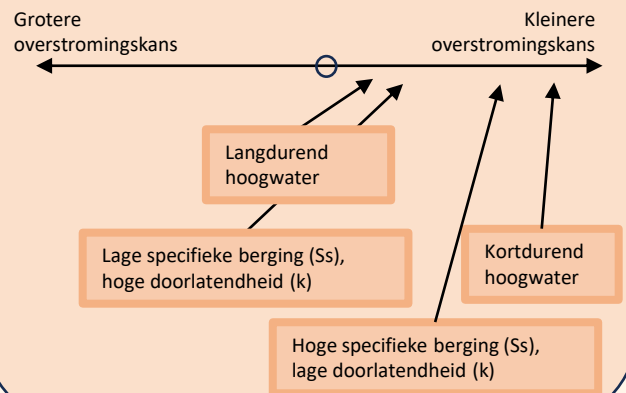
**Duur van de hoogwatergolf** indien een hoogwater lang duurt, is aan te nemen dat tijdsafhankelijkheid geen grote rol speelt. Bij kortdurende hoogwaters, zoals aan de kust voorkomen zal dit wel een grotere rol spelen.

**Specifieke berging (Ss)** is de grondwaterstromingsparameter die bepalend is voor hoe snel een druktoename zich verspreidt in de bodem. Bij een grote waarde is de verplaatsing langzaam en het effect groot. Bij een onverzadigde ondergrond is de specifieke berging groter, vaak zal de bodem tijdens een hoogwater echter (grotendeels) verzadigd zijn. Hierdoor is het verwachte effect klein.

**Doorlatendheid (k)** met een hoge doorlatendheid verspreidt de druk zich sneller.

### Inschatting potentieel effect op de overstromingskans

T.o.v. stationaire analyse.



## Kennisniveau: B

Grondwaterstroming is een bekend en goed bestudeerd fenomeen. Met numerieke berekeningen kan dit worden bepaald. Indien met de onverzadigde grondwaterstroming gerekend wordt is het kennisniveau lager. De specifieke relatie met spanningen onder de deklaag aan de binnendijkse zijde is op veel plekken in Nederland onderzocht met peilbuismetingen. De theoretische onderbouwing en met name de link met de onverzadigde zone is weinig onderzocht.

Theorie	■	■	■	■
Experimenten	■	■	■	■
Model	■	■	■	■
Toepasbaarheid	■	■	■	■

## Nadere analyse

### Nauwkeuriger bepalen

**Gevoeligheidsanalyse:** voordat uitgebreid geïnvesteerd wordt in het beter rekenen, kan het baten om een gevoeligheidsanalyse uit te voeren, om te bepalen of dit mechanisme van belang is.

**Metten en rekenen:** door goed je parameter ( $S_s$ ,  $K$  en verzadiging) te bepalen is het mogelijk om (numerieke) grondwaterstromingsberekeningen uit te voeren, op basis waarvan de druk onder de deklaag bepaald kan worden.

**Monitoren:** Door langdurig de stijghoogte langs de dijk, en de buitenwaterstanden te meten kan een responsanalyse uitgevoerd worden.

### Interactie met andere aspecten

**Voorlanden** reduceren de stroming naar naar/in het watervoerend pakket, daarom wordt verwacht dat bij een lang en slecht doorlatend voorland, het langer duurt tot de steady-state situatie is bereikt.

**3D geohydrologische stroming** heeft waarschijnlijk een grote invloed op de tijdsafhankelijke grondwaterstroming, in de binnenbocht van een rivier bereiken de drukken waarschijnlijk sneller een grotere hoogte, dan in de buitenbocht.

### Voorziena kennisontwikkeling

Er is geen kennisontwikkeling voorzien op dit moment.

### Referenties naar literatuur en/of projectervaring

Bij het Waterschap Scheldestromen wordt al tijdsafhankelijk gerekend

# Opbarsten: 3D geohydrologische stroming bij opbarstzone

## Beschrijving/Toelichting

De opbarstpotentiaal wordt bepaald door grondwaterstroming rondom de opbarstzone. Deze wordt bepaald door de grondeigenschappen en randvoorwaarden, belangrijke randvoorwaarden zijn de rivier en zijn meanders en de waterstand in het achterland.

### Huidige aanpak

2D berekening in combinatie met peilbuismetingen (indien beschikbaar)

3D stroming in rivierbochten



## Invloed op overstromingskans



In de binnenbocht wordt de overstromingskans vergroot, in de buitenbocht verkleind.

## Relatief effect op overstromingskans:

### Effect op overstromingskans wordt bepaald door

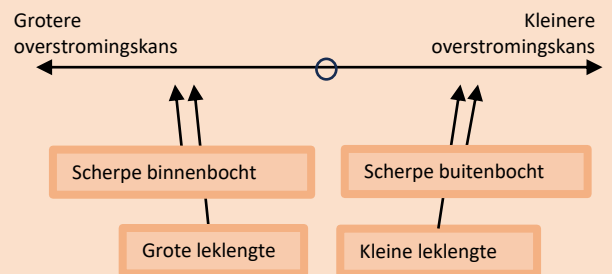
**Geohydrologische effecten:** indien er steile geohydrologische formaties of zandbanen in het gebied aanwezig zijn, of er is een heuvelachtig landschap in het achterland met een hoge grondwaterstand, dan zullen deze een invloed uit oefenen op de 3D geohydrologische stroming.

**Verloop achterland:** de druk onder de deklaag wordt sterk beïnvloed door de leklengte, de weerstand in het voor- en achterland en de transmissiviteit van het watervoerend pakket.

**Meanderen van rivieren:** bij een grote bocht (grote straal) is het effect van 3D stroming klein. Wanneer de verwachte opbarstzone nauw omsloten wordt door een scherpe bocht in de rivier is dit effect groter.

### Inschatting potentieel effect op de overstromingskans

T.o.v. analyse op basis van 2D doorsnede



## Kennisniveau: B

Grondwaterstroming is een goed bestudeerd fenomeen, ook in 3D. Met numerieke berekeningen en validatie door lokale metingen en monitoring onder verschillende omstandigheden/buitenwaterstanden kan de waterdruk onder de deklaag voorspeld worden.

Theorie	■	■	■	■
Experimenten	■	■	■	□
Model	■	■	■	□
Toepasbaarheid	■	■	■	□

## Nadere analyse

### Nauwkeuriger bepalen

Het langdurig monitoren door plaatsing van waterspanningsmeters/peilbuizen is van groot belang, om voor verschillende omstandigheden/buitenwaterstanden de grondwaterstromingsmodel te kunnen valideren. Met 3D grondwaterstromingsberekeningen kan de maatgevende druk onder de deklaag bepaald worden.

### Interactie met andere aspecten

**Tijdsafhankelijkheid** de duur van het hoogwater beïnvloedt hoe snel de druk zich verspreid in het watervoerend pakket.

### Voorziena kennisontwikkeling

Er is op dit moment geen voorziena kennisontwikkeling

### Referenties naar literatuur en/of projectervaring

Brinkhuis et al. (2020) [Syntheserapport Geohydrologische aanpak piping (GAP)]  
Kok & Bor (2020) [Beschrijving referentie grondwatermodel Achtergrond bij syntheserapport]

# Terugschrijdende Erosie

# Terugschrijdende Erosie: Voorlanden (>1x dijkbasis)

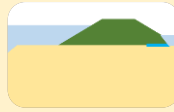
## Beschrijving/Toelichting

Een slecht doorlatend voorland zorgt ervoor dat water minder makkelijk het watervoerend pakket instroomt. Het meenemen van het volledige voorland leidt tot een hoger kritiek verval.

### Huidige aanpak

Recent is er veel kennis en een handelingsmethode ontwikkeld, die al toegepast wordt. Echter blijkt dat er in de praktijk op verschillende manieren met voorland omgegaan wordt.

Geen slecht doorlatend voorland



Slecht doorlatend voorland



## Invloed op overstromingskans



Hoe meer voorland hoe kleiner de overstromingskans.

## Relatief effect op overstromingskans :

### Effect op overstromingskans wordt bepaald door

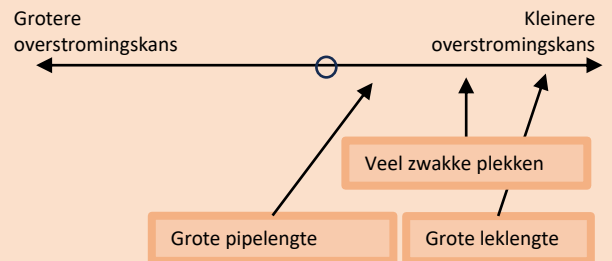
**Leklengte:** Bij een grote leklengte (grote deklaagweerstand, kleine doorlatendheid watervoerend pakket en kleine diepte watervoerend pakket) mag een groter effectief voorland meegenomen worden. Daarnaast kan ook een sliblaag een verlaging van de stijghoogte veroorzaken.

**Zwakke plekken:** De werkelijk aanwezige voorland lengte is de maximale voorland lengte, dit kan de afstand tot de riviergeul zijn, maar ook zijgeulen of diepe sloten kunnen het voorland afkappen. Bij een dikkere deklaag is de kans op zwakke plekken kleiner.

**Pipelengte:** Indien de pipe onder het voorland uit komt, is er een risico op kortsluiting. Om de kritieke pipelengte te bepalen kan het KvK rapport voorlanden gebruikt worden.

### Inschatting potentieel effect op de overstromingskans

T.o.v. situatie zonder voorland.



## Kennisniveau: B

Het meenemen van voorlanden sluit aan op de algemeen bekende grondwaterstromingstheorie. Het is mogelijk numerieke sommen te maken en er is een methode om het analytisch mee te nemen. Experimentele validatie van het effect van een slecht doorlatend voorland op piping ontbreekt. Experimentele validatie voor de bepaling van de kritieke pipe lengte is beperkt., zeker bij 3D stroming en anisotropie kan dit een grote rol spelen.

Theorie	■ ■ ■ ■ ■
Experimenten	■ □ □ □ □
Model	■ ■ ■ ■ ■
Toepasbaarheid	■ ■ ■ ■ ■

## Nadere analyse

### Nauwkeuriger bepalen

Een slecht doorlatend voorland kan in principe altijd meegenomen worden. Met D-Geo Flow of de resultaten van KvK voorlanden kan het effect van het slecht doorlatende voorland berekend worden. Een onzekere parameter hierin is de weerstand in de deklaag, deze kan bepaald worden d.m.v. monitoring. Een belangrijk aandachtspunt is dat de pipe geen kortsluiting mag maken, daarom wordt als maximale pipelengte de dijkbasis aangenomen.

### Interactie met andere aspecten

**3D effecten** spelen overall, maar met de aanwezigheid van een voorland wordt de geohydrologische stroming beïnvloed. De 3D stroming naar de pipe kan langere pipes veroorzaken.

**Anisotropie en meerlaagsheid:** beïnvloeden eveneens de grondwaterstroming. En daarmee de sterkte van het effect van het voorland. Anisotropie en meerlaagsheid leiden tot een langere pipe bij een gegeven buitenwaterstand.

### Voorziene kennisontwikkeling

### Referenties naar literatuur en/of projectervaring

Kennis voor Keringen 2021: Achtergrondrapport Voorlanden  
Kennis voor Keringen 2022: Onderzoek rapport Voorlanden



# Terugschrijdende Erosie: Extra sterkte door fijne fractie

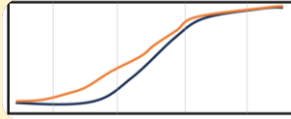
## Beschrijving/Toelichting

De fijne (cohesieve) fractie van een zand, leidt tot toegevoegde sterkte. Door fijne fractie (en cohesie) neemt de erodeerbaarheid van grond af, en daarmee ook de kans op piping.

### Huidige praktijk

De invloed van fijne fractie is niet meegenomen in het model van Sellmeijer.

Fijne fractie



## Invloed op overstromingskans



Door de extra weerstand van de fijne fractie wordt de overstromingskans kleiner.

## Relatief effect op de overstromingskans:

### Effect op overstromingskans wordt bepaald door

**Slib percentage** De hoeveelheid aanwezig fijne fractie materiaal. In de onderzoeken die zijn uitgevoerd wordt dit vaak uitgedrukt als percentage slib of percentage fijne fractie.

**Afzettingsgeschiedenis** In Nederland is de aanwezigheid van een fijne (cohesieve) fractie in het zand sterk afhankelijk van de locatie. Getijden afzettingen in het westen en noorden van Nederland worden gekarakteriseerd door een grote fijne fractie. Hierin wordt ook nog een onderscheid gemaakt tussen getijdenplaat en getijdengeul afzettingen.

### Inschatting Potentieel Effect op $H_c$

#### Getijdenafzettingen

Er wordt een onderscheid gemaakt tussen plaatafzettingen en geulafzettingen.

- Getijdenplaat

$$H_{C_{plaat}} = \frac{L}{7}$$

- Getijdengeul

$$H_{C_{geul}} = 1.4 * H_{C_{Sellmeijer}}$$

#### Andere afzettingen

Indien fijne fractie aanwezig is in andere afzettingen dan getijden afzettingen kan deze ook extra sterkte veroorzaken. Echter is dit nog niet gekwantificeerd.

## Kennisniveau: B/C

Voor piping in getijdenzand zijn er in Nederland op verschillende schalen ca. 35 experimenten uitgevoerd om de hypothese te bewijzen en kwantificeren. Een groot deel van deze experimenten was uitgevoerd op rivierzand met toegevoegde fijne fractie. Hiernaast zijn er ook 10 experimenten in de VS uitgevoerd met fijne fractie die de extra sterkte nogmaals bevestigen. Omdat het grootste deel van het onderzoek gefocust was op getijdenafzettingen is het kennisniveau bij getijdenzand als B beoordeeld, overige gebieden C.

Theorie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Experimenten	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Model	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Toepasbaarheid	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

## Nadere analyse

### Nauwkeuriger bepalen

Voor getijdenzand in Nederland zijn de bovengenoemde rekenregels toepasbaar. Het is hierbij wel van belang om voldoende grondonderzoek uit te voeren, om te valideren dat er daadwerkelijk fijne fractie aanwezig is. Indien het geen getijdenzand betreft maar er is wel een grote fijne fractie aanwezig zijn er nog geen gangbare methode om dit mee te nemen.

### Interactie met andere aspecten

Doordat in Nederland de gebieden met een grote fijne fractie vaak getijdenafzettingen zijn, wordt de ondergrond vaak ook gekenmerkt door een grote gelaagdheid en anisotropie.

### Voorziena kennisontwikkeling

Er is een idee voor extra onderzoek in rivierafzettingen, echter is hier geen onderzoeksvoorstel voor.

### Referenties naar literatuur en/of projectervaring

Van Goor et al. (2023) [Eindrapport Piping in Getijdenzand]  
Lucker and Robbins (2023)

# Terugschrijdende Erosie: Meerlaagsheid

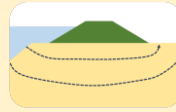
## Beschrijving/Toelichting

De ondergrond is van nature heterogeen opgebouwd, met verschillende afzettingen. Meerlaagsheid van het watervoerend pakket beïnvloedt de stroming naar de pipe en daardoor het pipingproces.

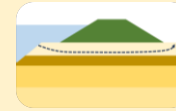
### Huidige aanpak

Als  $k_{\text{boven}} < k_{\text{onder}}$ , dan wordt  $H_c$  gebaseerd op een gewogen gemiddelde doorlatendheid. Anders wordt  $k_{\text{boven}}$  aangehouden.

Homogene ondergrond



Meerlaagse ondergrond



## Invloed op overstromingskans



Een meerlaagse ondergrond verkleint de overstromingskans t.o.v. huidige aanpak

## Relatief effect op overstromingskans:

### Effect op overstromingskans wordt bepaald door

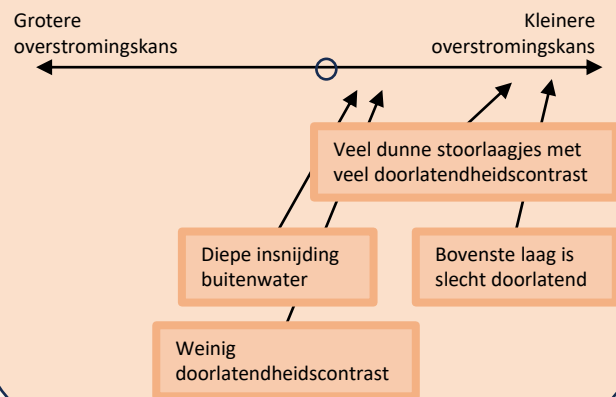
**Gelaagdheid:** Ten opzichte van de gewogen gemiddelde doorlatendheid geldt dat bij  $k_{\text{boven}} < k_{\text{onder}}$  meerlaagsheid een positief effect heeft op piping t.o.v. het gewogen gemiddelde en vice-versa. Een groot doorlatendheidscontrast ( $k_{\text{onder}}/k_{\text{boven}} > 5$ ) vergroot het kritiek verval met een factor 1.1-2.

**Schematisatie:** Over het algemeen geldt dat hoe meer lagen aanwezig zijn des te groter de invloed op de overstromingskans.

**Geometrie:** De insnijding van het buitenwater en het uittredepunt hebben een grote invloed op welke lagen bijdragen. Ook de verhouding kwelweglengte/dikte watervoerend pakket is belangrijk, bij een kleine  $L/D$  heeft meerlaagsheid meer effect.

### Inschatting potentieel effect op de overstromingskans

T.o.v. situatie met een gewogen gemiddelde



## Kennisniveau: B

Grondwaterstroming is een bekend fenomeen, met weinig onzekerheden. Zo geldt dat ook voor meerlaagse stroming. De stroming naar de pipe toe is numeriek (met D-Geo Flow) goed te bepalen. Echter is het zo dat er slechts enkele experimenten zijn die de invloed van meerlaagsheid op piping bevestigen. Tijdens enkele experimenten met meerlaagsheid zijn ook andere processen zoals fluidizatie geobserveerd, wat nu niet in de modellen zit.

Theorie	■ ■ ■ ■ ■
Experimenten	■ ■ ■ □ □
Model	■ ■ ■ □ □
Toepasbaarheid	■ ■ ■ □ □

## Nadere analyse

### Nauwkeuriger bepalen

Met grondonderzoek (CPT, HPT, (veel) doorlatendheidsproeven) kan de meerlaagsheid goed in kaart gebracht worden en daarmee meegenomen worden in de analyse. Met D-Geo Flow berekeningen kan de invloed op piping bepaald worden.

### Interactie met andere aspecten

**Pipelengte en Voorlanden** in situaties met 3D stroming is het kritieke verval lager waardoor de pipelengte bij een gegeven verval groter zal zijn dan ingeschat in 2D situaties.

De pipelengte bij kritiek verval is naar verwachting ook groter in 3D situaties, maar er is weinig experimentele data om dit te onderbouwen.

### Voorziena kennisontwikkeling

### Referenties naar literatuur en/of projectervaring

Van Beek et al. (2020) [Kennis voor Keringen: Syntheserapport pipingonderzoek 2018-2019]

# Terugschrijdende Erosie: Weerstand opbarstkanaal (0,3d)

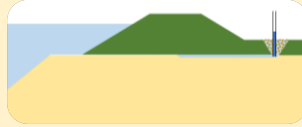
## Beschrijving/Toelichting

Weerstand in het opbarstkanaal reduceert het verval over de pipe en het watervoerendpakket. Het totale verval is de som van het verval in het watervoerend pakket, het verval in de pipe en het verval in het opbarstkanaal. Bij een hogere weerstand in het opbarstkanaal, verkleint de belasting op de pipe.

### Huidige aanpak

In de praktijk wordt 0,3x de deklaagdikte aangenomen als weerstand.

Weerstand opbarstkanaal



## Invloed op overstromingskans



Er wordt vanuit gegaan dat 0,3d een gemiddelde aanpak is.

## Relatief effect op overstromingskans:

### Effect op overstromingskans wordt bepaald door

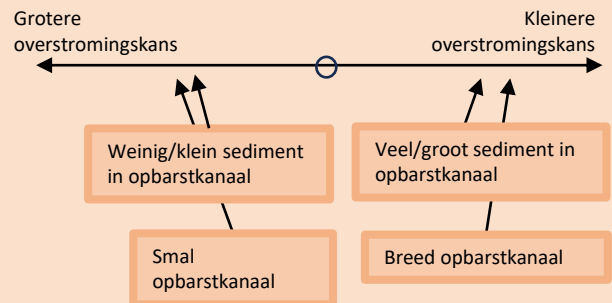
**Debiet** wanneer de stroomsnelheid klein is blijft er veel sediment in de zandmeevoerende wel en is er veel weerstand. In de tijd neemt de stroming naar de pipe toe, doordat de pipe groeit, hierdoor spoelt het sediment uit de wel en neemt de weerstand af.

**Vorm/afmeting opbarstkanaal:** bij een groot opbarstkanaal neemt de stroomsnelheid in de het opbarstkanaal af. Door de verlaagde stroomsnelheid drijft zand in suspensie in het opbarstkanaal, dit leidt tot extra weerstand. De vorm van het opbarstkanaal is afhankelijk van de manier waarop deze gevormd is (opbarsten/erosie/antropogeen) en de aanwezigheid van sloten.

**Korrelgrootte:** Bij grotere korrelgroottes neemt de weerstand in het opbarstkanaal toe.

### Inschatting potentieel effect op de overstromingskans

T.o.v. 0,3d



## Kennisniveau: C

De theorie voor het bepalen van de weerstand in het opbarstkanaal is experimenteel onderbouwd. Hoe veel de weerstand in welke situatie is, dat is niet bekend en kan nader verfijnd worden. Het is lastig om van te voren de vorm en de grootte van het opbarstkanaal te voorspellen, zeker aangezien deze in de tijd ook veranderd. Wanneer de pipe groeit, neemt de stroomsnelheid toe en de weerstand in het opbarstkanaal af.

Theorie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Experimenten	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Model	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Toepasbaarheid	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## Nadere analyse

### Nauwkeuriger bepalen

Er is geen gangbare methode om het de invoerparameters voor het model voor drukval in het opbarstkanaal te bepalen. Voor nu wordt de 0,3d regel daarom gebruikt. Enkel bij locatie-specifieke metingen en raadpleging specialisten kan hiervan afgeweken worden.

### Interactie met andere aspecten

**Opbarsten** beïnvloedt de vorm van het opbarstkanaal en daarmee ook de weerstand.

### Voorziene kennisontwikkeling

In Zeeland is in het najaar van 2023 gemeten aan een zandmeevoerende wel.

### Referenties naar literatuur en/of projectervaring

Leidraad zandmeevoerende wellen. (1984)  
Robbins et al.(2020).  
Marchi et al. (2021)

# Terugschrijdende Erosie: Sortering en grof zand

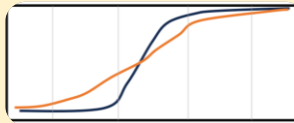
## Beschrijving/Toelichting

In het pad van de pipe leidt een slechte sortering van het zand (grote  $C_u = d_{60}/d_{10}$ ) ervoor dat de korrels beter met elkaar in verbinding staan en hierdoor minder makkelijk eroderen. Een slechte sortering komt vaker voor bij grotere korrels.

### Huidige aanpak

De Sellmeijer (2011) rekenregel is gekalibreerd op zanden met  $1,5 < C_u < 2,5$ , maar er wordt niet met de parameter  $C_u$  mee gerekend.

Slecht gesorteerd zand (oranje) en goed gesorteerd zand (zwart)



## Invloed op overstromingskans



Hoe breder een korrelverdeling, hoe lager de overstromingskans.

## Relatief effect op overstromingskans:

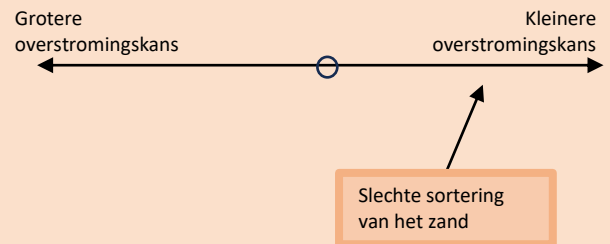
### Effect op overstromingskans wordt bepaald door

**Maatgevende korrelgrootte:** de erosie in piping wordt o.a. bepaald door de maatgevende grootte van een korrel. Een grote korrel erodeert minder makkelijk dan een kleine.

**Sortering:** met een brede sortering erodeert een korrel minder makkelijk doordat deze goed ingeklemd is door omliggende korrels. Indien het watervoerend pakket 'gap graded' is, dan kunnen andere processen dan terugschrijdende erosie een rol spelen. Het effect hiervan op de overstromingskans is niet bekend.

### Inschatting potentieel effect op de overstromingskans

T.o.v. een sortering binnen de kalibratie bandbreedte van Sellmeijer et al. (2011)



## Kennisniveau: C

Er zijn series van experimenten met variaties in  $C_u$ . In de kalibratie uitgevoerd door Sellmeijer et al. (2011) is  $C_u$  ook meegenomen als variabele, de invloed die hier uit kwam is echter klein, mogelijk doordat er geen grote variatie in  $C_u$  is. In tegenstelling tot dit onderzoek lijken Schmetmann 2000 en Robbins 2022 een groot verband tussen de uniformiteitscoëfficiënt en primaire erosie aan te tonen. De theoretische onderbouwing voor deze verschillen is niet uitgebreid onderzocht

Theorie	■	□	□	□
Experimenten	■	■	□	□
Model	■	■	□	□
Toepasbaarheid	■	■	□	□

## Nadere analyse

### Nauwkeuriger bepalen

De uniformiteitscoëfficiënt en maatgevende korrelgrootte kunnen bepaald worden door uitvoering van korrelverdelingen.

### Interactie met andere aspecten

Op basis van eerdere onderzoeken lijkt de uniformiteitscoëfficiënt voornamelijk de primaire erosie te bepalen. Op iets grotere schaal zal het ook de doorlatendheid van de ondergrond beïnvloeden.

### Voorziena kennisontwikkeling

Er is een onderzoeksvoorstel in ontwikkeling van micro-to-macro, maar dit is nog niet ingediend.

### Referenties naar literatuur en/of projectervaring

Robbins (2022)  
Schmetmann (2000)  
Sellmeijer et al. (2011)  
Allan (2018)

# Terugschrijdende Erosie: Heterogeniteit korrelgrootte

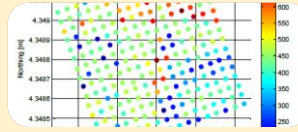
## Beschrijving/Toelichting

Langs het pipepad kan de korreldiameter variëren. De ondergrond heeft een natuurlijke variabiliteit, waardoor de pipe meandert en door zwakkere en sterkere zones moet ontwikkelen.

### Huidige aanpak

In de huidige methode wordt afhankelijk van de correlatielengte de karakteristiek (gemiddelde) korrelgrootte gebruikt in piping analyses.

D70 metingen in proeftuin Veessen-Wapenveld. De Visser, Kanning, Koopmans, Niemeijer (2014)



## Invloed op overstromingskans

?

T.o.v. gemiddelde zal de pipe meer meanderen en zal er meer weerstand zijn. Aan de andere kant wordt gezocht naar de minste weerstand.

## Relatief effect op overstromingskans :

### Effect op overstromingskans wordt bepaald door

**Correlatielengte** indien de correlatielengte klein is fluctueert de ondergrond zeer sterk. Hierdoor is de ondergrond sterker tegen piping.

### Variatiecoëfficiënt

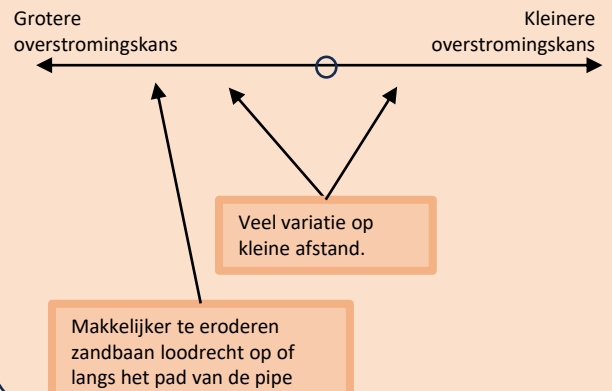
Hoe groter de onderlinge verschillen, des te groter het effect zal zijn op de overstromingskans.

### Zandbanen

Indien grootschalige heterogeniteiten, zoals zandbanen aanwezig zijn is het van belang deze goed in kaart te brengen. Het zou kunnen dat de pipe helemaal door de zandbaan loopt of dat deze loodrecht erop groeit, dit beïnvloedt de korrelgroottes die de pipe tegen komt. Ook binnen de zandbaan zal de pipe meanderen door kleinschalige heterogeniteiten.

### Inschatting potentieel effect op de overstromingskans

T.o.v. gewogen gemiddelde korrelgrootte



## Actueel kennisniveau: D

De theorie voor secundaire erosie is er. Maar op deze schaal is ook primaire erosie van groot belang, hier is minder over bekend. Daarnaast is er geen generieke kennis met betrekking tot variatie in de ondergrond. Er zijn voor zover bekend geen experimenten met sterk heterogene ondergronden. Wel zijn er bijvoorbeeld experimenten met de grofzand barrière.

Theorie	■	■	■	■
Experimenten	■	■	■	■
Model	■	■	■	■
Toepasbaarheid	■	■	■	■

## Nadere analyse

### Nauwkeuriger bepalen

Op deze schaal is het fluctuatiepatroon nauwelijks te bepalen, daarnaast kan er niet numeriek mee gerekend worden. Voor het vinden van grote fluctuaties zoals zandbanen is veel grondonderzoek nodig. Statistisch kan een inschatting gemaakt worden van een veilige korrelgrootte om mee te rekenen, maar het effect van fluctuaties op piping is niet te beoordelen op dit moment.

### Interactie met andere aspecten

Heterogeniteit bij de punt van de pipe beïnvloedt ook de **3D stroming** naar de pipe. Dit kan het 3D effect versterken bij een duidelijk zwak pad met 1 pipe of juist verzwakken, wanneer de pipe zich opsplijst om langs een barrière te komen.

### Voorziena kennisontwikkeling

### Referenties naar literatuur en/of projectervaring

Kanning (2012)  
De Visser et al. (2015).

# Terugschrijdende Erosie: Helling van de pipe

## Beschrijving/Toelichting

Indien de deklaag fluctueert in hoogte (meerdere hellingen) of een helling heeft, dan beïnvloedt dit de krachten op een korrel, bij een helling naar beneden (van bovenstrooms naar benedenstrooms) werkt de zwaartekracht mee aan erosie, bij een helling naar boven moet een korrel tegen de zwaartekracht in getransporteerd worden.

### Huidige aanpak

Uitgegaan van een horizontale pipe.

Helling naar boven



Helling naar beneden



## Invloed op overstromingskans



Bij een helling naar beneden, is de overstromingskans groter. Bij een helling naar boven, kleiner.

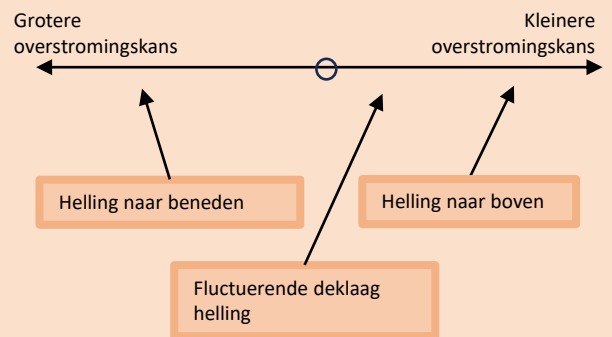
## Relatief effect op overstromingskans :

### Effect op overstromingskans wordt bepaald door

**De helling:** bij een sterke helling (bijna verticaal) naar boven, zal aan het heave criterium voldaan moeten worden. Omgekeerd is voor een sterke helling naar beneden en een reeds aanwezige holle ruimte niet eens stroming nodig voor erosie. Bij een fluctuerende deklaag zal de pipe zowel een helling naar boven als een helling naar beneden ervaren, berekeningen geven aan dat dit een positief effect heeft.

### Inschatting potentieel effect op de overstromingskans

T.o.v. een horizontaal georiënteerde pipe



## Kennisniveau: D

Het effect van de helling is theoretisch onderbouwd en er is een model om de helling van de pipe mee te nemen in de beoordeling van secundaire erosie (Sellmeijer 2006). Bovendien zijn er enkele experimenten ter validatie van deze theorie (Van Beek 2015). Echter is het mogelijk dat juist primaire erosie een dominant is bij piping onder een helling.

Theorie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Experimenten	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Model	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Toepasbaarheid	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## Nadere analyse

### Nauwkeuriger bepalen

Op basis van CPT's en boringen kan de helling onder de deklaag van de dijk geïnterpoleerd worden. Maar er is vervolgens geen methode om hier mee om te gaan. In de praktijk wordt uitgegaan van een horizontale pipe.

### Interactie met andere aspecten

**3D stroming, meerlaagsheid, heterogeniteit en anisotropie** hebben een invloed op piping onder een helling doordat het de stroming naar de pipe bepaald, maar hoe dit precies samenhangt is moeilijk te beoordelen zonder nadere analyse. Fluctuaties in de deklaag zorgen mogelijk voor meer meandering.

### Voorziena kennisontwikkeling

### Referenties naar literatuur en/of projectervaring

Sellmeijer (2006)  
Van Beek (2015)

# Terugschrijdende Erosie: 3D concentratie van stroming

## Beschrijving/Toelichting

Voor terugschrijdende erosie houdt 3D concentratie van stroming in dat water ook van de zijkanten naar de pipe stroomt. Deze extra belasting op de pipe wordt niet meegenomen in 2D analyses, die impliciet uitgaan van een oneindig brede pipe.

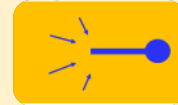
### Huidige aanpak

2D berekening of van 2D afgeleide rekenregel.

2D stroming  
naar de pipes



3D stroming  
naar de pipe



## Invloed op overstromingskans



Een 3D situatie vergroot de overstromingskans t.o.v. de 2D rekenregel.

## Relatief effect op overstromingskans:

### Effect op overstromingskans wordt bepaald door

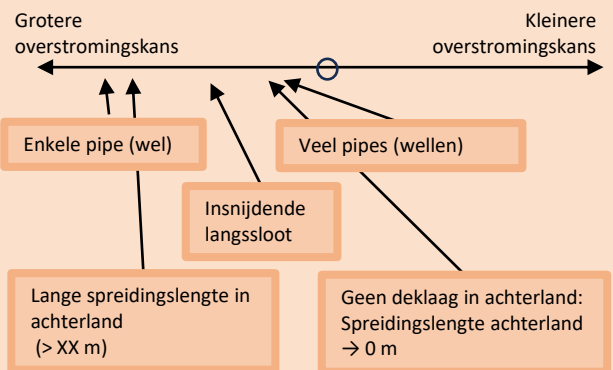
**Aanwezigheid van meerdere pipes** het effect is groter bij individuele wellen en enkele pipes dan wanneer meerdere pipes vormen en pipes vertakken/meanderen.

**Afstroming naar het achterland of sloot** deklagen op het achterland met een zeer grote doorlatendheid t.o.v. het watervoerend pakket (=kleine lek lengte), en insnijdende langssloten is er naar verwachting minder sterke concentratie van stroming naar de pipe omdat water ook naar het achterland stroomt. Dit verkleint het 3D effect, maar zal het niet helemaal voorkomen.

**Rivierbochten** 3D grondwaterstroming naar de pipe kan versterkt worden bij de binnenbocht van een rivier.

### Inschatting potentieel effect op de overstromingskans

T.o.v.  $H_c$  gebaseerd op een 2D berekening



## Kennisniveau: D

In een aantal kleine schaal laboratoriumproeven is het kritieke verval in 3D ca. 1/2 zo groot als in de 2D rekenregel. In deze proeven vormt één pipe en is geen afstroming naar het achterland. Er is weinig informatie over het effect op grotere schaal, al wordt op basis van theorie verwacht dat de invloed van 3D stroming groter kan zijn leidend tot lagere  $H_c$ . Er is geen experimentele data betreffende de invloed van achterland op het 3D effect. Op basis van geohydrologie wordt verwacht dat de invloed van het 3D effect kleiner wordt bij doorlatendere achterlanden.

Theorie	■ ■ ■ ■ ■
Experimenten	■ ■ ■ ■ ■
Model	■ ■ ■ ■ ■
Toepasbaarheid	■ ■ ■ ■ ■

## Nadere analyse

### Nauwkeuriger bepalen

Er is geen generieke software om met het kritiek verval voor met 3D piping te kwantificeren. Grondwaterstromingsmodellen kunnen gebruikt worden om een inschatting te maken van het debiet naar een pipe in 2D en 3D, of van de gradiënt aan de kop van de pipe in 2D en 3D. Deze geven een indicatie van in welke situatie 3D effecten relatief belangrijker zijn.

De berekende factoren zijn echter niet gelijk aan de factor waarmee  $H_c$  verandert, wat nadere kwantificatie bemoeilijkt. Onderzoeksmodellen voor terugschrijdende erosie in 3D bestaan (zie literatuur).

### Interactie met andere aspecten

**Pipelengte en Voorlanden** in situaties met 3D stroming is het kritieke verval lager waardoor de pipelengte bij een gegeven verval groter zal zijn dan ingeschat in 2D situaties.

De pipelengte bij kritiek verval is naar verwachting ook groter in 3D situaties, maar er is weinig experimentele data om dit te onderbouwen.

**Opbarsten** in situaties waar opbarsten minder waarschijnlijk is door dikke deklagen is het 3D effect groter als er wel een wel vormt, door lange lek lengte en doordat er naar verwachting weinig wellen zijn.

### Voorziene kennisontwikkeling

In het Kennis voor Keringen programma van Rijkswaterstaat WV en in het HWBP KIA Project Schaafeffecten wordt nader onderzoek naar het 3D effect voor terugschrijdende erosie gedaan.

### Referenties naar literatuur en/of projectervaring

Van Beek et al. (2015) [experimenten]  
Van Beek et al. (2022) [modellering].

# Terugschrijdende Erosie: Anisotropie

## Beschrijving/Toelichting

Bij anisotropie is de verticale doorlatendheid ( $k_v$ ) anders dan de horizontale doorlatendheid ( $k_h$ ). Dit leidt tot een ander grondwaterstromingspatroon. De anisotropie factor ( $A$ ) is gedefinieerd als:  $A = \frac{k_h}{k_v}$ .

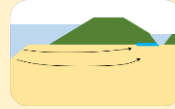
### Huidige aanpak

Doorgaans wordt gerekend met de horizontale doorlatendheid.

Isotroop



Anisotroop



## Invloed op overstromingskans



Een grote anisotropie verkleint de overstromingskans t.o.v. een isotroop aangenomen horizontale doorlatendheid.

## Relatief effect op overstromingskans :

### Effect op overstromingskans wordt bepaald door Anisotropie en doorlatendheid:

Bij een grote anisotropie factor zal de invloed van anisotropie op piping ook groter zijn. Bij een kleine horizontale doorlatendheid is het effect van anisotropie groter.

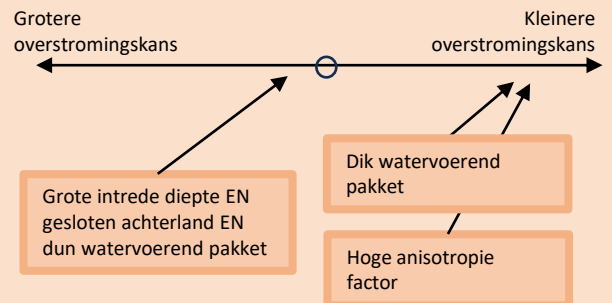
**Intredediepte:** Bij een diepe insnijding van het buitenwater heeft anisotropie niet veel effect op  $H_c$ . Ook in deze situatie is de horizontale doorlatendheid dominant.

**Lengte/diepte verhouding watervoerend pakket:** Bij een lang/dun watervoerend pakket heeft anisotropie niet veel effect op  $H_c$ , doordat de horizontale doorlatendheid in deze situatie dominant is.

**Afstroming achterland:** bij veel afstroming naar het achterland is de impact van anisotropie groter.

### Inschatting potentieel effect op de overstromingskans

T.o.v. isotrope horizontale doorlatendheid



**Aandachtspunt:** Bij de combinatie van een grote intrede diepte (zoals bij een zandwinput), een gesloten achterland en een grote lengte/diepte verhouding kan anisotropie een klein negatief effect hebben!

## Kennisniveau: B

Grondwaterstromingstheorie met anisotropie is redelijk bekend, numerieke berekeningen kunnen daarom uitgevoerd worden. Daarnaast is er een toevoeging op de rekenregel van Sellmeijer, waarmee een eerste inschatting gemaakt kan worden van de invloed van anisotropie (Stoop 2019).

Experimentele validatie met anisotrope ondergrond ontbreekt tot op heden.

Theorie	■	■	■	■
Experimenten	□	□	□	□
Model	■	■	■	□
Toepasbaarheid	■	■	■	■

## Nadere analyse

### Nauwkeuriger bepalen

Anisotropie nauwkeuriger meenemen in analyses kan door middel van D-GeoFlow berekeningen.

Anisotropie bij de dijk bepalen kan in het laboratorium door de monsters verticaal en horizontaal te steken. In-situ kan anisotropie met de AMPT (Aquisense) bepaald worden of met pompproeven.

### Interactie met andere aspecten

**Meerlaagsheid** heeft net als anisotropie een invloed op de grondwaterstroming. Kleine schaal meerlaagsheid kan door grote schaal metingen als anisotropie geregistreerd worden.

### Voorziena kennisontwikkeling

Er is geen nadere kennisontwikkeling voorzien.

### Referenties naar literatuur en/of projectervaring

Stoop (2018)  
Van Beek et al. (2020) [Kennis voor Keringen: Syntheserapport pipingonderzoek 2018-2019]  
Kanning et al. (2019) [KvK piping deelproject 014: Anisotropie]



# Terugschrijdende Erosie: tijdsafhankelijkheid

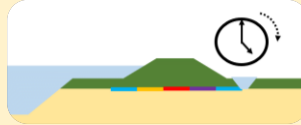
## Beschrijving/Toelichting

Piping is een tijdsafhankelijk proces, wanneer het kritiek verval bereikt wordt, is de pipe niet altijd al tot de kritiek pipelengte gegroeid. Bij een kortdurend hoogwater (piek boven kritiek verval) is het mogelijk dat de pipe niet doorgroeit tijdens de hoogwatergolf.

### Huidige aanpak

In de huidige aanpak wordt er gerekend met de maximale waterstand, aangenomen wordt dat deze oneindig aanhoudt.

Tijdsafhankelijke pipegroei, de pipe wordt langer, gedurende het hoogwater.



## Invloed op overstromingskans



T.o.v. stationair verkleint tijdsafhankelijke pipegroei de overstromingskans

## Relatief effect op overstromingskans :

### Effect op overstromingskans wordt bepaald door

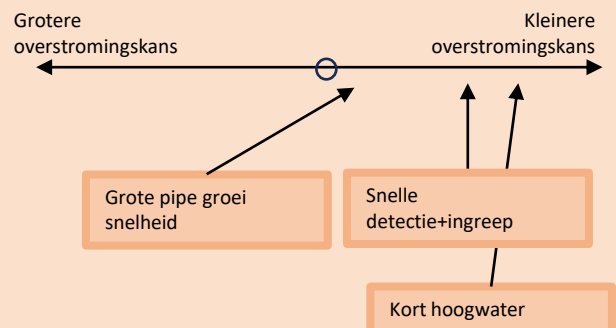
**Duur hoogwater:** bij een kort hoogwater zal de overstromingskans kleiner zijn.

**Pipegroei snelheid:** Bij een grote pipe groei snelheid is het effect van tijdsafhankelijkheid klein. De pipegroeisnelheid is afhankelijk van de overschrijding van het kritiek verval en karakteristieken van het watervoerend pakket en de dijk.

**Voorafgaande hoogwaters en herstel:** Indien voorheen zandmeevoerende wellen geobserveerd zijn en al een pipe gevormd is heeft dit een negatief effect. De pipe kan weer deels dicht raken (herstel), echter is het heel onzeker of dit gedeeltelijk herstel optreedt.

### Inschatting potentieel effect op de overstromingskans

T.o.v. stationaire analyse



## Kennisniveau: C

Er is uitgebreid onderzoek gedaan naar tijdsafhankelijke pipe groei met kleine en grote schaal experimenten, numerieke modellen en er is een statistische uitwerkingsmethode voorgesteld. Voor de toepassing op grotere schaal zijn er nog onzekerheden. Het is soms lastig vast te stellen of er nog oude pipes aanwezig zijn en 3D numerieke modellen geven op grote schaal onverwachte resultaten voor het kritiek verval.

Theorie	■	■	■	■
Experimenten	■	■	■	■
Model	■	■	■	■
Toepasbaarheid	■	■	■	■

## Nadere analyse

### Nauwkeuriger bepalen

Het is van belang om de duur en hoogte van de belasting goed in kaart te brengen. Hierbij kan een eerste inschatting gemaakt worden op basis van het type water: bovenrivierengebied, benedenrivierengebied, aan een meer of aan de kust.

Ook is het van belang om te kijken naar de aanwezige wellen in dit gebied.

### Interactie met andere aspecten

De tijdsafhankelijke pipegroei hangt samen met **tijdsafhankelijke grondwaterstroming** en de bezwijkprocessen, bijvoorbeeld door een koppeling met **macro-stabiliteit**.

**Noodmaatregelen en beheer** zijn zeer belangrijk voor het veilig omgaan met tijdsafhankelijke pipe groei aangezien, wanneer een pipe er is, deze wel gedetecteerd en gemitigeerd moet worden (bijvoorbeeld met zandzakken).

### Voorziena kennisontwikkeling

Er zijn geen vervolgonderzoeken gepland.

### Referenties naar literatuur en/of projectervaring

Pol (2022)

Vervolg processen

# Vervolprocessen: Duur van het bezwijkproces

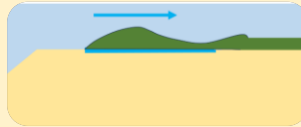
## Beschrijving/Toelichting

Een onderdeel van het faalpad piping is het ruimen (groter worden) van de pipe door een sterke toename in de stroming en vervolgens het falen van de dijk door instabiliteit. Deze processen nemen tijd in beslag.

### Huidige aanpak

In de huidige aanpak wordt het bezwijken of de duur daarvan niet meegenomen.

Bezwijken dijk



## Invloed op overstromingskans



De overstromingskans wordt kleiner door het meenemen van vervolgprocessen.

## Relatief effect op de overstromingskans:

### Effect op overstromingskans wordt bepaald door

**Duur van het hoogwater** Bij een langdurig hoogwater is het aannemelijk dat de dijk zal bezwijken indien de dijk in stationaire omstandigheden zou bezwijken. Bij een kortdurend hoogwater hoeft dit niet te gebeuren.

**Sterkte van de dijk en het dak van de pipe** Indien de dijk en het dak van de pipe erg sterk zijn moet de pipe groter zijn, voordat de dijk faalt.

**Erodeerbaarheid van de bodem** de snelheid waarmee het watervoerend pakket erodeert nadat er kortsluiting is ontstaan met het buitenwater is afhankelijk van het zand.

### Inschatting potentieel effect op de overstromingskans

Er is tijd nodig is waarin de vervolgprocessen kunnen plaatsvinden. Echter is niet bekend hoe lang de vervolgprocessen duren, daarom is het op dit moment niet veilig om mee te nemen.

## Kennisniveau: E

Op globale lijn is bekend dat wanneer de pipe kortsluiting maakt met het buitenwater, dat de er een sterke erosie van bovenstrooms naar benedenstrooms optreedt (ruimen). Wanneer de sterke toename in erosie zichtbaar is in de zand meevoerende wel, gaat het bezwijkproces snel. Er is echter geen hypothese voor de duur van deze vervolgprocessen laat staan veel experimentele onderbouwing.

Theorie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Experimenten	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Model	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Toepasbaarheid	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## Nadere analyse

### Nauwkeuriger bepalen

Er is op dit moment geen realistisch handelingsperspectief.

### Interactie met andere aspecten

Bij het meenemen van het volledige faalpad wordt ook de interactie met andere mechanismen, zoals macrostabiliteit belangrijk. Er is hier nog weinig van bekend.

### Voorziene kennisontwikkeling

Er is op dit moment geen kennis ontwikkeling voorzien.

### Referenties naar literatuur en/of projectervaring

De Bruijn et al. (2015) [Analyserapport IJkdijk pipingproeven]

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](http://www.deltares.nl)