



# PIPING

## DIJKEN/DAMMEN DEEL 2

Handleiding Overstromingskansanalyse





Rijkswaterstaat  
*Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat*

**RWS INFORMATIE**

## **Handleiding Overstromingskansanalyse dijken/dammen**

### **Deel 2: Piping**

## Colofon

Uitgegeven door	Rijkswaterstaat
Informatie	<a href="http://www.iplo.nl">www.iplo.nl</a>
Versie	December 2023

## Voorwoord

Beste lezer,

Deze handleiding Piping is onderdeel van het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI) voor primaire waterkeringen.

Een van de doelstellingen van het programma BOI is het denken vanuit het gedrag van de kering en het werken met overstromingskansen beter mogelijk te maken. De inzet van het instrumentarium is flexibeler geworden. De beheerder maakt zelf de afweging welk model het meest geschikt is voor zijn kering. Ook wordt het volledige faalpad dat leidt tot een overstroming beschouwd.

Het 'papieren' instrumentarium is daarom opnieuw ingericht en bestaat nu uit de handleidingen Overstromingskansanalyse voor de verschillende typen keringen en de verschillende faalmechanismen én de Technische leidraden. De nog relevante onderdelen uit het WBI2017 uit bijlage III, de schematiseringshandleidingen en de leidraden en technische rapporten zijn hierin opgenomen.

Het gedrag van de kering centraal zetten, klinkt logisch en past bij de ervaringen uit LBO-1. Deze stap lijkt dan ook eenvoudig het basisinstrumentarium wijzigt inhoudelijk nauwelijks, de kering blijft hetzelfde en er zijn weinig nieuwe inzichten van de fysica. Toch hebben we bij de ontwikkeling van het instrumentarium en het opstellen van de handleidingen ervaren dat het in de praktijk lastig en soms theoretisch is. Het 'gedrag van de kering centraal' werkt namelijk door in het hele instrumentarium en vraagt dat er met een nieuwe blik naar wordt gekeken. Het kostte tijd om de nieuwe begrippen te doorgronden en op te schrijven. We zijn dan ook verschillende keren opnieuw begonnen.

Deze eerste groene versies zijn daarom nog niet perfect. De theoretische discussies zijn gevoerd, maar voor verdere aanvulling is het nodig dat praktijkervaring wordt opgedaan. Daarbij is het belangrijk dat we de nieuwe begrippen die steeds aan het eind van elke handleiding staan, consistent en eenduidig gebruiken.

We houden rekening met een continue doorontwikkeling van deze handleiding. Door praktijkervaringen toe te voegen gaan we ervan uit dat we de handleiding steeds completer en gebruiksvriendelijker kunnen maken. We willen u daarom vragen om zoveel mogelijk ervaringen, positief en negatief, met ons te delen. Dat kan via [het vragenformulier op de IPLO](#). Op het de Iplo, de pagina van het BOI-portaal, zal periodiek een samenvatting van opmerkingen, vragen en antwoorden worden gepubliceerd en waar nodig een lijst met errata. Op basis van de opmerkingen en ontwikkelingen van kennis en instrumenten wordt jaarlijks een afweging gemaakt of een nieuwe versie nodig is.

Deze eerste groene versie van de handleiding is gezamenlijk opgesteld door Rijkswaterstaat, Deltares en marktpartijen. In de handleiding zijn de laatste inzichten rondom voorlanden uit Kennis voor Keringen en de resultaten van het onderzoek naar de sterkte van getijdzand van HWBP meegenomen. De kwaliteit is geborgd door een interne inhoudelijke review en controle op de consistentie over alle handleidingen vanuit het programma BOI.

In 2024 worden nieuwe versies verwacht aangevuld met de eerste ervaringen en ook opmerkingen en aanbevelingen van ENW.

Het BOI-team

## Inhoud

### Voorwoord 3

#### **1 Inleiding 7**

- 1.1 Het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI) 7
- 1.1.1 Procesinstrumentarium 7
- 1.1.2 Basisinstrumentarium 8
- 1.1.3 Werkatelier 9
- 1.2 Verhaal van de kering 9
- 1.3 Leeswijzer van deze handleiding 10

#### **2 Beschrijving faalmechanisme 11**

- 2.1 Fenomenologische beschrijving piping 11
- 2.2 Faalpaden/ overstromingskansbepaling 11
- 2.3 Indirecte mechanismen 14

#### **3 Bepalen relevantie met beslisregels 15**

- 3.1 Absolute beslisregels 15
- 3.1.1 Waterkering bestaat uit een zanddijk op een zandondergrond 15
- 3.1.2 Niet-pipinggevoelige (zand-)lagen 15
- 3.1.3 Waterspanningen stijgen niet 16
- 3.2 Relatieve beslisregels 17
- 3.2.1 Gebruik van ontwerp en beoordelingsresultaten 17
- 3.2.2 Overstromingskans is voldoende klein op basis van een eenvoudige tijdsafhankelijke benadering 17
- 3.2.3 Waterkering heeft veilige afmetingen 17

#### **4 Eerste inschatting overstromingskans 19**

- 4.1 Plaats inschatting overstromingskans binnen de overstromingskansanalyse 19
- 4.2 Beschikbare instrumenten 19
- 4.2.1 Rekenmodellen 19
- 4.2.2 Software 20
- 4.2.3 Toepassingsgebied van de rekenmodellen 20
- 4.3 Schematisatie: voorbereiding op eerste inschatting van de overstromingskans 22
- 4.3.1 Dijkvakken 23
- 4.3.2 Hydraulische belastingen 23
- 4.3.3 Geometrie 24
- 4.3.4 Ondergrond 24
- 4.3.5 Voorland 25
- 4.3.6 Grondparameters 27
- 4.3.7 Waterspanningen 28
- 4.4 Bepalen van de overstromingskans 28
- 4.4.1 Bepalen doorsnede faalkans 29
- 4.4.2 Vertaling van doorsnede faalkans naar faalkans per dijkvak 31
- 4.4.3 Combineren faalkansen op dijkvakniveau naar faalkans op trajectniveau 31
- 4.4.4 Ontwerpen 31

#### **5 Mogelijkheden voor aanscherping overstromingskans 33**

- 5.1 Inleiding 33
- 5.2 Afweging meeste kansrijke nadere analyse 33
- 5.3 Schematiseringsproces herhalen aan de hand van meer informatie 38

5.3.1	Verfijnen algehele schematisatie	38
5.3.2	Verfijnen schematisatie waterspanningen	38
5.3.3	Verfijnen schematisatie geohydrologische kenmerken	40
5.4	Toepassen andere modellen en technieken	43
5.4.1	Tijdsafhankelijke groei erosiekanaal	43
5.4.2	Geavanceerde probabilistische analyse	44
5.4.3	D-Geo Flow	46
5.5	Uitwerken vervolgmecanismen	47
5.6	Benutten kennisontwikkeling	47
5.7	Beheers- en calamiteitenmaatregelen	47

**Literatuur 48**

**Bijlage A Begrippenlijst 50**

**Bijlage B Stappenplan meenemen van het hele voorland in piping analyse 52**

# 1 Inleiding

Deze handleiding beschrijft de aanpak voor een geloofwaardige, herleidbare en stabiele bepaling van de bijdrage aan de overstromingskans vanuit het mechanisme piping. Het verhaal van de kering staat daarbij centraal. De handleiding is geschreven om handvatten te bieden om in de beoordeling, of bij het maken van een ontwerp voor een versterking, de overstromingskans te bepalen.

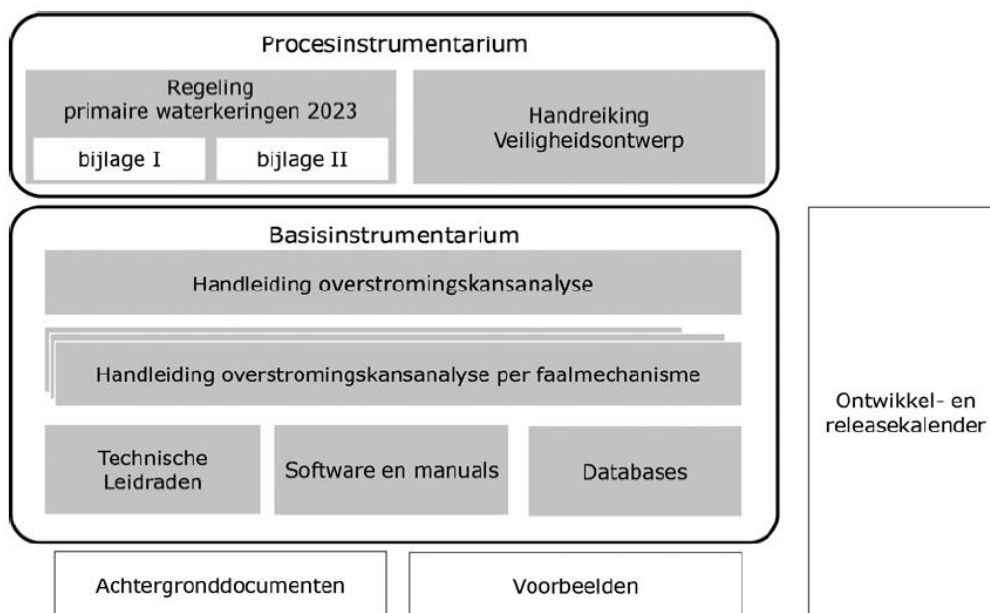
Als het grondlichaam, of de ondergrond, andere elementen bevat dan natuurlijke grond (bijvoorbeeld leidingen, damwanden, geotextielen, grofzandbarrière, verticaal zanddicht geotextiel, drainage- of filterconstructies), dan is deze handleiding niet van toepassing.

De begrippenlijst in deze handleiding is hetzelfde als bijlage I en II van de Regeling primaire waterkeringen 2023, zie Bijlage A.

## 1.1 Het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI)

Het Rijk stelt de regels voor het uitvoeren van de veiligheidsbeoordeling op en stelt leidraden, handleidingen en software beschikbaar voor het ontwerp en het beheer van primaire keringen. Onder het beheer van een waterkering vallen alle activiteiten die erop gericht zijn de bestaande kering zijn functies duurzaam te laten uitvoeren.

Als hulpmiddel bij de veiligheidsbeoordeling en het opstellen van een ontwerp voor een versterking, stelt het Rijk het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI) beschikbaar. Het BOI bestaat uit proces- en basisinstrumenten, zie Figuur 1.



Figuur 1: Overzicht BOI

### 1.1.1 Procesinstrumentarium

Voor het beoordelen bestaat het procesinstrumentarium uit de Regeling Veiligheid primaire waterkeringen 2023 en twee bijlagen:



- Bijlage I Procedure beoordeling primaire waterkeringen  
Deze bijlage beschrijft de te volgen procedure in de beoordeling van een dijktraject. Ook zijn de eisen aan de rapportage opgenomen.
- Bijlage II Randvoorwaarden beoordeling primaire waterkeringen  
In deze bijlage worden de randvoorwaarden beschreven voor het bepalen van de overstromings- of faalkans van een dijktraject.

De handleiding Veiligheidsontwerp is het procesinstrumentarium dat vanuit BOI beschikbaar wordt gesteld. Deze handleiding geeft ondersteuning en licht de keuzes toe die voor waterveiligheid moeten worden gemaakt. Zowel in het ontwerpproces van het definiëren van de dijkversterkingsopgave in de trajectaanpak, als voor het realiseren van dijkversterkingsmaatregelen.

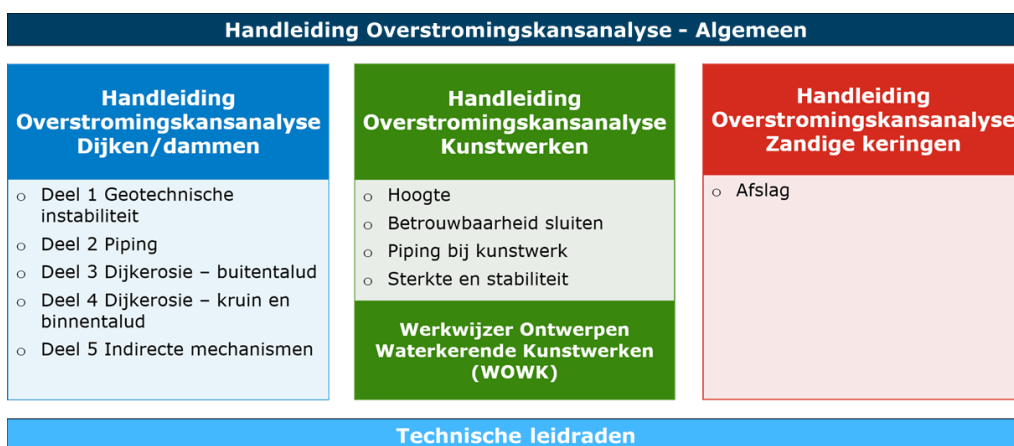
### 1.1.2 Basisinstrumentarium

Het basisinstrumentarium bestaat uit handleidingen, technische leidraden, software-applicaties en databases. Deze instrumenten kunnen worden gebruikt om de overstromingskans van een dijktraject te bepalen.

#### 1.1.2.1 Handleidingen

De handleidingen van het BOI ondersteunen bij het uitvoeren van de analyses om de overstromingskans van een dijktraject te bepalen, zowel voor het uitvoeren van een beoordeling als een ontwerpverificatie. In de handleidingen worden alle keuzes, overwegingen en activiteiten beschreven die op basis van het verwachte gedrag van de waterkering nodig zijn om de overstromingskans te bepalen.

Binnen het BOI zijn er meer handleidingen voor het maken van een analyse van de overstromingskans. Figuur 2 geeft een overzicht van deze verschillende handleidingen.



Figuur 2: Overzicht van verschillende handleidingen

De handleiding Overstromingskansanalyse - Algemeen (Rijkswaterstaat, 2023) beschrijft de algemene aanpak van de bepaling van de overstromingskans van primaire waterkeringen. Daarnaast staan er handvatten in voor het opstellen van het verhaal van de kering (zie paragraaf 1.2), waarmee de waterkering in de context van de omgeving wordt bekeken. Hierbij is uitgegaan van drie leidende principes:

1. Een stabiel eindresultaat en transparant handelingsperspectief.
2. Een geloofwaardige overstromingskans.
3. Het systeem staat centraal.

De handleiding geeft handvatten voor de bepaling van de overstromingskans voor het faalmechanisme Piping en is een concrete uitwerking van de aanpak zoals beschreven in de handleiding Overstromingskansanalyse.

#### 1.1.2.2 Technische leidraden

Naast handleidingen voor faalmechanismen maken ook technische leidraden onderdeel uit van het BOI. Technische leidraden bevatten informatie over onderdelen van de waterkering, mechanismen, sterkte en belastingen die samen bepalend zijn voor de overstromingskans. Ook gaan de technische leidraden in op rekenmodellen en rekentechnieken die kunnen worden gebruikt voor het berekenen van overstromingskansen. De technische leidraden zijn te vinden op <https://tl.iplo.nl/>.

#### 1.1.2.3 Software en databases

De modellen en applicaties die onderdeel uitmaken van het BOI, kunnen gebruikt worden om de kans van optreden van bepaalde mechanismen te berekenen. *Riskeer* is de user interface (UI) van de applicaties van het BOI. Riskeer voegt de resultaten van de verschillende faalpadanalyses samen om een inschatting te kunnen maken van de overstromingskans van het dijktraject.

De databases bevatten de hydraulische belastingen voor de verschillende watersystemen en de scenario's voor de schematisatie van de ondergrond (SOS).

#### 1.1.3 *Werkatelier*

Deze handleiding is vooral gericht op de bepaling van de overstromingskans en *niet* op het proces. Daarvoor wordt verwezen naar bijlage I en II van de Regeling en de afspraken die hierover zijn gemaakt in het draaiboek (Rijkswaterstaat, 2022a). In het draaiboek is een werkatelier gedefinieerd waarin een groep specialisten en beheerders onder leiding van een voorzitter een doelmatig en uitvoerbaar advies opstellen voor de bepaling van de overstromingskans van het dijktraject van de beheerder. Het doel hiervan is een verklaarbaar, consistent en stabiel resultaat van de beoordeling. Ook kan dit aanbevelingen geven voor het BOI.

## 1.2 **Verhaal van de kering**

Het verhaal van de kering draagt bij aan het begrijpen en kunnen duiden van de functie van het dijktraject in het systeem. Het geeft per dijktraject ook inzicht in de gebeurtenissen die leiden tot een overstroming. Gebeurtenissen en foutenbomen zijn methoden die daarbij kunnen helpen.

Het verhaal bestaat uit een beschrijving van de waterkering, de ondergrond en de belastingen. Het wordt opgesteld op basis van bestaande informatie en geeft een overzicht van de ordening en interpretatie van de gegevens in het data- en informatiesysteem van de waterkering waar het een onderdeel van is. Dit verhaal bepaalt de ordening en de aard van gegevens die nodig zijn voor een analyse van de overstromingskans. Een actueel en volledig data- en informatiesysteem, waarin continu de laatste inzichten worden verwerkt, is een voorwaarde voor een plausibele uitkomst van een overstromingskansanalyse. Het verhaal van de kering is nooit af. Door nieuwe inzichten en ervaringen kan het verhaal wijzigen of worden aangescherpt.

Het verhaal van de kering bevat een aantal basiselementen:

- **Beschrijving van de waterkering:** De beschrijving van de eigenschappen van de waterkering die van belang zijn voor een overstromings- of

faalkansanalyse. Hierbij wordt ook de relatie gelegd met de historische achtergrond van de kering. Het gaat onder andere om de geometrie en de opbouw van de waterkering. Zoals bijvoorbeeld type bekledingen, waterkerende constructies en kunstwerken en niet-waterkerende objecten die de overstromings- of faalkans kunnen beïnvloeden.

- **Geologische en geohydrologische analyse:** Het analyseren van geologische tijdvakken en de geohydrologische en geotechnische eigenschappen van het ondergrondsysteem kwalitatief beschrijven.
- **Hydrologische en hydraulische analyse:** Het beschrijven van de hydraulische belasting van het dijktraject vanuit het watersysteem, waar nodig in combinatie met hydrologische gebeurtenissen, zoals extreme neerslag.
- **Kennis en ervaring van de keringbeheerder:** Inspecties van de waterkering hebben inzicht gegeven in het optreden van schade en vervormingen van de waterkering. Daarnaast heeft de keringbeheerder de waterkering eerder beoordeeld en mogelijk versterkt.

### 1.3 Leeswijzer van deze handleiding

De handleidingen zijn geschreven om handvatten te bieden om in de beoordeling een geloofwaardige, herleidbare en stabiele overstromingskans te bepalen. De handleiding is geschreven voor de deskundige gebruiker die bekend is met de voorschriften, de (deel)faalmechanismen en de modellen die van toepassing zijn.

Deze handleiding is gericht op het faalmechanisme piping. **Hoofdstuk 2** beschrijft het gedrag van de kering en het faalpad. In **hoofdstuk 3** staan generieke beslisregels die het mogelijk maken snel te filteren in welke situaties het faalmechanisme piping niet relevant is.

**Hoofdstuk 4** beschrijft de uitwerking van een generieke analyse van de overstromingskans. Deze geeft, samen met de technische leidraad voor dit mechanisme, de handvatten voor het schematiseren en analyseren van dijktrajecten, dijkvakken en dwarsdoorsnedes. Deze eerste inschatting van de overstromingskans gebruikt generieke methodes met een zeker toepassingsgebied. Afhankelijk van de lokale situatie kan de overstromingskans met verdere analyses worden aangescherpt. Dit staat beschreven in **hoofdstuk 5**.

## 2 Beschrijving faalmechanisme

Dit hoofdstuk beschrijft het faalmechanisme piping bij dijken. De eigenschappen van de ondergrond, belasting en waterkering worden beschreven in relatie tot het faalmechanisme. Dit is onderdeel van het verhaal van de kering. Op basis van deze eigenschappen kan voor een specifieke locatie en context de relevantie van het faalmechanisme (hoofdstuk 3), de toepasbaarheid van de eerste inschatting van de overstromingskans (hoofdstuk 4) en de mogelijke vervolganalyse (hoofdstuk 5) worden bepaald.

### 2.1 Fenomenologische beschrijving piping

Piping is een van de faalmechanismen die worden veroorzaakt door een hoge waterspanning onder de waterkering, zie Tabel 4.1 van de Ministeriele Regeling. Door de hoge waterspanningen kan een uittredepunt ontstaan waar, bij een sterke grondwaterstroming door de zandlaag onder dijk, zandkorrels in beweging worden gebracht.

Door deze opening (uittredepunt) in het achterland spoelen de zandkorrels uit. Erosie vindt dan net onder een ondoorlatende laag plaats, in stroomopwaartse richting, en met name in het horizontale vlak.

Als de grondwaterstroming lang genoeg hoog blijft, wordt het kanaal langer en dit kan leiden tot kortsluiting met het buitenwater. Zodra kortsluiting ontstaat, kan water door de pipe naar het achterland stromen. Door erosie zal de pipe groter worden. Dit leidt tot het verzakken van de waterkering en kan uiteindelijk tot een doorbraak leiden.

Voor een uitgebreide fenomenologische beschrijving wordt verwezen naar de beschrijving in het artikel 'Fenomenologische beschrijving van piping' in de technische leidraad katern Piping.

### 2.2 Faalpaden/ overstromingskansbepaling

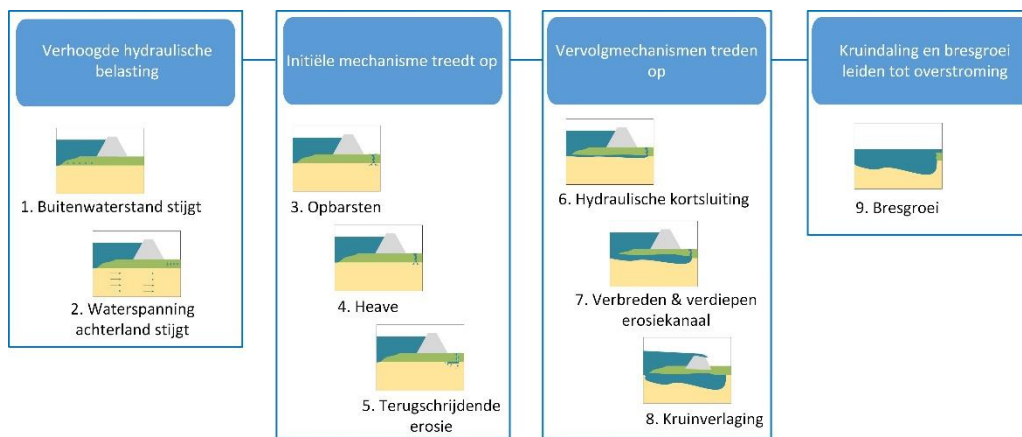
Het is niet altijd noodzakelijk de overstromingskans voor piping met een complete faalpadanalyse inzichtelijk te maken. Sommige gebeurtenissen kunnen worden uitgesloten aan de hand van beslisregels, zie Hoofdstuk 3.

In tegenstelling tot mechanismen zoals geotechnische instabiliteit, is bij piping vaak sprake van één faalpad met meer gebeurtenissen die moeten optreden om tot overstroming te komen. Als de faalkansbijdrage van één gebeurtenis in het faalpad voor dat zichtjaar op de beschouwde locatie al klein genoeg is, is verdere kwantificering van het faalpad niet nodig. Toelichting op de aanpak is beschreven in het document handleiding Overstromingskansanalyse.

Het meest voorkomende faalpad voor piping is in Figuur 3 geïllustreerd. Lokaal kan het faalpad op onderdelen afwijken. Welke gebeurtenissen of aspecten in het faalpad de meeste invloed hebben op de overstromingskans is sterk afhankelijk van lokale karakteristieken van de dijk, de ondergrond en de hydraulische belasting.

Belangrijk is:

- Duur en hoogte van de belasting.
- Eigenschappen van het watervoerend pakket (WVP), zoals dikte, doorlatendheid, korrelgrootteverdeling en laagopbouw.
- Geometrie van de dijk, voorland en achterland (kwelweglengte)
- Eigenschappen van de deklaag in het voorland en achterland, zoals dikte en doorlatendheid.



Figuur 3: Veelvoorkomend faalpad van piping

Onderstaande alinea's beschrijven de verschillende gebeurtenissen (1 tot en met 9) in het faalpad van Figuur 3. De belangrijke gebeurtenissen binnen het faalpad zijn Opbarsten (3), Heave (4) en Terugschrijdende erosie (5). Deze gebeurtenissen worden beschouwd bij de eerste inschatting van de overstromingskans, zie hoofdstuk 4, en bij aanscherping van de overstromingskans, zie hoofdstuk 5. Meer detail over het faalpad piping is te lezen in het artikel 'Gedetailleerde beschrijving van het faalpad - tot op niveau van de gebeurtenissen' van de technische leidraad katern Piping.

### 1: Buitenwaterstand stijgt

Een verhoogde buitenwaterstand leidt tot een stijging van de stijghoogte in de watervoerende zandlaag onder en achter de waterkering. Voor piping spelen zowel de maximale hoogte van de waterstand als de duur van de waterstand een rol. Karakteristieken van maximale waterstand en waterstandsduur zijn afhankelijk van het watersysteem. Dit wordt beïnvloed door kenmerken als rivierafvoer, meerpeil, inzet stormvloedkeringen en stormopzet van de waterstand. Met deze kenmerken is rekening gehouden van de afleiding van de hydraulische randvoorwaarden.

### 2: Waterspanning achterland stijgt

Door de verhoging van de waterstand stroomt via de watervoerende zandlagen onder de kering water naar het achter de waterkering aanwezige (polder)gebied.

De stroming van grondwater worden beïnvloed door de aanwezigheid van voorland, de lengte hiervan en de doorlatendheid van de deklaag. Ook kenmerken van het achterland en de eigenschappen van het zandpakket hebben invloed, zoals de dikte, doorlatendheid en de infiltratieweestand op de bodem van het buitenwater. Deze eigenschappen kunnen de verhoging van waterspanningen dempen. Tenslotte spelen geometrische zaken een rol, zoals tot hoe diep het buitenwater insnijdt in het

watervoerende pakket en of buitenwater hier in contact staat met het watervoerende pakket.

Geohydrologische processen zijn tijdsafhankelijk. Bij kortdurende variaties van de buitenwaterstand, zoals getij, reageert de waterspanning in de grond vertraagd en gedempt. Bij zeer kortdurende variaties van de buitenwaterstand, zoals een individuele golf of een seiche, reageert de waterspanning in de grond niet of nauwelijks.

### **3: Opbarsten**

Deze gebeurtenis treedt op alleen bij aanwezigheid van een deklaag in het achterland. Bij een voldoende hoge stijghoogte aan de polderzijde (grenspotentiaal), wordt de deklaag opgetild, zie ook het artikel 'Opbarsten' in de technische leidraad katern Piping. Afhankelijk van de eigenschappen van de deklaag, kan dit tot scheuren leiden waardoor verticale stroming geconcentreerd optreedt. Dit is zichtbaar door de aanwezigheid van een (schone) wel. Opbarsten kan op één of meer locaties optreden.

Specifieke aandachtspunten voor deze gebeurtenis zijn de effecten van sloten, oude doorbraaklocaties en het reliëf van het achterland. Als de deklaag ontbreekt, of er perforaties in de deklaag aanwezig zijn, kan terugschrijdende erosie optreden zonder opbarsten.

### **4: Heave**

Door concentratie van stroming naar het uittredepunt, worden zandkorrels gefluïdiseerd (drijfzandeffect); door hoge verticale stroomsnelheden worden korrels opgetild in het verticale kanaal. Als dit gebeurt, ontstaat een zandmeevoerende wel en zet het zand zich op het maaiveld af.

Ontbreekt de deklaag dan kan terugschrijdende erosie optreden zonder heave .

### **5: Terugschrijdende erosie**

Terugschrijdende erosie kan ontstaan wanneer horizontale hydraulische gradiënten groot genoeg zijn om korrels te eroderen en de gebeurtenissen opbarsten en heave zijn opgetreden. Zie de gebeurtenissen 4 en 5 uit het faalpad. Er kunnen dan een of meer erosiekanalen ontstaan. De ontwikkeling van de erosiekanalen is globaal gezien stroomopwaarts. Een erosiekanaal is een zeer ondiepe holle ruimte (meerdere korreldiameters diep) aan de bovenkant van het zandpakket. De kering of de deklaag vormt het dak van het kanaal, dat als gevolg van cohesie en boogwerking stabiel blijft. Boven het erosiekanaal is een dak nodig, anders stort het erosiekanaal in. Dit laatste stopt of vertraagt de ontwikkeling van het erosiekanaal.

Een kanaal kan langer worden als de korrels aan de kop van het kanaal loskomen en worden getransporteerd. Dit kan optreden als de belasting op de korrels op die locatie groot genoeg is. Als het erosiekanaal de zogenaamde kritieke lengte voorbij is, zal de groei van het erosiekanaal niet meer stoppen bij een gelijkblijvende waterstand.

### **6: Hydraulische kortsluiting**

Als de stijghoogte bovenstrooms van het erosiekanaal voldoende hoog is en blijft, kan het erosiekanaal groeien tot aan het intredepunt en maakt dan kortsluiting met het buitenwater. Dit is ook het einde van het feitelijke proces van terugschrijdende erosie.

Aandachtspunt bij deze gebeurtenis is de aan- of afwezigheid van een groot voorland. In het voorland kan een lokale doorsnijding van de deklaag aanwezig zijn, waardoor er eerder dan aan het eind van de horizontale (kwel)weg kortsluiting kan ontstaan.

#### **7: Verdiepen en verbreden erosiekanaal**

Vanaf het intredepunt begint het erosiekanaal zich te verbreden in landwaartse richting naar het uittredepunt.

#### **8: Kruinverlaging**

Zodra het ruimproces het uittredepunt heeft bereikt, resulteert dit in een forse toename van zandtransport en debiet. Als dit leidt tot grote holle ruimten of verweking, kan er (aanzienlijke) kruinverlaging optreden. Dit is slechts één van de mogelijkheden, het is ook denkbaar dat door verruiming een ander faalpad, zoals macrostabiliteit, dominant wordt.

#### **9: Bresgroei**

In die laatste fase groeit het erosiekanaal in diameter waardoor de dijk inzakt en de dijkhoogte afneemt. Er stroomt water over de dijk waardoor het dijklichaam erodeert en een bres ontstaat. De bresgroei kan door middel van modellen berekend worden. Dit is vooral interessant voor overstromingsmodellen.

### **2.3 Indirecte mechanismen**

Indirecte mechanismen kunnen invloed hebben op de gebeurtenissen van piping. Hierbij valt te denken aan afschuivend voorland, graverij, een omgewaaide boom of een bezweken leiding die invloed hebben op de ligging van het intredepunt en/of op het optreden van een uittredepunt. Het effect hiervan wordt meegenomen als scenario met een kans van voorkomen. Op deze manier wordt het relevante faalpad voor de dijk opgesteld.

Voorbeelden van indirecte mechanismen zijn:

- Optreden van voorland mechanisme waardoor de weerstand van het voorland veranderd (zettingvloeiing, afschuiven voorland, golfafslag of erosie door langstroming).
- Omwaaien van een boom waardoor een ontgrondingskuil ontstaat.

Meer over de indirecte mechanismen is beschreven in de handleiding Overstromingskansanalyse dijken-dammen deel 5 Indirecte mechanismen (Rijkswaterstaat, 2022d).

### 3 Bepalen relevantie met beslisregels

Met beslisregels kan worden onderbouwd of piping een relevant faalmechanisme is en het aannemelijk is dat dit tot een overstroming kan leiden. Onderscheid wordt gemaakt tussen absolute en relatieve beslisregels.

Met **absolute** beslisregels kan worden onderbouwd dat piping niet kan ontstaan, bijvoorbeeld omdat een initieel- of vervolgmecanisme fysisch niet kan optreden. Op basis van **relatieve** beslisregels kan worden onderbouwd dat de overstromingskans door piping niet significant is, omdat bijvoorbeeld de hydraulische belastingen te laag zijn. Historische analyses geven vaak waardevolle informatie voor relatieve beslisregels.

De beslisregels in dit hoofdstuk zijn niet uitputtend. Op basis van de lokale situatie kunnen ook andere beslisregels worden afgeleid. Nieuwe (locatiespecifieke) beslisregels kunnen worden onderbouwd met redeneerlijnen (absolute beslisregels) of probabilistische analyses (relatieve beslisregels).

Beslisregels kunnen worden gebruikt voor een screening op relevantie van een vak. Hoe een vakindeling wordt gemaakt, is uitgelegd in Hoofdstuk 6 van de handleiding Overstromingskansanalyse of in paragraaf 4.3.1. In paragraaf 3.1 en 3.2 wordt ingegaan op de absolute en relatieve beslisregels.

#### 3.1 Absolute beslisregels

Het gaat hier om regels waarvoor de kans op overstroming door het faalmechanisme piping verwaarloosbaar is, onafhankelijk van de omstandigheden.

##### 3.1.1 *Waterkering bestaat uit een zanddijk op een zandondergrond*

Zoals beschreven bij gebeurtenis 5 (zie paragraaf 2.2) treedt terugschrijdende erosie op bij een zandlaag afgedekt met een cohesieve laag. Wanneer onder een dijk met een zandkern geen cohesieve laag (klei- dan wel veen-) aanwezig is direct boven de pipinggevoelige zandlaag, zal geen terugschrijdende erosie plaatsvinden.

In dat geval vindt wel kwelstroming plaats via de ondergrond en door het dijklichaam zelf. Door een opening in de kleibekleding op het binnentalud kan wel zandtransport optreden. Hierdoor kan zand verdwijnen en eventueel kan een verzakking van de kruin optreden. Dit wordt ook wel uitspoelen genoemd en wordt dan ook zo beoordeeld, zie handleiding Geotechnische instabiliteit.

Bij het hydraulisch aanbrenge van het zand (bijvoorbeeld het opspuiten van zand) voor het zandlichaam van de dijk kunnen sliblagen in het zandpakket zijn ontstaan. Deze kunnen in specifieke omstandigheden als dak voor de pipe functioneren.

##### 3.1.2 *Niet-pipinggevoelige (zand-)lagen*

Piping kan worden uitgesloten bij cohesieve grondlagen, dunne tussenzandlagen en bij bepaalde getijdenafzettingen. Aanvullende criteria voor een niet-pipinggevoelige bodemopbouw worden gegeven in het artikel 'Bodemopbouw die niet pipinggevoelig is' in de technische leidraad katern Piping.

Tussenzandlagen met een dikte van  $\leq 0,5$  m, ingesloten tussen twee ondoorlatende lagen, zijn niet gevoelig voor het fenomeen piping. In deze dunne laag kan niet



voldoende debiet worden opgebouwd om het terugschrijdende erosieproces in gang te zetten.

In bepaalde getijdenafzettingen is het optreden van een doorgaand erosiekanaal zo onwaarschijnlijk, dat in principe uitgesloten kan worden dat deze lagen bijdragen aan het faalpad piping. Dit geldt voor:

1. Getijdenafzettingen met een sterk gelaagde opbouw van **klei-** en zandlaagjes. Hieronder volgt een opsomming van deze lagen met de bijbehorende SOS-codering:
  - Getijdenrestgeulopvulling, H\_Mr\_kz.
  - Afzettingen van kleine getijdenplaat- en kweldergeulen, H\_Mkw\_z&k.
  - Kleiige getijdenplaat- en kwelderafzettingen, H\_Mp\_k.
  - Organisch materiaalrijke getijdenplaat- en kwelderafzettingen, H\_Mp\_ko.
2. Getijdenplaatafzettingen met een sterk gelaagde opbouw van **siltige klei-** en zandlaagjes.

Voor andere zandige getijdenafzettingen zoals getijdengeulafzettingen zie paragraaf 5.3.3.3.

### 3.1.3

#### *Waterspanningen stijgen niet*

Zoals beschreven bij gebeurtenis 2 (zie paragraaf 2.2), is de aandrijvende kracht binnen het faalpad piping een stijging van het buitenwater. Dit leidt tot een stijging van de waterspanningen in het watervoerend pakket. Onder bepaalde voorwaarden is het stijgen van de waterspanningen niet aannemelijk. Hierdoor is geen drukopbouw mogelijk en treden opbarsten niet op. Zonder stijging in stijghoogte is er ook geen verhoging van de grondwaterstroming waardoor terugschrijdende erosie niet plaats kan vinden.

Voorbeelden van situaties waar het stijgen van de waterspanning niet aannemelijk is zijn:

- De buitenwaterstand staat niet in verbinding met de watervoerende zandlagen.
- Het regionale grondwatersysteem is zodanig dat de stijghoogte niet wordt bepaald door de lokale waterstand maar door b.v. een diepe polder op grotere afstand.

Als er twijfel is of waterspanningen stijgen, kan het met metingen worden onderzocht. Hierbij moet aandacht zijn voor een voldoende lange meetperiode, meetfrequentie en meetintensiteit en horen de omstandigheden voldoende representatief te zijn voor maatgevende hydraulische condities voor de kering. In de praktijk zijn bovenstaande zaken locatiespecifiek. Aandachtspunten bij de beoordeling van de meetperiode zijn bijvoorbeeld de inundatie van het voorland en de uitvoering van baggerwerkzaamheden.

## 3.2 Relatieve beslisregels

Met relatieve beslisregels kan vastgesteld worden dat de kans van optreden van het volledige faalpad verwaarloosbaar is door bepaalde omstandigheden.

### 3.2.1 *Gebruik van ontwerp en beoordelingsresultaten*

Een significante faalkansbijdrage van piping is uit te sluiten op basis van de ontwerp- en beoordelingsresultateninformatie. Deze kunnen worden toegepast onder de volgende voorwaarden:

- Inzichten over het faalpad zijn nog hetzelfde.  
Dit vraagt een controle of nieuwe kennis aanwezig is waardoor voor het faalmechanisme piping de berekende veiligheid of betrouwbaarheid is afgenomen. Nieuwe inzichten kunnen ontstaan vanuit wijziging van de gehanteerde rekensystematiek of door nieuwe kennis die nog geen onderdeel is van de rekensystematiek.
- Hydraulische belastingen zijn hetzelfde of gunstiger.  
Als hydraulische belastingen en/of andere randvoorwaarden niet significant zijn veranderd in ongunstige zin ten opzichte van historische analyse. Als randvoorwaarden in ongunstige zin zijn gewijzigd, is verder onderzoek noodzakelijk. Specifieke aandachtspunten hierbij zijn dijktrajecten waar in het verleden grote systeemmaatregelen hebben plaatsgevonden (Deltawerken, Afsluitdijk).
- (Nadelige) Verandering van de geometrie (bijvoorbeeld ontgraving).
- De beheerderservaring is niet tegenstrijdig met de analyse.

### 3.2.2 *Overstromingskans is voldoende klein op basis van een eenvoudige tijdsafhankelijke benadering*

Zoals beschreven bij gebeurtenis 1 (zie paragraaf 2.2) is de duur van het hoogwater relevant. Als aan de vijf criteria hieronder wordt voldaan, zal binnen de duur van één hoogwater geen doorgaande pipe ontstaan. De bijdrage aan de overstromingskans als gevolg van het faalpad piping is in zulke gevallen verwaarloosbaar (Jongejan & van Beek, 2015).

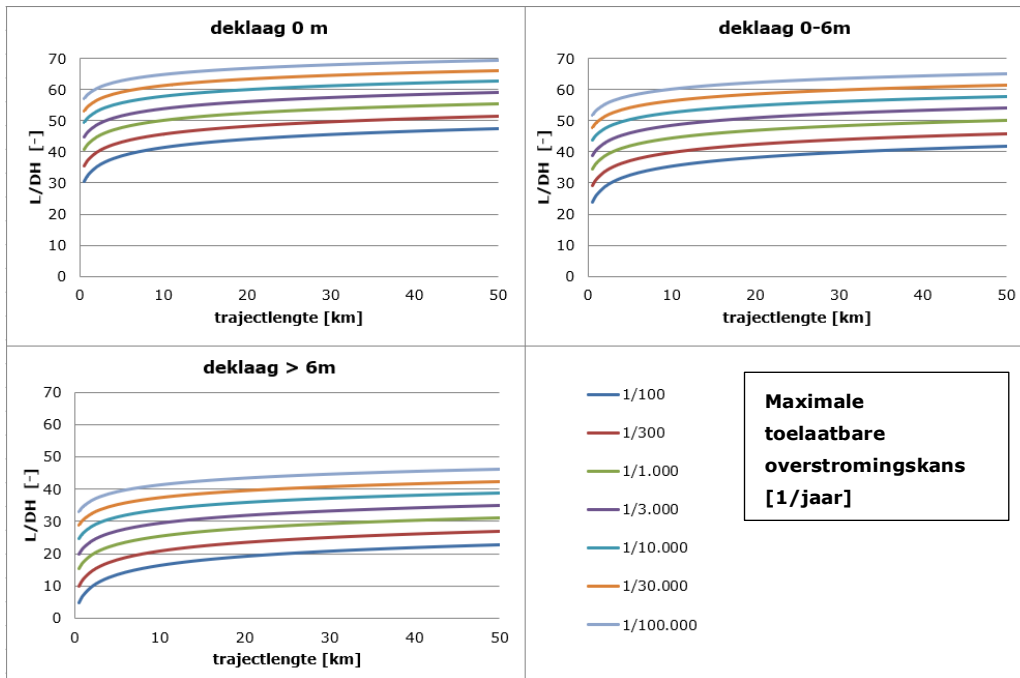
De voorwaarden zijn:

1. Er is geen sprake van een aansluiting op een constructie of van een doorgaande leiding onder de waterkering.
2. Kwelweglengte is groter dan 50 m.
3. Rivierafvoer speelt geen rol bij het verval over de waterkering.
4. De kering bevindt zich niet aan de Oosterschelde.
5. Het is aannemelijk dat in het verleden geen zandmeevoerende wel is opgetreden.

In calamiteitenplannen wordt rekening gehouden met maatregelen die moeten worden genomen wanneer twee extreme hoogwaters of stormen achter elkaar optreden.

### 3.2.3 *Waterkering heeft veilige afmetingen*

Zoals volgt uit gebeurtenis 1 en 5 (zie paragraaf 2.2), is bij een bepaalde verhouding tussen kwelweglengte en het verval over de waterkering de kans op terugschrijdende erosie verwaarloosbaar. De veilige verhouding is afhankelijk van de dikte van de deklaag, de lengte van het dijktraject en de norm. De veilige verhouding tussen kwelweglengte en het verval over de kering kan worden afgelezen uit onderstaande figuren.



Veilige verhouding tussen kwelweglengte ( $L$ ) en verval ( $DH$ ) over de waterkering als functie van de trajectlengte met verschillende deklaagdiktes in het achterland

De technische leidraad katern Piping beschrijft hoe de bovenstaande parameters  $L$ ,  $\Delta H$  en  $D_{deklaag}$  worden bepaalt.

Als de verhouding tussen de kwelweglengte en het verval over de waterkering groter is dan de waarden in bovenstaande figuren, dan is de kans op terugschrijdende erosie acceptabel klein. Indien de verhouding tussen de kwelweglengte en het verval over de waterkering kleiner is dan de waarden in bovenstaande figuren, dan kan op grond van deze generieke beslisregel worden geconcludeerd dat de kering geen evident veilige afmeting heeft.

## 4 Eerste inschatting overstromingskans

### 4.1 Plaats inschatting overstromingskans binnen de overstromingskansanalyse

Voor de relevante dijkvakken wordt tijdens een eerste inschatting van de overstromingskans (van het faalmechanisme piping) de bijdrage aan de overstromingskans bepaald van de deelmechanismen: opbarsten, heave en terugschrijdende erosie. Alle drie deze deelmechanismen moeten optreden voordat een overstroming op kan treden.

Het resultaat van de eerste inschatting van de overstromingskans is een overstromingskans per vak voor piping. Voor de eerste inschatting van de overstromingskans wordt in dit hoofdstuk een generieke methode beschreven. Deze bestaat uit een rekenmodel met bijbehorend schematisatievoorschrift. De data, de schematisatie, het rekenmodel en de benodigde informatie (doel/beslissing) hangen nauw met elkaar samen. In dit hoofdstuk zijn handvatten en kaders gegeven voor deze analyse.

Onder schematiseren wordt het proces van het versimpelen van de (complexe) werkelijkheid naar een vereenvoudigde weergave en vervolgens tot specifieke modelinvoer verstaan. In dit proces is het belangrijk om onzekerheden expliciet mee te nemen. Het veiligheidsformat beschrijft hoe met de verschillende onzekerheden wordt omgegaan. De onzekerheid van de ondergrond kan bijvoorbeeld worden meegenomen door het gebruik van scenario's. Bij het ontwerp wordt gebruikt gemaakt van een schematiseringsfactor waarin de ongunstigere scenario's en hun kans van optreden worden meegenomen.

Zowel bij beoordelen als ontwerpen wordt van grof naar fijn gewerkt. Na de eerste inschatting van de overstromingskans kan een aanscherping van de overstromingskans plaatsvinden door meer informatie in te winnen. Op basis daarvan kan een nauwkeuriger schematisatie gemaakt worden of door een analyse met een nauwkeuriger of beter passende rekenmethode (zie hoofdstuk 5). Van grof naar fijn betekent *niet* van conservatief naar scherp. Alleen om aan te tonen dat piping geen bijdrage heeft aan de overstromingskans, kan met conservatieve uitgangspunten worden gerekend.

### 4.2 Beschikbare instrumenten

#### 4.2.1 Rekenmodellen

De eerste voorwaarde voor het optreden van piping is het opbarsten van de deklaag. Opbarsten ontstaat wanneer de waterdruk in de zandlaag hoger wordt dan het gewicht van deklaag. De controle op opbarsten is gebaseerd op het verticaal evenwicht van de deklaag achter de dijk. De stabiliteitsfactor, die bepaalt of het opbarsten kan optreden is het quotiënt van het kritisch stijghoogteverschil over de deklaag en het optredend stijghoogteverschil. De rekenwijze voor het bepalen van het kritisch en optredend stijghoogteverschil is gegeven in de technische leidraad katern Piping in het artikel 'Opbarsten'.

De tweede voorwaarde voor het optreden van piping is dat de verticale stroming in het opbarstkanaal zo groot is dat de zandkorrels uit de watervoerende laag naar het maaiveld worden meegevoerd. De stabiliteitsfactor, die bepaalt of het

deelmechanisme heave wel of niet kan optreden, is het quotiënt van de kritische gradiënt en de optredende gradiënt in het opbarstkanaal. De kritische gradient De rekenwijze voor het bepalen van de kritische en optredende gradient is gegeven in de technische leidraad katern Piping in het artikel 'Heave'.

De derde voorwaarde voor het optreden van piping is het optreden van doorgaande terugschrijdende erosie. De stabiliteitsfactor, die bepaalt of het deelmechanisme terugschrijdende erosie wel of niet kan optreden, is het quotiënt van het kritieke verval en het optredende verval over de waterkering. Het kritieke verval wordt berekend met de rekenregel van Sellmeijer. De rekenwijze voor het bepalen van het kritisch en optredend verval is gegeven in het artikel 'Terugschrijdende erosie' in de technische leidraad katern Piping.

#### 4.2.2 *Software*

De analyses worden ondersteund met Riskeer.

#### 4.2.3 *Toepassingsgebied van de rekenmodellen*

##### **Toepassingsgebied rekenmodel voor opdrijven/opbarsten**

Het rekenmodel voor opdrijven/opbarsten heeft als voorwaarde dat de deklaag intact moet zijn en niet geperforeerd is. Als bij een opgetreden hoogwater is geconstateerd dat wellen achter de dijk aanwezig waren of als bekend is dat de deklaag plaatselijk onderbroken is of zelfs geheel ontbreekt, is niet voldaan aan deze voorwaarde. Voor een eerste inschatting van de overstromingskans door piping wordt aangenomen dat de kans op opbarsten gelijk is aan 1.

Het rekenmodel voor opdrijven/opbarsten verwaarloost extra weerstand tegen vervorming en scheurvorming. Met name bij dikke deklagen is het twijfelachtig of het overschrijden van het verticaal evenwicht ook leidt tot scheurvorming. Het is denkbaar dat bij dikke deklagen alleen sprake is van opdrijven van de deklaag als geheel en dat scheurvorming uitblijft, waardoor geen uittredepunt ontstaat voor piping. Dit komt voornamelijk door een grotere sterkte die aanwezig is bij een dikkere deklaag. Hier wordt nog verder onderzoek naar gedaan.

##### **Toepassingsgebied rekenmodel voor heave**

Het rekenmodel voor heave is van toepassing op situaties met een deklaag. Het rekenmodel voor heave is beperkt gevalideerd met theoretisch- of laboratoriumonderzoek, maar verkenningen zijn opgenomen in (Deltares, 2019a) en (Deltares, 2020b). Wel bestaan internationale veldmetingen die duiding geven bij welk verhang over een deklaag er sprake is van zandmeevoerende wellen, o.a. (USACE, 1956). Daarom wordt voor een eerste inschatting van de overstromingskans gewerkt met een veilige waarde voor de kritieke heavegradiënt.

##### **Toepassingsgebied van de rekenregel van Sellmeijer**

De rekenregel van Sellmeijer is gebaseerd op een combinatie van theoretische analyses, numerieke berekeningen en een kalibratie van de zandeigenschappen op basis van meer schaalproeven. Het geldigheidsgebied van de rekenregel wordt bepaald door de bandbreedte van deze proeven. Dit betekent niet per definitie dat deze rekenregel niet kan worden gebruikt. Bij gebruik buiten de bandbreedte is mogelijk een nadere onderbouwing voor toepassen van de regel nodig. In hoofdstuk 5 staat een uitleg van hoe omgegaan kan worden met afwijkende omstandigheden.

De bandbreedte van de proeven voor de kalibratie en validatie van de rekenregel van Sellmeijer bestaat uit de volgende zaken:

- Korreldiameter ( $d_{70}$ ): tussen 150 en 500  $\mu\text{m}$  (Deltares, 2012).
- Relatieve dichtheid: groter dan 50% (Deltares, 2012).
- Uniformiteit ( $d_{60}/d_{10}$ ): tussen 1,5 en 2,5 (Deltares, 2012).
- Fijne fractie: nihil, proeven zijn uitgevoerd op schoon gewassen zand.
- Opbouw watervoerende laag: homogeen en isotroop zand zonder constructies.
- Kwelweglengte: tussen 0,3 en 15 m (Deltares, 2009b). Dit betreft small-scale proeven, medium-scale proeven, proeven in de deltagoot en full-scale proeven.
- Geohydrologische situatie: weerstandsloze inzijging aan buitenwaterzijde, ondoorlatend dijklichaam en voorland, verwaarloosbare invloed van het achterland, geen geconcentreerde uitstroom naar een gat.
- Horizontale kwelweg

Bij toepassing van de rekenregel buiten deze bandbreedtes moet onderbouwd worden dat dit passend is voor de betreffende analyse, bijvoorbeeld dat de rekenregel voor een eerste inschatting van de overstromingskans conservatief is op deze punten.

*Omgang met situaties buiten het geldigheidsgebied: korreldiameter*

Bij kleinere of grotere korrelgroottes is de rekenregel van Sellmeijer niet gevalideerd. De rekenregel van Sellmeijer gebruikt voor de rolweerstand van zandkorrels de methode van White, aangevuld met een empirische correctie voor de invloed van de  $d_{70}$ . Hoewel hiervoor geen experimentele validatie is, kan op basis van het Shields-diagram worden onderbouwd dat de rekenregel van Sellmeijer waarschijnlijk conservatief is. Hoe om te gaan met grotere korreldiameter staat in paragraaf 5.3.3.4 uitgelegd.

*Omgang met situaties buiten het geldigheidsgebied: relatieve dichtheid*

Bij lagere relatieve dichtheden is de rekenregel van Sellmeijer niet meer geldig. De relatieve dichtheid correleert met de doorlatendheid van een zandlaag. Op basis van medium-scale proeven is aannemelijk dat de invloed van de relatieve dichtheid, mits gewerkt met passende waarden voor de doorlatendheid, gering is.

*Omgang met situaties buiten het geldigheidsgebied: uniformiteit*

Bij hogere waarden voor de uniformiteitscoëfficiënt ( $d_{60}/d_{10}$ ) neemt de sterkte tegen piping toe. Daarbij blijkt dat bij  $d_{60}/d_{10} > 6,8$  zand niet meer bezwijkt op terugschrijdende erosie (Allan, 2018). Het werken met de rekenregel van Sellmeijer is dus conservatief. Bij zeer hoge waarden van  $d_{60}/d_{10}$  kan het zand intern instabiel worden, en kunnen andere erosiemechanismen (suffosie) relevant worden. Hiervoor is een maatwerk analyse nodig.

*Omgang met situaties buiten het geldigheidsgebied: fijne fractie*

Wanneer de hoeveelheid fijne fractie in de zandlagen toeneemt, neemt de sterkte tegen terugschrijdende erosie toe, zie (Deltares, 2019b) en (Deltares, 2021a). Het werken met de rekenregel van Sellmeijer is dus conservatief. Aanscherping is mogelijk door verdere analyses, zie paragraaf 5.3.3.3.

*Omgang met situaties buiten het geldigheidsgebied: opbouw zandlaag*

Voor zandlagen die niet homogeen en isotroop zijn, is de rekenregel van Sellmeijer niet meer geldig. Modelonderzoek wijst uit dat anisotrope lagen in de regel meer

weerstand hebben tegen piping. Het werken met de rekenregel van Sellmeijer is op dat aspect dus conservatief. Voor meerlagensystemen kan een conservatieve equivalente doorlatendheid worden bepaald, gewogen naar de laagdiktes. Aanscherping is mogelijk door verdere analyses, zie paragraaf 5.3.3.2 voor het omgaan met anisotropie en paragraaf 5.3.3.1 voor het omgaan met meerlaagsheid.

*Omgang met situaties buiten het geldigheidsgebied: kwelweglengte*

Bij grotere kwelweglengtes dan 15 m is de geldigheid van de rekenregel van Sellmeijer niet gevalideerd (schaaleffecten). Omdat schaaleffecten ook gerelateerd zijn aan grondwaterstroming, geeft de validatie op verschillende schalen wel vertrouwen in de extrapolatie naar grotere schalen. Daarnaast komen schaaleffecten in de rekenregel goed overeen met schaaleffecten in numerieke berekeningen met het 2D model D-GeoFlow (Pol, 2020). Zodoende is de rekenregel van Sellmeijer, ook buiten het geldigheidsgebied, de best beschikbare methode.

*Omgang met situaties buiten het geldigheidsgebied: geohydrologische situatie*

Voor situaties waarbij veel kwel afstroomt naar het achterland in plaats van naar de zandmeevoerende wel, is aanscherping mogelijk door middel van nadere analyses met D-GeoFlow. Dit is bijvoorbeeld het geval bij het ontbreken van een deklaag aan de polderzijde of de aanwezigheid van diepe polders in het achterland.

*Omgang met situaties buiten het geldigheidsgebied: horizontale kwelweg*

Voor situaties waar de kwelweg niet volledig horizontaal is, maar een helling heeft, kan beredeneerd worden wat het effect is op het kritieke verval. Wanneer de korrels in het erosiekanaal omhoog rollen ondervinden ze meer weerstand en is het kritieke verval hoger en vice versa (Deltares, 2019c).

### **4.3 Schematisatie: voorbereiding op eerste inschatting van de overstromingskans**

Voor het faalmechanisme piping wordt de schematisatie gemaakt voor de drie deelmechanismen (opbarsten, heave en terugschrijdende erosie). Het schematiseren bouwt voort op de verzamelde data en de eigenschappen van de kering en ondergrond (het verhaal van de kering, zie paragraaf 1.2).

Het schematiseren start (meestal) met de vakindeling, zie paragraaf 4.3.1. Binnen een vak wordt vervolgens een representatieve schematisatie vastgesteld waarbij keuzes worden gemaakt voor hydraulische belastingen (4.3.2), geometrie (4.3.3), ondergrond (4.3.4) en waterspanningen (4.3.7). Aanvullende aandacht is gegeven aan onderwerpen die een sterke invloed hebben op de resultaten van de eerste inschatting van de overstromingskans, zoals voorland (4.3.5) en grondparameters (4.3.6). In hoofdstuk 6 van de handleiding Overstromingskansanalyse staat beschreven hoe je de representatieve doorsnede kunt kiezen. Voor het mechanisme piping wordt één doorsnede gekozen die representatief is voor het gecombineerde mechanisme van opbarsten, heave en terugschrijdende erosie.

Waar significante onzekerheid is over de aanwezige (ondergrond)condities binnen het dijkvak, worden deze scenario's toegepast. Dit beperkt de stapeling van maatgevende combinaties van uitgangspunten. Dit kan namelijk, voor een overschatting van de faalkans zorgen. In de strategie moet hier in brede zin over worden nagedacht.

#### 4.3.1

##### *Dijkvakken*

De beheerder deelt dijktrajecten in dijkvakken op. De vakindeling die wordt toegepast bij de beoordeling op piping, hoeft niet gebruikt te worden bij de beoordeling van andere initiële mechanismen of faalpaden. In hoofdstuk 6 van de handleiding Overstromingskansanalyse staat een algemene beschrijving van het uitvoeren van een vakindeling. Hieronder is dit specifiek voor piping uitgelegd.

Bij het maken van de vakindeling is het belangrijk dat er sprake is van (statistische) homogeniteit binnen een dijkvak. Homogeniteit betekent dat de belasting, de geometrie, de aanwezigheid van verschillende grondlagen (ondergrondscenario's) et cetera min of meer gelijk zijn over de strekking (of met een statistisch model kunnen worden beschreven). Daarbij moeten de vakken niet onnodig klein worden gekozen om te veel statistische afhankelijkheid tussen dijkvakken te voorkomen. De KPR-factsheet vakgrootte biedt hiervoor handvatten (Kennissplatform Risicobenadering, 2017).

Overwegingen voor de vakindeling voor piping zijn:

- Administratieve grenzen.  
Dit kan bestaan uit beheerdersgrenzen, type waterkering, normklasse, grenzen van peilgebieden of grenzen van eerdere versterkingen.
- Verschillen in constructie.  
Denk bijvoorbeeld aan harde keringen zoals duin, groene dijk of constructieve elementen (drainage, damwanden, diepwanden, verticaal zanddicht geotextiel of grofzandbarrière).
- Duidelijke verschillen in hydraulische belasting.  
Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn bij een rivier met een sterk verhang zoals de Maas in Limburg of de bovenloop van de IJssel, maar ook in de meren en estuaria als daar sprake is van grote ruimtelijke variaties in stormopzet.
- Verschillen in geometrie.  
Denk bijvoorbeeld aan aanwezigheid en lengte van het voorland, breedte van de dijkbasis, aanwezigheid van sloten en watergangen, aanwezigheid van bermen, en maaiveldhoogten. Ook verschillen in de waterpeilen binnendijks kunnen aanleiding zijn voor een vakindeling.
- Verschillen in ondergrond.  
Denk bijvoorbeeld aan een segmentgrens in de globale stochastische ondergrondschematisatie en bij beschikbaar lokaal grondonderzoek (grote) veranderingen in dikte in de aanwezige klei- en veenlagen, aanwezigheid van geulen of tussenzandlagen, aanwezigheid van een bodemopbouw die niet kwetsbaar is voor piping.

Een vakindeling kan tijdens de analyse worden verfijnd. Het verhaal van de kering kan ook input geven voor bovenstaande. Dit kan bestaan uit het meenemen van indirecte mechanismen of maatregelen.

#### 4.3.2

##### *Hydraulische belastingen*

Hydraulische belastingen (hoge waterstanden) bepalen mede het verval dat ontstaat over de kering. Als het verval voldoende groot is, vindt zandtransport plaats onder een cohesieve deklaag als gevolg van terugschrijdende erosie en kan een open kanaal ontstaan.

De hydraulische belastingen zijn:

- Waterstand met een overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan de norm voor een semi-probabilistische stabiliteitsanalyse. Bij het uitvoeren



van een pipinganalyse wordt deze waterstand probabilistisch berekend in Riskeer.

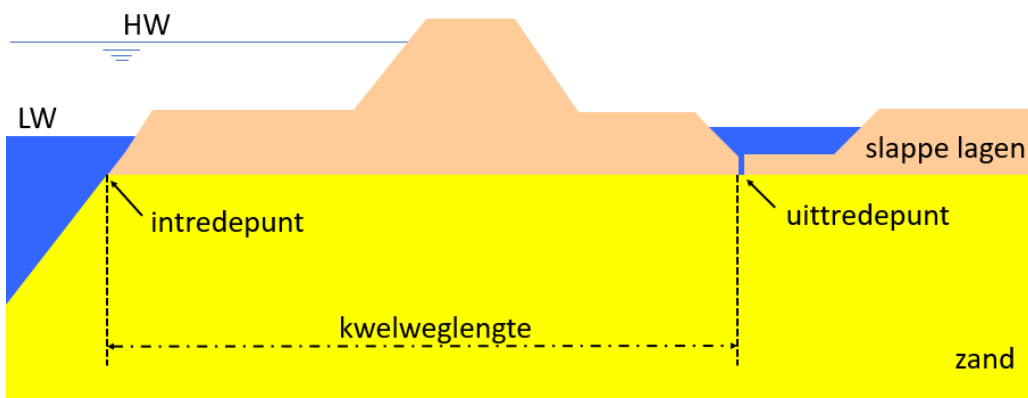
- Waterstandsverlooptlijnen worden gebruikt voor het in rekening brengen van niet stationaire grondwaterstroming voor de bepaling van de stijghoogte in het zand. De waterstandsverlooptlijn is de tijdsafhankelijke belasting die via een leklengte en dempingsfactor in rekening wordt gebracht. Voor verschillende gebieden in Nederland geldt een specifieke waterstandsverlooptlijn (zie ook het artikel 'Tijdsafhankelijke effecten buitenwaterstand bij piping' in de technische leidraad katern piping)

Bij de bepaling van de stijghoogte in het zand met rekenmodellen spelen onzekerheden een belangrijke rol, omdat parameters voor die rekenmodellen moeilijk zijn te schatten. Die onzekerheden kunnen verminderd worden door het afregelen van de parameters in de geohydrologische modellen met behulp van waterspanningsmetingen, zie ook paragraaf 5.3.

#### 4.3.3

##### Geometrie

Voor de geometrie van het faalpad piping is het intrede- en uittredepunt en de tussenliggende kwelweglengte vooral van belang, zie Figuur 4.



Figuur 4: Dijk met intredepunt, uittredepunt en de tussenliggende kwelweglengte

Let op: de kortste afstand tussen intrede- en uittredepunt hoeft niet altijd een goede maat te zijn voor de kwelweglengte. Het is soms veel nauwkeuriger als je vanuit potentiële uittredepunten en mogelijke kwelwegen redeneert. Bij sterk slingerende dijken of meanderende rivieren staat de kwelstroom niet altijd haaks op de dijk. Per vak kunnen dan verschillende scenario's voor de bodemopbouw mét hun kans van voorkomen worden meegenomen.

#### 4.3.4

##### Ondergrond

Voor alle primaire waterkeringen in Nederland met uitzondering van de duinen is de globale Stochastische Ondergrondschematisatie (SOS) opgesteld. Hierbij zijn de keringen opgedeeld in segmenten op basis van bekende informatie over de ondergrond. In een SOS-segment komen één of meerdere SOS-ondergrondscenario's voor met een bepaalde kans van aantreffen. De SOS-scenario's leggen de opbouw van de ondergrond vast met een opeenvolging van SOS-eenheden en de diepteligging van die eenheden. Door het toepassen van verschillende scenario's worden de onzekerheden van de opbouw van de ondergrond in kaart gebracht.

Een eerste inschatting van de overstromingskans door piping kan worden uitgevoerd met het SOS. Wanneer de overstromingskans door piping groter is dan de eis en deze kans door een ondergrondscenario wordt bepaald, is aanvullend onderzoek nodig om scenario's uit te sluiten of te bevestigen. Het aanvullende onderzoek leidt in veel gevallen ook tot verfijnen van de vakindeling.

Bij het lokaal aanscherpen van de SOS-schematisatie moet een balans gevonden worden tussen de ruimtelijke variatie van bodemlagen en de onderzoeksdichtheid van het beschikbare grondonderzoek. De ruimtelijke variatie is, met uitzondering van dekzanden, groot over relatief korte afstanden. Soms kan pas bij een onderzoeksdichtheid van onderzoekspunten om de 50 m een deel van die ruimtelijke variatie in kaart gebracht worden, namelijk de grootschalige onderdelen van de zandpakketten.

Veel informatie over de algemene aspecten van het opstellen van een schematisering is terug te vinden in technische leidraad katern Grondlichaam en Ondergrond.

#### 4.3.5

##### *Voorland*

Het voorland is het buitendijks gelegen land, grenzend aan de buitenteen van de dijk. Dit kan bestaan uit een deel dat het grootste deel van het jaar boven water staat, maar kan ook bestaan uit delen die permanent onder water staan (waterbodem).

Voor piping relevante eigenschappen van het voorland worden bepaald door diverse geologische aspecten, waaronder de afzetting van klei in wisselende omstandigheden. Daarnaast hebben antropogene factoren invloed, zoals kleiwinning of zandwinning. Ook hebben cultuurtechnische zaken invloed, zoals structuurvorming in kleilagen die boven de grondwaterstand liggen.

Bij schaaldijken is geen voorland aanwezig. In een eerste inschatting van de overstromingskans kan het intredepunt gelijk aan de buitenteen van de kering worden gekozen, daar waar de deklaag eindigt en waar het buitenwater het zandpakket snijdt.

Wanneer voorland aanwezig is, heeft dit vaak een sterk bepalende invloed op de ligging van het (fictieve) intredepunt, de kwelweglengte, het stijghoogteverloop en daarmee op de resultaten van de pipinganalyse. Daarbij zijn verticale hydraulische weerstand en de lengte van het voorland van belang, zie artikel 'Invloed van het voorland' in technische leidraad katern Piping. Het voorland moet volledig meegenomen worden in de pipinganalyse<sup>1</sup>.

Bij een voorland zijn twee aspecten van belang:

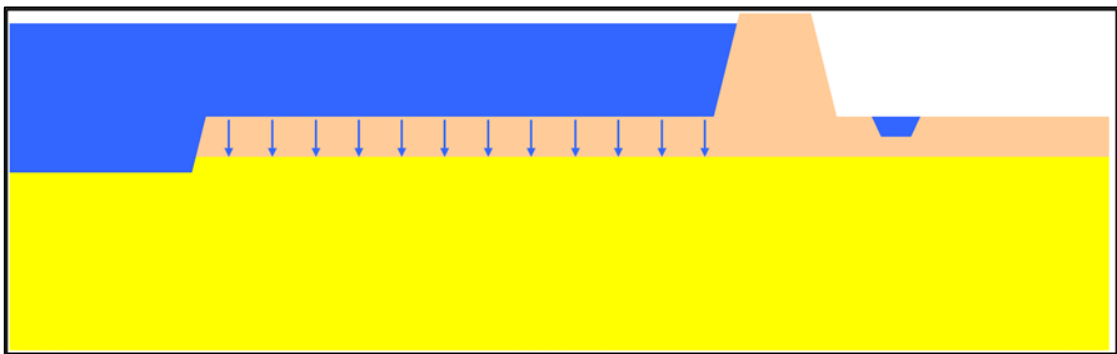
- Verticale stroming door de deklaag.  
De weerstand van de deklaag is afhankelijk van de dikte en de doorlatendheid van de klei, zie Figuur 5. Een doorlatende klei zorgt ervoor dat het watervoerend pakket en het aanwezige erosiekanaal, niet alleen gevoed worden door de insnijding in het watervoerend pakket bij de rivier, maar ook door stroming door de deklaag. Dit effect wijkt af van de

<sup>1</sup> In WBI2017 werden voorlanden niet meegenomen in de eerste inschatting van de overstromingskans of werd alleen 1 keer de dijkbasis als voorland meegenomen. De bedoeling is dat dit nu niet meer zo wordt aangepakt.

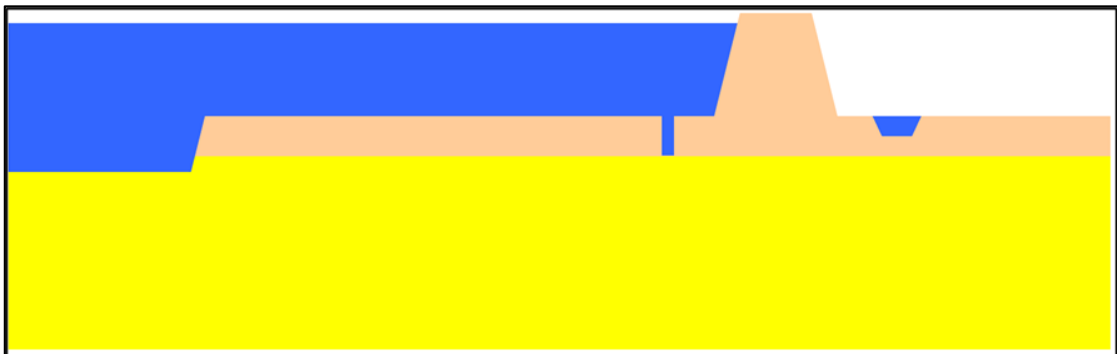
basisconfiguratie en is dus niet meegenomen in de analytische rekenregel van Sellmeijer.

- Aanwezigheid van gaten in de deklaag buitendijks. Hierdoor kan een erosiekanaal eerder kortsluiting maken met het buitenwater, zie Figuur 6. Dit fenomeen wordt ook wel uitbreken genoemd. Dit treedt alleen op als het erosiekanaal onder het voorland groeit.

Door deze twee aspecten is extra verificatie op uitbreken van het erosiekanaal van belang. Meer informatie hierover en een stappenplan om het hele voorland mee te nemen staat uitgebreid beschreven in Bijlage B (Deltares, 2023b). In het artikel 'Invloed van het voorland' in de technische leidraad katern Piping worden ook gedetailleerde voorwaarden gegeven in welke gevallen een voorland meegenomen kan worden in de eerste inschatting van de overstromingskans.



Figuur 5: Verticale stroming door de deklaag doordat het voorland doorlatende lagen bevat



Figuur 6: Aanwezigheid van gaten in de deklaag buitendijks, hierdoor kan de erosiekanaal eerder kortsluiting maken

### Controle uitbreken erosiekanaal

Het is van belang om te controleren of het erosiekanaal niet vóór de (fictieve) intredepunt kortsluiting maakt met het rivierwater. Uitbreken van het erosiekanaal kan alleen optreden als de pipe onder het voorland groeit en er een gat in de deklaag is. De kans op uitbreken van het erosiekanaal is afhankelijk van de lokale situatie, en wordt bepaald met de methode van Bijlage B. Met D-Geo Flow kan dit nauwkeuriger worden vastgesteld (zie paragraaf 5.4.3)

Parameters die de kans op uitbreken beïnvloeden, zijn:

- Dikte van de cohesieve laag in het voorland.
- Niveau van de dagelijkse grondwaterstand in relatie tot de onderzijde van de deklaag: met een toenemende dikte van de deklaag onder de grondwaterstand neemt de kans op het uitbreken van het erosiekanaal af.

- Insnijdingen of perforaties in de deklaag, zoals bij de aanwezigheid van sloten of greppels of door dierlijke graverij.
- Beheer van het voorland.

Bij het meenemen van voorlanden in een pipinganalyse gelden aanvullende aandachtspunten, zoals de ruimtelijk variatie van het voorland. Bij een voorland dat door mensenhanden is aangelegd of bij natuurlijke voorlanden met rivierduintjes of oude meanders, strangen en kreken, is de ruimtelijke variatie in dikte en samenstelling van het voorland groot en weinig systematisch. Ook bestaat het risico dat originele slechtdoorlatende lagen lokaal zijn verwijderd.

Intensief (grond)onderzoek kan deze variatie in beeld brengen. In het algemeen volstaat een onderzoekspunt per hectare, of bij smalle voorlanden per 100 m kering. Bij grote variatie kan ook gedacht worden aan vlakdekkend onderzoek (bijvoorbeeld grondradar, elektromagnetisch onderzoek) in combinatie met traditionele handboring om een uitspraak te kunnen doen over de dikte en continuïteit van de afdeklaag.

Meer informatie over het uitvoeren van grondonderzoek en schematisering is terug te vinden in het artikel 'Meet- en onderzoekstrategie voor de grondopbouw (incl. dichtheid)' van de technische leidraad katern Grondlichaam en Ondergrond.

#### 4.3.6

##### *Grondparameters*

Naast de schematisering van dijkvakken en grondlagen, zijn de eigenschappen van de aanwezige grondlagen van belang. In de technische leidraad katern Piping zijn handvatten gegeven voor de inschatting welke parameters voor het pipingmechanisme relevant zijn en hoe deze kunnen worden vastgesteld. Tabel 1 geeft een overzicht van de relevante artikelen in deze leidraad.

De parameters kunnen bepaald worden op basis van lokaal (laboratorium)onderzoek. Wanneer geen lokaal onderzoek mogelijk is, kunnen startwaarden worden gebruikt. Startwaarden kunnen gebruikt worden bij een eerste inschatting van de overstromingskans. Met een gevoeligheidsstudie kan worden vastgesteld of aanscherping van de overstromingskans nodig is.

Het onderzoek voor de eerste inschatting van de overstromingskans kan ook parameters bevatten die pas in de nadere analyse meegenomen worden. In de strategie is het belangrijk hier tenminste in algemene zin aandacht aan te geven.

*Tabel 1: Overzicht van artikelen in de technische leidraad katern Piping die ingaan op grondparameters*

<b>Code</b>	<b>Verwijzen naar technische leidraad artikelen in tabellen.</b>
P0440	D70
M0110	Verzadigd volumegewicht cohesieve deklaag
P0430	Volumegewicht zandkorrels onder water
P0450	Doorlatendheid zandlaag (aquifer)
P0456	Doorlatendheid deklaag voor- en achterland
P0454	Fijne fractie (slibfractie)
P0451	Gelaagd watervoerend pakket
P0452	Anisotropie

#### 4.3.7 Waterspanningen

Voor het faalmechanisme piping zijn de waterspanningen in de pipinggevoelige zandlaag van belang.

Voor de deelmechanismen opbarsten en heave zijn de waterspanningen ter hoogte van het uittredepunt van belang. Voor het deelmechanisme terugschrijdende erosie is het verval over de dijk van belang, of eigenlijk de gradiënt van de stijghoogte tussen het intrede- en uittredepunt.

Voor het schematiseren van de waterspanningen wordt verwezen naar de technische leidraad katern Piping en de technische leidraad katern Macrostabieleit, zie Tabel 2.

*Tabel 2: Overzicht van artikelen in de technische leidraad katern Piping die ingaan op waterspanningen*

Code	Verwijzen naar technische leidraad artikelen in tabellen.
M0072	Grondwaterstroming algemeen
M0062	Meten en monitoren van waterspanningen algemeen
M0065	Schematiseren van waterspanningen algemeen
M0078	Stijghoogten
P0320	Veilige schematisaties
M0069	Stationair
M0074	Niet-stationair
M0070	Bepaling leklengte
P0468	Responsfactor

Waterspanningen kunnen op meer manieren bepaald worden. De eenvoudigste aanpak is met een responsfactor. Uitvoeriger aanpakken zijn het gebruik van peilbuisgegevens en 2D grondwatermodellen tot aan volledige 3D-grondwatermodellen. Handvatten worden gegeven in het artikel 'Stijghoogten bepalen in het watervoerend pakket' van de technische leidraad katern Piping of bij de nadere analyses in paragraaf 5.4. Complexere methodes vragen meestal meer inspanning, omdat (langdurig) gegevens verzameld moeten worden of omdat de modellering complexer is. In de strategie moet hierover in brede zin nagedacht te worden.

## 4.4 Bepalen van de overstromingskans

Voor de eerste inschatting van de overstromingskans door piping wordt de doorsnede faalkans van opbarsten, heave en terugschrijdende erosie bepaald, zie paragraaf 4.4.1. De overstromingskans door piping op doorsnede niveau is de combinatie van de faalkansen van deze deelmechanismen, zie paragraaf 4.4.1.3. Vervolgens wordt deze doorsnede faalkans vertaald naar een faalkans op vakniveau, zie paragraaf 4.4.2. De kansen op vakniveau worden gecombineerd tot een faalkans op trajectniveau. Dit wordt in paragraaf 4.4.3 verder toegelicht.

Bij de eerste inschattingen van de overstromingskans van deze gebeurtenissen zitten verschillende onzekerheden die de overstromingskans door piping bepalen. Dit betreft bijvoorbeeld onzekerheden in parameters, modellen en in de schematisering van de ondergrond en waterspanningen. Deze onzekerheden moeten worden meegenomen om tot een voldoende betrouwbare beoordeling van een dijk te komen. Dit kan worden gedaan met behulp van de veiligheidsformat voor piping,

zie artikel 'Veiligheidsformat en modelonzekerheden voor piping' in de technische leidraad katern Piping.

In semi-probabilistische analyses worden onzekerheden verdisconteerd in rekenwaarden. In probabilistische analyses worden onzekerheden met een kansverdeling meegenomen. Meer informatie is te vinden in het artikel 'Probabilistisch en semi-probabilistisch ontwerpen' van de technische leidraad katern Veiligheidsanalyse. Riskeer ondersteunt zowel semi-probabilistische als probabilistische analyses.

#### 4.4.1 *Bepalen doorsnede faalkans*

##### 4.4.1.1 Semi-probabilistische analyse doorsnede

Een semi-probabilistische analyse bevat twee stappen.

#### **Stap 1: Bepalen van de rekenwaarden van onzekere parameters**

Bij een semi-probabilistische berekening worden onzekerheden verdisconteerd in rekenwaarden. De wijze waarop de rekenwaarden worden bepaald is vastgelegd in het veiligheidsformat. Meer informatie over het veiligheidsformat staat in artikel 'Veiligheidsformat en modelonzekerheden voor piping' in de technische leidraad katern Piping.

Het is belangrijk te beseffen dat de semi-probabilistische veiligheidsfactoren niet zondermeer geldig zijn als de onzekerheid in een parameter sterk afwijkt van de default variatiecoëfficiënten zoals gebruikt in de WBI-kalibratiestudie piping. Hierbij gaat het bijvoorbeeld om 12% op de  $d_{70}$  en 50% op de doorlatendheid. Ook bij een lage stabiliteitsfactor ( $<0,5$ ) is de kalibratierelatie niet betrouwbaar. De rekenwaarde dekt namelijk niet het volledige effect van onzekerheden af. In dat geval is een probabilistisch analyse aan te bevelen.

#### **Stap 2: Bepalen van de veiligheidsfactor en doorsnedefaalkans**

Per deelmechanisme is een rekenmodel beschikbaar om de veiligheid te bepalen op basis van een veiligheidsfactor, zie paragraaf 4.2 en het artikel 'Rekenmodellen voor piping' van de technische leidraad katern Piping. Op basis van de veiligheidsfactor bestaan twee manieren om de veiligheid te toetsen:

1. *Op basis van kansen.*  
Met de kalibratieregel (Rijkswaterstaat, 2017) kan op basis van de veiligheidsfactor een benadering van de overstromingskans worden afgeleid. Deze zijn beschreven in de kalibratiestudie (Rijkswaterstaat, 2017). Daarna kan de berekende veiligheidsfactor en doorsnedekans worden gebruikt om de totale pipingkans per vak en per traject te bepalen, zie 4.4.2 en 4.4.3.
2. *Op basis van een factor.*  
De berekende veiligheidsfactor op doorsnedeniveau kan ook rechtsreeks worden vergeleken met een benodigde veiligheidsfactor. Dit wordt onder meer bij ontwerpen vaak toegepast. Met deze aanpak is het niet meer nodig om faalkansen op te schalen naar trajectniveau. De benodigde veiligheidsfactor op doorsnedeniveau is afhankelijk van de norm op trajectniveau, de faalkansruimte voor het faalmechanisme piping en lengteeffectfactor voor het traject. Meer informatie staat in het artikel 'Schadefactor voor piping' in de technische leidraad katern Piping.

#### 4.4.1.2 Probabilistische analyse doorsnede

De probabilistische aanpak bevat twee stappen.

##### **Stap 1: Bepalen van de stochasten**

In probabilistische analyses worden onzekerheden rondom parameters en modelonnauwkeurigheden expliciet met een kansverdeling meegenomen. Meer informatie over de stochasten voor opbarsten, heave en terugschrijdende erosie, en de keuze van kansverdelingen is beschreven in de kalibratiestudie (Rijkswaterstaat, 2017).

Voor een eerste probabilistische analyse kunnen net als bij een semi-probabilistische analyse startwaarden worden gebruikt. Een probabilistische analyse geeft informatie over de bijdrage van de verschillende parameters aan de faalkans waardoor gericht nadere informatie kan worden ingewonnen.

##### **Stap 2: Bepalen van de doorsnede faalkans met grenstoestandfuncties en een probabilistische methode**

Bij een probabilistische berekening wordt een grenstoestandfunctie gebruikt. Zie voor meer informatie ook het artikel 'Betrouwbaarheid' van de technische leidraad katern Veiligheidsanalyse. Een grenstoestandfunctie (ook *Z*-functie genoemd) bepaalt wanneer falen wel ( $Z < 0$ ) of niet ( $Z > 0$ ) optreedt. Deze functie wordt met behulp van een probabilistische methode gebruikt om tot een doorsnede faalkans te komen. Voorbeelden van probabilistische methoden zijn de *First Order Reliability Methode* (FORM) die vaak gebruikt wordt of Monte Carlo.

Een grenstoestandfunctie is in essentie dezelfde als de functie voor de veiligheidsfactor. De enige afwijking is dat de grenstoestandfunctie het verschil is tussen sterkte en belasting in plaats van de quotiënt, en dat de probabilistische berekening nog een stap verder gaat door uitkomsten te presenteren in de vorm van probabilistisch berekende kansen en kansbijdragen.

#### 4.4.1.3 Totale doorsnedekans voor het faalmechanisme piping

Als voor elk scenario de faalkansen voor de drie deelmechanismen zijn bepaald, kan op grond hiervan de totale faalkans per doorsnede als gevolg van het mechanisme piping ( $P_{f,dsn}$  [1/jaar]) worden bepaald.

Allereerst wordt daartoe per scenario  $i$  de faalkans voor het mechanisme piping ( $P_{f,dsn;i}$  [1/jaar]) bepaald. Die faalkans voor scenario  $i$  wordt benaderd door het minimum van de kansen voor de deelmechanismen bij dat scenario. Dus de kansen op uplift ( $P_{f;u;i}$ ) heave ( $P_{f;h;i}$ ) en terugschrijdende erosie ( $P_{f;p;i}$ ).

$$P_{f,dsn;i} = \min(P_{f;u;i}; P_{f;h;i}; P_{f;p;i})$$

Om te komen tot de kans op falen van de doorsnede wordt de faalkans per scenario vermenigvuldigd met de kans op dat scenario ( $P(S_i)$ ) en dat product wordt vervolgens voor alle scenario's gesommeerd.

$$P_{f,dsn} = \sum_{i=1}^n P(S_i) P_{f,dsn;i}$$

De achtergronden, afleiding en toepassingsvoorwaarden voor de bepaling van de overstromingskans op doorsnede worden verder beschreven in het kalibratierapport (Rijkswaterstaat, 2017).

Het rekenen met het minimum van de doorsnedekansen is een behoudende maar niet bovenmatig conservatieve benadering (in dit geval door de grote onderlinge correlatie tussen de deelmechanismen) voor een parallelsysteem, waarin alle gebeurtenissen moeten optreden voordat sprake is van falen.

Als er geen deklaag is, ontbreken in het faalpad piping de deelmechanismen opbarsten en heave. In kanstermen moet dan voor beide deelmechanismen een kans gelijk aan 1 worden gehanteerd.

#### 4.4.2 *Vertaling van doorsnede faalkans naar faalkans per dijkvak*

In Hoofdstuk 8 van de handleiding Overstromingskansanalyse is beschreven hoe een faalkans op doorsnedeniveau kan worden vertaald in een faalkans op vakniveau. Een faalkans op vakniveau wordt verkregen door het vermenigvuldigen van de doorsnedekans met een lengte-effectfactor binnen een vak ( $N$ ).

$$P_{f,vak} = P_{f,dsn} N$$

Er zijn meerdere manieren om het lengte-effect op vakniveau in rekening te brengen. Een van de mogelijkheden is om de lengte-effectfactor met de volgende formule te bepalen:

$$N = 1 + \frac{a L_{vak}}{b}$$

Waarin  $a L_{vak}$  de lengte van het vak is dat bijdraagt aan de kans op piping en  $b$  wordt bepaald door de correlatiefuncties van de verschillende parameters. Voor piping wordt voor  $b$  een waarde van 300 m aangehouden. De lengte  $a L_{vak}$  is afhankelijk van de wijze waarop de doorsnede is geschematiseerd. Wanneer is uitgegaan van statistisch homogene vakken en een gemiddelde doorsnede is  $a$  gelijk aan 1. Wanneer een maatgevende (slechtste) doorsnede is geschematiseerd wordt voor  $a L_{vak}$  de lengte ingevuld waarvoor de maatgevende doorsnede representatief is. Daarbij wordt voor  $N$  een minimum waarde van 1 gehanteerd.

#### 4.4.3 *Combineren faalkansen op dijkvakniveau naar faalkans op trajectniveau*

In Hoofdstuk 8 van de handleiding Overstromingskansanalyse is beschreven hoe de vakkansen kunnen worden gecombineerd tot trajectkansen. Voor piping is de aanname dat de faalkansen van de dijkvakken  $j$  onafhankelijk van elkaar zijn in de meeste gevallen een realistische schatting.

$$P_{f,traj} = 1 - \prod (1 - P_{f,vak;j})$$

De faalkansen van dijkvakken kunnen ook probabilistisch met Riskeer en HydraRing worden gecombineerd. De aanscherping van de overstromingskans met een probabilistische analyse is meestal beperkt, de inspanning echter ook waardoor dit een interessant optimalisatie kan zijn. Daarnaast is het goed om te beseffen dat er meerdere optimalisaties mogelijk zijn in de schematisering en modellering welke een grotere invloed kunnen hebben dan optimalisaties in het lengte-effect.

#### 4.4.4 *Ontwerpen*

Bij ontwerpen is het gangbaar om op doorsnedekans te ontwerpen. Hierin wordt de traject-eis vertaald naar een doorsnede-eis op basis van lengte-effect en faalkansbegroting. De startwaarden voor het lengte-effect hierin zijn echter conservatief. De startwaarde voor lengte-effect factoren voor de vertaling van trajecteis naar doorsnede eis in het ontwerp zijn:  $a = 0,9$  (bovenrivierengebied) /



0,5 (benedenrivierengebied),  $b = 300\text{m}$ . Zie ook de technische Leidraad katern Piping. Vooral  $a$  kan per traject nader ingeschat worden. De startwaarde voor de faalkansbegroting voor piping is meestal 0,24, maar kan project-specifiek aangepast worden.

## 5 Mogelijkheden voor aanscherping overstromingskans

### 5.1 Inleiding

De vorige hoofdstukken bieden handvatten voor een eerste inschatting van de overstromingskans en een onderbouwing van het handelingsperspectief. Als dit nog niet heeft geleid tot een eenduidig handelingsperspectief, is een nadere analyse nodig. Dit hoofdstuk geeft handvatten voor de nadere analyse van de overstromingskans.

Hiervoor zijn veel mogelijkheden die meer of minder effectief kunnen zijn om het doel te bereiken. Iedere nadere analyse vraagt een investering. Daarom moet in de praktijk worden afgewogen welke verdere onderzoeken en analyses het meest effectief zijn tegen acceptabele kosten. In de praktijk zal vaak een combinatie van één of meer opties worden gekozen.

De volgende opties zijn mogelijk om deze analyse uit te voeren:

1. Schematiseringsproces herhalen aan de hand van meer informatie en gedetailleerdere analyses.
  - a. Verfijnen algehele schematisatie.
  - b. Verfijnen schematisatie waterspanningen.
  - c. Verfijnen schematisatie geologische parameters.
2. Uitwerken vervolgmecanismen.
3. Toepassen andere modellen en technieken (bijvoorbeeld DGeoflow, volledig probabilistisch rekenen, e.d.).
4. Benutten kennisontwikkeling.

### 5.2 Afweging meeste kansrijke nadere analyse

De afweging voor de meest kansrijke analyse is sterk situatieafhankelijk. Het meest effectief zijn vaak analyses gericht op het beperken (of wegnemen) van de dominante onzekerheden. Dit is afhankelijk van de karakteristieken van het gebied en de waterkering, de beschikbare gegevens en de bandbreedtes voor het handelingsperspectief.

Om een goede afweging te kunnen maken is kennis nodig van het gebied, en van de uitgevoerde analyses en onzekerheden. Ook is expertkennis en ervaring nodig. Bij piping gaat het vaak om aspecten als geohydrologie of geologie. Deze zaken hebben een sterk gebied specifiek karakter. Tabel 3 geeft per gebied aan welke nadere analyses kansrijk kunnen zijn. Een toelichting per deelgebied wordt hieronder gegeven.

Tabel 3: Indicatie van relevantiekenmerken per deelgebied (zeer relevant ++, weinig relevant 0)

Kenmerk	Bovenriviere n-gebied Rijntakken <sup>2</sup>	Bovenriviere n-gebied Maas <sup>3</sup>	Meren <sup>4</sup>	Kust <sup>5</sup>	Oosterscheide <sup>6</sup>	Overgangsgebieden <sup>7</sup>
<b>Waterspanningen</b>						
Tijdsafhankelijkheid	0	0	+	++	+	+
Aanvullende aandacht geohydrologie	+	+	+	+	+	+
<b>Geologische zaken</b>						
Anisotropie	+	+	+	++	++	+
Meerlaagsheid	+	+	0	0	+	0
Extra sterkte type zand (slib of grind)	0	+	0	++	++	0

Hierbij wordt opgemerkt dat de lokale situatie kan afwijken van de algemene kenmerken. De indeling in deelgebieden is gelijk aan die voor de hydraulische belastingen. Deze indeling staat hieronder nogmaals in Figuur 7.

In de praktijk zullen meer iteratieronden nodig zijn bij het bepalen van de overstromingskansen. Aangeraden wordt hier in de programmering en planning rekening mee te houden.

<sup>2</sup> Watersysteem 1 in Figuur 7

<sup>3</sup> Watersysteem 2 en 18 in Figuur 7

<sup>4</sup> Watersysteem 7, 8, 19, en 20 in Figuur 7

<sup>5</sup> Watersysteem 9, 10, 11, 12 en 12 in Figuur 7

<sup>6</sup> Watersysteem 14 in Figuur 7

<sup>7</sup> Watersysteem 3, 4, 5, 6, 17, 21, 22 en 23 in Figuur 7



Figuur 7: Gebiedsindeling primaire keringen

### Bovenrivierengebied – Rijntakken

Het bovenrivierengebied is ontstaan door rivierafzettingen en het meanderen van de rivier. Vroegere meanders bepalen de ligging van oude zandbanen die tot onder de huidige waterkering door kunnen lopen.

Het voorland tussen het zomerbed en de waterkering kan grote invloed hebben op de weerstand tegen piping. Het voor- en achterland bestaat uit een cohesieve deklaag van enkele meters klei (circa 0,5 tot 3 m) op een dik zandpakket (een fijnere laag dekzand met daaronder grovere zandlagen). Menselijke ingrepen zoals klei-, zand- en grindwinning in het voorland en gegraven nevengeulen kunnen ervoor zorgen dat de deklaag lokaal afwezig is. Het lokaal lange voorland met sterk wisselende eigenschappen heeft een bepalende invloed op de geohydrologie (lagere stijghoogte) en zorgt voor een langere kwelweglengte (weerstand tegen terugschrijdende erosie).

In gebieden waarbij de dijk (door oude meanders) niet parallel loopt aan de rivier, ontstaan 3D-grondwaterstromingspatronen. Door nadere analyse van de

geohydrologie kan meer zicht worden gekregen op de eigenschappen van het wisselende voorland en de 3D-grondwaterstromingspatronen.

De verschillende zandlagen onder de waterkering zorgen voor een gelaagd systeem met variaties in dikte, doorlatendheden en anisotropie. De anisotropie is in dit deelgebied in absolute zin gering, maar deze parameter heeft bij dikke watervoerende lagen een vrij grote invloed op het mechanisme piping.

De lange belastingduur (orde weken) maakt het bovenrivierengebied minder kansrijk als het gaat om tijdsafhankelijke berekeningen.

### **Bovenrivierengebied – Maas**

Voor de Maas gelden deels dezelfde karakteristieken als voor de Rijntakken: een gelaagd watervoerend pakket en een voorland dat weerstand kan bieden tegen piping.

Binnen de geohydrologie kan aanvullende aandacht gegeven worden aan de hoge doorlatendheid van de deklaag in het achterland. Dit heeft een matigend effect op opbarsten en heave (lagere stijghoogte); ook heeft dit een matigend effect op terugschrijdende erosie omdat de kwelstroom minder geconcentreerd wordt naar het erosiekanaal.

Aanvullend is het van belang om bij specifieke locaties recente kennisontwikkelingen over pipinggevoeligheid van grof of niet-uniform zand en grind, en mogelijk verkitting (Deltares, 2021b) (Deltares, 2020a) mee te nemen. Deze grondsoorten vallen buiten het toepassingsbereik van het Sellmeijermodel en hebben naar verwachting een hogere erosieweerstand.

De belastingduur in de Maas is vaak korter dan bij de Rijntakken, maar meestal aanzienlijk langer dan in een kuststelsel.

### **IJsselmeergebied**

De ondergrondeigenschappen in het IJsselmeergebied worden sterk bepaald door relatief recente geologisch gebeurtenissen. Rond het jaar 1000 bestond het merengebied uit relatief kleine meren en een veengebied. Door de Allerheiligenvloed van 1170 ontstond de Zuiderzee en na de aanleg van de Afsluitdijk (1920-1932) werd het gebied weer een merengebied.

De waterbodem bestaat uit restanten uit de tijd dat het een veengebied was, met structureel slecht doorlatende lagen (veen en klei) over het hele gebied. Zolang die lagen niet worden doorbroken, infiltreert weinig water vanuit de meren naar de ondergrond. De landinrichting vloeit voort uit de aanleg van diepe polders in de afgelopen 400 jaar, zoals de Beemster, de Purmer, de Wijdewormer en in de vorige eeuw de Noordoostpolder en Flevoland. Daardoor stroomt veel grondwater naar het lager gelegen achterland. Voor het merengebied kan voor de piping analyse nuttig inzicht worden gekregen door de binnendijkse respons van de stijghoogte in het watervoerend pakket te bepalen aan de hand van (regionale) grondwatermodellen en/of stijghoogtemetingen.

Hoogwater als gevolg van windopzet heeft een korte belastingduur. Hoogwater als gevolg van een verhoogd meerpeil heeft juist een fors langere tijdsduur. Analyses met meer aandacht voor tijdsafhankelijkheid zijn mogelijk waardevol in situaties waarbij er een noemenswaardig verschil zit tussen deze twee belastingssituaties (storm- en meerpeilgedomineerd).

## Kust

Onder kust wordt verstaan: harde keringen en zandige kust/duinen (Waddenzee, Westerschelde, delen rondom Europoort). Voor het kustgebied is het een belangrijk onderscheid of er in de grondopbouw sprake is van een getijdenplaatafzetting of getijdengeulafzetting.

- Getijdenplaatafzettingen zijn in veel gevallen slechts enkele meters dik en bevatten een opeenvolging van zandige en siltige kleiige laagjes op millimeterschaal (Deltares, 2020a).
- Getijdengeulafzettingen zijn dikker, zandiger en bevatten vaak minder kleilaagjes.

Voor terugschrijdende erosie lijkt het onwaarschijnlijk dat het mechanisme kan optreden in getijdenplaatafzettingen. Dit als gevolg van de aanwezigheid van veel cohesieve kleilaagjes in de baan van het erosiekanaal (Deltares, 2021b). Getijdengeulafzettingen zijn doorlatender en ook is de anisotropie lager ten opzichte van de getijdenplaatafzettingen. Daardoor kunnen bij getijdengeulafzettingen mogelijk wel pipingrisico's in optreden. Het zand dat afgezet is in het kustgebied bevat meer fijne fractie dan rivierafzettingen. Onderzoek (Deltares, 2020b) laat zien dat de aanwezigheid van fijne fractie een positief effect heeft op de weerstand tegen terugschrijdende erosie, zie paragraaf 5.3.3.3.

In het kustgebied kan een voorland aanwezig zijn voor de dijk, bijvoorbeeld in de vorm van kwelders. Dit voorland heeft een positief effect op de weerstand tegen piping.

Met aanvullende aandacht voor de geohydrologie kan grip worden gekregen op de tijdsafhankelijke reactie van het grondwater op de korte belastingduur van het buitenwater (o.a. getij). Ook geldt dat tijdsafhankelijkheid op de pijpgroei van grote invloed kan zijn op het analyseresultaat.

## Oosterschelde

Het Oosterscheldegebied vertoont qua beschrijving veel overeenkomsten met de kust. Een belangrijk verschil is wel dat de belasting iets langer kan aanhouden door meermaals sluiten of door een sluitingsduur van meer getijperiodes van de Oosterscheldekering. De belastingduur is nog steeds aanzienlijk korter dan die in het bovenrivierengebied.

## Overgangsgebieden

Kenmerkend voor de overgangsgebieden is dat ze deels of geheel achter een stormvloedkering liggen. Dit heeft invloed op de belastingduur. Overgangsgebieden zijn: benedenrivieren Rijn en Maas, Europoort, Volkerak-Zoommeer, Hollandsche IJssel en de IJssel-Vechtdelta.

De overgangsgebieden staan onder invloed van de waterstandsveranderingen op de zee of in het merengebied. Hoe dichter bij de zee of de meren, hoe groter de invloed vanuit deze gebieden op de lokale waterstand. Daarom zal het westelijk deel van het benedenrivierengebied meer overeenkomsten hebben met het kustgebied en het oostelijke deel met het bovenrivierengebied Rijntakken. Specifiek voor het benedenrivierengebied geldt dat in sommige gevallen de rivier niet insnijdt in het watervoerend pakket en dat in zulke situaties geen intredepunt voor piping aanwezig is.

Bij locaties die grenzen aan het bovenrivierengebied gelden bovengenoemde aandachtspunten voor het bovenrivierengebied. Bij locaties die grenzen aan de kust gelden bovengenoemde aandachtspunten voor de kust.

Hoogwater als gevolg van storm heeft een korte belastingduur. Hoogwater als gevolg van een hoge rivierafvoer heeft een langere tijdsduur. Analyses met aandacht voor tijdsafhankelijkheid zijn mogelijk waardevol in situaties waarbij de extreme waterstanden worden gedomineerd door stormgebeurtenissen, die een korte tijdsduur hebben.

### 5.3 Schematiseringsproces herhalen aan de hand van meer informatie

#### 5.3.1 *Verfijnen algehele schematisatie*

Een eerdere analyse kan uitwijzen dat het algeheel verfijnen van de schematisatie bijdraagt aan het verkleinen (of wegnemen) van de dominante onzekerheden. Bij het algeheel verfijnen kunnen alle voorgaande keuzes worden geëvalueerd en (eventueel) aangepast worden. Bijvoorbeeld keuzes voor: vakgroottes, relevante mechanismen, verkrijgen aanvullende gegevens (bv. aanvullend grondonderzoek) en de schematisering.

#### 5.3.2 *Verfijnen schematisatie waterspanningen*

##### 5.3.2.1 Tijdsafhankelijke waterspanningen

Piping is een faalmechanisme dat sterk afhankelijk is van grondwaterstroming:

- Opbarsten en heave treden op als de stijghoogte in het watervoerend pakket een kritieke waarde overschrijdt (afhankelijk van deklaagdikte, volumiek gewicht en heave-criterium).
- Terugschrijdende erosie treedt op als het verhang onder de dijk groot genoeg is om zandkorrels in beweging te krijgen.

Het stijghoogteverloop onder de dijk is een functie van de belastingduur (duur piekwaterstand en golfvorm). Hoe langer de duur van het hoogwater, hoe hoger de stijghoogte zal zijn. Stationaire stroming leidt tot hogere stijghoogtes dan tijdsafhankelijke stroming. Stationair kan dus als startkeuze worden gebruikt in het licht van grof naar fijn werken. Voor watersystemen waar de duur van het hoogwater gelimiteerd is (kust en grote delen van het merengebied) kan het meenemen van tijdsafhankelijkheid in de stijghoogtemodellering zinvol zijn.

Tijdsafhankelijkheid kan worden meegenomen in de grondwatermodellering voor de analyses van opbarsten en heave. De resultaten van een niet stationair grondwatermodel kunnen echter niet gebruikt worden in de rekenregel van Sellmeijer.

Binnen het BOI-instrumentarium is het mogelijk om een stijghoogte af te leiden waarbij de duur van het hoogwater een variabele is. Dit kan door:

- Analytische grondwatermodellen  
Hierbij kan gedacht worden aan modellen uit het *Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken* (TAW, 2004) (paragraaf b4.5).
- Numerieke grondwatermodellen  
Tijdsafhankelijkheid kan verwerkt worden in een numeriek grondwatermodel. Hiervoor bestaan meer opties van 2D- tot 3D- modellen, bijvoorbeeld Plaxis en D-Geo Flow,
- Extrapolatie van metingen  
Gemeten stijghoogtes kunnen onder bepaalde voorwaarden en aannames

geëxtrapoleerd worden naar maatgevende condities. Er moet vooral worden opgelet dat de metingen representatief zijn voor hoogwater en dat bij hoogwater de (geohydrologische) situatie niet afwijkt, bijvoorbeeld kortsluiting door inundatie van het voorland of het eroderen van slecht doorlatende klei- of sliedlagen. Handvatten worden gegeven in (POV-piping, Waterschap Scheldestromen, 2018).

Bij tijdsafhankelijke grondwaterberekeningen is het van belang de eigenschappen van de bodem te kennen. Voor tijdsafhankelijkheid is de samendrukbaarheid van de grond, het gehalte aan lucht, de geohydrologische uitgangssituatie (waterpeilen, neerslag, etc.) en de bergingscoëfficiënt van belang. Een systeembreed beeld (zand- en deklaag) van de bergingseigenschappen kan worden verkregen uit peilbuisanalyses. Rekenparameters voor tijdsafhankelijkheid voor de zandlaag kunnen afgeleid worden uit pompproeven (bergingscoëfficiënt, horizontale doorlatendheid en weerstand deklaag) en HPT-AMPT-sonderingen (bergingscoëfficiënt en eventueel ook horizontale en verticale doorlatendheid).

#### 5.3.2.2 Waterspanningen door middel van 3D-grondwatermodellen

Met een (semi-)3D-grondwatermodel kan de grondwaterstroming in een groter gebied gemodelleerd worden. Hierin kunnen variabele bodemopbouw, wisselende geometrieën en 3D-effecten worden meegenomen. Een 3D-grondwatermodel vraagt een grotere (tijds)inspanning dan de 2D-modellen, maar kan aanvullende inzichten opleveren.

De lokale situatie bepaalt of het gebruik van een (semi-)3D-grondwatermodel meerwaarde heeft. Dit is vooral het geval wanneer er sterke 3D-fenomenen aanwezig zijn. Voorbeelden hiervan zijn:

- Sterk meanderende rivier of dijk  
Bij een binnenbocht van de rivier kan water van meer kanten instromen. In een buitenbocht is het omgekeerde het geval.
- Aanwezigheid van lokale waterplassen in voor- en achterland  
Het effect van lokale fenomenen kan niet altijd in een 2D-grondwatermodel worden meegenomen, maar vaak wel in een 3D-model.
- Grote variatie in deklaagweerstand  
Een variabele deklaagweerstand kan wel in een 3D-model worden beschouwd.

Het gebruik van grondwatermodellen is gangbaar in waterveiligheidsanalyses. In [TAUW, 2021] worden voorbeelden van toepassingen van grondwatermodellen in project beschreven, inclusief het rekening houden met het voorland. De complexiteit van modellen is wel onderscheidend: van extrapolatie van gemeten stijghoogtes, tot 2D-analytische modellen en uiteindelijk tot stochastische 3D-grondwatermodellen.

Om een 3D-grondwatermodel te bouwen dat geschikt is voor het doorrekenen van een hoogwatersituatie is het van belang om onder andere de volgende parameters te verzamelen:

- Bodemopbouw en variaties daarvan in 3 dimensies.
- Bathymetrie of bodemhoogtes van watergangen en plassen.  
Expliciete aandacht gaat uit naar deze objecten direct aan de binnen- en buitenzijde van de dijk (Waterschap Aa en Maas, 2020).
- Weerstand van de deklaag in het voor- en achterland (dikte en doorlatendheid).



- Bergingscoëfficiënt en geohydrologische uitgangssituatie (waterpeilen, neerslag etc.) (Waterschap Aa en Maas, 2020).

De resultaten van een grondwatermodel (stijghoogtes) kunnen gebruikt worden voor diverse onderdelen van een pipinganalyse:

- Deelfaalmechanisme opbarsten  
In de opbarst-vergelijking is de stijghoogte een directe invoerparameter (95%-waarde in semi-probabilistische analyse of een kansverdeling in een probabilistische analyse).
- Deelfaalmechanisme heave  
In de heave-vergelijking is de stijghoogte een directe invoerparameter (95%-waarde in semi-probabilistische analyse of een verdeling in een probabilistische analyse).
- Deelfaalmechanisme terugschrijdende erosie  
In de Sellmeijer-vergelijking kunnen de berekende stijghoogtes gebruikt worden om de fictieve voorlandlengte te bepalen (zie hiervoor paragraaf 4.3.5).

Een grondwatermodel is in veel gevallen multi-inzetbaar. Het grondwatermodel kan ook gebruikt worden voor het ontwerp van pipingoplossingen (zoals een heavescherm), het analyseren van macrostabiliteit en het beschouwen van milieu-effecten.

### 5.3.3 *Verfijnen schematisatie geohydrologische kenmerken*

#### 5.3.3.1 Anisotropie

Anisotropie is het verschil in horizontale en verticale doorlatendheid van grondlagen. De mate van anisotropie wordt uitgedrukt in een anisotropiefactor: de horizontale doorlatendheid gedeeld door de verticale. De anisotropie wordt bepaald door de geologische eigenschappen van een zandlaag. Zoals de wijze waarop de grondlaag is afgezet en of sprake is van veel gelaagdheid (met fijner zand of met klei). In de rekenregel van Sellmeijer is uitgegaan van een isotrope zandlaag. De horizontale en verticale doorlatendheid zijn gelijk (anisotropie = 1).

Uit numeriek onderzoek (D-Geo Flow) blijkt dat anisotropie van de pipinggevoelige zandlagen (een lagere verticale dan horizontale doorlatendheid) een positief effect heeft op de weerstand tegen opbarsten, heave en terugschrijdende erosie (Deltares, 2020b). In een anisotroop zandpakket stroomt door een lagere verticale doorlatendheid minder water naar het erosiekanaal dan bij een homogeen isotroop zandpakket.

Onderzoek laat zien dat bij toenemende anisotropie, het risico op piping afneemt. Het meest zinvol is het meenemen van anisotropie in de volgende situaties:

- Hoge waarden van de anisotropie  
Deze waarden worden vooral gevonden in getijdenafzettingen.
- Grote dikte van de zandlaag  
In alle regio's in Nederland zijn wel locaties waar dit het geval is.

De anisotropiewaarde moet locatiespecifiek bepaald worden, in (Deltares, 2020c) staat per type afzetting een bandbreedte van verwachte anisotropiewaarden. In de rekenmethodiek wordt aanbevolen of een veilige ondergrenswaarde te hanteren, op basis van deze lokale metingen ofwel een scenarioanalyse uit te voeren.

Voor de bepaling bestaan meer methodes:

- Pompproef met specifieke peilbuismonitoring  
De bulk-anisotropie kan bepaald worden met een pompproef. Deze moet zo ingericht worden dat naast de horizontale stroming ook de verticale stroming in beeld wordt gebracht.
- HPT-AMPT-metingen  
De lokale anisotropie kan bepaald worden door dit type metingen. Deze geven informatie over de anisotropiefactor voor circa 1 m<sup>3</sup> grond. Meer metingen kunnen gecombineerd worden om de anisotropiefactor voor het hele watervoerende pakket af te leiden.

De (bulk)anisotropiefactor kan niet bepaald worden met monsters uit boorkernen. Zulke monsters zijn te klein en meestal niet voldoende ongeroerd.

Meer informatie over het meenemen van anisotropie bij een piping berekening is te vinden in het artikel 'Anisotropie' van de technische leidraad katern Piping.

Het meenemen van anisotropie in een pipinganalyse kan op drie manieren:

- als rekenparameter in een numerieke analyse van terugschrijdende erosie in D-Geo Flow;
- met een aangepaste Sellmeijer-rekenregel waarbij een parameter voor anisotropie is toegevoegd, die is geijkt aan de hand van D-Geo Flow. De variant is beschreven in (Deltares, 2020b);
- in een grondwatermodel waarbij stijghoogtes worden bepaald die gehanteerd kunnen worden in de evaluatie van opbarsten of heave.

### 5.3.3.2 Meerlaagsheid

De rekenregel van Sellmeijer is afgeleid voor een homogeen zandpakket (constante dikte en constante doorlatendheid). In veel gevallen bestaat het watervoerend pakket uit meer geologische afzettingen, zoals fijne windafzettingen (formatie van Boxtel) met daaronder grove rivierafzettingen (formatie van Kreftenheye). Deze lagen kenmerken zich door een verschil in eigenschappen, zoals doorlatendheid.

Meerlaagsheid heeft een significante invloed wanneer de lagen een groot verschil in de doorlatendheid hebben en bij relatief dikke zandlagen. Situaties waarbij de bovenste zandlaag een lagere doorlatendheid heeft dan de onderste hebben een grotere veiligheid tegen piping.

Om meerlaagsheid mee te nemen in een pipinganalyse, zal aan de hand van (geotechnisch) onderzoek aangetoond moeten worden of er sprake is van een gelaagd systeem, bijvoorbeeld via boor- en sondeonderzoek.

Voor het vereenvoudigen van een meerlagensysteem in de eerste inschatting van de overstromingskans worden handvatten gegeven in het artikel 'Gelaagd watervoerend pakket' van de technische leidraad katern Piping. Het meenemen van meerlaagsheid in een pipinganalyse kan met behulp van een numeriek model (bv. D-Geo Flow). In het grondwatermodel worden de opeenvolgende lagen geschematiseerd met de specifieke eigenschappen (zoals de dikte en doorlatendheid).

### 5.3.3.3 Sterkte fijne fractie in getijdenzanden

De rekenregel van Sellmeijer is afgeleid van proeven op homogeen zand zonder fijne fractie. Uit onderzoek blijkt dat de weerstand tegen piping hoger is voor zand met een fijne fractie. Dit heeft de volgende oorzaken:

- De doorlatendheid van een zandlaag met fijne fractie is lager. Zandlagen met een lagere doorlatendheid leiden tot minder stroming en dus minder belasting op de zandkorrels.
- De weerstand tegen terugschrijdende erosie is hoger als gevolg van de fijne fractie. Hoe hoger het aandeel fijne fractie, hoe groter de weerstand. Dit effect komt bovenop het bovenstaande.

De grootte van de doorlatendheid van zand met fijne fractie kan worden bepaald met veldmetingen en laboratoriumproeven, zoals bepaling van de korrelverdeling. Bij de laatste optie worden specifieke correlaties toegepast tussen doorlatendheid en korrelgrootte waarin het aandeel fijne fractie wordt meegenomen. Voorbeelden van dergelijke correlaties zijn te vinden in de combinatie van de formule van Beijer met de methode van Van den Akker (TAW, 1994) of de formule van Grontmij (Deltares, 2021d) die ook is opgenomen in (SBR-CUR, 2003).

De extra sterkte tegen terugschrijdende erosie kan worden meegenomen door het kritieke verval te verhogen als functie van het percentage slib (slibfractie,  $<16 \mu\text{m}$ ). Dit is toepasbaar in een (semi-) probabilistische analyse met de rekenregel van Sellmeijer. Bij getijdegeulafzettingen is het uitgangspunt om het kritieke verval met een factor 1,4 te verhogen (HWBP / Waterschap Hollandse Delta / Deltares / Fugro, 2023).

Meer informatie over het meenemen van de Sterkte fijne fractie staat in het artikel 'Fijne fractie (slibfractie)' in de technische leidraad katern Piping.

#### 5.3.3.4 Grind en grindhoudende zanden

Op veel locaties langs de Limburgse Maas bestaat de ondergrond voor een deel uit grindlagen en grindhoudende zandlagen. De rekenregel van Sellmeijer is afgeleid op basis van proeven op homogeen zand zonder grind. De methode van Sellmeijer (toepassingsbereik tot 500 µm) is daarmee niet zonder meer van toepassing op grindlagen of grindhoudende zandlagen.

Onderzoek (Deltares, 2019d) laat zien dat meer weerstand tegen terugschrijdende erosie verwacht mag worden voor grind en grindhoudende zanden. In een nadere analyse kan met deze kennis rekening worden gehouden door het kritiek verval te verhogen. Dit kan verder ingevuld worden op basis van literatuuronderzoek of aanvullende proeven op grind zanden.

Daar waar een zandlaag op grind aanwezig is, kan gerekend worden met een meerlaagssysteem zoals beschreven in paragraaf 5.3.3.2.

## 5.4 Toepassen andere modellen en technieken

### 5.4.1 Tijdsafhankelijke groei erosiekanaal

Piping is een geleidelijk erosieproces. In de eerste inschatting van de overstromingskans (paragraaf 4.2.1) wordt geen rekening gehouden met de tijd die het erosiekanaaltje nodig heeft om zich te ontwikkelen.

De hoogwaterduur heeft veel invloed op piping. Rivierhoogwater wordt gekenmerkt door langdurige hoge waterstanden (weken). Stormopzet bij meren en aan de kust is meestal juist van korte duur (één tot enkele dagen). In kustgebieden, benedenrivieren en meren wordt de ontwikkeling van piping daarom beperkt door de korte hoogwaterduur. Bij de bovenrivieren is er meer tijd beschikbaar voor de ontwikkeling van het erosiekanaaltje. Dit geeft extra tijd voor noodmaatregelen zoals bijvoorbeeld opkisten van wellen.

Belangrijke factoren die bepalen of een erosiekanaaltje zich tijdens een hoogwater ontwikkelt tot een bres zijn:

- De lengte van het erosiekanaal is al aanwezig voor een hoogwater. Hierdoor worden het faalproces en de standduur verkort, en is het toepassen van tijdsafhankelijke pipegroei minder kansrijk.
- Op welk moment tijdens de hoogwatergolf de groei van de pipe begint. Dit hangt samen met het moment van scheurvorming (opbarsten) en zandtransport (heave).
- De groeisnelheid van het erosiekanaaltje, die toeneemt met korrelgrootte en waterstand.
- De hoogwaterduur (korte stormopzet versus lange rivierafvoer), die bepaalt hoeveel tijd beschikbaar is voor erosie.
- De effectiviteit van noodmaatregelen, uitgedrukt in kans op detectie en de benodigde tijd voor het uitvoeren van de maatregel (opkisten, peilopzet etc.).

Voor watersystemen waar de belastingduur lang kan zijn (zoals orde weken in het bovenrivierengebied) is het meenemen van tijdsafhankelijkheid minder kansrijk. In watersystemen als de kust en voor stormgedomineerde delen van de meren en het

overgangsgebieden, is het minder waarschijnlijk dat de belasting lang aanhoudt (orde dagen). In deze gevallen kan het waardevol zijn om tijdsafhankelijkheid mee te nemen.

Het meenemen van tijdsafhankelijkheid is een kennisgebied dat in ontwikkeling is. Bij het meenemen van het effect zal gebruik gemaakt moeten worden van de laatste kennis.

Tijdsafhankelijkheid is van toepassing op de drie deelfaalmechanismen:

- Opbarsten en heave  
Deze deelfaalmechanismen hebben als belasting de stijghoogte in het watervoerend pakket. Hoe korter de piek van de hoogwaterstand aanwezig is, hoe minder hoog de stijghoogte zal stijgen. Dit effect kan meegenomen worden in bijvoorbeeld een (tijdsafhankelijk) grondwatermodel.
- Terugschrijdende erosie  
Voor terugschrijdende erosie geldt dat bij toenemende buitenwaterstand een erosiekanaal kan ontstaan onder de dijk. Bij een verval groter dan het kritiek verval zal het erosiekanaal doorgroeien naar het intredepunt. Het erosiekanaal zal niet direct de bovenstroomse zijde bereiken: groei van het erosiekanaaltje kost tijd. Als de hoogwaterduur beperkt is, kan dit effect meegenomen worden in de nadere analyse.

Om de groeisnelheid van het erosiekanaal mee te nemen is het van belang om (Pol, 2022):

- Het verloop van de hoogwaterstanden te kennen.  
Een eerste handvat is de waterstandverlopendool. Deze geeft specifiek voor de geotechnische faalpaden het verloop van een representatieve hoogwatergolf. Op basis van locatiespecifieke gegevens kunnen deze verlopen waar nodig nader aangescherpt te worden op basis van metingen, mits deze voldoende representatief zijn.
- De groeisnelheid van het erosiekanaal mee te nemen in de analyse.  
Hiervoor zijn meer opties:
  - Rekenen met een constante groeisnelheid (bovengrenswaarde).
  - Uitgaan van een empirisch model voor de groei van het erosiekanaal.
- Rekening te houden met de relevante onzekerheden in hydraulische belasting en groeisnelheid. Een probabilistische analyse is hiervoor het meest geschikt. Er is op dit moment geen semi-probabilistische werkwijze beschikbaar voor deze analyse.
- Te weten of in het dijkvak zandmeevoerende wellen zijn waargenomen in het verleden.

Meer informatie over het meenemen van tijdsafhankelijke stroming is te vinden in het artikel 'Tijdsafhankelijke effecten buitenwaterstand bij piping' in de technische leidraad katern Piping.

#### 5.4.2 Geavanceerde probabilistische analyse

In een geavanceerde probabilistische analyse kan gebruik worden gemaakt van nieuwe kennis:

- Bewezen sterkte op basis van observaties
- Uittredepunt methode
- Gereduceerde onzekerheden op basis van metingen

### **Bewezen sterkte**

Bewezen sterkte kan worden meegenomen door faalkansupdating. Het algemene principe van faalkansupdating (FU) is dat op basis van een observatie de schatting van de faalkans kan worden bijgesteld met de stelling van Bayes. Een observatie is hierbij het overleven van geobserveerde belastingcondities zonder indicaties van falen, zodat ervan kan worden uitgegaan dat de beschouwde grenstoestand niet is overschreden. Met deze informatie kan de faalkans worden bijgesteld.

Een aandachtspunt is dat observaties alleen voor opbarsten en heave kunnen worden gemaakt door het waarnemen van (zandmeevoerende) wellen. Voor terugschrijdende erosie bestaat nog geen meetapparaat om de groei van het erosiekanaaltje te monitoren. Hierdoor is bewezen sterkte alleen van toepassing voor opbarsten en heave. Daarbij geldt dat het vaak lastig is de precieze condities tijdens de observatie te bepalen.

Bij het gebruik van observaties geldt een aantal aandachtspunten:

- De observaties moeten representatief te zijn. Wanneer tussentijds (ruimtelijke) ontwikkelingen hebben plaats gevonden waardoor de observaties niet meer representatief zijn (bijvoorbeeld kleiwinning in het voorland, aanpassen van polderpeilen, uitdiepen van waterpartijen, e.d.) dan is de meerwaarde van observaties niet evident.
- Geen observatie van opbarsten of heave betekent niet per definitie dat deze mechanismen niet zijn opgetreden. (Zandmeevoerende) wellen kunnen zijn opgetreden, maar niet gedetecteerd.
- Voor piping is ook de duur van het hoogwater van belang, specifiek de respons van de stijghoogte in het watervoerend pakket). Een veilig gekeerde waterstand betekent niet dat deze waterstand stationair gekeerd kan worden.
- Er moet expliciete aandacht zijn voor de kwaliteit van de modellering en schematisering. Door het negeren van verborgen veiligheden is de bijstelling van de faalkans mogelijk te groot. Het is belangrijk om je bewust te zijn van zulke verborgen veiligheden en te bekijken of die tijdens de normsituatie net zo veel bijdragen als tijdens de observatie. Zo moeten de onderliggende fenomenen (anisotropie, meerlaagsheid, tijdsafhankelijkheid, 3D, 0,3d, etc.) meegenomen worden in de probabilistische analyses.

Voor piping is het nog niet helemaal duidelijk of en hoe bewezen sterkte toegepast kan worden. Voor verdere achtergrondinformatie wordt verwezen naar rapportages over probabilistische analyses voor geotechnische faalmechanismes (Deltares, 2017), (Deltares, 2017) en (Schweckendiek, 2014). In het artikel 'Bewezen Sterkte' van de technische leidraad katern Veiligheidsontwerp staat een uitgebreide definitie van bewezen sterkte.

### **Uittredepuntmethode**

De uittredepuntmethode is door waterschap Rivierenland ontwikkeld. Met deze methode kunnen meer potentiële uittredepuntlocaties meegenomen worden in de beoordeling. Dit draagt bij aan een nauwkeuriger handelingsperspectief voor pipingveiligheid. Per uittredepunt is het mogelijk om een probabilistische analyse te maken en te combineren om tot een faalkans van vakken en het hele segment te komen. Zie voor meer informatie hierover (Deltares, 2021e).

### **Gereduceerde onzekerheden op basis van metingen**

Met metingen, zoals HPT sonderingen, kan meer vertrouwen ontstaan in de waarden van de parameters en kan de onzekerheid van een parameter gereduceerd worden. Minder onzekerheid leidt tot een verlaging van de faalkans.

#### 5.4.3

##### *D-Geo Flow*

D-Geo Flow is een 2-dimensionaal Eindige Elementen Model (EEM) waarin het rekenmodel van Sellmeijer is gekoppeld aan een grondwaterstromingsmodel. Hiermee kan een numerieke analyse worden uitgevoerd. De verschillen tussen de rekenregel van Sellmeijer en D-Geo Flow bij gelijke schematisatie (een homogeen, isotroop zandpakket met ondoorlatend voorland, etc.) en de juiste rekeninstellingen zijn verwaarloosbaar.

Waar de Sellmeijer-rekenregel een relatie legt tussen het kritiek verval als functie van (ondergrond)parameters geeft D-Geo Flow ook de lengte van het erosiekanaal bij een bepaalde buitenwaterstand. Het kritieke verval kan in D-Geo Flow worden afgeleid uit de waterstand waarbij het erosiekanaal nog net niet doorschiet naar het intredepunt.

Tijdsafhankelijke groei van het erosiekanaal kan niet met D-Geo Flow bepaald worden.

Er wordt momenteel nog gewerkt aan D-Geo Flow, onderdeel van de Embankment Suite van Deltares, waarin de functionaliteit van D-Geo Flow wordt ondergebracht.

Met D-Geo Flow kunnen een kritiek verval en de groei van het erosiekanaal worden berekend. In het numerieke model zijn grondwaterstroming en het Sellmeijer-criterium gekoppeld.

Het inzetten van D-Geo Flow is zinvol:

- Als er sprake is van locatiespecifieke kenmerken die niet meegenomen kunnen worden in de rekenregel van Sellmeijer. Denk hierbij aan: een geometrie die varieert binnen de doorsnede, meerlaagsheid, anisotropie, (variërende) eigenschappen van het voorland of achterland. Het kritiek verval kan in D-Geo Flow dan worden aangescherpt.
- Als inzicht in de lengte van het erosiekanaal gegeven (kritiek) verval nodig is, bijvoorbeeld voor de analyse naar het rekenen met voorland (paragraaf 4.3.5).

De output van een berekening met D-Geo Flow is een kritiek verval. Dit kan door middel van de handvatten in hoofdstuk 4 vertaald worden naar een faalkans.

Enkele aandachtspunten bij het gebruik van D-Geo Flow zijn te vinden in (Rijkswaterstaat, 2020). Het gaat om:

- Het omgaan met onzekerheden (bij het bepalen van de parameters, bij het berekende kritiek verval of de kritieke lengte van het erosiekanaaltje en bij het bepalen van de overstromingskans). Specifiek voor de lengte van het erosiekanaal geldt dat deze niet is gevalideerd aan de hand van experimenten.
- Het gebruiken van de juiste rekeninstellingen bij EEM, zoals randvoorwaarden, rastergrootte van het rekenraster (mesh), verfijning van het raster rond de pipe, stapgrootte van het verval en MPicard-getal.

Voor verdere informatie wordt verwezen naar de manual van D-Geo Flow. Informatie over de toepassing van dit softwarepakket is ook opgenomen in (Rijkswaterstaat, 2020).

## 5.5 Uitwerken vervolgmechanismen

Op basis van de eigenschappen van de kering en de eerdere analyse kan worden geconcludeerd dat het uitwerken van vervolgmechanismen leidt tot een betere inschatting van de overstromingskans. Een belangrijk onderdeel van deze analyse is het kwantificeren van de (voorwaardelijke) kansen op vervolggebeurtenissen. De te hanteren werkwijze is beschreven in handleiding Overstromingskansanalyse (Rijkswaterstaat, 2022b).

Bij de uitwerking van faalpaden moet rekening gehouden worden met mogelijke scenario's en afhankelijkheden (ruimte en tijd) tussen gebeurtenissen. Hiervoor wordt verwezen naar de bijlage indirecte mechanisme (Rijkswaterstaat, 2022d), de bijlage scenario's (RWS-WVL, 2022).

## 5.6 Benutten kennisontwikkeling

De laatste optie gaat over het inventariseren en verwerken van nieuwe relevante ontwikkelingen. Aandachtspunt is dat nieuwe kennis positieve of negatieve effecten op de faalkans kunnen hebben. Het is belangrijk om niet alleen nieuwe kennis met positieve effecten toe te passen.

In Nederland wordt kennis ontwikkeld vanuit verschillende programma's en invalshoeken. Dit kan meerwaarde hebben voor het bepalen van de overstromingskans van primaire waterkeringen. In de voorgaande paragrafen is al een deel van de recente kennisontwikkeling opgenomen.

Om alle nieuwe (positieve en negatieve) kennisontwikkelingen mee te nemen in de analyse kan gebruik worden gemaakt van het Beslissingsondersteunend Raamwerk Piping (BRP). Volgens deze methode in dit BRP wordt een overzicht gemaakt van hoe nieuwe kennisontwikkelingen min of meer invloed hebben op de pipingopgave afhankelijk van lokale kenmerken. Meer informatie hierover is te vinden in (Deltares, 2023a).

Om richting te geven aan de te verwachten kennisontwikkeling zal vanuit BOI een releasekalender worden opgesteld. Aandachtspunt is dat de kennis met voldoende zekerheid kan worden toegepast voor het beoogde doel. Aangeraden wordt dit punt te bespreken in het werkatelier.

## 5.7 Beheers- en calamiteitenmaatregelen

Bij de bepaling van de overstromings- of faalkansen wordt alleen rekening gehouden met gepland menselijk ingrijpen. Hierdoor kan bij de bepaling van de overstromings- of faalkans rekening worden gehouden met – geplande – beheersmaatregelen. Er zijn twee soorten maatregelen: preventieve en reactieve. Preventieve maatregelen zoals hoogwaterprotocollen en/of peilopzet, worden voorafgaand aan een hoogwater ingezet. Reactieve maatregelen zoals opkisten van zandmeevoerende wellen, of de aanleg van noodbermen, worden tijdens een hoogwater ingezet.



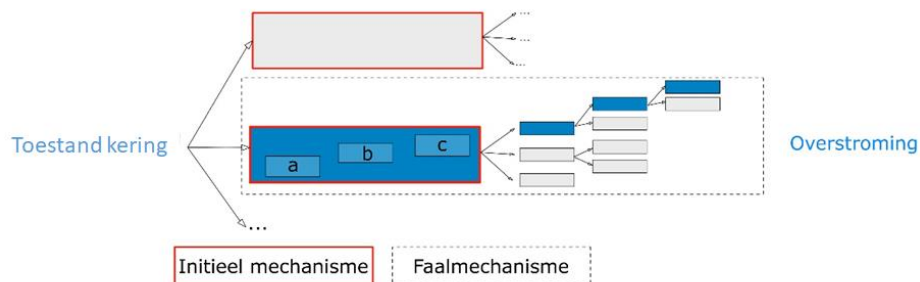
## Literatuur

- Allan, R. (2018). *Doctor of Philosophy thesis on Backward Erosion Piping*.
- Deltares. (2009b). *SBW Hervalidatie Piping, HP5.4a Inrichting en aanleg full-scale experiment*. Delft.
- Deltares. (2012). *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen*. Delft.
- Deltares. (2019a). *KPP Piping - Heave*. Delft.
- Deltares. (2019b). *KvK Piping deelproject 011: Getijdenafzettingen en piping (2)*. Delft.
- Deltares. (2019c). *KvK Piping deelproject 017: Verkenning heterogeniteit - Variatie onderkant deklaag; kenmerk: 11203719-017-GEO-0002*. Delft.
- Deltares. (2019d). *Pipinggevoeligheid grind en grindhoudende zanden maasvallei; kenmerk: 11202002-002-GEO-0005*. Delft.
- Deltares. (2020a). *Gebiedsspecifieke faalpaden voor piping, kenmerk: 11205284-001-ZWS-0002*. Delft.
- Deltares. (2020b). *Kennis voor Keringen: Syntheserapport pipingonderzoek 2018-2019*. Delft.
- Deltares. (2020c). *Memo: Anisotropieonderzoek in gebieden met andere afzettingen; kenmerk: 11202960-002-BGS-0020*. Delft.
- Deltares. (2021a). *Pipingproef Vijfhuisterdijk - Eindrapportage, kenmerk: 11204843*. Delft.
- Deltares. (2021b). *Rode draad overstroming door piping*. Delft.
- Deltares. (2021d). *Doorlatendheidsbepaling in gelaagde; kenmerk: 11203697-029-BGS-0002*. Delft.
- Deltares. (2021e). *Probabilistische analyses en combinatie pipinganalyses uittredepuntenmethode; kernmerk 11205809-000-GEO-0004*.
- Deltares. (2023a). *Omgaan met piping onzekerheden; kenmerk 1208057-052-GEO-0004*.
- Deltares. (2023b). *Onderzoek rapport Voorlanden - KvK2022; kenmerk: 11208057-046-GEO-0002*. Delft.
- ENW. (2010). *Piping, Realiteit of Rekenfout?*
- HWBP / Waterschap Hollandse Delta / Deltares / Fugro. (2023). *Analyserapport grootschalige pipingproeven: Piping in getijdenzand | Hedwigeproject*.
- Jongejan, R., & van Beek, V. (2015, 09 26). Voorstel voor eenvoudige toetsregel o.b.v. tijd tot falen. Discussienotitie voor WT12017.
- Kennisplatform Risicobenadering. (2017). *Factsheet KPR vakgrootte*.
- Pol, J. (2020). *Shields-Darcy pipingmodel, Verschilanalyse met Sellmeijer en D-GeoFlow*.
- Pol, J. (2022). *PhD Dissertation: Time-dependent development of Backward*. Delft.
- POV-piping, Waterschap Scheldestromen. (2018). *Effect tijdsafhankelijkheid op stijghoogte bij getijdewateren*.
- Rijkswaterstaat. (2017). *WBI2017 Code Calibration, Reliability-based code calibration and semi-probabilistic assessment*.
- Rijkswaterstaat. (2020). *Factsheet D-Geo Flow, Voor op maat pipinganalyses*.
- Rijkswaterstaat. (2022a). *Draaiboek primaire waterkeringen overstromingskansen, periode 2023 - 2036, versie 1.0*.
- Rijkswaterstaat. (2022b). *Handleiding overstromingskansanalyse met faalpaden*. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
- Rijkswaterstaat. (2022d). *Handleiding Indirecte Mechanismen (nog op te stellen)*.
- Rijkswaterstaat. (2023). *Handleiding overstromingskansanalyse - Algemeen*. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
- RWS-WVL. (2022). *Bijlage Scenario's (nog op te stellen)*.
- TAW. (1994). *Technisch Rapport voor de controle op het mechanisme piping bij rivierdijken*.
- TAW. (2004). *Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken*.
- USACE. (1956). *Investigation of underseepage and its control, Lower Mississippi River Levees*.
- Waterschap Aa en Maas. (2020). *HWBP Projectgebonden Innovatie 'Geohydrologische Aanpak voor Piping; Syntheserapport*.



## Bijlage A Begrippenlijst

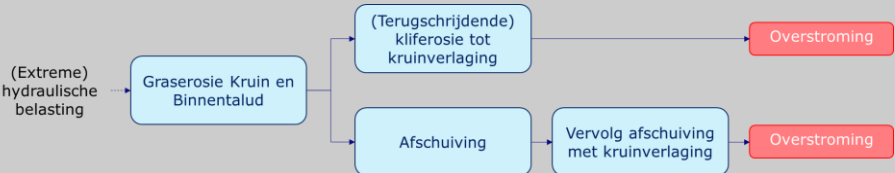
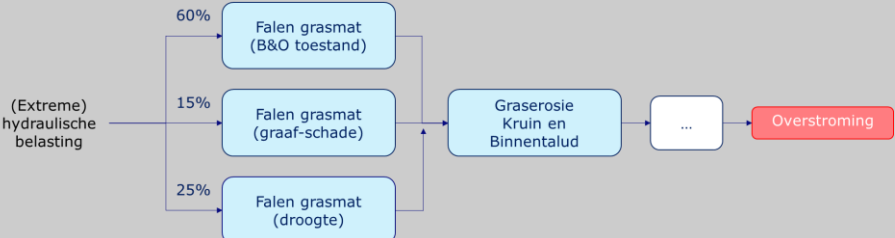
Deze begrippenlijst is hetzelfde als in bijlage I en II van de Regeling primaire waterkeringen 2023.



*Figuur 8: Schematische weergave van de relatie tussen faalmechanisme, faalpaden, gebeurtenissen en (initiële, vervolg) mechanismen*

*Tabel 4: Begrippenlijst. Voor deze termen is de definitie contextafhankelijk, geen absoluut begrip. Het betekent dat binnen het beoordelingsproces de term wordt gebruikt met de betreffende definitie. De definities van deze termen zijn uitgewerkt in bijlage II van de Regeling (Randvoorwaarden beoordeling)*

Naam	Omschrijving en voorbeelden
Faalmechanisme*	De verzameling faalpaden met een gemeenschappelijk initieel mechanisme. <i>Voorbeeld: gestippelde kader in Figuur 8</i>
Faalpad*	Een gehele keten van opeenvolgende gebeurtenissen of mechanismen die samen leiden tot een overstroming of falen van de waterkering. <i>Voorbeeld: in Figuur 8 in blauw aangegeven reeks van gebeurtenissen/ mechanismen</i>
Gebeurtenis*	Proces van verandering van een toestand naar een nieuwe, opvolgende toestand. Een gebeurtenis of knoop geeft de stap in het proces aan (zie ook mechanisme). <i>Voorbeeld: in Figuur 8 zijn a-b-c drie gebeurtenissen binnen het initiële mechanisme (met een rode rand aangegeven)</i>
Mechanisme	Proces van verandering van een toestand naar een nieuwe, opvolgende toestand. Mechanisme wordt gebruikt om de fysica te beschrijven en kan bestaan uit een gebeurtenis of uit een aaneenschakeling van meerdere gebeurtenissen (zie ook gebeurtenis). <i>Voorbeeld: in Figuur 8 zijn mechanismen in blauw aangegeven. Samen vormen ze een faalpad, Het initiële mechanisme in Figuur 8 bestaat uit drie gebeurtenissen.</i>
Initieel mechanisme*	Eerste mechanisme in een faalpad <i>Voorbeeld: in Figuur 8 aangegeven met een rode rand</i>
Vervolgmechanismen*	De mechanismen die de initiërende mechanisme opvolgen. Samen leiden ze tot overstroming of falen van de waterkering. <i>Voorbeeld: in Figuur 8 zijn voorbeelden van vervolgmechanismen in een faalpad in blauw aangegeven. De vervolg mechanismen volgen op het met een rode rand aangegeven initiële mechanisme.</i>

<p>Directe mechanismen</p>	<p>Directe mechanismen zijn mechanismen binnen een faalpad die kunnen leiden tot een overstroming en die worden veroorzaakt door een (extreme) hydraulische belasting.</p> <p><i>Voorbeelden van directe mechanismen zijn de initiële mechanismen in Tabel 5.1 van Bijlage II van de Regeling (Randvoorwaarden beoordeling) bij de Omgevingsregeling. Directe mechanismen kunnen ook een vervolgmecanisme zijn. Bijvoorbeeld het optreden van een afschuiving binnentalud na erosie van kruin en binnentalud.</i></p>
<p>Indirecte mechanismen</p>	<p>Indirecte mechanismen leiden niet direct tot falen maar eerder tot een gewijzigde staat van de waterkering. Ze hebben hierdoor invloed op het gedrag van de waterkering tijdens een extreme hydraulische belasting.</p> <p><i>Voorbeelden van indirecte mechanismen zijn gegeven Tabel 5.2 van Bijlage II van de Regeling (Randvoorwaarden beoordeling) bij de Omgevingsregeling</i></p>
<p>Generieke faalmechanismen</p>	<p>Bij overstromingskansanalyses wordt onderscheid gemaakt tussen generieke en specifieke faalmechanismen. De generieke faalmechanismen die worden beschouwd in de overstromingskansanalyse zijn gebundeld rondom de initiële mechanismen in Tabel 5.1 van Bijlage II van de Regeling (Randvoorwaarden beoordeling) bij de Omgevingsregeling.</p> <p><i>Voorbeeld van een generiek faalmechanisme gebundeld rond Grasbekleding erosie kruin en binnentalud als initieel mechanisme</i></p> 
<p>Specifieke faalmechanismen</p>	<p>Specifieke faalmechanismen zijn locatiespecifiek. Specifieke faalmechanismen kunnen het gevolg zijn van een optreden van een direct of indirect mechanisme.</p> <p><i>Voorbeeld van een specifiek faalmechanisme is het falen van innovaties.</i></p> <p><i>Voorbeeld van een specifiek faalmechanismen, die het gevolg is van het optreden van een direct mechanisme, is het falen van een waterkering als gevolg van het falen van een langsconstructie.</i></p> <p><i>Voorbeeld van een specifiek faalmechanisme die het gevolg is van een indirect mechanisme is het falen van een waterkering als gevolg aan de invloed van ernstige droogte op de kwaliteit van een grasbekleding.</i></p>
<p>Scenario</p>	<p>Een scenario beschrijft een mogelijke geometrie of staat van de waterkering die wordt gebruikt als uitgangspunt voor een overstromingskansanalyse. Verschillende scenario's kunnen een bijdrage leveren aan de overstromingskans van een waterkering. Een scenario kan onder anderen betrekking hebben op onzekerheden over de ondergrond of op een gewijzigde staat van de waterkering die kan ontstaan na het optreden van een indirect mechanisme.</p> <p><i>Voorbeeld van scenario's bij een overstromingskansanalyse: scenario's voor toestand grasbekleding</i></p> 

## Bijlage B Stappenplan meenemen van het hele voorland in piping analyse

Deze Bijlage is grotendeels gekopieerd uit (Deltares, 2023b).

### Afbakening

Het onderstaande stappenplan is alleen bedoeld voor het beoordelen van het mechanisme terugschrijdende erosie van het faalmechanisme piping op basis van het model van Sellmeijer. Dit mechanisme wordt verder piping genoemd tenzij anders is vermeld. *Uplift* en *heave* zijn ook mechanismes van het piping mechanisme maar zijn geen onderdelen van het stappenplan.

Het stappenplan bevat **nog ruimte voor verbeteringen**. Hierdoor is het belangrijk om dit stappenplan in zo veel mogelijk praktijk cases toe te passen en op basis van voortschrijdend inzicht deze aan te passen. Aanbevelingen hiervoor zijn in (Deltares, 2023b) genoemd.

### Toepassingsgebied

Het stappenplan is gebaseerd op berekeningen van de lengte van het erosiekanaaltje in D-Geo Flow. Wanneer er geen sprake is van meerlaagsheid of anisotropie, kan de lengte van het erosiekanaaltje bij een specifieke situatie worden berekend aan de hand van empirische formules, afgeleid met curves van de lengte van het erosiekanaaltje (Deltares, 2023b). Hiervoor geldt als eis dat het beschouwde geval binnen het toepassingsgebied moet liggen van de curves. Het toepassingsgebied van de curves is een 2D situatie, een homogeen 1-laags watervoerend pakket met een isotrope doorlatendheid, en geen 3D stroming, geen anisotropie of meerlaagsheid. Dit is vrijwel gelijk aan het toepassingsgebied van de regel van Sellmeijer, met als uitzondering dat het achterland wel (semi-)doorlatend mag zijn.

Wanneer een traject buiten het toepassingsgebied van de curves valt, moet de lengte van het erosiekanaaltje met D-Geo Flow bepaald worden. D-Geo Flow is gevalideerd voor het berekenen van het kritieke verval bij 2D stroming. Voor anisotropie en meerlaagsheid zijn geen proeven gebruikt om het kritieke verval te valideren maar de verwachting is dat dit redelijk goed wordt voorspeld. D-Geo Flow is niet gevalideerd voor 3D grondwaterstroming. De berekende lengte van het erosiekanaaltjes zijn slechts met drie 2D medium-schaalproeven vergeleken wat onvoldoende is voor een validatie, hiervoor is nog geen veiligheidsbenadering gemaakt en wordt de onzekerheid in dit stappenplan meegenomen met *expert judgment*.

Bij het gebruik van de empirische formules voor de berekening van de lengte van het erosiekanaaltje is een veiligheidsbenadering opgesteld. Deze is gevalideerd met data van het dijkversterkingsproject Neder Betuwe. De bevindingen hiervan kunnen daardoor alleen worden gebruikt bij vergelijkbare doorsnede als bij Neder Betuwe (NeBe), zie Tabel 5. Hier bovenop geldt ook de toepassingsgebieden van de curves van het concept stappenplan (zie voorgaande paragraaf) en de standaard schematiseringsuitgangspunten (zie paragraaf 4.3).

Tabel 5: Toepassingsgebied van de veiligheidsbenadering van de curves

Parameter	NeBe range
<b>Diktes van het WVP</b>	20 tot 52 m <sup>8</sup>
<b>Fictieve kwelweglengtes</b>	44,5 tot 290 m
<b>Dijkbasis</b>	20 tot 100 m
<b>Leklengtes van het voorland</b>	15 tot 300 m
<b>Doorlatendheden van het WVP</b>	45 tot 86 m/dag

Wanneer een dijktraject buiten dit toepassingsgebied valt of wanneer gebruikt wordt gemaakt van D-Geo Flow om de lengte van het erosiekanaaltje af te leiden is de veiligheidsbenadering niet gevalideerd. Dan moet er worden uitgegaan van een veiligheidsfactor voor lengte van het erosiekanaaltje op basis van *expert judgement*.

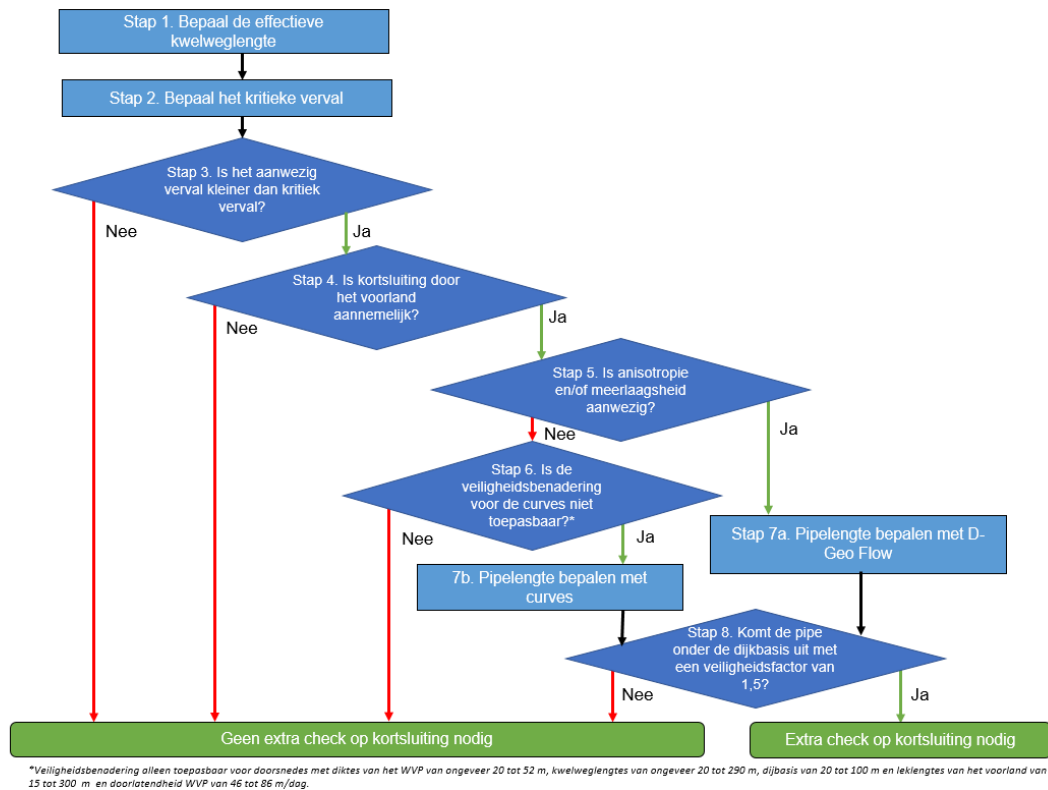
### Het stappenplan

Het stappenplan is in Figuur 9 weergegeven, een uitgebreide uitleg van alle stappen staat onder de figuur. Na het doorlopen van het stappenplan zijn twee mogelijke uitkomsten.

- Geen extra check op kortsluiting nodig. Het voorland kan volledig meegenomen worden in de pipinganalyse door verschillende redenen:
  - Na stap 3, omdat over het beschouwde traject het verval groter is dan het kritiek verval, waardoor er ook geen berekening van de lengte van het erosiekanaaltje nodig is.
  - Na stap 4, omdat er geen risico is op kortsluiting.
  - Na stap 6, omdat de pipe geen dominant effect heeft op de totale overstromingskans.
  - Na stap 8, omdat de pipe niet onder het voorland komt.
- Extra check op kortsluiting nodig. Afhankelijk van de situatie kan worden gekozen uit een aantal vervolgstappen:
  - Kwantificeren van het risico op kortsluiting om een betere beslissing te maken
  - Aanscherpen van het stappenplan voor het specifieke dijktraject, met experts
  - Versterking. Dit moet verder worden meegenomen binnen een ontwerpproject. Hoe hier verder mee om te gaan ligt buiten de scope van dit stappenplan.

Na het doorlopen van het stappenplan en na de analyse van de uitkomst is nog geen definitieve conclusie te trekken over of het dijktraject wel of niet veilig is met betrekking tot piping. Hiervoor moeten alle andere onzekerheden en de invloed van nieuwe kennisaspecten nog meegenomen worden aan de hand van het BRP aanpak (Deltares, 2023a).

<sup>8</sup> maximale WVP dikte van NeBe was 42 m, door een gevoeligheidsanalyse is de toepassingsgebied van *D* vergroot met 10 m



Figuur 9: Flowchart van het stappenplan

### Stap 1: Bepaal de effectieve kwelweglengte ( $L_s$ )

De effectieve kwelweglengte ( $L_s$ ) is afhankelijk van de geohydrologische weerstand van het voorland en kan worden bepaald aan de hand van de voorland leklengte ( $\lambda_{VL}$ , ook wel spreidingslengte genoemd), de geometrische voorlandlengte ( $L_{VL}$ , afstand van de buitenteen naar het einde van het voorland) en de dijkzate ( $DB$ , afstand van uittredepunt tot buitenteen), zie onderstaande vergelijking. Meer informatie is ook terug te vinden in de artikels 'Intredepunt piping' en 'Lekfactor of leklengte' van de technische leidraad katern piping.

$$L_s = \lambda_{VL} \tanh\left(\frac{L_{VL}}{\lambda_{VL}}\right) + DB$$

Voor de parameterwaarden kunnen boven/ondergrenswaarden gehanteerd worden conform het veiligheidsformat in BOI. Gevoeligheidsanalyse met verwachtingswaarden en bandbreedte van parameters zoals intredeweerstand wordt aanbevolen om de bandbreedte van  $L_s$  te bepalen.

- **Ga naar stap 2**

### Stap 2: Bepaal het kritieke verval ( $H_c$ )

Bepaal het kritieke verval  $H_c$  met de rekenregel van Sellmeijer conform de standaard werkwijze en veiligheidsformat in BOI (Rijkswaterstaat, 2016) (Rijkswaterstaat, 2021), voor een beoordeling of ontwerp op terugschrijdende erosie, waarbij wordt nu wel de gehele fictieve kwelweglengte  $L_s$  meegenomen.

- **Ga naar stap 3**

**Stap 3: Is het aanwezig verval kleiner dan kritiek verval?**

Het aanwezige verval bevat schadefactor en schematiseringsfactor en is uitgevoerd bij WBN conform (Rijkswaterstaat, 2016) (Rijkswaterstaat, 2021). Wanneer niet wordt voldaan aan deze stap is geen check op de lengte van het erosiekanaaltje nodig. De doorsnede voldoet toch niet aan de piping eis.

- **Ja, ga naar stap 4**
- **Nee, geen extra check op kortsluiting nodig (voldoet niet aan de eis)**

**Stap 4: Is kortsluiting door het voorland aannemelijk?**

Een erosiekanaaltje tot onder het voorland hoeft geen bezwaar te zijn in situaties waar kortsluiting niet aannemelijk is. Deze situaties komen bijvoorbeeld voor wanneer de deklaag van het voorland veel intredeweerstand bevat. Een voorland heeft een hoge intredeweerstand wanneer de deklaag heel dik is, ca. dikker dan 4 m, of/in combinatie met een lage doorlatendheid mits er geen gaten zijn. Voor nadere afweging van het risico op kortsluiting wordt verwezen naar Hoofdstuk 10 van het Kennis voor Keringen 2022 Achtergrondrapport Voorlanden. Een check van de lengte van het erosiekanaaltje is niet nodig wanneer kortsluiting niet aannemelijk is.

- **Ja, ga naar stap 5**
- **Nee, geen extra check op kortsluiting nodig (want evident onwaarschijnlijk)**

**Stap 5: Is anisotropie en/of meerlaagsheid aanwezig?**

Anisotropie en meerlaagsheid leiden tot een hoger kritiek verval, maar ook tot een langer erosiekanaaltje; de mate waarin ze een significant effect hebben is anders voor lengte van het erosiekanaaltje en kritiek verval. De curves van het stappenplan zijn afgeleid voor situaties zonder meerlaagsheid en anisotropie. Hierdoor kunnen, in geval van meerlaagsheid en anisotropie, langere lengte van het erosiekanaaltjes voorkomen dan met de curves worden voorspeld. In deze situaties kunnen de curves niet gebruikt worden en moet een D-Geo Flow som worden gemaakt.

De grens van wanneer een dijkttraject wel of niet anisotropie bevat is moeilijk te definiëren, voor nu lijkt het redelijk om bij een gemiddelde anisotropiefactor groter dan 2 uit te gaan van significante (dus: significant effect op  $H_c$  en  $L_c$ ) anisotropie. Voor meerlaagsheid bevat een doorsnede meerlaagsheid wanneer er in het WVP een scherpe overgang in doorlatendheid is. Welk minimaal contrast hierbij hoort is locatie afhankelijk. Op basis van generieke analyses is een minimaal doorlatendheidscontrast van 1,5 een goede eerste inschatting. Dit kan worden aangescherpt met bijvoorbeeld D-Geo Flow sommen.

- **Ja, ga naar stap 7a**
- **Nee, ga naar stap 6**

**Stap 6: Is de veiligheidsbenadering voor de curves niet toepasbaar?**

Binnen het toepassingsgebied van de veiligheidsbenadering (zie Tabel 5) heeft het doorgroeien van de pipe tot onder het voorland geen significante bijdrage aan de totale faalkans van piping, zie Hoofdstuk 4 van voorliggend rapport. In dit geval is dus geen check op lengte van het erosiekanaaltje nodig. Wanneer je buiten het toepassingsgebied valt, is het niet evident of de pipe dan wel of niet bijdraagt aan de totale faalkans en is een lengte van het erosiekanaaltje check nodig. De lengte van het erosiekanaaltje ( $L_{pipe}$ ) kan dan nog wel worden bepaald aan de hand van de curves (stap 7b).

- **Ja, ga naar stap 7b**
- **Nee, geen extra check op kortsluiting nodig**

**Stap 7a: Lengte van het erosiekanaaltje bepalen met D-Geo Flow**

Bepaal de lengte van het erosiekanaaltje, bij WBN zonder schadefactor en veilige karakteristieke waarden voor alle invoer conform OI/WBI, met D-Geo Flow. Bij aanwezigheid van anisotropie wordt aanbevolen om twee D-Geo Flow berekeningen te maken, één met de ondergrens en één



met de bovengrens anisotropiefactor omdat het netto effect van anisotropie op de lengte van het erosiekanaaltje bij WBN niet makkelijk af te leiden is. De grootste lengte van het erosiekanaaltje kan dan worden gebruikt bij stap 8. Wanneer veel onzekerheid is over de meerlaagsheid wordt ook aanbevolen om meerdere schematisaties uit te werken.

➤ **Ga naar stap 8**

### Stap 7b: Bepaling lengte van het erosiekanaaltje met curves

Bepaal de lengte van het erosiekanaaltje bij WBN ( $H$  in onderstaande formule) zonder schadefactor en veilige karakteristieke waarden voor alle invoer conform OI/WBI met de curves. Hiervoor zijn empirische formules afgeleid op basis van de curves voorland uit eerder onderzoek, zie hieronder.

$$L_c = L_s \left[ -0,3984 \left( \frac{D}{L_s} \right)^2 + 0,7979 \frac{D}{L_s} + 0,0707 \right]$$

$$L_{pipe} = L_c \left[ 164,5 \left( \frac{H}{H_c} \right)^8 - 570,1 \left( \frac{H}{H_c} \right)^7 + 797,6 \left( \frac{H}{H_c} \right)^6 - 575,5 \left( \frac{H}{H_c} \right)^5 + 227,7 \left( \frac{H}{H_c} \right)^4 - 48,99 \left( \frac{H}{H_c} \right)^3 + 5,966 \left( \frac{H}{H_c} \right)^2 - 0,367 \left( \frac{H}{H_c} \right)^1 + 0,00757 \right]$$

➤ **Ga naar stap 8**

### Stap 8: Komt de pipe onder de dijkbasis uit met een veiligheidsfactor van 1,5?

In deze stap wordt gecontroleerd of de pipe mogelijk onder de dijkbasis groeit tot onder het voorland. De lengte van het erosiekanaaltje is bepaald op basis van  $D$ -Geo Flow sommen (stap 7a) of op basis van de curves (stap 7b). Met beide aanpakken moeten nog onzekerheden meegenomen worden:

- voor de curves: de case ligt buiten het toepassingsgebied van de veiligheidsbenadering voor de curves; er is niet geverifieerd hoeveel invloed de lengte van het erosiekanaaltje heeft op de totale faalkans voor deze case.
- voor  $D$ -Geo Flow: de berekende lengte van het erosiekanaaltje is onvoldoende gevalideerd door een gebrek aan experimenten.

In beide gevallen wordt voorgesteld om een veiligheidsfactor van 1,5 toe te passen op de berekende lengte van het erosiekanaaltje bij WBN (inclusief veilige karakteristieke waarden van alle invoer) om zo de resterende onzekerheden af te dekken. Dit is gebaseerd op expert judgement omdat onvoldoende kennis aanwezig is om de bovengenoemde onzekerheden naar veiligheidsfactoren te vertalen.

➤ **Ja, pipe komt onder het voorland**

➤ **Nee, geen extra check op kortsluiting nodig**



Foto voorzijde: <https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat - Ruimte voor de Rivier / Ruimte voor de Rivier  
Foto achterzijde: <https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat / Jan van den Broeke



Rijkswaterstaat  
*Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat*

**Deltares**