

Gebiedsspecifieke Faalpaden voor Piping



Gebiedsspecifieke Faalpaden voor Piping

Auteur(s)

Esther Rosenbrand

Han Knoeff

Marc Hijma

Erik van Onselen

CONCEPT

Gebiedsspecifieke Faalpaden voor Piping

Opdrachtgever	Strategisch Onderzoek Deltares
Contactpersoon	Esther Rosenbrand
Referenties	n.v.t.
Trefwoorden	Piping, geologie, ondergrond, faalpad,

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	06-08-2020
Projectnummer	11205284-001
Document ID	11205284-001-ZWS-0002
Pagina's	88
Status	concept Dit document is een concept en uitsluitend bedoeld voor discussiedoeleinden. Aan de inhoud van dit rapport kunnen noch door de opdrachtgever, noch door derden rechten worden ontleend.

Auteur(s)

	Esther Rosenbrand	
	Han Knoeff	
	Marc Hijma	
	Erik van Onselen	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	Esther Rosenbrand	Vera van Beek	Leo Voogt	
	Han Knoeff			
	Marc Hijma			
	Erik van Onselen			

Samenvatting

Uit de studie Veiligheid Nederland in Kaart en ook uit de beoordeling volgt dat piping een grote bijdrage levert aan de overstromingskans van veel dijktrajecten. De hoge faalkansen die worden berekend sluiten in de praktijk echter niet aan bij het gevoel van de beheerder. Een belangrijke oorzaak van deze discrepantie is dat in de beoordeling niet het gehele proces van initiatie tot een overstroming ten gevolge van piping wordt meegenomen en de faalkans wordt benadert met de gedetailleerde toets. In de gedetailleerde toets wordt alleen het deelmechanisme terugschrijdende erosie beschouwd. Dit deelmechanisme wordt geanalyseerd met de rekenregel van Sellmeijer, die is afgeleid onder geïdealiseerde omstandigheden. Hierin kunnen verschillende aspecten die een groot effect hebben op de overstromingskans onvoldoende worden meegenomen. Het meenemen van de hele keten van gebeurtenissen die tot overstroming leiden, het faalpad, en het beter beschouwen van belangrijke aspecten daarin, leidt naar verwachting tot een realistischere inschatting van de overstromingskans ten gevolge van piping.

Voor het optreden van piping zijn de karakteristieken van de ondergrond en de belasting bepalend, en deze verschillen regionaal. Daarom is op basis van gebiedsspecifieke kenmerken van de ondergrondopbouw en de hydraulische belastingen Nederland ruwweg ingedeeld in vier karakteristieke gebieden, het bovenrivierengebied, het benedenrivierengebied, het getijdengebied en het Maasdal (Limburg). Voor deze gebieden is op basis van de fenomenologische beschrijving van het faalpad aangegeven wat de belangrijkste gebeurtenissen zijn, en welke aspecten, kenmerken van het gebied, deze beïnvloeden. Per gebied wordt inzichtelijk gemaakt welke aspecten naar verwachting het meest van belang zijn. Dit is gepresenteerd in een overzicht per gebied. Dit overzicht kan gezien worden als een basisstructuur waarin de beschikbare kennis, en de resterende kennisleemtes geplaatst kunnen worden. Op basis hiervan kan een effectieve kennisstrategie voor piping worden ontwikkeld, gericht op het ontwikkelen en toepasbaar maken van kennis die een grote impact op de piping opgave heeft.

Dit concept rapport is tot stand gekomen onder het Deltares Strategisch Onderzoek programma Future Proof Dikes, en kan naar aanleiding van ervaring worden geactualiseerd.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Aanleiding en achtergrond	8
1.2	Doel en overkoepelend piping overzicht	8
1.3	Aanpak en aandachtspunten	9
1.4	Leeswijzer	11
2	Overzicht faalpaden en belangrijkste aspecten	12
2.1	Bovenrivierengebied Rijntakken	12
2.2	Limburg: het Maasdal	15
2.3	Getijdengebied	19
2.4	Benedenrivierengebied	22
3	Bovenrivierengebied Rijntakken	27
4	Limburg: Het Maasdal	29
4.1	Geologie	29
4.1.1	Deklaag	29
4.1.2	Watervoerend pakket	29
4.2	Hydraulische belasting	32
4.3	Narratief	33
4.3.1	Knoop 1. Buitenwaterstand stijgt en waterspanning in het WVP aan de rivierzijde van de kering stijgt	33
4.3.2	Knoop 2. Waterspanning WVP aan de polderzijde van de kering stijgt en er ontstaat verticale stroming	34
4.3.3	Knoop 3. Opbarsten en geconcentreerde verticale stroming	35
4.3.4	Knoop 4. Heave	36
4.3.5	Knoop 5. Horizontaal zandtransport en pipe vorming	37
4.3.6	Knoop 6. Doorgaande pipe	38
4.3.7	Knoop 7. Ruimen, (verbreding en verdieping van de pipe)	38
4.3.8	Knoop 8. Kruinverlaging	38
4.3.9	Knoop 9. Maatregelen ineffectief	39
4.3.10	Knoop 10. Bresgroei	39
4.4	Overzicht faalpad en belangrijke aspecten	39
5	Getijdengebied	42
5.1	Geologie	42
5.2	Deklaag	43
5.3	Watervoerend pakket	45
	Getijdengeulafzettingen	45
1.1	Belangrijke eigenschappen getijdenafzettingen	47
5.4	Hydraulische belasting	48
5.5	Narratief	49
5.5.1	Knoop 1. Buitenwaterstand stijgt en waterspanning in het WVP aan de rivierzijde van de kering stijgt	50
5.5.2	Knoop 2. Waterspanning WVP aan de polderzijde van de kering stijgt en er ontstaat verticale stroming	51
5.5.3	Knoop 3. Opbarsten en geconcentreerde verticale stroming	51

5.5.4	Knoop 4. Heave	53
5.5.5	Knoop 5. Horizontaal zandtransport en pipe vorming	54
5.5.6	Knoop 6. Doorgaande pipe	55
5.5.7	Knoop 7. Ruimen, (verbreding en verdieping van de pipe)	56
5.5.8	Knoop 8. Kruinverlaging	56
5.5.9	Knoop 9. Maatregelen ineffectief	56
5.5.10	Knoop 10. Bresgroei	57
5.6	Overzicht faalpad en belangrijke aspecten	57
6	Benedenriviereengebied	60
6.1	Geologie	60
6.1.1	Deklaag	60
6.1.1.1	Fluviatiel deelgebied	60
6.1.1.2	Primariën deelgebied	61
6.1.2	Watervoerend pakket	61
6.2	Hydraulische belasting	63
6.3	Narratief	64
6.3.1	Knoop 1. Buitenwaterstand stijgt en waterspanning in het WVP aan de rivierzijde van de kering stijgt	64
6.3.2	Knoop 2. Waterspanning WVP aan de polderzijde van de kering stijgt en er ontstaat verticale stroming	65
6.3.3	Knoop 3. Opbarsten en geconcentreerde verticale stroming	65
6.3.4	Knoop 4. Heave	66
6.3.5	Knoop 5. Horizontaal zandtransport en pipe vorming	66
6.3.6	Knoop 6. Doorgaande pipe	68
6.3.7	Knoop 7. Ruimen, (verbreding en verdieping van de pipe)	68
6.3.8	Knoop 8. Kruinverlaging	68
6.3.9	Knoop 9. Maatregelen ineffectief	69
6.3.10	Knoop 10. Bresgroei	69
6.4	Overzicht faalpad en belangrijke aspecten	70
7	Referenties	74
A	Bijlage: Bovenriviereengebied Rijntakken: karakteristieken	75
A.1	Belasting uit de rivier	75
A.2	Ondergrond	76
A.2.1	Deklaag	76
A.2.2	Watervoerend pakket	77
A.3	Dijkprofiel	79
B	Bijlage: Bovenriviereengebied Rijntakken: Narratief	81
B.1	Knoop 1. Buitenwaterstand stijgt en waterspanning in het WVP aan de rivierzijde van de kering stijgt	81
B.2	Knoop 2. Waterspanningen in het WVP aan de polderzijde stijgt en er ontstaat verticale stroming	82
B.3	Knoop 3. Opbarsten en geconcentreerde verticale stroming	83
B.4	Knoop 4. Heave	83
B.5	Knoop 5. Horizontaal zandtransport en pipe vorming	84
B.6	Knoop 6. Doorgaande pipe	85
B.7	Knoop 7. Ruimen	85
B.8	Knoop 8. Kruinverlaging	86
B.9	Knoop 9. Maatregelen ineffectief	86
B.10	Knoop 10. Bresgroei	86

CONCEPT

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en achtergrond

Piping is een mechanisme dat in veel trajecten de overstromingskans bepaalt. De erg hoge overstromingskansen die in VNK2 en de eerste beoordelingen berekend worden ($>> 1/100$ per jaar) komen echter vaak niet overeen met de verwachtingen van beheerders en experts. In het Nederlandse waterveiligheidsbeleid kunnen we hier moeilijk mee omgaan.

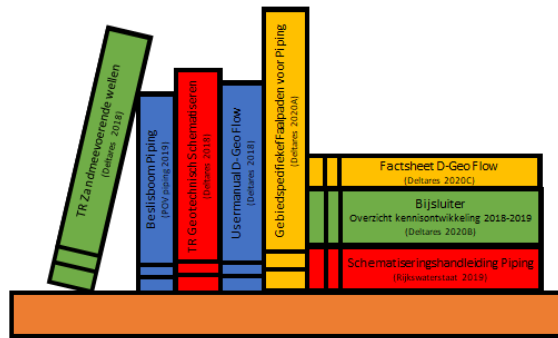
Piping is een complex mechanisme waarvan het optreden sterk wordt bepaald door de lokale omstandigheden die moeilijk te bepalen of te schematiseren zijn. Wel bekend is dat voordat piping tot een overstroming leidt, er een aantal gebeurtenissen achter elkaar moeten optreden. Voor het bepalen van de overstromingskans door piping beschouwen we in de eenvoudige en gedetailleerde toets bij beoordelen en voor het dimensioneren van versterkingsmaatregelen alleen de eerste gebeurtenissen. Door gebruik te maken van een fenomenologische beschrijving van hoe piping tot een overstroming leidt, hier het narratief genoemd, en de faalpadenaanpak kunnen ook vervolgebeurtenissen meegenomen worden. Het narratief is sterk afhankelijk van de kenmerken van het watersysteem en de geologie van het gebied. Analyse van het faalpad geeft voor de verschillende geologische en watersystemen inzicht in de gebeurtenissen (knopen in het faalpad) die een groot effect hebben op de overstromingskans, en welke aspecten deze gebeurtenissen sterk beïnvloeden.

1.2 Doel en overkoepelend piping overzicht

Het doel van voorliggend rapport is om voor verschillende geologische en watersystemen te beschouwen welke gebeurtenissen (knopen) en lokale aspecten veelal een groot effect hebben op de overstromingskans door piping door middel van de faalpaden aanpak. Voor vier karakteristieke gebieden worden deze in overzichtelijke tabellen weergegeven. Doordat ook binnen de vier gebieden veel variatie op kan treden kunnen deze tabellen gezien worden als een eerste indicatie, die verder aangescherpt kan worden in het kader van 'van grof naar fijn' werken. Het voorliggende concept rapport kan ook naar aanleiding van opgedane ervaring worden geactualiseerd.

Het faalpad voor piping vormt ook de basis voor een overkoepelend overzicht van de beschikbare kennis en meetmethoden. Parallel aan voorliggend rapport wordt een rapport opgesteld waarin de in Kennis voor Keringen 2018-2019 ontwikkelde kennis wordt ontsloten (Rosenbrand & Knoeff, 2020). Dat overzicht kan op termijn verder worden uitgebreid met kennis en ervaringen uit andere projecten. De combinatie van inzicht in de meest belangrijke aspecten voor een gebied, en de hiervoor ontwikkelde kennis dient een beheerder in staat te stellen een onderbouwde afweging te maken welke kennis ingezet kan worden om de pipingopgave scherper te bepalen.

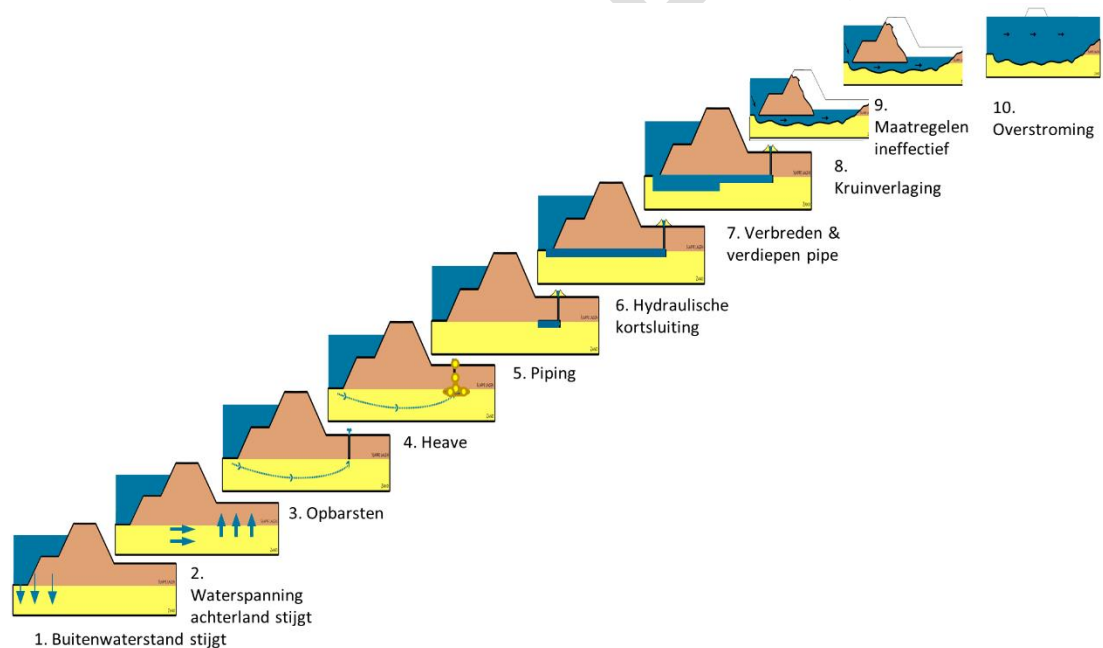
Tevens vormt dit overzicht de basis voor een strategie voor kennisontwikkeling en disseminatie gericht op een scherpere bepaling van de kans op een overstroming ten gevolge van piping.



Figuur 1-1 Documenten die de beoordeling van piping ondersteunen

1.3 Aanpak en aandachtspunten

Voor het narratief en het faalpad per gebied wordt hier uitgegaan van het generieke faalpad voor piping, zoals opgesteld in Rosenbrand & Knoeff (2020). Welke knopen of aspecten in het faalpad het meeste invloed op de overstromingskans ten gevolge van piping hebben is sterk afhankelijk van lokale karakteristieken van de geologie en de hydraulische belasting.

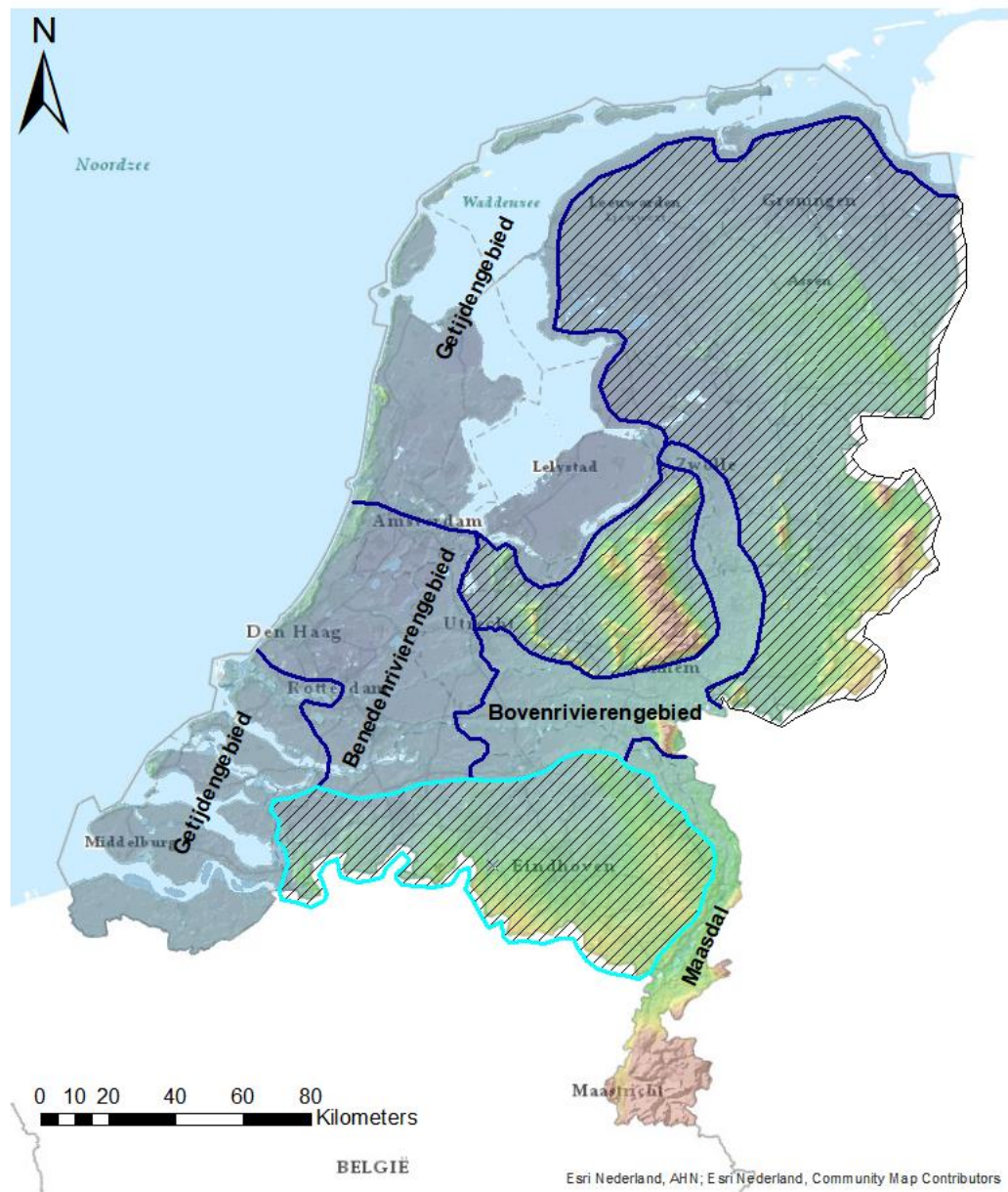


Figuur 1-2 Generiek faalpad voor piping met daarin de verschillende knopen

Om rekening te houden met lokale karakteristieken van de hydraulische belasting en de geologie is Nederland ruwweg ingedeeld in vier karakteristieke gebieden. Bij deze indeling is gelet op duur van de belasting, eigenschappen van het watervoerend pakket (WVP) (dikte, doorlatendheid, korrelgrootteverdeling, laagopbouw, afzettingsgeschiedenis) en van de deklaag. Voor typische karakteristieken van deze vier gebieden is aan de hand van het faalpad het narratief uitgewerkt:

- bovenrivierengebied
- Limburg: Maasdal
- getijdengebied
- benedenrivierengebied

De locaties van de verschillende gebieden zijn in Figuur 1-3 weergegeven



Figuur 1-3 Indicatie van de indeling in de beschouwde gebieden: getijdengebied, benedenrivierengebied, bovenrivierengebied, Limburg-Maasdal.

De waterspanningen in het watervoerende pakket zijn de drijvende kracht, d.w.z. de relevante belasting voor de processen in stappen 3 tot en met 9. De waterspanningen worden bepaald door de buitenwaterstand en de invloed hiervan op het watervoerend pakket (WVP) buitenwaarts in knoop 1 en de eigenschappen van het WVP en de deklaag in het achterland binnenwaarts (knoop 2).

Belangrijke aspecten met betrekking op knopen 1 en 2 kunnen op verschillende manieren relevant zijn voor latere mechanismen. Bijvoorbeeld, de intredeweerstand van het voorland bij knoop 5 wordt vaak gekoppeld aan eisen aan het voorland om kortsluiting van de pipe te voorkomen, iets wat voor knoop 3 geen rol speelt. Om deze reden ligt het voor de hand om in de vervolgprojecten bestaande kennis en methoden aan te geven bij de knopen waarvoor deze ontwikkeld is. Om dit mogelijk te maken worden in de voorliggende basistabellen aspecten die in meerdere knopen relevant zijn ook bij meerdere knopen benoemd.

Hoewel de gebiedsspecifieke beschrijvingen een globaal beeld schetsen, zal er lokaal variatie zijn, waardoor mogelijk andere aspecten belangrijker worden. De hier gepresenteerde overzichten met belangrijkste aspecten bieden zo een eerste handvat voor aanscherping van de faalkans; maar sluiten niet uit dat een verdere aanscherping mogelijk is gebaseerd op de locatie specifieke karakteristieken. De faalpadanalyse in dit rapport is uitgevoerd voor groene dijken, zonder kunstwerken zoals een heave scherm, verticaal zanddicht geotextiel, GZB, etc.

1.4 Leeswijzer

Een lezer die een eerste inzicht wil krijgen in de belangrijkste aspecten van het faalpad voor elk van de vier gebieden wordt verwezen naar hoofdstuk 2. Dit bevat per gebied een beknopt overzicht van de, naar verwachting, belangrijkste knopen en beïnvloedende aspecten van het faalpad.

Voor meer detail wordt verwezen naar de detailanalyse in hoofdstukken 3 tot en met 6. In die hoofdstukken worden per gebied eerst de gebiedsspecifieke karakteristieken van de geologie en de hydraulische belasting beschreven. Vervolgens wordt aan de hand hiervan het gehele narratief van piping voor dat gebied beschreven. Het faalpad vormt hiervoor de basis. Op basis hiervan wordt een overzicht van de belangrijke knopen/aspecten in tabelvorm gepresenteerd. Deze tabellen zijn uitgebreider dan die in hoofdstuk 2.

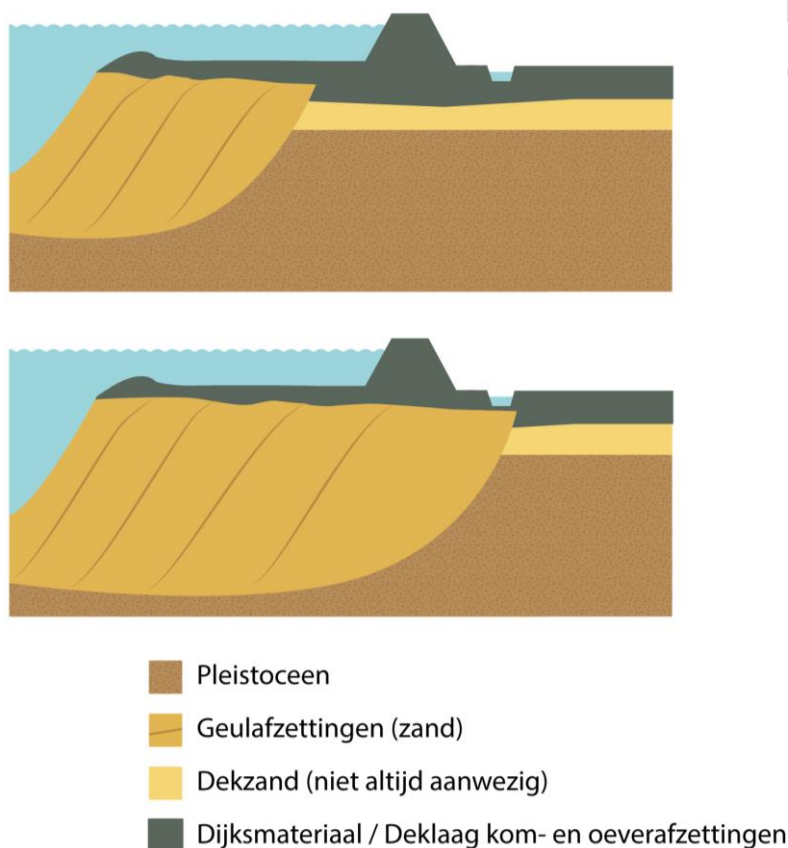
Voor het bovenrivierengebied Rijntakken (Hoofdstuk 3) is het faalpad in KvK Faalpaden Piping uitgewerkt (Rosenbrand & Knoeff, 2020). Voor dit gebied zijn de karakteristieken en het narratief in bijlage A en B overgenomen uit dat rapport. Het overzicht van het faalpad en de belangrijke aspecten is in huidig rapport nader geanalyseerd in Hoofdstuk 2.

2 Overzicht faalpaden en belangrijkste aspecten

Dit hoofdstuk vat per gebied de belangrijkste processen (knopen) samen, en er wordt een beknopt overzicht van de naar verwachting de belangrijkste aspecten (beïnvloedende parameters) voor een gebied gepresenteerd. Vanwege het belang van de ondergrondopbouw voor het piping proces worden typische voorbeelden van de ondergrondopbouw gepresenteerd. Door variatie binnen een gebied kunnen lokaal ook andere aspecten meespelen. De voorliggende samenvatting is bedoeld als een eerste indicatie in het kader van 'van grof naar fijn' werken. De samenvattingen zijn gebaseerd op de detailanalyse van het faalpad in hoofdstukken 3 tot en met 6. Daarnaast wordt verwezen voor meer achtergrond met betrekking tot het faalpad en voor een uitgebreidere tabel met relevante kenmerken. De faalpadanalyse in dit rapport is uitgevoerd voor groene dijken, zonder kunstwerken zoals een heave scherm, verticaal zanddicht geotextiel, GZB, etc.

2.1 Bovenrivierengebied Rijntakken

In het bovenrivierengebied zijn de deklagen veelal dunner doordat het Pleistocene pakket relatief ondiep zit. Voorbeelden van typische ondergrondkarakteristieken in het bovenrivierengebied worden in Figuur 2-1 getoond.



Figuur 2-1 Typische ondergrondopbouw in het bovenrivierengebied. Er kan een lang voorland aanwezig zijn, eventueel met een zomerkade. Het pleistocene watervoerend pakket kan vrij dicht onder de oppervlakte liggen, daardoor zijn de deklagen veelal relatief dun. Soms is er een laag dekzand aanwezig bovenop het watervoerend pakket. Holocene rivierafzettingen (geulafzettingen) kunnen ingesneden liggen in het pleistocene pakket. Deze holocene afzettingen lopen niet altijd door onder de dijk en in het achterland.

Zoals in alle gebieden zijn voor het optreden van piping de aspecten die de toename van de waterspanning in het watervoerende pakket (WVP) buitendijks en in het achterland (knopen 1 en 2) beïnvloeden van groot belang. Het gaat om eigenschappen van de deklaag en het WVP; door de lange duur van de hoogwaterbelasting speelt tijdsafhankelijke grondwaterstroming naar verwachting een onbelangrijke rol.

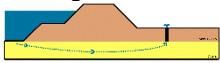
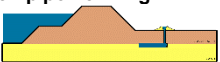

Opbarsten en heave (knoop 3 en 4) lijken wegens de veelal dunne deklaagen (typisch orde 0,5 tot 3 m) vaak minder van belang, doordat de kans op opbarsten en heave bij een dunne deklaag hoger is. Echter, die dunne deklaag zal ook zorgen voor meer kwel naar het maaiveld, waardoor de waterspanningen onder de deklaag minder oplopen. Daardoor neemt de kans op opbarsten af, evenals de stroomsnelheid in het opbarstkanaal die van belang is voor heave.

Gelet op de karakteristieken van het pipingproces in het bovenrivierengebied is de verwachting dat de **onzekerheden omtrent de geohydrologische aspecten die knoop 5, terugschrijdende erosie, beïnvloeden het grootste effect op de overstromingskansen door piping in dit gebied hebben.** Met name de invloed van de **intredeweerstand in het voorland, heterogeniteit van het watervoerend pakket (preferente stroombanen en zwakke plekken, meerlaagsheid, anisotropie) en aspecten die concentratie van stroming naar de pipe beïnvloeden** zijn daarom aandachtspunten voor het maken van een scherpe analyse van de faalkans.

Vanwege de relatief lange duur van het hoogwater zijn knopen 6 tot en met 10 minder belangrijk. Maatregelen (knoop 9), is een uitzondering aangezien maatregelen bij verschillende knopen genomen kunnen worden. Het meenemen van maatregelen uit het calamiteitenplan (knoop 9) heeft wel invloed op de overstromingskansen, en zeker, wanneer dit in combinatie met tijdsafhankelijkheid wordt beschouwd (Rosenbrand en Knoeff, 2020).

In onderstaande tabel worden de belangrijkste aspecten voor de meest belangrijke knopen genoemd. Aspecten die de geohydrologie in knopen 1 en 2 beïnvloeden zijn in verschillende mate van belang voor de verschillende processen. De naar verwachting meest belangrijke gebiedsspecifieke geohydrologische aspecten zijn daarom bij de vervolprocessen opgenomen, en knopen 1 en 2 zijn hieronder niet weergegeven. Deze knopen zijn wel opgenomen in Tabel 3-1 waarin belangrijke aspecten in meer detail zijn uitgewerkt.

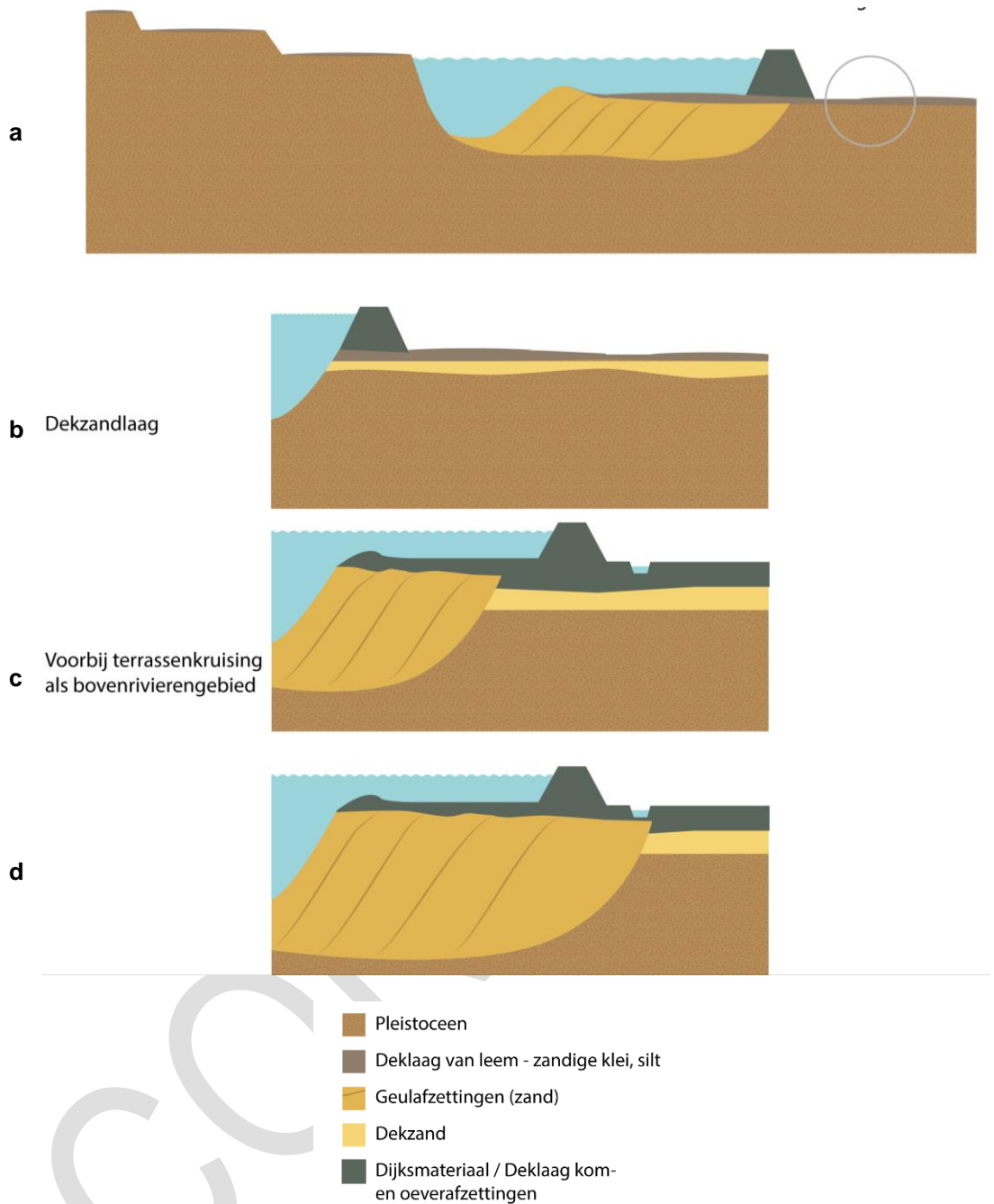
Tabel 2-1 Faalpad en selectie van naar verwachting belangrijkste gebiedsspecifieke aspecten bovenrivierengebied (voor nader detail wordt verwezen naar Tabel 3-1)

Faalpadknopen	Narratief	Belangrijke aspecten gebied, bepalend voor optreden knoop
<p>3. opbarsten en geconcentreerde verticale stroming</p> 	<p>De stijghoogte aan de polderzijde is voldoende om de deklaag op te tillen en te scheuren, dit resulteert in een opbarstgat.</p>	<p><u>Geohydrologische situatie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - doorlatendheid van de deklaag i.r.t. doorlatendheid van het watervoerend pakket: kunnen waterspanningen voldoende toenemen voor opbarsten? - aanwezigheid van lokaal zwakke plekken: <ul style="list-style-type: none"> • dunne deklaag, preferente stroombanen of menselijke verstoringen, eventueel in combinatie met doodlopen van stroombaan op kleiplug - aanwezigheid en intredeweerstand van voorland
<p>5. horizontaal zandtransport en pipe vorming</p> 	<p>Een of meerdere pipes ontstaan doordat de horizontale gradiënten hoog genoeg zijn om korrels te eroderen. Doordat de gradiënt vanuit de rivier zijde hoog is groeien pipes globaal richting de rivier.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - weerstand in het opbarstkanaal (0,3D regel) wanneer deklaag aanwezig is (in combinatie met maatregel opkisten) <p><u>Geohydrologische situatie</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - dikte en intredeweerstand (leklengte) deklaag voorland - dikte, doorlatendheid, en anisotropie en meerlaagsheid in WVP - concentratie van stroming naar de pipe in 3D
<p>9. maatregelen ineffectief</p> 	<p>De mitigerende maatregelen zijn niet of niet tijdig getroffen, of de mitigerende maatregelen zijn niet effectief.</p>	<p>Calamiteitenplan</p> <ul style="list-style-type: none"> - Door bij pipingverschijnselen maatregelen te nemen wordt de overstromingskans sterk gereduceerd. Een voorbeeld is opkisten waardoor het optredende verval afneemt.

2.2 Limburg: het Maasdal

In het Maasdal zijn de deklagen veelal nog dunner dan in de andere gebieden, met name in het zuidelijke deel van het gebied. Typische ondergrondkarakteristieken worden in Figuur 2-2 getoond.

CONCEPT

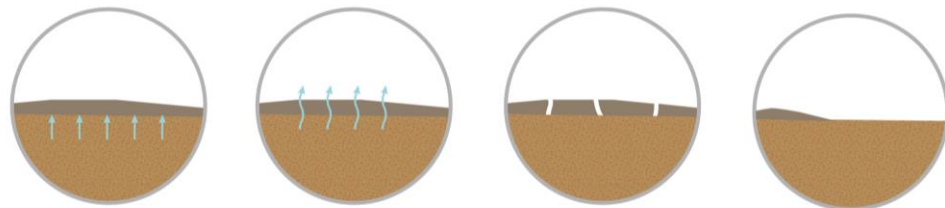


Figuur 2-2 Typische ondergrondopbouw in Limburg. Het bovenste figuur (a) toont de situatie in het zuidelijke deel van het gebied, daar is in de buitenbocht van de Maas soms geen dijk aanwezig en ligt de rivier direct tegen het hogergelegen terras aan. De actieve rivierbedding snijdt zich in de onderliggende afzettingen. In minder hooggelegen gebied kan de buitenbocht ook insnijden in de afzettingen, waardoor er geen Holocene geulafzettingen onder de dijk aanwezig zijn (b). Ten noorden van de terrassenkruising (c,d) is de situatie meer vergelijkbaar met het Bovenrivierengebied, waar de actieve rivier zich in holocene geulafzettingen beweegt. De holocene geulafzettingen lopen niet of beperkt onder de dijk door. Er is veelal een dekzandlaag aanwezig op de Pleistocene rivierafzettingen.

Evenals in het bovenrivierengebied van de Rijntakken zijn eigenschappen van de deklaag en het WVP, die de toename van de waterspanningen buitendijks en binnendijks beïnvloeden (knopen 1 en 2), van groot belang. Door de lange duur van de hoogwaterbelasting speelt tijdsafhankelijke grondwaterstroming naar verwachting een onbelangrijke rol.

Kenmerkend aan Limburg is de veelal dunne doorlatende deklaag waardoor wel veel kwel ontstaat, maar weinig individuele zandmeevoerende wellen waargenomen worden. Dit beïnvloedt de processen opbarsten (knoop 3) en heave (knoop 4). Wanneer geen deklaag aanwezig is, of bij een onderbroken deklaag zijn deze processen niet nodig voor het verloop van het pipingproces en wordt de overstromingskans door piping bepaald door terugschrijdende erosie (knoop 5). Richting het noordelijke deel van het Maasdal kan de deklaag wel dikker, en minder doorlatend worden, vergelijkbaar met het bovenrivierengebied. Zo kunnen 4 situaties worden onderscheiden op basis van de deklaag zoals weergegeven in Figuur 2-3:

1. **Intacte minder doorlatende deklaag:** door opbouw van de waterspanning onder de deklaag kan opbarsten optreden (knoop 3) zowel opbarsten als de daaropvolgende processen zijn van belang. Het goed meenemen van de geohydrologie is van belang voor het scherp bepalen van de waterspanningen, hierbij speelt de doorlatende deklaag een belangrijke rol, maar ook toestroom van hoge gronden is van belang.
2. **Intacte doorlatende deklaag: lek door de deklaag kan de opbouw van waterspanningen verhinderen waarmee het proces mogelijk stopt bij opbarsten (knoop 3).** Het goed meenemen van de geohydrologie is van belang voor het scherp bepalen van de waterspanningen, zoals ook bij situatie 1.
3. **Deklaag met scheuren: lek door de deklaag en de scheuren kan de opbouw van waterspanningen verhinderen waarmee het proces mogelijk stopt bij heave (knoop 4).** De geohydrologie is hier evenzeer van belang als bij een intacte deklaag.
4. **Afwezige deklaag (kleidijk op zand) of deklaag doorsneden door sloot:** hier zijn opbarsten en heave niet nodig, het zand kan horizontaal afgevoerd worden, en terugschrijdende erosie is van belang.



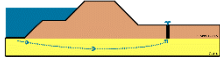
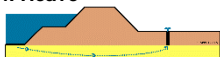
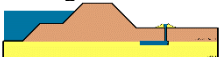

Figuur 2-3 Illustratie van 4 situaties voor de deklaag, van links naar rechts: intacte minder doorlatende, intacte doorlatende, deklaag met scheuren, afwezige deklaag. Zie tekst voor details.

Over terugschrijdende erosie (knoop 5) is veel onzekerheid omtrent de erosiegevoeligheid van de grove zand- en grindpakketten in Limburg, omdat het huidige erosiemodel niet is gevalideerd voor dit type sediment. De grotere korrels, de hoge uniformiteitscoëfficiënt en mogelijk verkitting dragen naar verwachting bij aan een hogere erosieweerstand.

Het nemen van maatregelen bij knoop 9 kan effectief zijn, echter gezien de hoge mate van kwel is het de vraag in hoeverre dit mogelijk is.

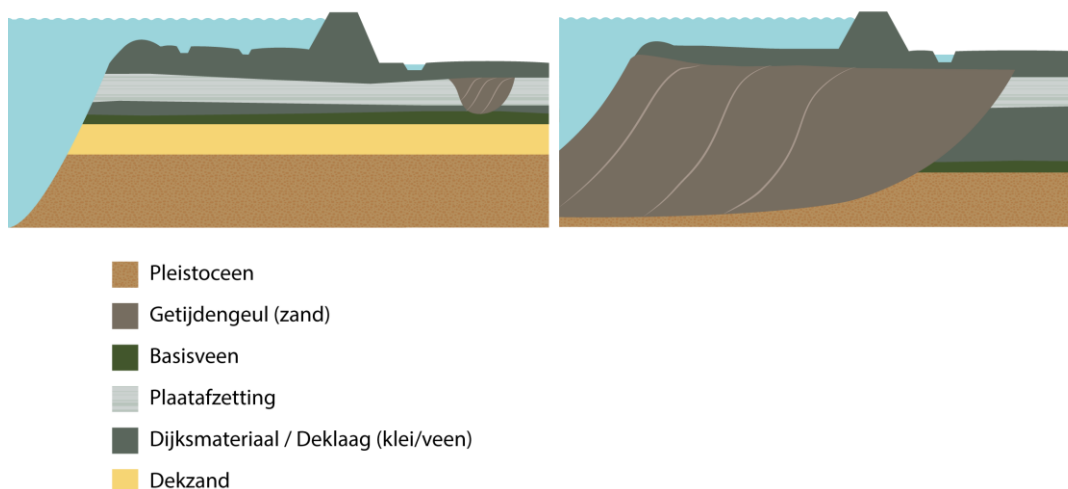
In onderstaande tabel worden de belangrijkste aspecten voor de meest belangrijke knopen genoemd. Aspecten die de geohydrologie in knopen 1 en 2 beïnvloeden zijn in verschillende mate van belang hebben voor de verschillende processen. De naar verwachting meest belangrijke gebiedsspecifieke geohydrologische aspecten zijn daarom bij de vervolprocessen opgenomen, en knopen 1 en 2 zijn hieronder niet weergegeven. Deze knopen zijn wel opgenomen in Tabel 4-1 waarin alle aspecten in meer detail zijn uitgewerkt.

Tabel 2-2 Faalpad en selectie van naar verwachting belangrijkste gebiedsspecifieke aspecten voor Limburg (voor nader detail wordt verwezen naar Tabel 4-1)

Faalpad	Narratief	Belangrijkste aspecten
<p>3. opbarsten en geconcentreerde verticale stroming</p> 	<p>De stijghoogte aan de polderzijde is voldoende om de deklaag op te tillen en te scheuren, dit resulteert in een opbarstgat.</p>	<p><u>Geohydrologische situatie</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - aanwezigheid en doorlatendheid van de deklaag i.r.t. doorlatendheid van het watervoerend pakket: kunnen waterspanningen voldoende toenemen voor opbarsten? - toestroom vanuit hoge gronden - mogelijk vollopen en onderwater staan achterland
<p>4. Heave</p> 	<p>Door concentratie van stroming naar het uittredepunt worden zandkorrels gefluïdiseerd; door hoge verticale stroomsnelheden worden korrels opgetild in het verticale kanaal.</p>	<p>Korrelgrootte beïnvloedt weerstand in het opbarstkanaal relatie aan 0,3D regel</p> <p><u>Geohydrologische situatie</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - mate van concentratie van stroming naar uittredepunt (in 3D): kunnen waterspanningen voldoende toenemen voor heave? - toestroom vanuit hoge gronden - mogelijk vollopen en onderwater staan achterland
<p>5. horizontaal zandtransport en pipe vorming</p> 	<p>Een of meerdere pipes ontstaan doordat de horizontale gradiënten hoog genoeg zijn om korrels te eroderen. Doordat de gradiënt vanuit de rivier zijde hoog is groeien pipes globaal richting de rivier.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - mogelijk extra weerstand tegen erosie als gevolg van brede korrelgrootteverdeling en grotere korrelgrootte bij grind (mogelijk groter belang van primaire erosie) - mogelijk extra weerstand tegen erosie door verkitting in oudere Maasafzettingen. - drukval in opbarstkanaal (0,3D regel) wanneer deklaag aanwezig is (in combinatie met maatregel opkisten) <p><u>Geohydrologische situatie</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - dikte, doorlatendheid, en anisotropie en meerlaagsheid in WVP - concentratie van stroming naar de pipe in 3D
<p>9. maatregelen ineffectief</p> 	<p>De mitigerende maatregelen zijn niet of niet tijdig getroffen, of de mitigerende maatregelen zijn niet effectief.</p>	<p>Calamiteitenplan</p> <ul style="list-style-type: none"> -Door bij pipingverschijnselen maatregelen te nemen wordt de overstromingskans sterk gereduceerd. Een voorbeeld is opkisten waardoor het optredende verval afneemt.

2.3 Getijdengebied

Getijdenzanden kunnen onderscheiden worden in getijdenplatafzettingen en getijdengeulafzettingen. Deze zijn veelal ingebed in organischere of kleigere getijdenafzettingen zoals getoond in Figuur 2-4. Getijdengeulafzettingen zijn dikker en zandiger, en kunnen insnijden in het Pleistocene pakket (Figuur 2-4). Er is veel variatie in de bodemopbouw in getijdenafzettingen.



Figuur 2-4 Typische bodemopbouw in het getijdengebied. Links deklaag met getijdenplatafzettingen met een kleinere getijdengeul binnendijs. In het voorland kunnen kwelders aanwezig zijn. Rechts een grotere getijdengeul onder het voorland en de dijk, die zeer diep kunnen zijn: de geul snijdt in het Pleistocene zand. Het Pleistocene zand kan diep of ondiep liggen, afhankelijk van de locatie.

Voor het getijdengebied speelt de belasting in knoop 1 een belangrijke rol, vanwege de relatief korte duur. Voor met name Friesland en Groningen is daarnaast de aanwezigheid van kwelders van belang, aangezien deze de toename van de waterspanningen buitenwaarts remmen. Maar ook in deze gebieden komen schaaldijken voor en in Zeeland liggen ook gebieden met kwelders (daar vooral schor genoemd).

Evenals in andere gebieden is de geohydrologische situatie voor knoop 2 belangrijk. Hierbij is het van belang om rekening te houden met de verschillende typen getijdenafzetting. De opeenvolging van lagen, en doorlatendheidseigenschappen daarvan bepalen de geohydrologische situatie, en daarmee de vervolgstappen. Net als voor de afzettingen in Limburg, geldt dat het huidige erosiemodel niet is afgeleid en gevalideerd voor dit type sediment.

Getijdenplatafzettingen zijn veelal slechts enkele meters dik en bevatten een opeenvolging van zandige en siltigere kleigere laagjes op mm schaal. **De lage doorlatendheid, anisotropie en de relatief dunne pakketten leiden tot minder toename van de waterspanning onder de deklaag** in het achterland (knoop 2), zeker als het doorlatendheidscontrast met de deklaag klein is. In combinatie met de veelal **dikke deklagen** leidt dit tot **een kleinere kans op opbarsten en heave** (knoop 3&4). Wat betreft terugschrijdende erosie (knoop 5) is het de vraag **hoe het piping proces in dergelijke afzettingen verloopt** wanneer er sprake is van een **hoge concentratie kleilaagjes in de baan van de pipe**. De **erosiegevoeligheid van het zand is waarschijnlijk ook laag door invloed van biologische en fysische cohesie en de aanwezigheid van fines**. Voor het optreden van zowel deze initiële als de vervolprocessen in knopen 6 t/m 10 is de duur van de belasting van belang.

Getijdengeulafzettingen zijn dikker, veelal zandiger, en kunnen relatief weinig kleilaagjes bevatten, waardoor de bulkdoorlatendheid hoger en bulkanisotropie lager is ten opzichte van getijdenplatafzettingen. Ook kan de deklaag boven recent actieve geulen lokaal dunner zijn. **Hierdoor is het waarschijnlijker dat het pipingproces in getijdengeulafzettingen kan plaatsvinden.** De afmetingen van de geul, en het al dan niet kortsluiting maken met het Pleistocene watervoerende pakket, zijn dan van groot belang om te bepalen of de waterspanning en concentratie van stroming voldoende zijn voor alle processen in het faalpad. Bij kleinere geulen is het minder waarschijnlijk dat er voldoende debiet is om een doorgaande pipe te vormen. Ook bij getijdengeulafzettingen speelt de hogere weerstand tegen erosie ten gevolge van de invloed van biologische en fysische cohesie en de aanwezigheid van fines, evenals de duur van de belasting.

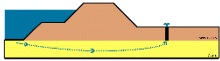
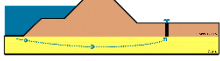

Doordat er in het getijdengebied weinig wellen voorkomen is de kans op het succesvol nemen van maatregelen hoog (knoop 9). Zeker als de kans op piping voor grote delen van het gebied verwaarloosd (bijvoorbeeld voor kleigere getijdenplatafzettingen en/of voor kleinere getijdengeulafzettingen) of in zijn algemeen sterk verkleind kan worden, is het vooral nodig om enkele bekende zwakke plekken te monitoren en maatregelen voor te bereiden.



Indien de faalkans middels aanscherping in knopen 3 en 5, al dan niet in combinatie met noodmaatregelen, niet voldoende klein blijkt, ligt het voor de hand dat de beperkte duur van de belasting ook bijdraagt aan een faalkansreductie. Hieromtrent spelen echter wel aandachtspunten rondom de kans dat oudere pipes in stand blijven, en de kennisleemten omtrent de pipegroeisnelheid een rol.

Gelet op de bovengenoemde karakteristieken van het pipingproces in het getijdengebied **is de verwachting dat het risico op piping feitelijk verwaarloosbaar klein is voor grote delen van het gebied.** Het is hierbij **belang om de geohydrologische situatie** van de ondergrond in kaart te brengen, en het **onderscheid tussen getijdengeul-, getijdenplaat- en de kleiige organische getijdenafzettingen** te maken. Onderzoek naar de pipinggevoeligheid van getijdenafzettingen is momenteel in volle gang, inclusief grootschalige veldproeven, met als doel om het verwachte verwaarloosbare risico te onderbouwen en te valideren. Het onderzoek zal ook leiden tot specifieke aanbevelingen voor het omgaan met piping in het getijdengebied.

In onderstaande tabel worden de belangrijkste aspecten voor de meest belangrijke knopen genoemd. Aspecten die de geohydrologie in knopen 1 en 2 beïnvloeden zijn in verschillende mate van belang hebben voor de verschillende processen. De naar verwachting meest belangrijke gebiedsspecifieke geohydrologische aspecten zijn daarom bij de vervolprocessen opgenomen, en knopen 1 en 2 zijn hieronder niet weergegeven. Deze knopen zijn wel opgenomen in Tabel 5-1 waarin belangrijke aspecten in meer detail zijn uitgewerkt.

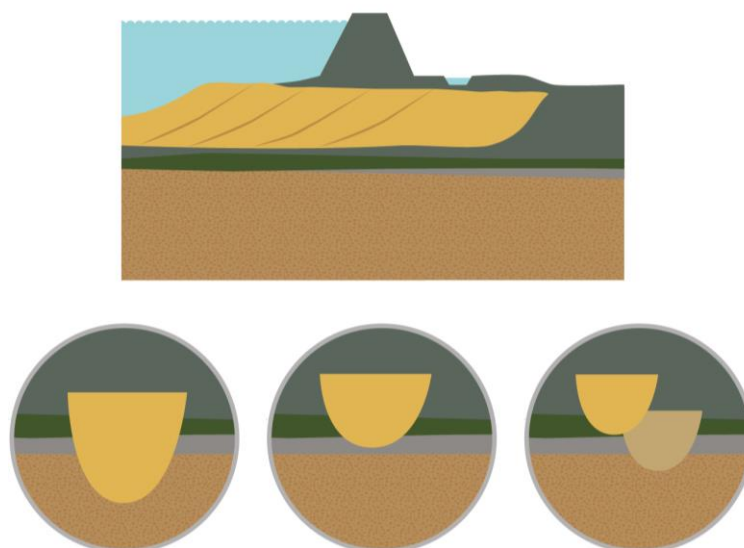
Tabel 2-3 Faalpad en selectie van naar verwachting belangrijkste gebiedsspecifieke aspecten voor het getijdengebied (voor nader detail wordt verwezen naar Tabel 5-1)

Faalpad	Narratief	Belangrijkste aspecten
<p>3. opbarsten en geconcentreerde verticale stroming</p> 	<p>De stijghoogte aan de polderzijde is voldoende om de deklaag op te tillen en te scheuren, dit resulteert in een opbarstgat.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - dikte & samenstelling (sterkte eigenschappen) deklaag (eigenschappen van veen m.b.t. opbarsten) <p><u>Geohydrologie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - opbouw waterspanning onder deklaag achterland <i>Getijdenplaatafzetting:</i> contrast tussen doorlatendheid WVP en deklaag, aanwezigheid dunne kleilaagjes in WVP en dunne siltlaagjes in deklaag <i>Getijdengeulafzetting:</i> contrast tussen doorlatendheid WVP en deklaag, kortsluiting met Pleistocene zand, afmetingen geul, en eventueel polderwaartse overgang naar deklaag, siltige deklaag <ul style="list-style-type: none"> - Meerlaagsheid, anisotropie - Doorlatendheid deklaag voorland
<p>4. Heave</p> 	<p>Door concentratie van stroming naar het uitrededepunt worden zandkorrels gefluidiseerd; door hoge verticale stroomsnelheden worden korrels opgetild in het verticale kanaal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - korrelgrootte en debiet in wel beïnvloeden weerstand in het opbarstkanaal relatie aan 0,3D regel - dikte deklaag <p><u>Geohydrologie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - concentratie van stroming in 3D naar wel <i>Getijdenplaatafzetting:</i> contrast tussen doorlatendheid WVP en deklaag, aanwezigheid dunne kleilaagjes in WVP en dunne siltlaagjes in deklaag, dikte WVP <i>Getijdengeulafzetting:</i> contrast tussen doorlatendheid WVP en deklaag kortsluiting met Pleistocene zand, afmetingen geul, en eventueel polderwaartse overgang naar deklaag, siltige deklaag <ul style="list-style-type: none"> - Meerlaagsheid, anisotropie - Doorlatendheid deklaag voorland
<p>5. horizontaal zandtransport en pipe vorming</p> 	<p>Een of meerdere pipes ontstaan doordat de horizontale gradiënten hoog genoeg zijn om korrels te eroderen. Doordat de gradiënt vanuit de rivier zijde hoog is groeien pipes globaal stroomopwaarts.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - effect horizontale afwisseling zand en kleilaagjes in het WVP op pipegroei - extra weerstand tegen erosie door fijne fractie en cohesie - weerstand in het opbarstkanaal (0,3D regel) (en dikte deklaag, en eventueel opkisten) <p><u>Geohydrologie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - concentratie van stroming in 3D naar pipe <i>Getijdenplaatafzetting:</i> contrast tussen doorlatendheid WVP en deklaag, aanwezigheid dunne kleilaagjes in WVP en dunne siltlaagjes in deklaag, dikte WVP, anisotropie en meerlaagsheid <i>Getijdengeulafzetting:</i> contrast tussen doorlatendheid WVP en deklaag kortsluiting met Pleistocene zand, afmetingen geul, en eventueel polderwaartse overgang naar deklaag, siltige deklaag <ul style="list-style-type: none"> - Meerlaagsheid, anisotropie - Doorlatendheid deklaag voorland

Faalpad	Narratief	Belangrijkste aspecten
<p>7. ruimen, (verbreding en verdieping van de pipe)</p> 	<p>Vanaf bovenstreams begint de pipe te verbreden, en dit proces propageert zich terug naar het uittredepunt.</p>	<p>Waterstandsverloop en duur belasting (knoop 1) in relatie tot duur vorming pipe en ruimen.</p>
<p>9. maatregelen ineffectief</p> 	<p>De mitigerende maatregelen zijn niet of niet tijdig getroffen, of de mitigerende maatregelen zijn niet effectief.</p>	<p>- het aantal wellen, bij weinig wellen is de kans op succesvolle maatregelen zoals opkisten groter, zeker als bij monitoring</p>

2.4 Benedenrivierengebied

Voor het benedenrivierengebied geldt zowel op basis van de geologie als op basis van de hydraulische belasting dat er in het westelijke deel, het perimariene gebied, een grote mate van overeenkomst is met het getijdengebied, en voor het oostelijke deel, het fluviaatiele gebied, meer overeenkomst is met het bovenrivierengebied. Typisch voorkomende bodem opbouwen in het benedenrivierengebied zijn in Figuur 2-5 weergegeven.



- Pleistoceen
- Recente geulafzettingen (zand)
- Oudere geulafzetting (zand)
- Dijkmateriaal /Deklaag kom- en oeverafzettingen
- Basisveen
- Laag van Wijchen

Figuur 2-5 Kenmerkend voor het benedenrivierengebied zijn de relatief dikke komafzettingen die doorsneden worden door zandige geulafzettingen. Deze geulafzettingen kunnen tot het Pleistocene zand reiken (gefundeerd), zoals in de linker cirkel, of juist niet (ongefundeerd) zoals in de middelste cirkel. Ook komt het voor dat geulen in oudere geulen insnijden en op die manier ook in contact staan met het Pleistocene zand zoals in de rechter cirkel.

Gezien de aanwezigheid van getijdengeulen en -platen kan gesteld worden dat richting het westen de afzettingen in toenemende mate lijken op die in het getijdengebied, met een verminderde gevoeligheid voor piping als gevolg. Deze verminderde gevoeligheid kan met huidige erosiemodel nog niet gekwantificeerd worden (zie ook §2.3).

Voor beide delen van het gebied zijn **geohydrologische aspecten die de toename van waterspanning buiten- en binnendijs beïnvloeden (knopen 1 & 2) van groot belang voor de faalkans. In beide gebieden is het van belang of het Holocene WVP kortsluiting maakt met het Pleistocene WVP.** Ook de dynamiek van de grondwaterstand en de oppervlaktewaterstand hebben een belangrijke invloed op de toename van waterspanningen aan de polderzijde, hierbij spelen zowel peilbeheer als tijdsafhankelijke berging een rol.

Voor het perimariene gebied is het onderscheid tussen zandige afzettingen, en kleiigere organischere afzettingen van belang, en binnen de zandige afzettingen het onderscheid tussen getijdengeul en getijdenplatafzettingen (zie ook paragraaf 2.3). Bij **getijdenplatafzettingen is het de vraag of de waterspanning onder de deklaag voldoende op kan lopen voor opbarsten en heave** (knoop 3 & 4). Voor **getijdengeulafzettingen** geldt in het westelijke deel

van het benedenrivierengebied dat de kans op kortsluiting met het Pleistocene zand kleiner is dan in het oostelijke deel van het benedenrivierengebied en in het getijdengebied. Kortsluiting maakt de kans op opbarsten en heave, evenals terugschrijdende erosie groter. Hier zijn de onzekerheden omtrent de **weerstand tegen terugschrijdende erosie (knoop 5) evenals de geohydrologische aspecten die concentratie van stroming naar de pipe bepalen van belang voor de faalkans.**

Voor het fluviatiele gebied kan de waterspanning in het achterland sterk toenemen door **relatief abrupte overgangen van zand naar klei in het achterland**, zoals bijvoorbeeld langs de rivier de Lek. Ook de aanwezigheid van crevassegeulen, of rivierduinen (donken) die relatief grofkorreliger en doorlatender zijn, kan leiden tot lokaal hoge waterspanningen. Dit kan leiden tot concentratie van stroming en hoge waterspanning onder de deklaag en **lokaal een grotere kans op opbarsten en heave.**

Naast de geohydrologie beïnvloeden de **deklaag dikte en sterkte eigenschappen de kans op opbarsten en heave.** Wanneer de deklaag dikker dan 5 m is, is de vraag of opbarsten op kan treden. Als er geen uittredepunt is kan de rest van de knopen ook niet optreden. Boven recent actieve geulafzettingen (zowel in perimariën als in fluviatiele gebied), kan de deklaag lokaal dunner zijn, waardoor dit zwakke plekken zijn, met name wanneer er ook een abrupte overgang van zand naar klei is in het achterland.

Wanneer de deklaag veel veen bevat is ook de vraag hoe dit het opbarsten beïnvloedt. Er zijn weinig voorbeelden bekend van zandmeevoerende wellen bij een venige deklaag.

Voor **terugschrijdende erosie** (knoop 5) gelden voor het perimariene gebied vergelijkbare overwegingen als voor het getijdengebied. **Het is de vraag of terugschrijdende erosie optreedt in getijdenplaatafzettingen door de hogere weerstand tegen erosie** door cohesie en de concentratie van dunne laagjes in de zandige getijdenplaatafzettingen in combinatie met de lage doorlatendheid van deze afzettingen. In getijdengeulafzettingen is de kans op terugschrijdende erosie groter en spelen geohydrologische aspecten die de concentratie van stroming naar de pipe beïnvloeden, evenals de hogere sterkte in getijdenafzettingen.

Voor het fluviatiele gebied zijn met name de geohydrologische factoren die de concentratie van stroming naar de pipe bepalen van belang voor terugschrijdende erosie. De afmetingen van geulen, de doorlatendheid en anisotropie daarvan, en het in contact staan met het Pleistoceen, beïnvloedt of er wel voldoende debiet is voor pipevorming. Daarnaast kan de aanwezigheid van fines ook leiden tot een hogere weerstand tegen terugschrijdende erosie, evenals heterogeniteit in de baan van de pipe. Opgemerkt wordt dat bij het bepalen van benodigde berm lengtes het ook van belang is na te gaan hoever de pipinggevoelige zandlichamen in het achterland doorlopen, aangezien deze overgang relatief abrupt kan zijn bijvoorbeeld langs de Lek.

Gezien de verwachting dat opbarsten slechts op weinig plekken optreedt is de kans om effectieve maatregelen te kunnen nemen bij zandmeevoerende wellen relatief groot, zeker als deze plekken in het calamiteitenplan zijn opgenomen.

Indien de faalkans middels aanscherping in knopen 3 en 5, al dan niet in combinatie met noodmaatregelen, niet voldoende klein blijkt, ligt het voor de hand dat de beperkte duur van de belasting in het westelijke deel van het benedenrivierengebied ook bijdraagt aan een faalkansreductie. In het westelijke deel van het gebied is de hoogwaterbelasting uit de rivier beperkt en wordt de piekbelasting gedomineerd door het aandeel uit getij en storm. Hieromtrent spelen echter wel aandachtspunten rondom de kans dat oudere pipes in stand blijven, en de kennisleemten omtrent de pipegroeisnelheid.

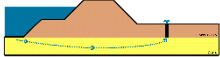

Gelet op de verschillende karakteristieken in het perimariene en in het fluviatiele deel van het gebied ligt het voor de hand om dit onderscheid te maken bij de pipinganalyse. Bij het perimariene

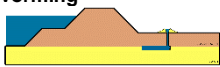

gebied speelt dan ook het verschil tussen de getijdengeulafzettingen die pipinggevoeliger zijn dan de getijdenplatafzettingen.

In onderstaande tabel worden de belangrijkste aspecten voor de meest belangrijke knopen genoemd. Aspecten die de geohydrologie in knopen 1 en 2 beïnvloeden zijn in verschillende mate van belang voor de verschillende processen. De naar verwachting meest belangrijke gebiedsspecifieke geohydrologische aspecten zijn daarom bij de vervolprocessen opgenomen, en knopen 1 en 2 zijn hieronder niet weergegeven. Deze knopen zijn wel opgenomen in Tabel 6-1 waarin belangrijke aspecten in meer detail zijn uitgewerkt.

Aangezien de belangrijkste eigenschappen voor het perimariene gebied sterk overeenkomen met die van en de getijdenafzettingen wordt verwezen naar Tabel 2-3 voor een beknopt overzicht die aspecten, en Tabel 6-1 voor een gedetailleerder overzicht van belangrijke aspecten in het benedenrivierengebied.

Tabel 2-4 Faalpad en selectie van naar verwachting belangrijkste gebiedsspecifieke aspecten voor het fluviatiele deel van het benedenrivierengebied (voor het perimariene deel wordt verwezen naar Tabel 2-3 en voor nader detail beide delen wordt verwezen naar Tabel 6-1)

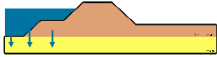
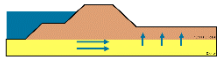
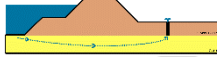
Faalpad	Narratief	Belangrijkste aspecten
<p>3. opbarsten en geconcentreerde verticale stroming</p> 	<p>De stijghoogte aan de polderzijde is voldoende om de deklaag op te tillen en te scheuren, dit resulteert in een opbarstgat.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - dikte & samenstelling (sterkte eigenschappen) deklaag (eigenschappen van veen m.b.t. opbarsten) <p><u>Geohydrologische situatie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - aanwezigheid van lokaal zwakke plekken: dunne deklaag boven crevassegeulen of donken, eventueel in combinatie met snelle polderwaartse overgang naar deklaag - meerlaagsheid (kortsluiting met het Pleistocene watervoerende pakket), anisotropie. - doorlatendheid voorland
<p>4. Heave</p> 	<p>Door concentratie van stroming naar het uittrededepunt worden zandkorrels gefluïdiseerd; door hoge verticale stroomsnelheden worden korrels opgetild in het verticale kanaal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - korrelgrootte en debiet in wel beïnvloeden weerstand in het opbarstkanaal relatie aan 0,3D regel - dikte deklaag <p><u>Geohydrologie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - concentratie van stroming in 3D naar wel (preferente stroming in crevassegeulen of donken, snelle polderwaartse overgang naar deklaag, afmetingen watervoerende zandlaag, kortsluiting met het Pleistocene watervoerende pakket.) - meerlaagsheid (kortsluiting met het Pleistocene watervoerende pakket), anisotropie - doorlatendheid deklaag voorland

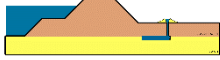

Faalpad	Narratief	Belangrijkste aspecten
<p>5. horizontaal zandtransport en pipe vorming</p> 	<p>Een of meerdere pipes ontstaan doordat de horizontale gradiënten hoog genoeg zijn om korrels te eroderen. Doordat de gradiënt vanuit de rivier zijde hoog is groeien pipes globaal stroomopwaarts.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - extra weerstand tegen erosie door fijne fractie en cohesie - weerstand in het opbarstkanaal (0,3D regel) (en dikte deklaag, en eventueel opkisten) <p><u>Geohydrologie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - concentratie van stroming in 3D naar wel (preferente stroming in crevassegeulen of donken, snelle polderwaartse overgang naar deklaag, afmetingen watervoerende zandlaag, kortsluiting met het Pleistocene watervoerende pakket.) - meerlaagsheid (kortsluiting met het Pleistocene watervoerende pakket), anisotropie - doorlatendheid deklaag voorland
<p>9. maatregelen ineffectief</p> 	<p>De mitigerende maatregelen zijn niet tijdig getroffen, of de mitigerende maatregelen zijn niet effectief.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - het aantal wellen, bij weinig wellen is de kans op succesvolle maatregelen zoals opkisten groter, zeker als bij monitoring

3 Bovenrivierengebied Rijntakken

Het bovenrivierengebied Rijntakken is beschouwd in Rosenbrand & Knoeff (2020) en de daarin opgestelde karakteristieken en het narratief zijn opgenomen in bijlagen A en B. In dat document zijn ook beïnvloedende en belangrijke aspecten geanalyseerd. Op basis van die analyse, zijn in onderstaand overzicht de belangrijkste knopen en belangrijke aspecten voor dit gebied weergegeven.

Tabel 3-1 Faalpad en belangrijke aspecten bovenrivierengebied

Faalpadknopen	Narratief	Belangrijkste aspecten
<p>1. buitenwaterstand stijgt en waterspanning in het WVP aan de rivierzijde van de kering stijgt</p> 	<p>De rivierwaterstand stijgt. De stroomsnelheid in de rivier neemt toe. Toename van de waterstand leidt tot toename van waterspanningen in de watervoerende lagen onder de rivier en onder het voorland.</p>	<p><u>Geohydrologische situatie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - netto intredeweerstand (deklaag voorland, inrichting voorland bijv kleiwinputten) - bij kort of afwezig voorland doorlatendheid en anisotropie in bovenste WVP - Laagopbouw (dikte, doorlatendheid, en anisotropie en meerlaagsheid in WVP): <ul style="list-style-type: none"> - meerlaagsheid en kortsluiting tussen Holoceen en Pleistoceen WVP, - insnijden rivier in Pleistoceen en weerstand rivierbodembodem
<p>2. waterspanning WVP aan de polderzijde van de kering stijgt en er ontstaat verticale stroming</p> 	<p>Toename van waterspanningen in watervoerend pakket - voor en onder de dijk - leidt tot verhoging van de stijghoogte aan de binnenzijde van de dijk.</p>	<p><u>Geohydrologische situatie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - leklengte en hydrologische randvoorwaarden achterland (bepaald door de lokale situatie, peilbeheer, grondwaterstand, stijghoogte WVP, hoge gronden zoals stuwwallen en stroming richting de rivier) -preferente stroombanen: doorlatendheid en afmeting daarvan, eventueel in combinatie met doodlopen van stroombaan op kleiplug - dikte, doorlatendheid, en anisotropie en meerlaagsheid in WVP (knoop 1)
<p>3. opbarsten en geconcentreerde verticale stroming</p> 	<p>De stijghoogte aan de polderzijde is voldoende om de deklaag op te tillen en te scheuren, dit resulteert in een opbarstgat.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - dikte en sterkte (cohesie) van de deklaag <u>Geohydrologische situatie:</u> <ul style="list-style-type: none"> - aanwezigheid van lokaal zwakke plekken: <ul style="list-style-type: none"> dunne deklaag of kopsloten preferente stroombanen: doorlatendheid en afmeting daarvan, eventueel in combinatie met doodlopen van stroombaan op kleiplug (knoop 2) - leklengte & hydrologische randvoorwaarden achterland i.v.m. concentratie van stroming naar wel (knoop 2) - dikte, doorlatendheid, anisotropie en meerlaagsheid in WVP (knoop 1&2) - intredeweerstand voorland (knoop 1)

Faalpadknopen	Narratief	Belangrijkste aspecten
<p>5. horizontaal zandtransport en pipe vorming</p> 	<p>Een of meerdere pipes ontstaan doordat de horizontale gradiënten hoog genoeg zijn om korrels te eroderen. Doordat de gradiënt vanuit de rivier zijde hoog is groeien pipes globaal richting de rivier.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - aan/afwezigheid van stabiele deklaag als dak voor pipe bij wellen verder van de kering - extra weerstand tegen erosie als gevolg van brede korrelgrootteverdeling -extra weerstand als gevolg van heterogeniteit WVP in de baan van de pipe (opeenvolgende lagen op verschillende schalen, van cm tot dm tot m, met verschillende doorlatendheid, korrelgrootte, of het niet doorlopen van pipinggevoelig zandlichaam. Diepteligging onderkant deklaag). - weerstand in het opbarstkanaal (0,3D regel) wanneer deklaag aanwezig is (in combinatie met maatregel opkisten) <p><u>Geohydrologische situatie</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - dikte, doorlatendheid, en anisotropie en meerlaagsheden in WVP (knoop 1&2) - doorlatendheid deklaag voorland (knoop 1) - leklengte achterland & hydrologische randvoorwaarden (knoop 2) beïnvloed de concentratie van stroming naar pipe in 3D - preferente stroombanen: doorlatendheid en afmeting daarvan (knoop 2) beïnvloed de concentratie van stroming naar pipe in 3D
<p>9. maatregelen ineffectief</p> 	<p>De mitigerende maatregelen zijn niet of niet tijdig getroffen, of de mitigerende maatregelen zijn niet effectief.</p>	<p>Hoeveel tijd heb je voor maatregelen? Hierin spelen:</p> <ul style="list-style-type: none"> Tijd tussen optreden en signaleren? Tijd van pipevormingsproces Al dan niet blijven bestaan van pipes tussen opeenvolgende hoogwater situaties Tijd nodig om maatregelen te implementeren <ul style="list-style-type: none"> - Is het mogelijk om risicogestuurde inspectie en maatregelen (bijv. op basis van regionale geohydrologische modellen) uit te voeren? - Vertalen van beheermaatregelen (calamiteitenzorg) naar overstromingskans, en hoeveel levert het op? - Moment van waarneming in combinatie met tijdsduur van belasting meenemen bij inschatten faalkans en noodzaak van maatregelen - Inschatten van potentiële effectiviteit van maatregelen? - inspectie t.b.v. noodmaatregelen en t.b.v. evacuatie - Wanneer is het beter om een wel op te kisten, en wanneer is het beter dit juist niet te doen (en eventueel zelfs meerdere ontlast gaten te maken)?

4 Limburg: Het Maasdal

4.1 Geologie

Het Maasdal strekt zich uit vanaf de Maas nabij Maastricht tot aan Nijmegen. Dit deel van de Maas ligt voor de terrassenkruising, met andere woorden: hier heeft de Maas zich ingesneden door langzame opheffing van het gebied, waardoor er hoger gelegen rivierterrassen zijn gevormd en de huidige rivier in een dal ligt. De Maas snijdt zich dus constant in zijn eigen en daaronder gelegen afzettingen in en de ondergrond bestaat over het algemeen uit zand. In dit stuk zal alleen ingegaan worden op het huidige en het jongere terrasniveau van de Maas uit het Holoceen, waar de dijken op staan en de rivierbodem in ligt.

4.1.1 Deklaag

Een deklaag kan langs de Maas gevormd worden op kronkelwaarden, in verlaten meanderbochten en op jonge rivierterrassen die laag genoeg zijn om te overstromen bij een hoge afvoer. Er zijn, anders dan in het rivierengebied, geen duidelijke komgebieden aanwezig waarin dikke lagen klei of leem zijn afgezet of veen in is gevormd. **Het binnendijkse voorland bestaat uit de jongste terrasniveau's, waar een deklaag aanwezig kan zijn. In het achterland is een deklaag zeldzamer. De deklaag kan geheel afwezig of slechts zeer dun zijn en bestaat deze uit zandige leem met name in het zuidelijke deel van het Maasdal.** De deklaag, indien aanwezig, is vrijwel overal < 2 m dik. Op enkele plekken, zoals in verlaten meanderbochten en de laaggelegen gebieden/meertjes die hierin achtergebleven zijn, kan een tot ~5 m dikke deklaag aangetroffen worden die bestaat uit klei, leem en/of veen. **Een homogeen pakket klei of leem komt echter zelden voor.** In het noordelijke deel van het Maasdal lijkt de deklaag meer op die in het bovenrivierengebied. De klei is doorgaans (sterk) siltig of zandig en wordt vaak afgewisseld door dunne laagjes zand. De doorlatendheid van de deklaag is dan ook groter dan in het boven- en benedenrivierengebied: er worden waardes gerapporteerd tot wel 0.1-1 m/dag (Koopmans & Janssen, 2017; Van der Hulst, 2017).

4.1.2 Watervoerend pakket

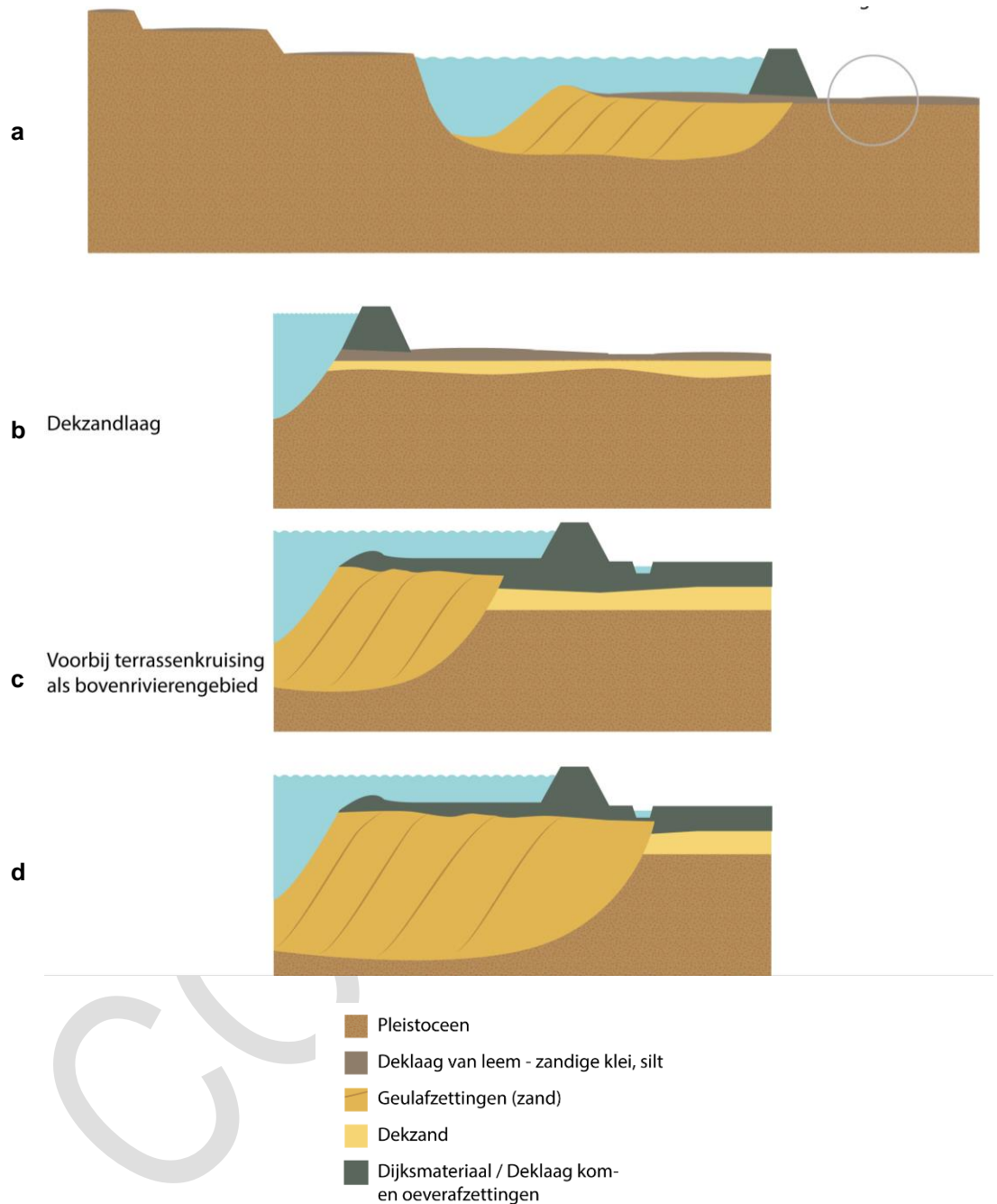
De beddingafzettingen van de Maas liggen vrijwel overal nabij het oppervlak en liggen zowel, binnen, buiten als onder bestaande dijken. De korrelgrootte van de jongste beddingafzettingen neemt af in benedenstroomse richting. Van **zandig grind in de zuidelijke helft van Limburg tot grof zand bij de terrassenkruising ten zuiden van Nijmegen, waarbij de overgang van overwegend grind naar overwegend zand tussen Swalmen en Venlo plaatsvindt** (Murillo-Muñoz & Klaassen, 1998). **Op lokaal niveau is er vaak sprake van een aflopend profiel.** Dat wil zeggen: van onder naar boven in een beddingafzetting wordt de korrelgrootte kleiner. In de oudere generaties beddingafzettingen van de Maas waarin de huidige Maas zich insnijdt zijn soortgelijke trends aanwezig. Een volledig aflopend profiel zal niet overal aangetroffen worden omdat de Maas zijn eigen afzettingen volledig of ten dele aansnijdt en er op deze wijze een complex systeem van verschillende generaties beddingafzettingen op elkaar ontstaat. Langs de hele Maas in dit gebied kunnen de bewaard gebleven beddingafzettingen bestaan uit matig grof zand tot grind. Hier en daar kunnen kleiige of lemige lagen voorkomen die op vergelijkbare wijze als de huidige deklaag zijn gevormd en bewaard zijn gebleven. **Een opvallend kenmerk van de Limburgse zand en grinden is de relatief hoge uniformiteitscoëfficiënt (d_{60}/d_{10}),** dit betekent dat de afzettingen slecht gesorteerd zijn. Aangenomen wordt dat voor Limburg deze coëfficiënt regelmatig ruim boven de 4 uitkomt. Daarnaast zijn veel van de oudere Maasafzettingen erg oud. Deze kunnen in zeker mate verkit zijn (van Staveren, 1995). Ook bij sommige jongere Maasafzettingen is een zekere mate van verkitting mogelijk.

De doorlatendheid van de grind-zandpakketten is groot, zeker in vergelijking met de rivierzanden in het bovenrivierengebied. Uit pompproeven komen waarden van 80-180 m/dag voor (zie referenties in Koopmans & Janssen, 2017). Gezien de afname in korrelgrootte richting het noorden, kan verwacht worden dat de gemiddelde doorlatendheid van de afzettingen afneemt. Binnen WBI-SOS worden startwaarden voor de gemiddelde Kh tot 125 m/dag gegeven, andere studies geven waarden in de bandbreedte 60 – 185 m /dag (van der Hulst, 2017; Koopmans & Janssen, 2017).

Op veel plaatsen worden de oudere rivierterrassen van de Maas afgedekt door een laag dekzand. Dit is zand dat door de wind is aangevoerd en uit leem tot matig grof zand bestaat. Met name op de oostoever komen ook rivierduinen voor die uit het Maasdal opgestoven zijn. In relatie tot de huidige Maas worden de dekzanden en rivierduinen die op de oudere beddingafzettingen liggen aangesneden door de rivier. Hierdoor kan het voorkomen dat deze fijnere zanden onder de dijk liggen en in direct contact staan met de rivier.

De Maas ligt in een tektonisch actief gebied en doorkruist o.a. het Kempenblok, het Peelblok (omhoogkomende gebieden), de Roerdalslenk en de Venloslenk (dalende gebieden). In de slenken zijn jongere afzettingen bewaard gebleven onder de Maasafzettingen, terwijl op de blokken oudere afzettingen relatief ondiep voorkomen. Op het Kempenblok, vanuit het zuiden ongeveer tot aan Born, komen mariene afzettingen uit het Tertiair nabij het oppervlak voor. Het betreft hierbij voornamelijk **fijn zand van de Formatie van Breda dat direct onder de oude Maasafzettingen ligt en in sommige gevallen ondiep genoeg ligt om aangesneden te worden door de huidige Maas.** Aangezien de Formatie van Breda relatief slecht doorlatend is, zal de dikte van het voor piping relevante zandpakket hier dunner zijn. Deze formatie is ook ondiep aanwezig op het Peelblok, ongeveer van Roermond tot aan Venlo. In de slenken zijn Kwartaire formaties met fluviatiele afzettingen van de Rijn-Maas delta bewaard gebleven en is bovendien het pakket Maasafzettingen dikker, waardoor de Maas zelden oudere (niet 'eigen') rivierafzettingen aansnijdt.

Typische ondergrondkarakteristieken zijn in Figuur 2-2 getoond.



Figuur 4-1 Typische ondergrondopbouw in Limburg. Het bovenste figuur (a) toont de situatie in het zuidelijke deel van het gebied, daar is in de buitenbocht van de Maas soms geen dijk aanwezig en ligt de rivier direct tegen het hogergelegen terras aan. De actieve rivierbedding snijdt zich in de onderliggende afzettingen. In minder hooggelegen gebied kan de buitenbocht ook insnijden in de afzettingen, waardoor er geen Holocene geulafzettingen onder de dijk aanwezig zijn (b). Ten noorden van de terrassenkruising (c,d) is de situatie meer vergelijkbaar met het Bovenrivierengebied, waar de actieve rivier zich in holocene geulafzettingen beweegt. De holocene geulafzettingen lopen niet of beperkt onder de dijk door. Er is veelal een dekzandlaag aanwezig op de Pleistocene rivierafzettingen.

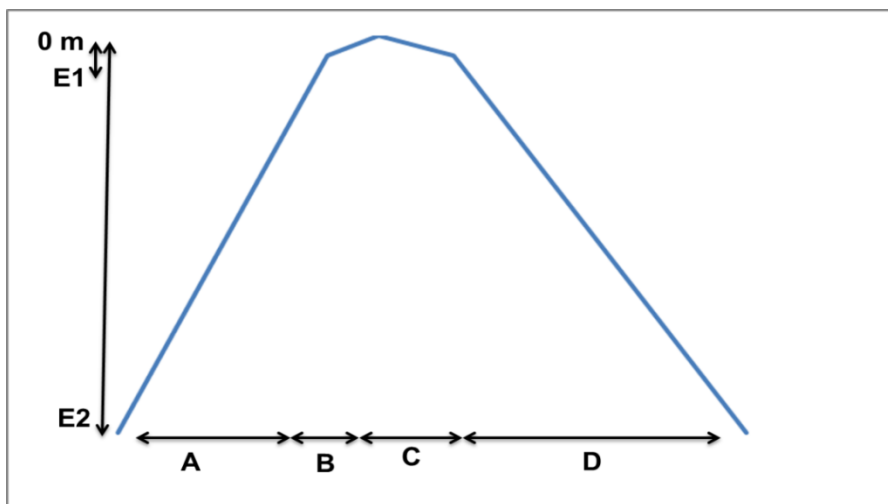
4.2 Hydraulische belasting

De hydraulische belastingen langs de Maas worden bepaald door de afvoer van deze rivier. Voor het WBI zijn tijdreeksen van de waterstand uit de productieberekeningen Rijntakken en Maas geanalyseerd. De resultaten van 3 afvoergolven zijn hierbij beschouwd. Voor de Maas betreft het de afvoergolven met afvoer van 3.394, 3.950 en 4.600 m³/s.

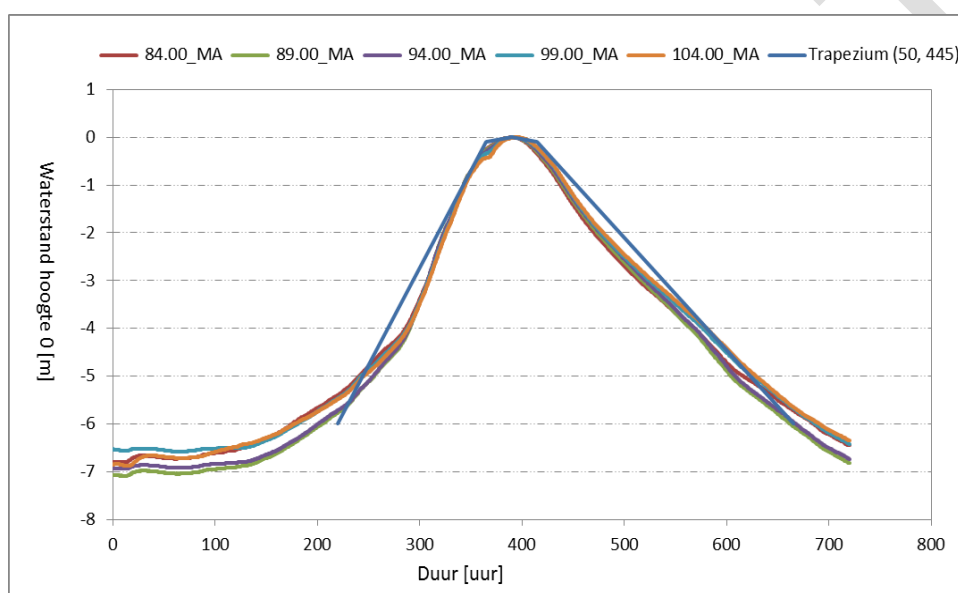
Uit de uitgevoerde analyse is gebleken dat de hoogte van de afvoergolf nauwelijks effect heeft op de vorm van het waterstandsverloop. In de benedenstroomse richting treedt topvervlakking op, waardoor het tijdsverloop breder wordt.

Het waterstandsverloop laat zich beschrijven door het verloop in onderstaande figuur. Voor de Limburgse Maas zijn A en B beide circa 60 uur, C circa 30 a 50 uur en D circa 200 uur. E (E1+E2) bedraagt 3 tot 6 m.

CONCEPT



Figuur 4-2 Standaard trapeziumverloop voor het schematiseren van waterstandsverlopen in het Maasdal.



Figuur 4-3 Geschematiseerd waterstandsverloop aan de Maas door trapeziumverloop met basisduur op niveau -6 m van 445 uur (ca. 18,5 dag) en topduur van 50 uur. De totale duur van de voorflank bedraagt 170 uur en van de achterflank 275 uur. De waterstand stijgt van het niveau van -0,2 m tot het niveau van 0 m (piekwaarde) in 25 uur en daalt daarna in eveneens 25 uur tot het niveau van -0,2 m.

Naast waterstand is ook de stroomsnelheid van belang omdat deze tot ontgrondingskuilen achter objecten kan leiden waardoor water makkelijker het watervoerend pakket instroomt.

4.3 Narratief

In het narratief wordt het gehele faalpad geschetst en de voorwaarden beschreven voor een overstroming door piping. Het fysische proces van iedere knoop wordt kort toegelicht en vervolgens worden de kenmerkende aspecten van het gebied die het optreden van het betreffende mechanisme sterk kunnen beïnvloeden in *italics* uitgelicht. Een samenvatting van de meest belangrijke aspecten van het gebied volgt bij het 'Overzicht van het faalpad en belangrijke aspecten'.

4.3.1 Knoop 1. Buitenwaterstand stijgt en waterspanning in het WVP aan de rivierzijde van de kering stijgt

Doordat er meer water door de Maas wordt afgevoerd stijgt de waterstand en neemt de stroomsnelheid in de rivier toe. Na verloop van tijd stromen buitendijkse gebieden onder.

De waterstandstoename in verloopt over ca. 7 dagen, gevolgd door een piek van 1 a 2 dagen en een afname van ca. 12 dagen (zie schematische weergave figuur 2-2 en 2-3).

Toename van de waterstand leidt tot toename van waterspanning in de watervoerende lagen. Door toename van de stroomsnelheid in de rivier neemt de weerstand van de rivierbodem, indien deze aanwezig was, af. De aanwezigheid van geulen (al dan niet meestromend), kolken en zandwinputten, en sloten in de uiterwaarden beïnvloeden de toename van de waterspanning in het WVP.

De locaties waar de rivier in Maasafzettingen insnijdt kan de waterspanning in deze afzettingen sterk toenemen door de hoge doorlatendheid van deze afzettingen. Wanneer de rivier insnijdt in een dekzandlaag is de doorlatendheid van deze laag lager en nemen waterspanningen in de onderliggende doorlatendere lagen waarschijnlijk minder toe, waardoor er minder debiet richting in het achterland stroomt. Op locaties waar de rivier insnijdt in oudere afzettingen (formatie van Breda) neemt de waterspanning ook minder toe door de lagere doorlatendheid van het watervoerend pakket.

De deklaag in het voorland remt de stroming naar het WVP. De weerstand van het voorland tegen intredend water, die wordt bepaald door dikte en doorlatendheid van de deklaag, zal niet sterk beïnvloed worden door het onderlopen van het voorland, omdat stroomsnelheden ter plaatse van het voorland lager zullen zijn dan in de rivier. Zelfs een dunne of onderbroken deklaag in het voorland zorgt al voor intredeweerstand.

De hoogte van het maaiveld, de aanwezigheid van zomerkades en de hoogte bepalen wanneer uitwaarden onderstromen.

4.3.2 Knoop 2. Waterspanning WVP aan de polderzijde van de kering stijgt en er ontstaat verticale stroming

Toename van waterspanningen in WVP - voor en onder de dijk - leidt tot verhoging van de stijghoogte aan de binnenzijde van de dijk. De mate waarin de stijghoogte toeneemt hangt af van de eigenschappen van het WVP, de eigenschappen van de deklaag aan de binnenzijde en de geohydrologische situatie binnendijks. Alleen daar waar een (slecht doorlatende) deklaag aanwezig is kunnen waterspanningen onder de deklaag opbouwen. Zonder deklaag stroomt het water ongehinderd naar het oppervlak. In beide situaties ontstaan natte plekken aan de binnenzijde van de dijk. Wanneer hoge gronden in het achterland onder dagelijkse omstandigheden leiden tot stroming richting de rivier zal dit water bij hogere rivierwaterstanden opstuwten en leiden tot meer kwel.

Door de veelal hoge doorlatendheid van de grove Maasafzettingen kan het debiet in het WVP groot zijn. De toename van de waterspanning in het achterland wordt deels geremd door de relatief hoge doorlatendheid van de deklaag in het achterland, of het afwezig zijn van een deklaag. Bij een doorlatende deklaag treedt veel kwel op maar bouwt waterspanning minder op, bij een afwezige deklaag is sprake van meer kwel maar bouwt de waterspanning onder de deklaag niet op.

De aanwezigheid van hoge gronden in het achterland kan sterk bijdragen aan de toename van de waterspanningen in het achterland. Water dat normaliter van hogere gronden richting de Maas stroomt, wordt verhinderd door de toegenomen waterspanning in het WVP en zal ook naar het oppervlak kwellen.

Wanneer het WVP bestaat uit een opeenvolging van Maasafzettingen bovenop de minder doorlatende formatie van Breda is het debiet dat vanuit de rivier naar het achterland stroomt lager, door de lagere doorlatendheid van die tweede formatie.

De dynamiek van de grondwaterstand en de oppervlaktewaterstand hebben een belangrijke invloed op de toename van waterspanningen aan de polderzijde. In het geval dat er binnendijks bemalen (peilbeheer) wordt remt dit de ontwikkeling van de waterspanningen onder de deklaag. Het oppervlaktewaterbeheer beïnvloedt de waterspanningen ook. De vraag daarbij is wel of peilbeheer mogelijk is bij extreme rivierafvoeren. De aanwezigheid van een onverzadigde zone in het WVP achterland remt de toename van de waterspanningen binnendijks, doordat er freatische berging in de onverzadigde zone is. Dit zorgt ook voor vertraging, waardoor het optreden van gebeurtenissen vertraagd kan worden.

4.3.3 Knoop 3. Opbarsten en geconcentreerde verticale stroming

Het vervolg van het doorbraakproces is afhankelijk van de aanwezigheid en eigenschappen van de binnendijkse deklaag.

Aangezien de deklaag over het algemeen minder dan 2 m dik zal zijn, en een relatief hoge doorlatendheid kent vergeleken met dekragen in het benedenrivierengebied wordt gemaakt tussen:

Intacte deklaag. De deklaag eigenschappen kunnen lokaal variëren, globaal gesproken is de deklaag in het zuidelijke deel van het Maasdal dunner en doorlatender dan in het noordelijke deel. Indien er een intacte deklaag aanwezig is in het achterland en de waterspanning voldoende stijgt om deze op te tillen vindt opdrijven plaats. Hierdoor kan de deklaag scheuren, opbarsten.

Het scheuren van de deklaag wordt mogelijk verhindert door cohesie in de deklaag, echter dit is bij zandige of sterk siltige dekragen minder waarschijnlijk. Een zandigere deklaag is naar verwachting gevoeliger voor scheuren, echter deze zal ook meer doorlatend zijn waardoor waterspanningen minder toenemen.

Het is met name in het zuidelijke deel van het Maasdal sterk de vraag of de waterspanning onder de deklaag voldoende toe kan nemen om tot opbarsten te leiden. Als dit niet het geval is kunnen vervolgnoppen niet optreden en is piping niet aan de orde.

Dunne doorlatende deklaag, mogelijk met scheuren. Opbarsten is niet nodig voor het verdere verloop van het pipingproces. De hogere stijghoogte leidt direct tot verticale uitstroom wat nodig is voor verticaal zandtransport, de volgende stap in het pipingproces. Door de aanwezigheid van meerdere kwelpunten (scheuren) zal er minder concentratie van stroming zijn dan in situatie met slechts 1 uittredepunt.

Indien er een dunne deklaag is waarbij de sloot in het WVP insnijdt, of wanneer er gaten (bijvoorbeeld krimpscheuren of slecht afgedichte boorgaten) in de deklaag zijn, is opbarsten niet nodig om een uittredepunt te creëren. Door structuurvorming zal een dunne deklaag vaak erg doorlatend zijn, waardoor er minder concentratie van stroming naar het uittredepunt is. De vraag is of de waterspanning in dit geval voldoende is voor de vervolgstap heave.

Afwezige deklaag of deklaag doorsneden door een sloot. Verticale stroming en verticaal zandtransport is niet noodzakelijk. Het pipingproces gaat verder met horizontaal zandtransport.

Het is mogelijk dat wellen ontstaan op enige afstand van de kering, op lokale zwakke plekken waar het maaiveld lager is, of waar de deklaag dunner of lokaal afwezig (bijvoorbeeld in sloten). Indien tussen de wel en de kering een deklaag aanwezig is kan de pipe hieronder

terugschrijden. Indien dit niet het geval is vormen deze wellen geen risico op een overstroming door piping, echter kunnen wel bij hogere waterstanden wellen dichterbij de kering ontstaan.

Factoren die de waterspanning in het achterland beïnvloeden (knoop 2), zoals de dikte van de Maasafzetting en op welke diepte daaronder minder doorlatende afzettingen aanwezig zijn, en toestroom vanuit hoge gronden, hebben ook effect op opbarsten. Indien het achterland onder water komt te staan, door kwel en toestroom vanuit hoge gronden, vermindert dit het optredend verval (vergelijkbaar aan opkisten).

4.3.4 Knoop 4. Heave

Stroming concentreert zich naar het uittredepunt of de uittredepunten voor situaties met een deklaag. Door een zekere mate van concentratie van stroming naar het uittredepunt, neemt de gradiënt in het zand toe, en worden zandkorrels gefluïdiseerd. Bij meerdere uittredepunten is de concentratie minder, evenals bij een doorlatendere deklaag. Dit resulteert in meer kwel, maar juist in lagere kansen op heave. Alleen bij voldoende hoge vervallen zullen de verticale stroomsnelheden in het verticale kanaal voldoende zijn om korrels op te tillen. Het gefluïdiseerde zand vult het verticale kanaal. Wanneer de stroomsnelheid hoog genoeg is kunnen de korrels worden getransporteerd naar het maaiveld.

Wanneer de suspensie van korrels in het gat een evenwicht bereikt met de stroomsnelheid resulteert de suspensie in een drukval in de wel, waardoor de drukval over het watervoerende pakket afneemt. Bij hogere stroomsnelheden worden de korrels uit de wel weggespoeld. Als er niet meer zand geërodeerd wordt kan de wel ook alleen water meevoeren ('kokende' wel). De drukval in de wel is nagenoeg nul en draagt niet bij aan de drukval over het pakket.

Door de hoge doorlatendheid van de deklaag of het onderbroken zijn van de deklaag is er minder sprake van concentratie van stroming naar 1 uittredepunt in Limburg. Daardoor is het verval dat nodig is voor verticaal korreltransport hoog, en de kans op heave kleiner. Dit past ook bij de observatie dat er in Limburg geen/nauwelijks zandmeevoerende wellen worden gerapporteerd. Ook de aanwezigheid van meerdere wellen of uittredepunten door meerdere scheuren in de deklaag leidt tot minder concentratie van stroming naar de wellen.

Wanneer het zand erg grof is zijn korrels zwaarder en worden deze minder makkelijk getransporteerd, wat verdere erosie belemmert. Echter in een grof zand kan het debiet ook hoog zijn.

De hoge uniformiteitscoëfficiënt betekent ook dat bij grind-zandpakketten er uitspoeling van fijner materiaal, met name silt, kan optreden. Indien het fijnere materiaal uitspoelt (via kwel bijvoorbeeld), maar de dragende functie van het grind-zandpakket intact blijft spreekt men van suffusie. In het geval de dragende functie vermindert spreekt men van suffusie. In Limburg ligt het voor de hand dat als uitspoeling al optreedt, er vooral sprake zal zijn van suffusie (Koopmans & Janssen, 2017).

Wanneer een diffuse sterk zandige deklaag aanwezig is waardoor de binnenteen onder het maaiveld niveau ligt kan dit mogelijk het optreden van heave bij realistisch te verwachten waterstanden voorkomen (Rosenbrand en van Beek 2020). Indien de deklaag zodanig zandig is dat er geen waterspanningen op kunnen bouwen is opbarsten niet aan de orde, maar de zandkorrels moeten wel verticaal getransporteerd worden (heave). Als de deklaag zeer diffuus is, is er minder geconcentreerde stroming waardoor er een hoog verval nodig is om de benodigde verticale gradiënt te realiseren. Vervolgens moet een diep genoeg gat gevormd worden zodat horizontale pipe vorming onder de dijk kan initiëren. De vraag is dus of een dergelijke situatie bij de norm kan leiden tot piping, of dat hier dusdanig hoog kritiek verval voor nodig is dat het niet realistisch is.

De afmetingen van de wel beïnvloeden de stroomsnelheid van de wel en daarmee het korreltransport. Bij grote wellen zijn stroomsnelheden lager.

Factoren die de waterspanning in het achterland beïnvloeden (knoop 2), zoals de dikte van de Maasafzetting en op welke diepte daaronder minder doorlatende afzettingen aanwezig zijn, en toestroom vanuit hoge gronden, hebben ook effect op heave. Indien het achterland onder water komt te staan, door kwel en toestroom vanuit hoge gronden, vermindert dit het optredend verval (vergelijkbaar aan opkisten).

In een situatie zonder deklaag, of met een uittredepunt in de sloot is deze knoop niet relevant en gaat het proces verder met terugschrijdende erosie (knoop 5).

4.3.5 Knoop 5. Horizontaal zandtransport en pipe vorming

Horizontaal zandtransport treedt op doordat de horizontale hydraulische gradiënt hoog genoeg is om korrels te eroderen. Aan het maaiveld is een zandmeevoerende wel zichtbaar. Wanneer de hydraulische gradiënt vanuit de rivierzijde hoog genoeg, is groeien pipes richting de rivierzijde. Boven de pipe is een cohesieve deklaag nodig anders stort deze in, wat de ontwikkeling van de pipe vertraagt. In situaties zonder deklaag kan een pipe alleen ontstaan en doorgroeien bij de binnenteen van de kering.

Bij signalering van een zandmeevoerende wel bij inspectie kunnen maatregelen worden getroffen indien het risico op piping groot genoeg wordt geacht.

De vergelijkingen voor erosie van korrels in het Sellmeijer zijn afgeleid voor fijnere homogenere zanden dan de meeste Maasafzettingen. Het is aannemelijk dat grind, en grover zand met een bredere korrelsortering (hogere $Cu = d_{60}/d_{10}$) en grotere korreldiameter een hogere weerstand tegen erosie hebben. Kleine schaalproeven laten zien dat dit de weerstand tegen piping met een factor 1.8-5.5 verhoogt (Van Beek, 2019). De oorzaak voor deze sterkte is nog niet goed bekend.

Daarnaast zijn veel van de oudere Maasafzettingen erg oud. Deze kunnen in zeker mate verkit zijn, wat invloed heeft op het losmaken van de korrels (van Staveren, 1995). Ook bij sommige jongere Maasafzettingen is een zekere mate van verkitting mogelijk.

Daar waar dekzand direct onder de deklaag of dijk aanwezig is, vormt dit een locatie waar de kans op horizontaal zandtransport juist groter is door de fijnere korrel en smalle korrelgrootteverdeling. Zeker wanneer hieronder Maasafzettingen met een hogere doorlatendheid aanwezig zijn.

Bij een afwezige of doorlatende deklaag in het achterland zal sprake zijn van minder concentratie van stroming naar de pipe. Hierdoor zal horizontaal zandtransport veelal ook pas optreden bij een verval dat dicht in de buurt licht bij het verval waarbij een pipe naar bovenstrooms door kan groeien (het kritieke verval, dit is in tegenstelling tot in gebieden met een minder doorlatende deklaag waarbij wellen al vormen bij waterstanden die nog beduidend lager dan het kritieke verval). Hoewel het effect van een diffuse of onderbroken deklaag voor Limburg gezien kan worden als mogelijke eenvoudige uitsluitingsgrond voor terugschrijdende erosie blijkt hiervoor geen theoretische basis te zijn (Rosenbrand en van Beek, 2020). Het effect van een zeer doorlatende deklaag op de opbouw van de waterspanningen heeft een sterker effect op het optreden van opbarsten en heave. Daarom ligt het meer voor de hand dat een van die twee mechanismen uit kan worden gesloten (doordat het benodigde verval hiervoor onrealistisch hoog is).

Factoren die de waterspanning in het achterland beïnvloeden (knoop 2), zoals de dikte van de Maasafzetting en op welke diepte daaronder minder doorlatende afzettingen aanwezig zijn, en toestroom vanuit hoge gronden, hebben ook effect op terugschrijdende erosie. Ook de drukval in

het opbarstkanaal, en het eventueel opkisten hiervan heeft effect doordat dit de stroming naar de pipe doet afnemen. Indien het achterland onder water komt te staan, door kwel en toestroom vanuit hoge gronden, vermindert dit het optredend verval (vergelijkbaar aan opkisten).

Indien er een wel ontstaat op enige afstand van de binnenteen van de kering in een situatie zonder deklaag is het onwaarschijnlijk dat deze terug groeit naar de kering. Dat betekent niet dat bij een hogere waterstand er geen wellen dicht bij de dijk kunnen ontstaan. Indien de deklaag relatief zandig is, is de vraag of deze stabiel genoeg is als dak voor de pipe.

4.3.6 Knoop 6. Doorgaande pipe

Als de pipe vormt, kan deze bij gelijkblijvend verval een evenwichtssituatie bereiken, dan groeit de pipe alleen door wanneer de rivierwaterstand toeneemt. Echter in de veelvoorkomende situatie van een doorlatende of afwezige deklaag zal de pipe pas tot ontwikkeling komen bij een verval dat voldoende is om de pipe ook door te laten groeien (het kritieke verval).

De aanwezigheid van drains, kwelschermen of damwanden voorkomt het doorgroeien van de pipe. Instorten van de deklaag kan de pipe ook (tijdelijk) blokkeren waardoor deze een nieuw pad moet zoeken wat het proces vertraagt.

Wanneer het zand in de baan van de pipe een afwisseling van fijnere en grovere lagen bevat, hindert dit het doorgroeien, zowel doordat de totale stroming naar de pipe door fijnere lagen wordt gehinderd, als doordat horizontale gradiënten in grovere lagen lager zijn en korrels dus minder makkelijk losgemaakt worden. Ook kan het langer duren, doordat de pipe een zwakker pad zoekt. Wanneer de diepte van de deklaag helt heeft dit invloed op het korreltransport, wat de pipegroei kan hinderen of vergemakkelijken als de helling over de gehele kwelweglengte gelijk is. Bij kleine schaal afwisseling van de diepte zal dit naar verwachting altijd een positief effect hebben. Heterogeniteit kan zowel invloed hebben op het benodigde verval om de pipe langer te laten worden als op de snelheid waarmee de pipe langer wordt.

In de aanwezigheid van een breed voorland is de vraag waar de pipe kortsluiting zal maken met de rivier. Echter bij een dunne deklaag is de kans groter dat dit nabij de buitenteen gebeurt, doordat er naar verwachting meerdere zwakke plekken met kortsluiting zijn.

4.3.7 Knoop 7. Ruimen, (verbreding en verdieping van de pipe)

Wanneer de pipes aan de rivierzijde kortsluiting maken met de rivier neemt de erosiecapaciteit van het water sterk toe en wordt de pipe verbreed en verdiept (ruimen). Voorwaarde hiervoor is wel dat de waterstand in de rivier hoog blijft. De instroom van water erodeert zand bovenstrooms in de pipe, als dit niet direct afgevoerd wordt kan de pipetijdelijk verstopten totdat het proces weer doorgaat. Zo vergroot de pipe van bovenstrooms naar benedenstrooms.

Het ruimproces wordt kan eventueel worden beïnvloed door het instorten van de kering boven de pipe. Dit kan optreden bij grotere pipes, bijvoorbeeld in grovere watervoerende pakketten. Dat vertraagt of stopt het proces totdat de pipe een andere weg heeft gevonden. Dit wordt mede beïnvloed door de dikte en cohesie van de deklaag en door de opbouw van de dijk zelf.

4.3.8 Knoop 8. Kruinverlaging

De holte onder de dijk leidt tot verzakking van de dijk.

De sterkte en vervormingseigenschappen van de dijk en eventueel aanwezige deklaag beïnvloeden ook de mate van kruinverlaging.

4.3.9 Knoop 9. Maatregelen ineffectief

Wanneer pipingverschijnselen op tijd worden waargenomen en effectieve beheersmaatregelen inzetbaar zijn kan een overstroming worden voorkomen. Indien dat niet het geval is kan bresgroei optreden.

Voor het nemen van maatregelen is detectie nodig om de wellen tijdig te constateren. De frequentie van inspectie beïnvloedt de kans op het tijdig detecteren van wellen, evenals de zichtbaarheid van de verschijnselen, en de hoeveelheid wellen. De inzet van monitoringsequiptment zoals drones, kan de kans op detectie ook verhogen.

Maatregelen, zoals opkisten, die de drukval in de wel verhogen kunnen door de hoge doorlatendheid van het achterland relatief veel effect hebben op het debiet dat naar de pipe stroomt. Om dezelfde reden zal drainage relatief minder effect hebben.

De mogelijkheid tot het nemen van maatregelen wordt beïnvloed door factoren als de aanwezigheid van voldoende materiaal en mensen. Bij extreme situaties is het mogelijk onveilig om maatregelen te treffen. De tijd die beschikbaar is voor het meenemen van maatregelen beïnvloedt de effectiviteit hiervan. Gezien de veelal dunne dekklagen zal veel kwel optreden waardoor inspectie mogelijk bemoeilijkt wordt. Daarnaast zullen wellen pas bij relatief hoge waterstanden vormen, waardoor de tijd voor handelen korter is dan in situaties met een dikke deklaag in het achterland.


4.3.10 Knoop 10. Bresgroei

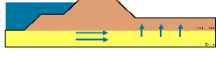
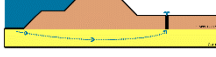
Indien de kruinverlaging zodanig is dat water over de kruin heen stroomt leidt dit tot bresgroei.

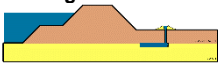

De vervormingen in de dijk die tot bresgroei leiden zijn ook afhankelijk van de opbouw van de dijk, van het materiaal waaruit de dijk bestaat en van de geometrie van de dijk. Bij dijken met een zandkern en kleibekleding zal een kleine vervorming al snel leiden tot erosie van de kern en bresgroei, terwijl een kleidijk meer vervorming kan verdragen. De dikte en cohesie van de deklaag beïnvloeden de deformatie van de dijk. De mate van vervorming die nodig is voor overstroming hangt ook af van de hoogte van de dijk, in relatie tot de buitenwaterstand.

4.4 Overzicht faalpad en belangrijke aspecten

Tabel 4-1 Overzicht faalpad en belangrijke aspecten Limburg

Faalpad	Narratief	Belangrijkste aspecten
<p>1. buitenwaterstand stijgt en waterspanning in het WVP aan de rivierzijde van de kering stijgt</p> 	<p>De rivierwaterstand stijgt. De stroomsnelheid neemt toe. Toename van de waterstand leidt tot toename van waterspanningen in de watervoerende lagen onder de rivier en onder het voorland.</p>	<p><u>Geohydrologische situatie:</u></p> <ul style="list-style-type: none">- netto intredeweerstand (deklaag voorland, inrichting voorland)- bij kort of afwezig voorland doorlatendheid en anisotropie in bovenste WVP- Laagopbouw (dikte, doorlatendheid, en anisotropie en meerlaagsheid in WVP):<ul style="list-style-type: none">- meerlaagsheid door dekzand (minder doorlatend) bovenop (meer doorlatender) Maasafzettingen,- ondiepe aanwezigheid minder doorlatende lagen (formatie van Breda)- insnijden rivier in meer doorlatende Maasafzettingen

Faalpad	Narratief	Belangrijkste aspecten
<p>2. waterspanning WVP aan de polderzijde van de kering stijgt en er ontstaat verticale stroming</p> 	<p>Toename van waterspanningen in watervoerend pakket - voor en onder de dijk - leidt tot verhoging van de stijghoogte aan de binnenzijde van de dijk.</p>	<p><u>Geohydrologische situatie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - leklengte en hydrologische randvoorwaarden achterland (bepaald door de lokale situatie, peilbeheer, grondwaterstand, stijghoogte WVP, toestroom vanuit hoge gronden, mogelijk onder waters staan achterland) - dikte, doorlatendheid, en anisotropie en meerlaagsheid in WVP (knoop 1)
<p>3. opbarsten en geconcentreerde verticale stroming</p> 	<p>De stijghoogte aan de polderzijde is voldoende om de deklaag op te tillen en te scheuren, dit resulteert in een opbarstgat.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - dikte en sterkte (cohesie) van de (intacte) deklaag - gewicht van de deklaag <p><u>Geohydrologische situatie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - doorlatendheid deklaag (en leklengte) - toestroom vanuit hoge gronden (knoop 2) - mogelijk vollopen en onderwater staan achterland (knoop 2) - dikte, doorlatendheid, anisotropie en meerlaagsheid in WVP (knoop 1&2) - intredeweerstand voorland (knoop 1)
<p>4. Heave</p>	<p>Door concentratie van stroming naar het uittrededepunt worden zandkorrels gefluïdiseerd; door hoge verticale stroomsnelheden worden korrels opgetild in het verticale kanaal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - <u>mate van concentratie van stroming naar uittrededepunt (beïnvloed door leklengte, meerdere opbarstgaten/scheuren).</u> - <u>korrelgrootte</u> - <u>afmeting wel</u> <p><u>Geohydrologische situatie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - doorlatendheid deklaag (en leklengte) (knoop 2) - toestroom vanuit hoge gronden (knoop 2) - mogelijk vollopen en onderwater staan achterland (knoop 2) - dikte, doorlatendheid, anisotropie en meerlaagsheid in WVP (knoop 1&2) - intredeweerstand voorland (knoop 1)

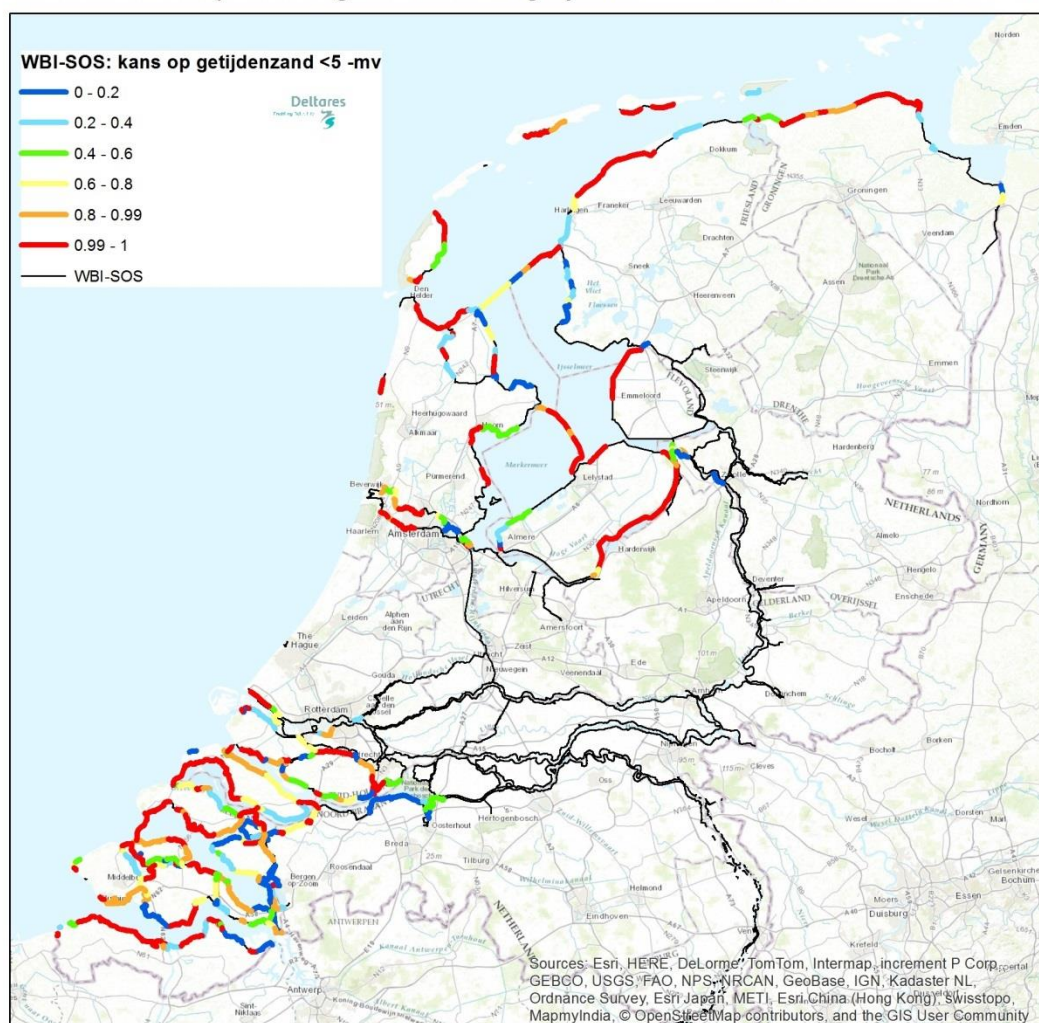
Faalpad	Narratief	Belangrijkste aspecten
<p>5. horizontaal zandtransport en pipe vorming</p> 	<p>Een of meerdere pipes ontstaan doordat de horizontale gradiënten hoog genoeg zijn om korrels te eroderen. Doordat de gradiënt vanuit de rivier zijde hoog is groeien pipes globaal richting de rivier.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - aan/afwezigheid van stabiele deklaag als dak voor pipe bij wellen verder van de kering - mogelijk extra weerstand tegen erosie als gevolg van brede korrelgrootteverdeling en grotere korrelgrootte bij grind (mogelijk groter belang van primaire erosie) - mogelijk extra weerstand tegen erosie door verkitting in oudere Maasafzettingen. -extra weerstand als gevolg van heterogeniteit WVP in de baan van de pipe (opeenvolgende lagen op verschillende schalen, van cm tot dm tot m, met verschillende doorlatendheid, korrelgrootte, of het niet doorlopen van pipinggevoelig zandlichaam. Diepteligging onderkant deklaag). - weerstand in het opbarstkanaal (0,3D regel) wanneer deklaag wel aanwezig is (in combinatie met maatregel opkisten) - wanneer sterke kwel en toestroom vanuit hoge gronden leidt tot het onder water lopen van het maaiveld verlaagt dit het optredende verval (vergelijkbaar met opkisten van een wel of een kwelkade) <p><u>Geohydrologische situatie</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - dikte, doorlatendheid, en anisotropie en meerlaagsheid in WVP (knoop 1&2) - doorlatendheid deklaag voorland (knoop 1) - leklengte achterland & hydrologische randvoorwaarden (knoop 2) beïnvloed de concentratie van stroming naar pipe in 3D
<p>9. maatregelen ineffectief</p> 	<p>De mitigerende maatregelen zijn niet tijdig getroffen, of de mitigerende maatregelen zijn niet effectief.</p>	<p>Hoeveel tijd heb je voor maatregelen? Hierin spelen:</p> <ul style="list-style-type: none"> Tijd tussen optreden en signaleren? Tijd van pipevormingsproces Al dan niet blijven bestaan van pipes tussen opeenvolgende hoogwater situaties Tijd nodig om maatregelen te implementeren <ul style="list-style-type: none"> - Is het mogelijk om risicogestuurde inspectie en maatregelen (bijv. op basis van regionale geohydrologische modellen) uit te werken? - Vertalen van beheermaatregelen (calamiteiten zorg) naar overstromingskans, en hoeveel levert het op? - Moment van waarneming in combinatie met tijdsduur van belasting meenemen bij inschatten faalkans en noodzaak van maatregelen - Inschatten van potentiële effectiviteit van maatregelen? - inspectie t.b.v. noodmaatregelen en t.b.v. evacuatie - Wanneer is het beter om een wel op te kisten, en wanneer is het beter dit juist niet te doen (en eventueel zelfs meerdere ontlast gaten te maken)?

5 Getijdengebied

5.1 Geologie

In Nederland komt onder ongeveer 1000 km primaire waterkering, circa 1/3 van het totaal, getijdenzand voor in de bovenste 5 m (Figuur 5-1). In Friesland en Groningen zijn duidelijk secties zichtbaar waar de kans op getijdenzand veel lager is (blauwe en groene kleuren) of waar het getijdenzand zelf niet aanwezig is, terwijl in Zeeland de kans op getijdenzand onder de meeste keringen zeer hoog is. Ook in Noord-Holland en langs de oostgrens van Flevoland komt veel getijdenzand voor. Op locaties waar de kans op getijdenzand in de bovenste 5 m klein of zelfs nul is, zijn meer kleiige en organische getijdenafzettingen aanwezig.

WBI-SOS - Kans op aanwezigheid Holoceen getijdenzand in de bovenste 5 m - Totaal 970 km



Figuur 5-1 Overzicht van het voorkomen van getijdenafzettingen onder de primaire waterkeringen (gebaseerd op Hijma & Lam, 2015a).

Hoewel zandige getijdenafzettingen dus in een groot deel van Nederland voorkomen zijn er wel enkele verschillen te benoemen tussen de regio's. Deze verschillen zijn te herleiden tot andere ontstaans- en bedijkingsgeschiedenissen. De landschappelijke situatie in Friesland en Groningen is bijvoorbeeld al enkele millennia in hoofdlijnen niet veranderd: een buitenste ring van Waddeneilanden, daarachter getijdenbekkens die richting het vaste land overgaan in

kweldergebieden. Op een zeker moment is men begonnen met dijken bouwen langs de hogere randen van de kweldergebieden en ook land gaan aanwinnen. Dit betekent dat de dijken gebouwd zijn op afzettingen die in een heel rustig milieu achterin getijdenbekkens afgezet zijn. Hierdoor zijn de afzettingen gemiddeld erg slibrijk, afgezien van de locaties waar vroeger grotere getijdengeulen aanwezig waren (bijv. bij de Lauwers en de Middelzee). Hoe anders is de geschiedenis van Zeeland! Zeeland bestond tot de Romeinse tijd uit een groot veengebied, zonder Waddeneilanden, dat via de Schelde afwaterde op zee. In de eeuwen na de start van de jaartelling verdronk Zeeland echter volledig en ontstonden grote getijdengeulen met daartussen eilanden. Deze eilanden werden uiteindelijk bedijkt en dit betekent dat veel dijken langs grote getijdengeulen staan, geulen met veel energie en stroming waardoor de afzettingen zandiger en gemiddeld minder slibrijk zijn dan in Friesland en Groningen. De bedijkingsgeschiedenis heeft ook invloed op de gemiddelde voorlandlengte: in gebieden waar direct langs getijdengeulen de dijken aangelegd zijn is de voorlandlengte vaak zeer kort, terwijl in gebieden waar aan de randen van kwelders is bedijkt de voorlandlengte op kan lopen tot meer dan 1500 m.

Deze verschillende geschiedenissen zijn goed bekend en geïllustreerd middels paleogeografische kaarten (Vos et al., 2018). Dergelijke kaarten, en zeker de meer regionale varianten, bieden veel mogelijkheden om in combinatie met AHN-hoogtebeelden en ondergrondgegevens vast te stellen waar en waar geen zandige getijdenafzettingen verwacht kunnen worden. Binnen het WBI-SOS is hier een eerste aanzet toe gezet, maar er is bij het opstellen van een lokaal SOS nog veel winst te behalen door de SOS-eenheden te bekijken vanuit een gedetailleerde landschappelijke bril, waarbij meer lokale SOS-eenheden onderscheiden kunnen worden. Op die manier kan bijvoorbeeld beter bepaald worden of de afzettingen uit grote getijdengeulafzettingen bestaan of juist uit kleine kwelderkreekafzettingen.

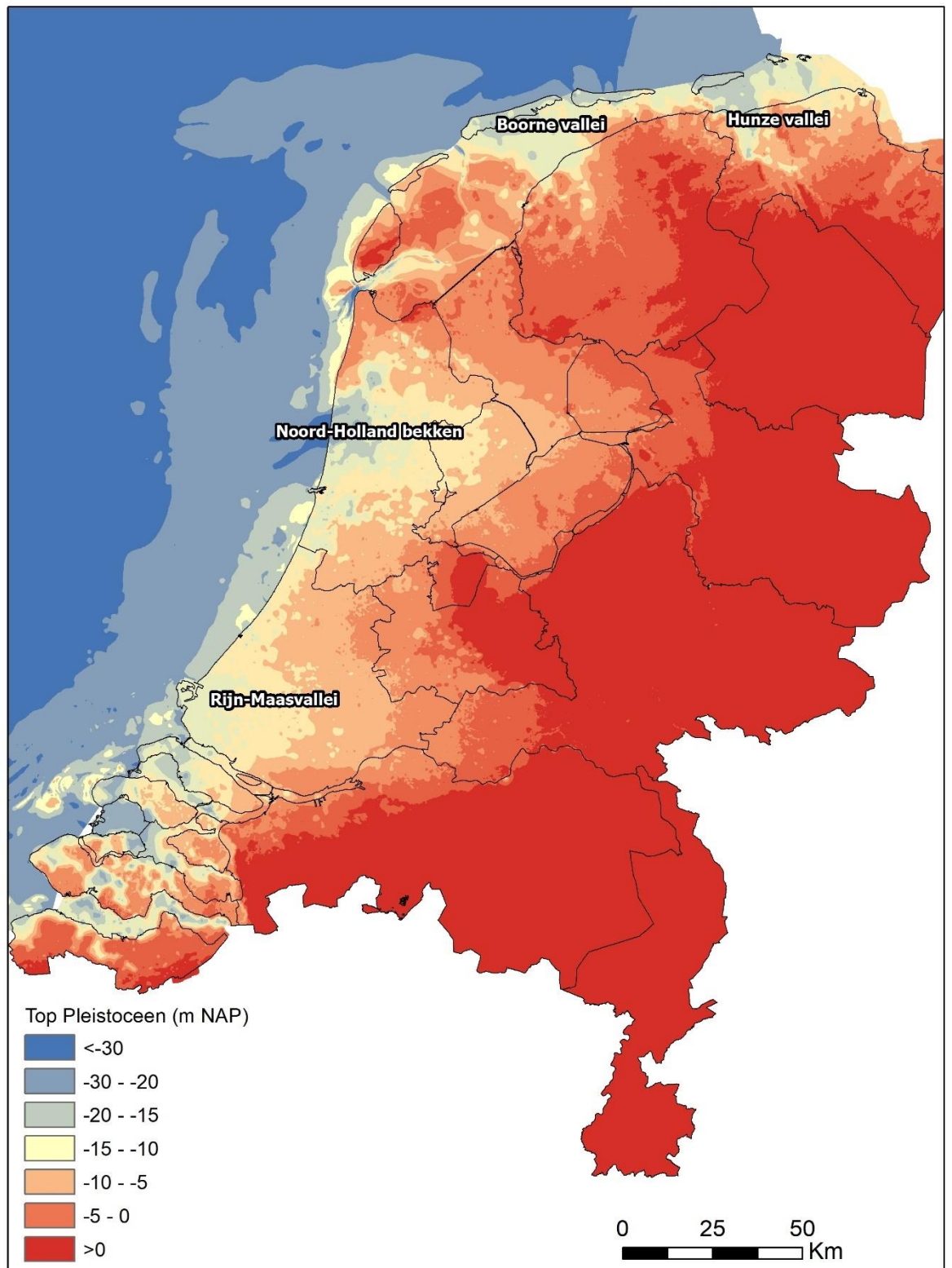
Hieronder worden eerst kort enkele kenmerken van de deklaag en het getijdenzand gegeven, gevolgd door een opsomming van belangrijke aspecten die de weerstand van getijdenzand tegen piping bepalen.

5.2

Deklaag

In het getijdengebied is de deklaag erg variabel, zowel in termen van dikte als van opbouw. Ter plaatse van locaties waar relatief recent getijdengeulen actief zijn geweest kan de deklaag dunner dan 1 m zijn, terwijl direct naast deze geulen de deklaag meer dan 10 m dik kan zijn. Daarnaast wordt de dikte van de deklaag sterk beïnvloed door de diepteligging van het Pleistocene zand: in vrijwel alle gevallen bepaalt deze diepteligging de maximale dikte van de deklaag. En aangezien het getijdengebied loopt van de grens met België tot de grens met Duitsland is er veel variatie in deze diepteligging. Op verschillende plaatsen ligt de top van het Pleistoceen dicht bij het maaiveld, terwijl er ook locaties zijn waar het Pleistoceen meer dan 20 m diep begint (Figuur 5-2). Op verschillende locaties loopt de deklaag door tot het Pleistoceen.

Op locaties waar getijdengeulafzettingen binnen 1 m onder het maaiveld beginnen bestaat de deklaag meestal uit vrij zandige en siltige klei met nog een relatief hoge doorlatendheid. Tussen de geulen in komt veel zwaardere klei voor en wordt ook organische klei en veen aangetroffen in de deklaag. Het is mogelijk dat deklagen die vooral uit veen bestaan op een andere manier opbarsten dan deklagen die vooral uit klei bestaan.



Figuur 5-2 Kaart met de diepteligging van de top van het pleistocene oppervlak. De afstand tussen de top van het Pleistoceen en het maaiveld is een goede maat voor de maximale dikte van de deklaag.

Watervoerend pakket

De geologie en het afzettingmilieu zijn bepalend voor de eigenschappen van het watervoerend pakket. De zandige afzettingen die het meest in het getijdengebied aangetroffen worden zijn uitgebreid beschreven in Hijma & Oost (2018). Ze kunnen onderverdeeld worden in zandige geulen en plaatafzettingen. Deze worden hieronder kort toegelicht. Daarna wordt ingegaan op de specifieke eigenschappen van het getijdenzand die sterk bepalend zijn voor de weerstand tegen piping.

Getijdengeulafzettingen

Getijdengeulen in de ondergrond zijn vaak zandig ingevuld en kunnen direct onder de dijk aanwezig zijn. De korrelgrootte van getijdenzand is kleiner dan die van rivierzand, met een gemiddelde mediane korrelgrootte van 180 µm met een minimum van 90 µm en een maximum van 500 µm (Van Beek et al. 2016).

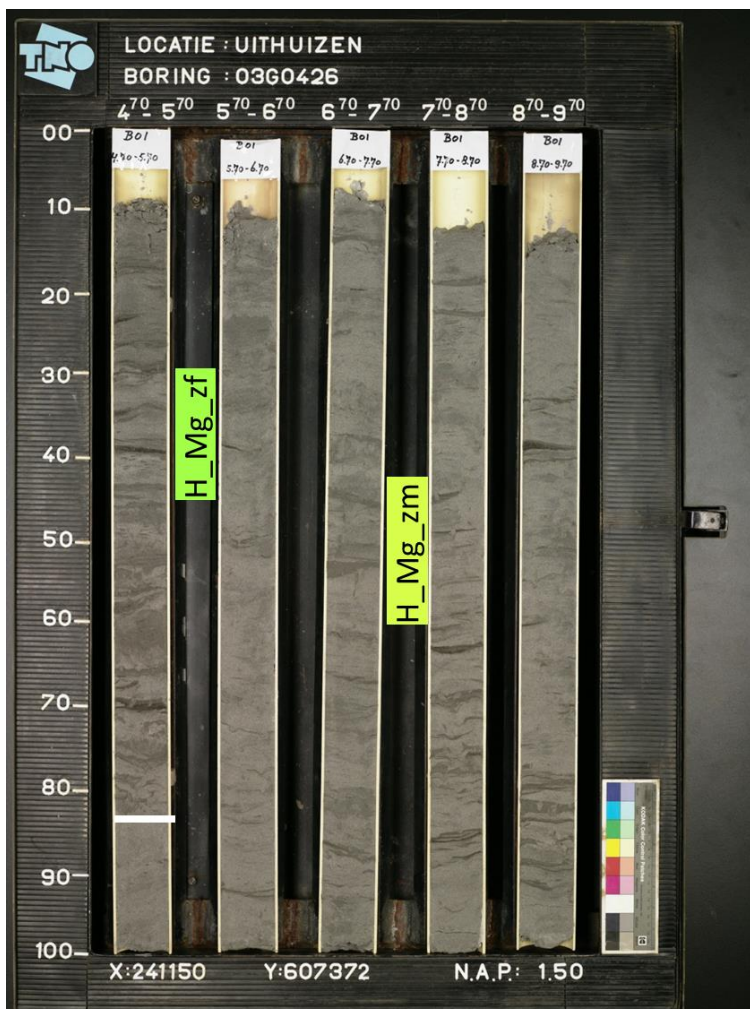
Er worden grofweg 3 verschillende SOS-eenheden onderscheiden binnen getijdengeulafzettingen:

- matig fijn tot zeer grof (estuariën) getijdengeulzand (H_Mg_zm, P_Mg_zm, H_Eg_zm);
- uiterst fijn tot matig fijn (estuariën) getijdengeulzand (H_Eg_k&z);
- uiterst fijn tot matig fijn getijdengeulzand met dunne klei- en siltlaagjes (H_Mg_zf, H_Mg_zk, P_Mg_zk, H_Eg_k&z).

In deze eenheden kunnen mm-cm dunne en smalle (<1 m) klei- en siltlaagjes voorkomen, waarbij het gehalte aan fijne laagjes zeer variabel is. De afzettingen zijn zeer los tot los gepakt.

Estuariene afzettingen komen voor in gebieden waar de rivier de zee ontmoet. Deze eenheden (H_Eg_*) worden vooral onderscheiden in het benedenrivierengebied en de oudere getijdenafzettingen (P_Mg_*) komen nergens direct onder de deklaag voor. Figuur 5-3 laat een boorfoto zien van een locatie bij Vijfhuizen, waarop zowel fijne (H_Mg_zf) als wat grovere getijdengeulafzettingen (H_Mg_zm) te zien zijn. Het aantal kleilaagjes is sterk wisselend, maar ze komen duidelijk veelvuldig voor.

Het wordt kortsluiting genoemd als het bovenste zandpakket in contact staat met het Pleistocene watervoerende pakket, en men zegt ook wel dat de getijdenafzettingen dan gefundeerd liggen in het Pleistoceen. **Hoewel het aannemelijk lijkt dat in gebieden waar het Pleistoceen relatief ondiep aanwezig is, de kans op kortsluiting het grootst is, is dit niet per sé het geval. Deze gebieden lagen namelijk vrijwel altijd aan de randen van de getijdenbekkens, op locaties waar de getijdengeulen smal en ondiep zijn. De kans op kortsluiting volgt dus uit een combinatie van de dikte van getijdenzandafzettingen en de diepteligging van het Pleistoceen. De dikte van de getijdenzandafzettingen is overigens sterk variabel: de grootste getijdengeulen kunnen voor meer dan 30 m uit getijdenzand bestaan; terwijl voor de kleinste getijdengeulen dit minder dan 1 m kan zijn. Ook de breedte van de geulen is sterk variabel: de grotere getijdengeulen kunnen meer dan 3 km breed zijn, terwijl de kleinere geulen smaller dan 10 m kunnen zijn.** De getijdenzandpakketten zullen zeker niet uniform opgebouwd zijn en er is relatief veel grondonderzoek nodig om de interne opbouw gedetailleerd te beschrijven. In rapporten rondom het opstellen van WBI-SOS wordt ingegaan op welk inzicht verkregen kan worden bij hart-op-hart afstanden tussen boringen/sonderingen van respectievelijk 200, 100, 50 en 25 m (Hijma & Lam, 2015b; Kruse & Hijma, 2015).



Figuur 5-3 Boring 03G0426, met een indeling in SOS-eenheden.

Getijdenplaatafzettingen

De zandige getijdenplaten liggen vaak langs de flanken van getijdengeulen of getijdenbekkens. In de Waddenzee liggen ze ook vaak tussen de getijdengeulen in. Ze worden gevormd in een sub-tot intergetijdengebied (Van Beek et al. 2016). Een subgetijdengebied valt nooit droog, terwijl een intergetijdengebied bij eb wel droogt valt. Er worden 2 SOS-eenheden onderscheiden binnen zandige getijdenplaatafzettingen:

- zandige getijdenplaat-afzettingen met weinig klei (H_Mp_zf);
- afzettingen van kleine getijdenplaat- en kweldergeulen met een afwisseling van zand en klei (H_Mkw_k&z).

Deze laatste zijn al aangemerkt als niet pipinggevoelig en kunnen daarom tot de deklaag gerekend worden (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017). Doordat de platen regelmatig droog staan en ook onderhevig zijn aan golfwerking, is de pakking soms aanzienlijk minder los dan bij getijdengeulen. Getijdenplaatafzettingen bestaan vaak uit zeer fijn zand, met een gemiddelde mediane korrelgrootte van ongeveer 90 μm , met een minimum van 70 en een maximum van 130 μm (Van Beek et al. 2016). **In tegenstelling tot de getijdengeulen, is het pakket zandige afzettingen vaak hooguit enkele meters dik.** De platen kunnen wel over grote afstanden aaneengesloten voorkomen. **De getijdenplaatafzettingen zijn vaak gelaagd op mm-schaal, met een afwisseling van klei- en zandlagen.** Dit is het gevolg van een afwisseling in energetische condities door het optreden van eb en vloed: afzetting van zand of erosie tijdens hoge energetische condities en afzetting van fijn materiaal, en daarmee leidend tot gelaagdheid,

tijdens lage energetische condities. **De lengte van de kleilagen is vaak aanzienlijk langer dan bij getijdengeulen.**

Belangrijke eigenschappen getijdenafzettingen

Er is de laatste jaren veel onderzoek gedaan naar piping in getijdenafzettingen (Hijma & Oost, 2018; Fugro, 2019; Hijma, 2019) en er worden verschillende veldproeven voorbereid. Op basis van deze onderzoeken worden vijf belangrijke aspecten van getijdenafzettingen onderscheiden.:

1. Meerlaagsheid
2. Anisotropie in doorlatendheid
3. Hoog percentage fijne fractie
4. Cohesie
5. Doolhof structuur

1. Meerlaagsheid

Er is sprake van meerlaagsheid als verschillende typen getijdenzand op elkaar gestapeld liggen. Dit komt met name bij getijdenplatafzettingen veel voor.

2. Anisotropie in doorlatendheid

De meeste typen afzettingen zijn enigszins anisotroop (Van Asselen et al., 2018). Voor getijdenafzettingen wordt in Van Asselen et al. (2018) een range van 1-8 gegeven, waarbij de laagste waardes gebaseerd zijn op doorlatendheidstesten op boorkernen. Inmiddels is duidelijk dat deze meettechniek geen representatieve, maar te lage waardes geeft (Fugro, 2019). De laatste paar jaar wordt steeds vaker de anisotropie *in situ* gemeten met de HPT-AMPT techniek van Fugro. De afgeleide anisotropiewaarden zijn sterk variabel en gecorreleerd aan de hoeveelheid kleilaagjes: hoe meer kleilaagjes, hoe meer anisotropie. Voor zand met relatief weinig kleilaagjes worden waardes tussen 2-20 gemeten, met een gemiddelde van 7 à 8. In pakketten met veel kleilaagjes worden waardes tot 80 gemeten en kunnen gemiddelde waardes ruim boven de 10 liggen. De HPT-AMPT techniek is nog relatief nieuw en het aantal nieuwe metingen neemt sterk toe. In 2020 zullen de bestaande meetresultaten, voor alle typen afzettingen, nader geanalyseerd worden.

3. Hoog percentage fijne fractie

In zandige getijdenafzettingen komt meestal een aanzienlijk fijne fractie voor. Lutumpercentage variëren hierbij tussen 0-8%, maar schommelen meestal tussen de 1-3%. Percentages silt zijn hoger en variëren tussen enkele procenten tot wel 40%. In de meeste gevallen gaat het om circa 5-30%.

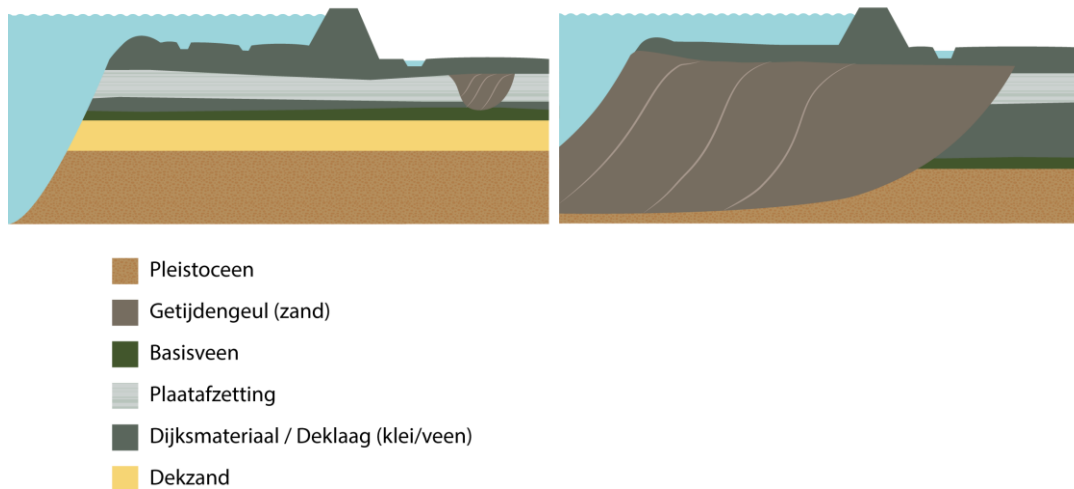
4. Cohesie

Een recent afstudeeronderzoek heeft uitgebreid gekeken naar de invloed van cohesie op de weerstand tegen piping in getijdenzand (Methorst, 2020). Hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen fysische cohesie en biologische cohesie, waarbij vooral biologische cohesie een rol speelt. Deze biologische cohesie is het gevolg van de aanwezigheid van *Extracellular Polymeric Substances (EPS)*, een stof die tot verkleefing leidt waardoor de korrels minder snel in beweging komen. Een goede maat voor de hoeveelheid EPS is chlorofyll-a.

5. Doolhofstructuur

Complexe structuren waarlangs of onderdoor een erosiepijp dient te groeien, met name door de aanwezigheid van dunne kleilaagjes. Dit zal tot vertraging en vergrote weerstand leiden. Dit hangt wel sterk af van de lengte/breedte van de kleilaagjes. In ontsluitingen is bijvoorbeeld te zien dat deze laagjes soms vrij kort zijn, hooguit enkele meters en dan kunnen pipes er wellicht vrij gemakkelijk omheen groeien.

Typisch voorkomende afzettingen zijn in Figuur 2-5 samengevat, waarbij opgemerkt wordt dat er veel variatie is in de ondergrond in het getijdengebied.



Figuur 5-4 Typische bodemopbouw in het getijdengebied. Links deklaag met getijdenplaat afzettingen met een kleinere getijdengeul binnendijs. In het voorland kunnen kwelders aanwezig zijn. Rechts een grotere getijdengeul onder het voorland en de dijk, die zeer diep kunnen zijn: de geul snijdt in het Pleistocene zand in. Het Pleistocene zand kan diep of ondiep liggen, afhankelijk van de locatie.

5.4 Hydraulische belasting

Getijdenafzettingen komen met name voor onder keringen langs de zee en estuaria. Het betreft de Hollandse kust, de Westerschelde, de Oosterschelde en de Waddenzee. Ook merengebied en overgangsgebied komen deze afzettingen voor (Figuur 4-1). In onderstaande alinea's worden echter alleen de kenmerken van hydraulische belastingen van de eerstgenoemde watersystemen beschreven. Daarbij wordt alleen ingegaan op het waterstandsverloop omdat golven voor het optreden van piping niet relevant zijn.

Twee belasting componenten leiden langs kust en in estuaria tot hoge waterstanden. Deze componenten zijn: stormopzet veroorzaakt door storm (intensiteit en richting) en astronomisch getij. Het tijdsverloop van deze twee componenten zijn dan bepalend voor het tijdsverloop van de waterstand. Afhankelijk van locatie kan één van deze componenten in meer of mindere mate bijdragen aan hoge waterstanden.

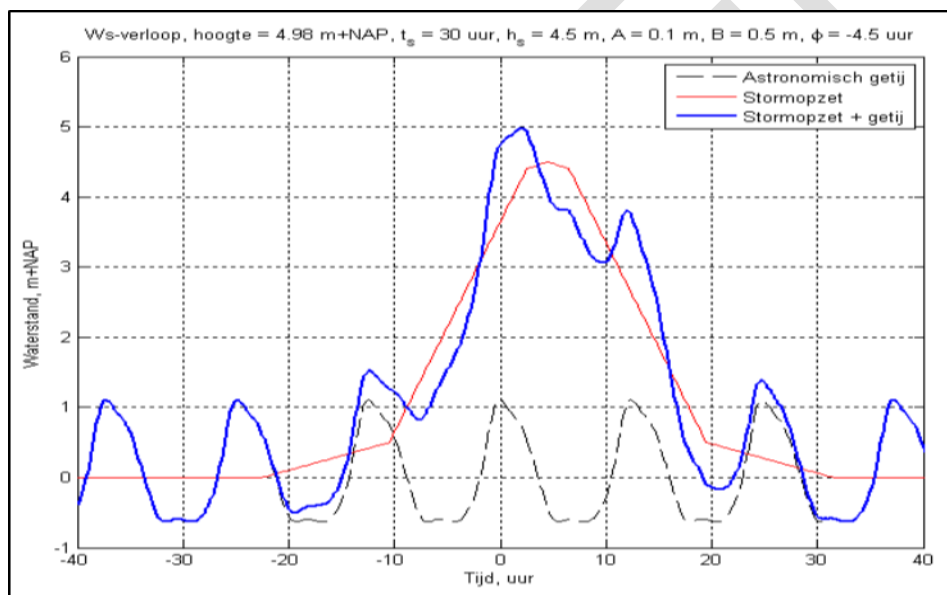
Stormopzetten langs de Nederlandse kust zijn het gevolg van windopstuwung tijdens stormen. Hoewel deze zin de essentie van het optreden van stormopzetten inderdaad weergeeft, is het verschijnsel in de praktijk toch erg complex. We zien dat al aan de verschijningsvormen van de stormopzetten. Bij een zelfde storm is het verloop van de opzetkromme en daarmee de opzetduur per locatie sterk verschillend. Ook de piekwaardes van de opzet verschillen, en het tijdstip van de piek verschilt eveneens. De vorm van de kromme, de opzetduur, en waarde en tijdstip van de maximumopzet zullen voor een andere storm vaak heel anders zijn. De stormramp van 1953 heeft bijvoorbeeld aanleiding gegeven tot de hoogste hoogwaterstanden in Vlissingen, Hoek van Holland en Den Helder na 1900, maar in Delfzijl komt hij niet in de lijst met 50 hoogste waterstanden sinds 1900 voor. De beruchte "Hamburg-storm" van 16 februari 1962 heeft hoge waterstanden langs de noordelijke kust (Den Helder, Harlingen, Delfzijl), maar komt in de rijtjes van hoogste 50 waterstanden in de westelijke hoofdstations niet voor.

Het verloop van een stormopzet in Nederland laat zich beschrijven met een trapezium. De basis van het trapezium, is afhankelijk van de locatie tussen 36 en 44 uur. De top bedraagt 2 tot 4 uur.

De astronomische getijcyclus bedraagt voor de Nederlandse kust ca. 12 uur en 25 minuten. Astronomisch getij heeft weliswaar een regelmatig patroon maar er kunnen wel enige verschillen ontstaan in onder andere de hoogte van de getijamplitude. Verder is het verloop van het astronomisch getij sterk afhankelijk van plaats omdat het getij bepaald wordt door veel factoren, waaronder waterdiepte en reflectie/buiging van golven. De tijden waarop hoogwater en laagwater vallen op verschillende plaatsen langs de Nederlandse kust verschillen dan ook sterk. Het getij plant zich in bijna twaalf uur voort van zuidwesten naar noordoosten van het land. Ook de getijamplitude verschilt per plaats. Het getijverschil (verschil tussen hoogwater en laagwater) is het grootst in Zeeland (Vlissingen). Vanaf dat punt neemt het in de noordelijke richting geleidelijk af, tot Den Helder; vanaf Den Helder neemt het in de oostelijke richting weer toe.

Waterdiepte, de vorm van de kust en de uitmonding van rivieren hebben invloed op het gedrag van het getij. De astronomische getijcyclus van 12 uur en 25 minuten blijft hetzelfde, maar op sommige plekken kan het door deze invloeden 2 keer zo lang eb of vloed zijn. Zo is er in Hoek van Holland sprake van een dubbel laagwater bij springtij en komen in Den Helder dubbele hoogwaters voor.

De stormopzet als gevolg van (westelijke tot noordwestelijke) stormen bepaalt, samen met het astronomische getij, het waterstandsverloop langs de kust. Het faseverschil tussen de top van de stormopzet en de top van het astronomische getij speelt hierbij ook een rol. Een voorbeeld van een extreem waterstandsverloop is weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 5-5 Waterstandsverloop Hoek van Holland behorende bij een waterstand van 5.0 m (bron (Chbab, 2012))

5.5 Narratief

In het narratief wordt het gehele faalpad geschetst en de voorwaarden beschreven voor een overstroming door piping. Het fysische proces van iedere knoop wordt kort toegelicht en vervolgens worden de kenmerkende aspecten van het gebied die het optreden van het betreffende mechanisme sterk kunnen beïnvloeden in *italics* uitgelicht. Een samenvatting van de meest belangrijke aspecten van het gebied volgt bij het 'Overzicht van het faalpad en belangrijke aspecten'.

5.5.1 Knoop 1. Buitenwaterstand stijgt en waterspanning in het WVP aan de rivierzijde van de kering stijgt

De waterstand stijgt onder invloed van een storm en getij. Voor piping is de golfbelasting minder van belang dan de waterstand zelf. De relatieve invloed van de twee componenten kan lokaal sterk verschillen. De verhoging van de waterstand ten gevolge van een storm kan beschreven worden met een trapezium met een basis van ca. 36-44 uur en een top van 2-4 uur. Een getijdencyclus bedraagt 12 uur en 25 minuten, maar wordt beïnvloed door waterdiepte, de vorm van de kust en de uitmonding van rivieren. Hierdoor kunnen dubbele hoogwaters voorkomen.

De duur van een hoogwater kan sterk variëren afhankelijk van de oorzaak van de toename, storm of getij, en de lokale karakteristieken die de toename beïnvloeden. Echter de maximale duur is in de orde van 3-4 dagen.

De toename van de waterstand leidt tot toename van waterspanning in de watervoerende lagen. De toename wordt sterk beïnvloed door de geohydrologische eigenschappen van het voorland en het WVP.

In Friesland en Groningen zijn veelal kwelders aanwezig in het voorland. Deze kunnen een lengte tot 1500 m hebben. De hoogte van het voorland beïnvloedt wanneer het voorland onderstroomt. Daar waar een kleiige deklaag aanwezig is buitendijks remt deze de toename van de waterspanning sterk. De dikte en doorlatendheid van de deklaag beïnvloeden de toename van de waterspanning door de intredeweerstand. De deklaagdikte kan op korte afstanden sterk variëren, boven recent actieve getijdengeulen kan deze dunner dan 1 m zijn terwijl deze direct daarnaast > 10 m dik kan zijn. Daar waar de getijdengeulafzettingen binnen 1 m onder het maaiveld beginnen is de deklaag veelal ook siltiger en deze heeft een hogere doorlatendheid.

In Zeeland zijn dijken veelal langs grote getijdengeulen gebouwd waardoor weinig voorland aanwezig is. De toename van de waterspanning in het watervoerend pakket zal hier sterker beïnvloed worden door de eigenschappen van het WVP (anisotropie en doorlatendheid).

Getijdenafzettingen kunnen bestaan uit getijdenzanden en kleigere of organische getijdenafzettingen. Piping kan alleen in de zandige afzettingen optreden. Bij getijdenzanden wordt onderscheid gemaakt tussen getijdengeulafzettingen en getijdenplaatafzettingen. Die eersten hebben veelal slechts dunne klei en siltlaagjes, en zijn los gepakt. De afmetingen kunnen variëren dieptes van <1 m tot >30 m en breedtes van <10 m tot >3 km.

Getijdenplaatafzettingen bestaan veelal uit een afwisseling van zand en klei met een gelaagdheid op de mm schaal, de lengte van de kleilagen is aanzienlijk langer dan bij getijdengeulen. Sommige getijdenplaatafzettingen bevatten zo veel klei dat deze als deklaag kunnen worden gerekend. Getijdenplaatafzettingen kunnen over grote afstanden aaneengesloten voorkomen maar zijn vaak slechts enkele meters dik.

Door de grotere korrels en het lagere gehalte aan fijne fractie zullen getijdengeulafzettingen in het algemeen meer doorlatend zijn dan getijdenplaatafzettingen en zullen hierin de waterspanningen meer toenemen als gevolg van hoogwater. De mate van anisotropie is naar verwachting ook wat lager in geulafzettingen dan in plaatafzettingen, waardoor de waterspanning ook sterker toeneemt.

De toename van de waterspanningen hangt hiermee af van de laagopbouw en de architectuur van het WVP: meerlaagsheid, of het bovenste (Holocene) WVP in contact staat met het Pleistocene WVP, kortsluiting. Of dit het geval is hangt af van de diepteligging van het Pleistoceen, en de dikte van de getijdenzandafzetting. Getijdengeulafzettingen reiken regelmatig tot in het Pleistoceen, getijdenplaatafzettingen vrijwel nooit.

5.5.2 **Knoop 2. Waterspanning WVP aan de polderzijde van de kering stijgt en er ontstaat verticale stroming**

Toename van waterspanningen in WVP - voor en onder de dijk - leidt tot verhoging van de stijghoogte aan de binnenzijde van de dijk. De mate waarin de stijghoogte toeneemt hangt af van de eigenschappen van het WVP, de eigenschappen van de deklaag aan de binnenzijde en de geohydrologische situatie binnendijs. Door de hogere stijghoogte ontstaat een verticale stroming door de deklaag welke leidt tot kwel. Aan de binnenzijde van de dijk ontstaan natte plekken.

De dikte en doorlatendheid van de deklaag in het achterland beïnvloeden de opbouw van de waterspanning onder de deklaag. Een dikke ondoorlatende deklaag zal enerzijds tot hoge waterspanningen leiden doordat er weinig lek naar het achterland is. Anderzijds kan door berging in de klei (of het veen) de toename van de waterstand gedempt worden.

Zoals bij knoop 1 vermeld zijn deklaag diktes sterk variabel en kan boven recent actieve getijdengeulen lokaal een relatief dunne doorlatende deklaag aanwezig zijn. Hierdoor zal meer kwel naar het achterland optreden. Echter, de hogere doorlatendheid van de getijdengeulen kan ook leiden tot een sterkere toename in de waterspanning in knoop 1.

De laagopbouw en de doorlatendheidseigenschappen van het WVP zoals genoemd in knoop 1 beïnvloeden ook de toename van waterspanning in het achterland als gevolg van een hogere waterspanning buitenwaarts. Een dunner WVP, met lagere doorlatendheid en hogere anisotropie factor zoals bijvoorbeeld het geval kan zijn bij getijdenplaatafzettingen zal de toename van waterspanningen binnendijs sterk afremmen. Bij getijdengeulen zorgt de relatief hoge doorlatendheid voor meer stroming, echter de afmetingen van de geul, of en hoever deze doorloopt in het achterland, en eventuele kortsluiting met het Pleistocene zandpakket spelen een belangrijke rol. In alle gevallen zal de doorlatendheid van het getijdenezand lager zijn dan van rivierzand.

5.5.3 **Knoop 3. Opbarsten en geconcentreerde verticale stroming**

Het vervolg van het proces is afhankelijk van de aanwezigheid en eigenschappen van de binnendijsse deklaag.

Onderscheid wordt gemaakt tussen:

- Een dikke deklaag.
*Deklagen met een dikte van meer dan 10 m kunnen in het getijdengebied voorkomen. Het is onwaarschijnlijk dat deze op zullen barsten.
De deklaag dikte kan lokaal sterk variabel zijn (zie knoop 1 & 2).*
- Deklaag aanwezig die tot enkele meters dik is (maar waarschijnlijk minder dan 5 m) zonder gaten of sloten die door de gehele dikte van de deklaag snijden. Bij deze deklaag zorgt toename van de stijghoogte voor opdrijven van de deklaag. Afhankelijk van de eigenschappen kan de deklaag scheuren waardoor verticale stroming geconcentreerd optreedt. Deze is zichtbaar als een (schone) wel. Opbarsten kan op één of op meerdere locaties optreden. Het opbarsten zorgt voor een uitredepunt, dat nodig is voor het verdere piping proces.

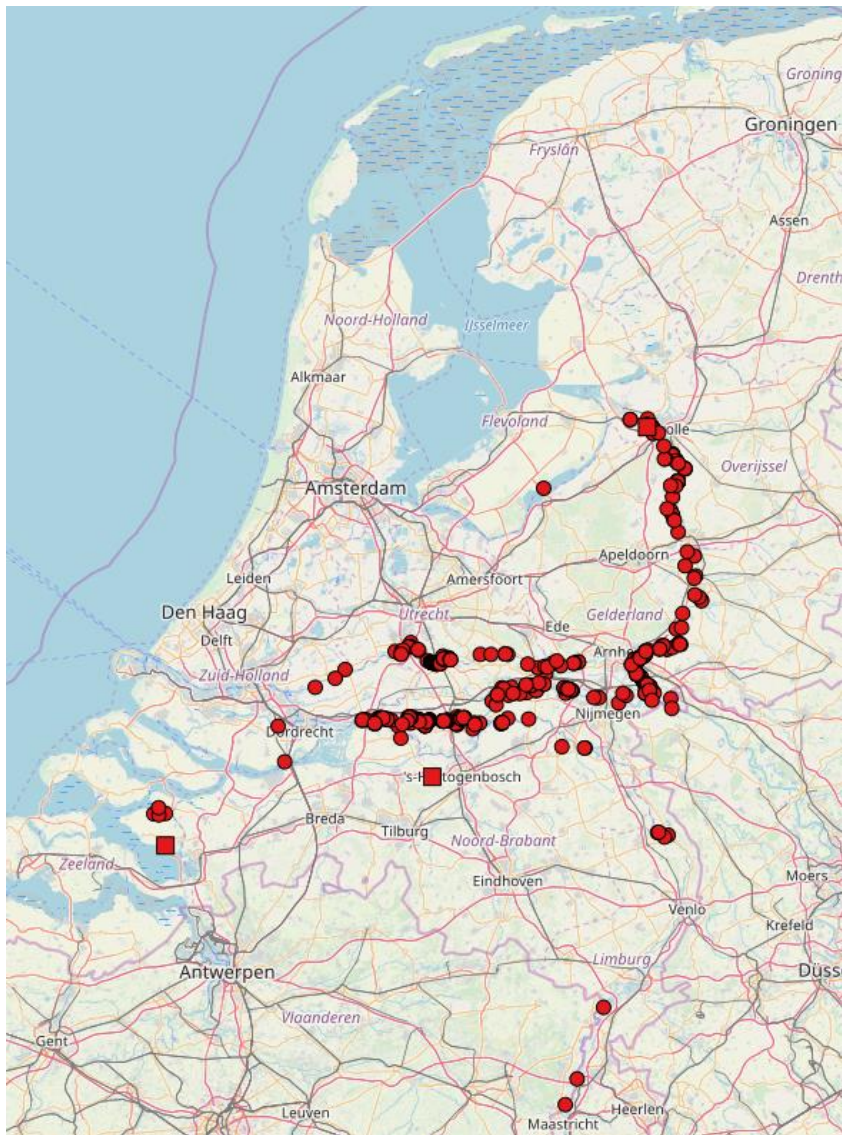
De deklaag dikte kan lokaal sterk variëren. Wanneer lokaal een dunnere deklaag aanwezig is, bijvoorbeeld boven een recent actieve getijdengeul, kan de dikkere deklaag daarnaast of in het achterland tot een sterke mate van concentratie van stroming naar de wel leiden. Dit zal ook het geval zijn als een geul doodloopt in het achterland. Wellen kunnen dan verder van de kering ontstaan. De toestroom naar de wel wordt dan ook beïnvloed door de architectuur van het watervoerend pakket (geul afmetingen, meerlaagsheid, kortsluiting, zie ook knopen 1 en 2). De concentratie van stroming bij grotere of gefundeerde geulen zal relatief snel tot wellen leiden,

die behoorlijke debieten kunnen hebben en zand mee kunnen nemen, terwijl dit bij kleinere geulen minder het geval zal zijn (zie ook knoop 4 en 6).

Op locaties waar de deklaag bestaat uit getijdenafzettingen met een afwisseling van klei en zandlaagjes is de vraag of de waterspanning hieronder voldoende toe kan nemen voor opbarsten, hoe een dergelijke deklaag opbarst, en of een opbarstkanaal stabiel blijft. Als er geen sprake is van opbarsten kunnen vervolgstappen niet optreden.

Ook kan het voorkomen dat deklagen vooral uit veen bestaan, waardoor deze op een andere manier opbarsten dan deklagen die vooral uit klei bestaan.

Ondanks dat getijdenzand onder een groot deel van de keringen voorkomt, zijn er slechts weinig observaties van zandmeevoerende wellen bekend (Hijma, 2018). Op verschillende locaties in het westelijke benedenrivierengebied is onderzoek gedaan naar waarom daar nog wel zandmeevoerende wellen voorkomen. In de meeste gevallen is het voorkomen te koppelen aan locaties waar het getijdenzand in contact staat met het Pleistocene watervoerende pakket (zie ook knoop 1) en/of locaties waar het zandpakket naast de dijk snel ophoudt en er door opstuwning zandmeevoerende wellen kunnen ontstaan (knoop2) (Hijma, 2018).



Figuur 5-6 Kaart met observaties van zandmeevoerende wellen (cirkels) en dijkdoorbraaklocaties die aan piping gekoppeld worden (vierkantjes). Zie ook: <https://www.pipingdb-rws-coe.nl/fieldobs/>

5.5.4 Knoop 4. Heave

Stroming concentreert zich naar het uittredepunt. Door concentratie van stroming naar het uittredepunt, neemt de gradiënt in het zand toe, en worden zandkorrels gefluïdiseerd. Door hoge verticale stroomsnelheden in het verticale kanaal worden korrels opgetild. Het gefluïdiseerde zand vult het verticale kanaal. Wanneer de stroomsnelheid hoog genoeg is kunnen de korrels worden getransporteerd naar het maaiveld.

Wanneer de suspensie van korrels in het gat een evenwicht bereikt met de stroomsnelheid resulteert de suspensie in een drukval in de wel, waardoor de drukval over het watervoerende pakket afneemt. Bij hogere stroomsnelheden worden de korrels uit de wel weggespoeld. Als er niet meer zand geërodeerd wordt kan de wel ook alleen water meevoeren ('kokende' wel). De drukval in de wel is nagenoeg nul en draagt niet bij aan de drukval over het pakket.

Met name bij een deklaag met veel organisch materiaal (veen) is het mogelijk dat heave een bepalendere rol speelt dan opbarsten vanwege het lage volumiek gewicht van veen. Hier staat tegenover dat veenpakketten gestructureerd zijn en in natte omstandigheden niet snel scheuren,

maar eerder als geheel opbollen. Er zijn echter weinig voorbeelden bekend van zandmeevoerende wellen onder een venige deklaag (zie ook knoop 3).

In situaties waar de deklaag siltig en relatief dun is en het watervoerend pakket ook een lage doorlatendheid heeft is het mogelijk dat het contrast tussen de doorlatendheid van de deklaag en het watervoerend pakket te klein is voor voldoende concentratie van stroming voor heave. Dunnere siltigere deklaagen komen eerder voor boven recent actieve getijdengeulen dan boven zandige getijdenplaat afzettingen. Dan zijn ook de afmetingen van de geul, en het al dan niet in contact staan met het Pleistocene zand, van belang om na te gaan of er voldoende debiet naar een wel stroomt voor verticaal korreltransport.

5.5.5 **Knoop 5. Horizontaal zandtransport en pipe vorming**

Horizontaal zandtransport treedt op doordat de horizontale hydraulische gradiënt hoog genoeg is om korrels te eroderen. Aan het maaiveld is een zandmeevoerende wel zichtbaar. Wanneer de hydraulische gradiënt vanuit de rivierzijde hoog genoeg, is groeien pipes richting de rivierzijde. Boven de pipe is een cohesieve deklaag nodig anders stort deze in, wat de ontwikkeling van de pipe vertraagt. In situaties zonder deklaag kan een pipe alleen ontstaan en doorgroeien wanneer een geconcentreerde uitstroom bij de binnenteen van de kering ontstaat. De duur van de belasting speelt ook een rol, de waterstand moet lang genoeg hoog genoeg zijn voor pipevorming.

Wanneer de deklaag en/of het WVP bestaan uit horizontale dunne lagen zand en klei (getijdenplaatafzettingen) is het de vraag of en waar de pipe ontstaat. Het is namelijk niet ondenkbaar dat het pipingproces in het bepaalde typen zandige getijdenafzettingen, bijvoorbeeld bij veel klei-zand afwisselingen, fenomenologisch anders verloopt waardoor bestaande modellen niet meer van toepassing zijn.

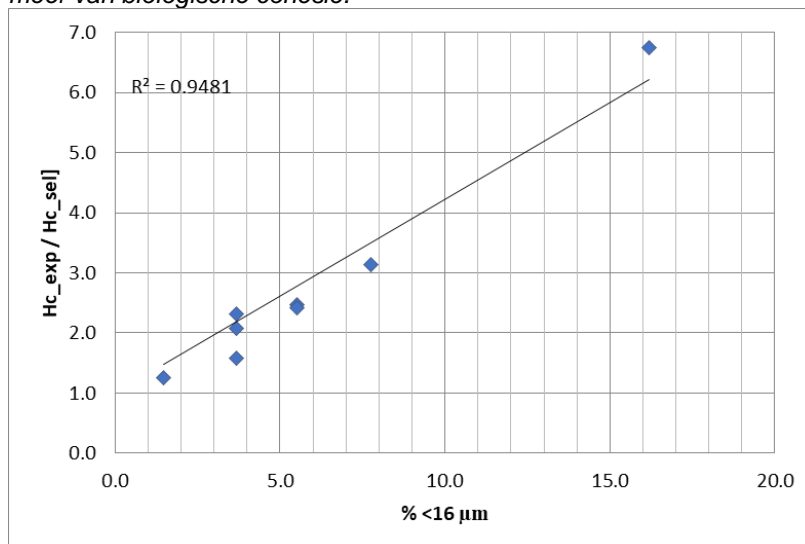
*Bij **zandige getijdenplaatafzettingen** leiden de lage doorlatendheid van het WVP, en de hoge anisotropie daarvan, en de kleine dikte van de pakketten (orde enkele meters) tot minder (concentratie van) stroming naar de pipe. Daarnaast zal de aanwezigheid van dunne kleilaagjes in het zandpakket tot grotere weerstand leiden doordat de pipe hieromheen moet groeien. Dit effect is wel afhankelijk van de concentratie van deze laagjes en de afmetingen daarvan, en zal bij getijdenplaatafzettingen veelal meer effect hebben dan bij getijdengeulen. Ook de extra weerstand tegen erosie die gecorreleerd is aan de aanwezigheid van fines (zoals hieronder nader toegelicht) leidt tot een lagere kans op piping.*

*In **zandige getijdengeulafzettingen** is de doorlatendheid van het watervoerende pakket hoger en zijn minder doorlopende laagjes klei te verwachten dan in zandige getijdenplaatafzettingen waardoor de kans op terugschrijdende erosie hierin groter is. De pakkingsdichtheid beïnvloedt ook de weerstand tegen erosie, een lagere pakkingsdichtheid, zoals in getijdengeulen kan worden verwacht, is erosiegevoeliger. De deklaag boven recent actieve getijdengeulafzettingen kan wel zandiger en siltiger zijn waardoor, er meer kwel naar het maaiveld kan zijn en minder concentratie naar de pipe is.*

Voor zowel getijdengeulafzettingen als getijdenplaatafzettingen geldt dat het goed meenemen van de architectuur van het watervoerend pakket (meerlaagsheid, afmetingen van de geul, kortsluiting, dikte van verschillende pakketten, doodlopen geulen) van belang is voor het bepalen van de belasting. Er is sprake van meerlaagsheid als verschillende typen getijdenzand op elkaar gestapeld liggen.

Getijdenzanden hebben een kleinere korrelgrootte dan rivierzanden, wat op zichzelf kan leiden tot meer erosie. Echter veelal is een fijne fractie aanwezig, in zandige getijdenafzettingen schommelt deze meestal tussen de 1 en 3%, maar dit kan oplopen tot 40%. De aanwezigheid van de fijne fractie leidt in laboratoriumproeven tot een hogere weerstand tegen erosie. Verschillende factoren

dragen bij aan een hogere weerstand, waaronder cohesie (fysische en biologische cohesie maar met name biologische cohesie die veroorzaakt wordt door de aanwezigheid van EPS dat wordt geproduceerd door bacteriën in het zand) en vermoedelijk door de verhoogde schuifweerstand door meer korrelcontacten in zanden met een niet uniforme korrelgrootteverdeling. Bovenstaande twee effecten leiden er toe dat de weerstand tegen piping aanzienlijk toeneemt bij een toename van het percentage fijne fractie. Hierbij is vooral een sterke relatie gevonden tussen het percentage slib (< 16 μm) en de extra weerstand ten opzichte van Sellmeijer-berekeningen. In deze proeven was door langdurige opslag en droging van het zand waarschijnlijk weinig invloed meer van biologische cohesie.



Figuur 5-7 Ratio tussen experimentele kritieke vervallen en berekende kritieke vervallen, uitgezet tegen het percentage materiaal dat kleiner is dan 16 μm (slibfractie). Uit [Hijma \(2019\)](#).

Daarnaast wordt de stroming naar de pipe beïnvloed door de drukval in het opbarstkanaal, die wordt veroorzaakt door een slurry van korrels en water in het opbarstkanaal. Deze weerstand kan zeker bij een dikke deklaag en een laag verval een groot deel van het verval bepalen. Eventueel opkisten verhoogt de drukval ook. De dichtheid van de slurry bepaald, naast de hoogte van het opbarstkanaal, de hoogte van de drukval, hoewel deze vaak als 1,3 maal het volumiek gewicht van water wordt beschouwd kan de dichtheid zowel hoger als lager zijn zoals benoemd in Knoop 4.

Bij signalering van een zandmeevoerende wel bij inspectie kunnen maatregelen worden getroffen indien het risico op piping groot genoeg wordt geacht.

Wanneer door de veelal dikke deklaagen wellen slechts op enkele locaties ontstaan is de kans op succesvolle maatregelen groter. In een calamiteitenplan kan rekening gehouden worden met bekende zwakke plekken.

5.5.6 Knoop 6. Doorgaande pipe

Als de pipe vormt kan deze bij gelijkblijvend verval een evenwichtssituatie bereiken, dan groeit de pipe alleen door wanneer de waterstand toeneemt. Bij de overschrijding van een zeker verval bereikt de pipe een lengte waarbij deze bij gelijkblijvende waterstand door zal groeien, mits geen vreemde elementen de pipegroei verstoren. De pipe maakt kortsluiting bij het intredepunt.

Door de beperkte duur van de hoogwaterbelasting is de kwelweglengte hier van belang. De pipe dient wel de tijd te hebben om terug te schrijden tot het intredepunt. De pipegroeisnelheid is relatief onzeker, al is op basis van beschikbare informatie een snelheid van maximaal 2 mm/s gevonden in van Beek (2016). Instorten van de deklaag kan de pipe ook (tijdelijk) blokkeren

waardoor deze een nieuw pad moet zoeken wat het proces vertraagt. Ook de afwisseling van fijnere en grovere lagen in de baan van de pipe hindert het doorgroeien. De aanwezigheid van dunne kleilaagjes in het watervoerend pakket leidt ook tot een toename in kwelweglente en kan het doorgroeien hinderen. Hierbij zal het effect afhangen van de hoeveelheid en afmetingen van deze kleilaagjes, die in getijdenplaatafzettingen groter is dan bij getijdengeulen. Daarnaast kan de demping door compressibiliteit van de deklaag in het achterland (knoop 2) ervoor zorgen dat de waterspanningen met vertraging reageren.

In een situatie met een voorland en dikke deklaag is ook de vraag waar het intredepunt is. De dikte en sterkte eigenschappen van de deklaag beïnvloeden of deze stabiel blijft als een pipe onder het voorland komt.

Zoals ook bij knopen 1-5 zullen ook hier de architectuur van het WVP en de doorlatendheidseigenschappen een belangrijke rol spelen bij het doorgroeien van de pipe.

5.5.7 Knoop 7. Ruimen, (verbreding en verdieping van de pipe)

Wanneer de pipes aan de rivierzijde kortsluiting maken met het buitenwater neemt de erosiecapaciteit van het water sterk toe en wordt de pipe verbreed en verdiept (ruimen). Voorwaarde hiervoor is wel dat de waterstand hoog blijft. De instroom van water erodeert zand bovenstreams dat de pipe benedenstreams tijdelijk verstopt totdat het proces weer doorgaat. Zo vergroot de pipe van bovenstreams naar benedenstreams.

Evenals in knoop 6 is hier de duur van het hoogwater van belang. Ook dit proces zal tijd vergen. Daarnaast is ook hier de stabiliteit van de deklaag en het instorten daarvan van belang evenals in knoop 6.

5.5.8 Knoop 8. Kruihverlaging

De holte onder de dijk leidt tot verzakking van de dijk.

De sterkte en vervormingseigenschappen van de dijk en eventueel aanwezige deklaag beïnvloeden ook de mate van kruihverlaging.

5.5.9 Knoop 9. Maatregelen ineffectief

Wanneer pipingverschijnselen op tijd worden waargenomen en effectieve beheersmaatregelen inzetbaar zijn kan een overstroming worden voorkomen. Indien dat niet het geval is kan bresgroei optreden.

Voor het nemen van maatregelen is detectie nodig om de wellen tijdig te constateren. De frequentie van inspectie beïnvloedt de kans op het tijdig detecteren van wellen, evenals de zichtbaarheid van de verschijnselen. De inzet van monitoringsequipment zoals drones, kan de kans op detectie ook verhogen. De kans dat wellen in een (diepe) sloot over het hoofd gezien worden is groter, en 's nachts is de zichtbaarheid ook lager dan overdag. Op basis van kennis van de geohydrologische situatie kan een risico gestuurd plan van inspectie overwogen worden. Aangezien getijdengeulen veelal pipinggevoeliger zullen zijn dan getijdenplaatafzettingen kan een goede kartering daarvan leiden tot effectieve inspectie. Gezien de veelal dikke deklaagen zullen naar verwachting relatief weinig wellen voorkomen en de registratie van bestaande wellen kan dan ook helpen bij het inrichten van het calamiteitenplan.

De mogelijkheid tot het nemen van maatregelen wordt beïnvloed door factoren als de aanwezigheid van voldoende materiaal en mensen. Bij extreme situaties is het mogelijk onveilig om maatregelen te treffen. De tijd die beschikbaar is voor het meenemen van maatregelen beïnvloedt de effectiviteit hiervan. Omdat wellen veelal relatief vroeg in het pipingproces zullen

ontstaan bij een situatie met een lange lek lengte (door bijvoorbeeld een dikke deklaag) is de verwachting dat er meer tijd is voor maatregelen dan bij een dunne of afwezige deklaag.

Om te besluiten of maatregelen noodzakelijk zijn is het van belang na te gaan of wellen tot piping kunnen leiden (bijvoorbeeld doordat deze veroorzaakt worden door lokale concentratie van stroming bij een doodlopende geul die voorts niet genoeg debiet aanvoert voor het doorgroeien van een pipe) en hoeveel tijd benodigd is voor het groeien van de pipe en hoe dit zich verhoudt tot de duur van het hoogwater. Hierbij is het wel van belang om de mogelijkheid van reeds ontwikkelde pipes die mogelijk gereactiveerd kunnen worden te beschouwen.

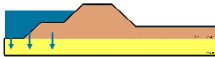
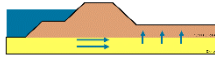
5.5.10 Knoop 10. Bresgroei

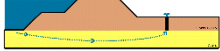
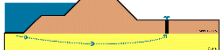
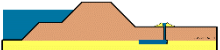
Indien de kruinverlaging zodanig is dat water over de kruin heen stroomt leidt dit tot bresgroei.

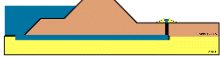

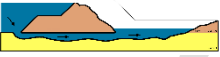
De vervormingen in de dijk die tot bresgroei leiden zijn ook afhankelijk van de opbouw van de dijk, van het materiaal waaruit de dijk bestaat en van de geometrie van de dijk. Bij dijken met een zandkern en kleibekleding zal een kleine vervorming al snel leiden tot erosie van de kern en bresgroei, terwijl een kleidijk meer vervorming kan verdragen. De dikte en cohesie van de deklaag beïnvloeden de deformatie van de dijk. De mate van vervorming die nodig is voor overstroming hangt ook af van de hoogte van de dijk, in relatie tot de buitenwaterstand.

5.6 Overzicht faalpad en belangrijke aspecten

Tabel 5-1 Overzicht faalpad en belangrijke aspecten getijdengebied

Faalpad	Narratief	Belangrijkste aspecten
<p>1. buitenwaterstand stijgt en waterspanning in het WVP aan de rivierzijde van de kering stijgt</p> 	<p>De waterstand stijgt, door storm of getij. Toename van de waterstand leidt tot toename van waterspanningen in de watervoerende lagen buitenwaarts.</p>	<p>Waterstandsverloop: de beperkte duur van de (piek) belasting</p> <p><u>Geohydrologische situatie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - aanwezigheid kwelders en maaiveldhoogte en netto intredeweerstand daarvan - bij kort of afwezig voorland doorlatendheid en anisotropie in bovenste WVP - Laagopbouw (dikte, doorlatendheid, en anisotropie en meerlaagsheid in WVP): <ul style="list-style-type: none"> - architectuur van getijdengeulen en getijdenzanden en meer kleiige of organische getijdenafzettingen - meerlaagsheid en kortsluiting tussen Holoceen en Pleistoceen WVP. - contact tussen de getijdengeulen en de zee
<p>2. waterspanning WVP aan de polderzijde van de kering stijgt en er ontstaat verticale stroming</p> 	<p>Toename van waterspanningen in watervoerend pakket - voor en onder de dijk - leidt tot verhoging van de stijghoogte aan de binnenzijde van de dijk.</p>	<p><u>Geohydrologische situatie</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - leklengte en hydrologische randvoorwaarden achterland (bepaald door de lokale situatie, peilbeheer, grondwaterstand, stijghoogte WVP) -preferente stroombanen (getijdengeulen): afmetingen en doorlatendheid daarvan, eventueel in combinatie met doodlopen van getijdengeul - dikte, doorlatendheid, en anisotropie en meerlaagsheid in WVP (knoop 1) - elastische berging in deklaag

Faalpad	Narratief	Belangrijkste aspecten
<p>3. opbarsten en geconcentreerde verticale stroming</p> 	<p>De stijghoogte aan de polderzijde is voldoende om de deklaag op te tillen en te scheuren, dit resulteert in een opbarstgat.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - eigenschappen deklaag: <ul style="list-style-type: none"> - effect van horizontale gelaagdheid deklaag op opbarsten - effect hoog veen gehalte - sterkte (cohesie) en dikte deklaag <u>Geohydrologische situatie</u> <ul style="list-style-type: none"> - lokale zwakke plekken <ul style="list-style-type: none"> -preferente stroombanen (getijdengeulen): afmetingen en doorlatendheid daarvan, eventueel in combinatie met doodlopen van getijdengeul (knoop 2) dunne deklaag of kopsloten -leklengte (contrast doorlatendheid deklaag en WVP) & hydrologische randvoorwaarden achterland i.v.m. concentratie van stroming naar wel (knoop 2) - dikte, doorlatendheid, en anisotropie en meerlaagsheid in WVP (knoop 1&2) - intredeweerstand voorland (knoop 1) - elastische berging in deklaag (knoop 2)
<p>4. Heave</p> 	<p>Door concentratie van stroming naar het uitrededepunt worden zandkorrels gefluïdiseerd; door hoge verticale stroomsnelheden worden korrels opgetild in het verticale kanaal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - korrelgrootte en debiet in wel beïnvloeden weerstand in het opbarstkanaal relatie aan 0,3D regel - dikte deklaag <u>Geohydrologische situatie</u> <ul style="list-style-type: none"> - lokale zwakke plekken <ul style="list-style-type: none"> -preferente stroombanen (getijdengeulen): afmetingen en doorlatendheid daarvan, eventueel in combinatie met doodlopen van getijdengeul (knoop 2) dunne deklaag of kopsloten -leklengte (contrast doorlatendheid deklaag en WVP) & hydrologische randvoorwaarden achterland i.v.m. concentratie van stroming naar wel (knoop 2) - dikte, doorlatendheid, en anisotropie en meerlaagsheid in WVP (knoop 1&2) - intredeweerstand voorland (knoop 1) - elastische berging in deklaag (knoop 2)
<p>5. horizontaal zandtransport en pipe vorming</p> 	<p>Een of meerdere pipes ontstaan doordat de horizontale gradiënten hoog genoeg zijn om korrels te eroderen. Doordat de gradiënt vanuit de rivier zijde hoog is groeien pipes globaal stroomopwaarts.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - extra weerstand tegen erosie door fijne fractie - effect horizontale afwisseling zand en kleilaagjes in het WVP op pipegroei (vooral getijdenplaatafzetting) - weerstand in het opbarstkanaal (0,3D regel) (en dikte deklaag, en eventueel opkisten) <u>Geohydrologische situatie</u> <ul style="list-style-type: none"> - dikte, doorlatendheid, en anisotropie en meerlaagsheid in WVP (knoop 1&2) - doorlatendheid deklaag voorland (knoop 1) - leklengte achterland & hydrologische randvoorwaarden (knoop 2) beïnvloed de concentratie van stroming naar pipe in 3D - preferente stroombanen (getijdengeulen): doorlatendheid en afmeting daarvan (knoop 2) beïnvloed de concentratie van stroming naar pipe in 3D

Faalpad	Narratief	Belangrijkste aspecten
<p>6. doorgaande pipe</p> 	<p>Wanneer de stijghoogte bovenstrooms van de pipe voldoende hoog is en blijft, en geen vreemde elementen de pipegroei verstoren, kan de pipe naar bovenstrooms groeien totdat de pipe kortsluiting maakt met het buitenwater bij het intredepunt.</p>	<p>Waterstandsverloop (knoop 1) in relatie tot kwelweglengte en pipegroeisnelheid (en eventuele demping door samendrukking deklaag).</p> <p>Aanwezigheid, dikte en stabiliteit van de deklaag beïnvloed locatie van intredepunt.</p> <p>Aanwezigheid kleilaagjes in het WVP, en continuïteit en dichtheid daarvan.</p> <p>Het al dan niet doorlopen van het pipinggevoelige zandlichaam</p> <p><u>Geohydrologische situatie</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - dikte, doorlatendheid, en anisotropie en meerlaagsheid in WVP (knoop 1&2) - doorlatendheid deklaag voorland (knoop 1) - leklengte achterland & hydrologische randvoorwaarden (knoop 2) beïnvloed de concentratie van stroming naar pipe in 3D - preferente stroombanen: doorlatendheid en afmeting daarvan (knoop 2) beïnvloed de concentratie van stroming naar pipe in 3D
<p>7. ruimen, (verbreding en verdieping van de pipe)</p> 	<p>Vanaf bovenstrooms begint de pipe te verbreden, en dit proces propageert zich terug naar het uitredepunt.</p>	<p>Waterstandsverloop (knoop 1) in relatie tot duur voorgaande processen en duur van het ruimen.</p> <p>Stabiliteit van de deklaag.</p>
<p>9. maatregelen ineffectief</p> 	<p>De mitigerende maatregelen zijn niet tijdig getroffen, of de mitigerende maatregelen zijn niet effectief.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - het aantal wellen, bij weinig wellen is de kans op succesvolle maatregelen groter - inspectiefrequentie en inspectie gebaseerd op ondergrondschematisatie en kennis van lokale zwakke plekken - inschatting van mogelijke consequenties van een wel: <ul style="list-style-type: none"> - kan de pipe teruggroeien in de tijd van het hoogwater? - is de wel veroorzaakt door lokale concentratie van stroming maar loopt WVP niet door of levert dit onvoldoende water voor pipevorming?

6 Benedenrivierengebied

6.1 Geologie

Het benedenrivierengebied omvat de huidige Rijn-Maas delta ten westen van de lijn Utrecht - Culemborg - Gorinchem - Afgedamde Maas - Waalwijk met o.a. de grotere rivieren zoals de Waal, de Lek en de Maas, hun kleinere aftakkingen zoals de Hollandsche IJssel en de Noord en de gebieden rond de mondingen zoals het Haringvliet en de Nieuwe Waterweg (Figuur 1-3). De mariene invloeden nemen, evenals de dikte van het Holocene pakket, richting het westen toe. Ten westen van de lijn Gouda - Rotterdam – Zwijndrecht – Biesbosch komen naast rivierafzettingen ook Holocene getijdengeul-, kwelder- en getijdenplatafzettingen voor in de ondergrond. Voor deze beschrijving wordt daarom onderscheid gemaakt tussen een fluviatiele en een perimariene gebied. In het fluviatiele gebied (Krimpenerwaard, Alblasserwaard, Lopikerwaard en het Land van Altena) zijn de afzettingen vooral afkomstig van rivieren. In het perimariene gebied (Biesbosch, Hoekse Waard, Beijerland, Goeree-Overflakkee, Voorne-Putten, Delfland en het Westland) komen zowel rivier- als getijdenafzettingen voor. In de overgangszone tussen deze twee typen afzettingen worden estuariene afzettingen onderscheiden. Zowel het perimariene als fluviatiele deelgebied wordt gekenmerkt door een zeer heterogene opbouw van de ondergrond.

6.1.1 Deklaag

Door de heterogeniteit is het lastig om voor het benedenrivierengebied van een 'typische' deklaag te spreken. Ten eerste **neemt de gemiddelde dikte van de deklaag in westelijke richting sterk toe**. In het oosten van de Alblasserwaard is bijvoorbeeld de deklaag in het komgebied van de Lek en de Waal zo'n 5-8 m, terwijl op Voorne-Putten in het westen de deklaag meer dan 20 m dik kan zijn. Maar hoewel de deklaagdikte dus gemiddeld toeneemt, kan deze direct naast rivieren als de Lek of de Waal/Merwede nog steeds dun zijn en niet dikker dan in het oosten. Een belangrijker effect van een gemiddeld dikkere deklaag, oftewel gemiddeld een diepere ligging van het Pleistocene zand, is dat in het benedenrivierengebied de ondiep beginnende zandbanen minder vaak in contact staan met het Pleistocene watervoerende pakket dan in het bovenrivierengebied. Hier wordt in een volgende paragraaf over dit pakket nader op ingegaan.

Verder kan gesteld worden dat de dikte van de deklaag op lokale schaal sterk variabel is door het netwerk van zandbanen die zich in de ondergrond bevindt. Dit zijn beddingafzettingen die zijn achtergelaten door getijden-, crevasse- of riviergeulen. Op sommige plekken waar een relatief jonge verlaten geul heeft gestroomd of een geul nog actief is kan de dikte van de deklaag < 1 m zijn.

6.1.1.1 Fluviatiele deelgebied

In de fluviatiele komgebieden nabij en tussen de rivieren bestaat de deklaag voornamelijk uit **(zandige/siltige/humeuze) klei met veenvoorkomens**. Vaak is de klei van kom- en oeverafzettingen **gelaagd met zandige klei of soms zelfs dunne zandlaagjes**. Over het algemeen geldt dat de kom- en oeverafzettingen in deze gebieden **zandiger worden met afnemende afstand van de actieve of verlaten geul(en) die deze afzettingen hebben neergelegd**. Zo zal een oeverafzetting nabij een geul eerder uit zandige klei of kleilig zand bestaan en meer afwisseling met zandiger lagen hebben, terwijl klei in de diepere komgebieden meestal siltig of humeus en niet of nauwelijks met zand gelaagd is. Hetzelfde principe geldt voor de voorkomens van veen. **In de diepere komgebieden, verder van de (op dat moment actieve) rivier, is veen gevormd met minder inmenging van klei dan dichtbij of op de oevers**. Het voorkomen van veen verschilt per gebied: De top van de deklaag bestaat in de hele Krimpenerwaard typisch uit een 3-6 m dik pakket Hollandveen, omdat in dit gebied lange tijd veen heeft kunnen vormen in de afwezigheid van rivierinvloeden. In contrast daarmee komt veen in het oosten van de Alblasserwaard, de Lopikerwaard en het Land van Altena veel lokaler voor en is de

dikte meestal < 3 m. Naast de opvulling van klei en veen komt onderaan de deklaag vaak basisveen met daaronder een dunne laag stugge klei voor (Laag van Wijchen). Bij relatief jonge rivierlopen zoals die van de Lek en de Waal kan de polderwaartse overgang van zand naar klei/veen zeer snel zijn. Deze rivieren zijn namelijk in een bestaand komgebied ingesneden, waardoor het dikke klei/veenpakket dicht langs of onder de oevers van de rivier kan liggen. Dit zorgt potentieel voor opstuwung, waardoor opbarsten sneller op kan treden (Hijma, 2018). Een andere factor die een rol speelt bij deze relatief jonge rivieren is dat de oudere zandbanen dieper begraven liggen. Dit heeft te maken met de zeer lange activiteit (4 - 5 duizend jaar) van de Oude Rijn als hoofdgeul van het Rijnsysteem, waardoor in het benedenrivierengebied zeer beperkt Rijnsystemen actief waren en er weinig zandbanen gevormd zijn.

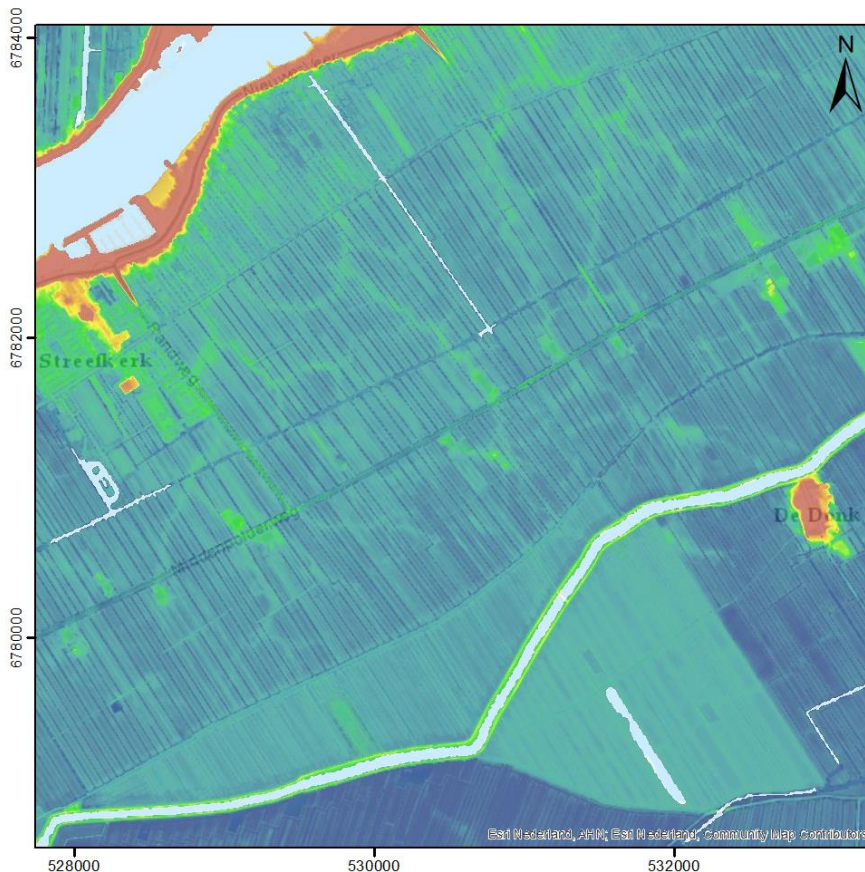
6.1.1.2 Perimarien deelgebied

In dit gebied bestaat de deklaag typisch uit **(sterk siltige tot zandige) klei** met daarin een 1 - 5 m dikke laag Hollandveen, met daarin ingeschakelde mariene of fluviatiele afzettingen. De klei is hoofdzakelijk van mariene oorsprong, maar rond de Hollandse IJssel en de Nieuwe en Oude Maas zijn de afzettingen onderin de deklaag vaak van fluviatiele oorsprong. Ook hier geldt het principe dat **afzettingen in de nabijheid van actieve of verlaten getijden- of riviergeulen zandiger (gelaagd)** zijn dan afzettingen verder weg van de geul. In vergelijking met de deklaag in fluviatiele komgebieden is de **mariene klei over het algemeen siltiger en op grotere schaal gelaagd met zand**, met name richting de kust.

6.1.2 Watervoerend pakket

In het benedenrivierengebied bestaat de **top van het Pleistoceen bijna overal uit matig grof tot grof rivierzand of uit de stugge klei van de Laag van Wijchen**. Het al dan wel of niet aanwezig zijn van de Laag van Wijchen is een belangrijk gegeven voor piping aangezien het als afsluitende laag kan dienen. Veel recente rivieren hebben hun zandlichaam afgezet tot op deze klei, waardoor er geen kortsluiting is met de daaronder gelegen grove rivierzanden. Daar waar de Laag van Wijchen niet aanwezig is, geldt omgekeerd dat de kans op kortsluiting groot is. Op enkele plekken **in het zuiden** (Land van Altena, Hoekse Waard, Beijerland, Goeree-Overflakkee) komt **ook fijner dekzand** voor dat direct bovenop de grovere Pleistocene rivierzanden ligt. De diepte waarop het Pleistoceen begint varieert van ~5 m onder maaiveld in het oosten tot ~25 m in het westen. **De beddingafzettingen in het fluviatiele deelgebied zijn typisch tussen de 5 en 8 m dik (Gouw & Berendsen, 2007), terwijl in het perimarien gebied de zoetwatergetijdengeulen veel dikker kunnen zijn. Het zand dat is achtergelaten door geulen kan direct in verbinding staan met het Pleistocene zand.** Zeker in het oostelijk deel van het benedenrivierengebied, waar de deklaag relatief dun is, kunnen rivieren in hun buitenbocht diep genoeg zijn om contact te maken met het onderliggende Pleistocene zandpakket. Lokaal kunnen de diepere getijdengeulen mogelijk het Pleistocene zand bereiken. Onduidelijk is waar dit precies het geval is, maar het komt in ieder geval zelden voor. Let wel: deze opmerking geldt alleen voor het benedenrivierengebied. In gebieden als Zeeland en langs de Waddenzee zijn de getijdengeulen regelmatig zo groot dat ze wel in contact staan met het Pleistoceen.

Het kan ook voorkomen dat een geul die niet diep genoeg is om direct contact te maken met het Pleistocene oppervlak, oudere beddingafzettingen doorsnijdt die dat wél doen. Hierop is de kans groter in het oosten waar de deklaag dunner is dan in het westen. In Gouw (2008) wordt het overlappen en dus op elkaar aansluiten van verschillende generaties Holocene beddingafzettingen uitgedrukt in de 'Connectedness Ratio' (CR). Dit is de verhouding tussen de overlappende breedte van twee beddingafzettingen en hun totale gecombineerde breedte. Bovenstreams (in het bovenrivierengebied) is deze ongeveer twee keer zo hoog als benedenstreams. Er is dus een algemene trend van minder verbonden beddingafzettingen naar het westen toe. In kleinere zandbanen, zoals die van crevasses (Figuur 6-1), zijn vaak maar tot enkele meters diep en zullen niet in contact staan met het Pleistocene zand.



Figuur 6-1. Ten zuiden van de Lek bij Streefkerk is een netwerk van crevassegeultjes zichtbaar op het AHN (de licht-groene, dus net iets hoger liggende ruggen, die tussen de Lek en het kanaal bij De Donk voorkomen). Dit zijn ondiepe meestal zandige afzettingen die gevormd zijn ten tijde van overstromingen. Deze crevassegeultjes lopen mogelijk onder de dijk door (tenzij deze bij aanleg diep genoeg is ingegraven). Ook zichtbaar zijn twee rivierduinen: bij Streefkerk en niet geheel toevallig bij De Donk.

Zand van beddingafzettingen is in het oosten van het gebied gemiddeld grover dan in het westen. In het fluviatiele gebied zijn de beddingafzettingen dus grover dan die in het perimarien gebied. In het oosten ligt de zandmediaan overwegend tussen 105 en 420 μm , terwijl in het westen de zandmediaan overwegend tussen 63 en 150 μm en in ieder geval onder 420 μm ligt (Wiersma & Hijma, 2018). De d_{70} zal een vergelijkbare trend volgen.

Belangrijk hierbij is ook het percentage fijn materiaal (<63 μm) en dan met name het materiaal fijner dan 16 μm (slib). In Hijma (2019) wordt een duidelijk verband aangetoond tussen het percentage slib en de weerstand tegen piping: hoe meer slib, hoe meer weerstand. Aangenomen mag worden dat het percentage slib in het benedenrivierengebied richting het westen toeneemt.

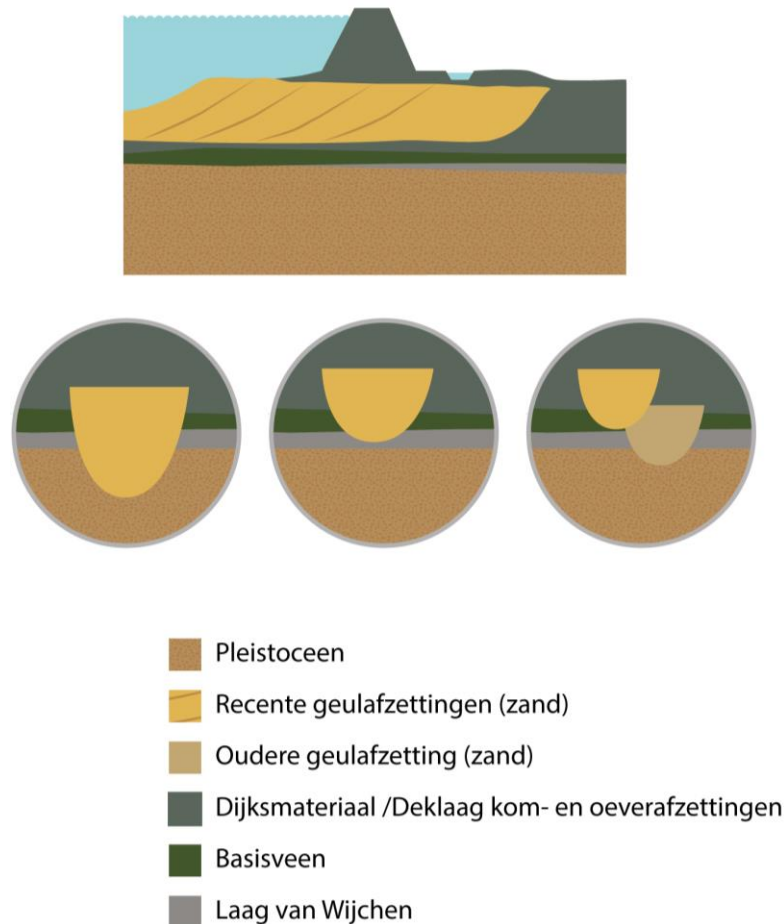
Beddingafzettingen van rivieren vertonen een aflopend profiel (fijner naar boven toe).

Beddingzand op een kronkelwaard kan aan de basis grind bevatten (channel lag), maar wordt naar boven toe fijner. Getijdengeulen volgen hetzelfde principe, maar zijn door de grotere variatie van stromingsenergie gevarieerder: er kunnen dunne silt- en kleilaagjes voorkomen tussen het zand. De zandplaten die tussen de getijdengeulen voorkomen bestaan uit nog fijner zand (zie de beschrijving van getijdenafzettingen).

In het fluviatiele gebied komen ook rivierduinen (donken) voor (Figuur 6-1). Enkele voorbeelden hiervan liggen in de Krimpenerwaard net ten noorden van de Lek en in de Alblasserwaard. Het betreft overwegend fijn tot matig grof zand dat vlak voor de aanvang van het Holoceen uit een vlechtende riviervlakte is opgestoven. **Indien de Laag van Wijchen aanwezig is, liggen de rivierduinen hier bovenop**, waardoor er geen contact is met het onderliggende rivierzand.

De doorlatendheid van het watervoerende pakket speelt uiteraard een grote rol bij piping. In het algemeen kan gesteld worden dat de doorlatendheid van het bovenste zandpakket, waar pipegroei in plaatsvindt, richting het westen afneemt door een afname van de gemiddelde korrelgrootte, een toename van het percentage fijn materiaal en een toename van de mate van anisotropie in doorlatendheid (Van Asselen et al., 2018). Daarnaast is het zo dat richting het westen de doorlatendheidscontrasten tussen verschillende zandpakketten (getijdenafzettingen versus rivierafzettingen) groter worden.

Typisch voorkomende situaties van de ondergrond in het benedenrivierengebied zijn in Figuur 6-2 getoond.



Figuur 6-2 Kenmerkend voor het benedenrivierengebied zijn de relatief dikke komafzettingen die doorsneden worden door zandige geulafzettingen. Deze geulafzettingen kunnen tot het Pleistocene zand reiken (gefundeerd), zoals in de linker cirkel, of juist niet (ongefundeerd) zoals in de middelste cirkel. Ook komt het voor dat geulen in oudere geulen insnijden en op die manier ook in contact staan met het Pleistocene zand zoals in de rechter cirkel.

6.2 Hydraulische belasting

De combinatie van het optredende verval en de duur van de belasting zijn van belang voor het piping proces. Het benedenrivierengebied is een complex systeem waarin de hoogwatergolf wordt bepaald door sluitregimes van stormvloedkeringen, stormen en getijden op zee en afvoeren van Rijn en Maas. De invloed van deze aspecten verschilt per locatie in het benedenrivierengebied. Hierdoor is er geen eenvormige karakterisering van hydraulische belastingen te geven.

In het algemeen geldt dat het waterstandsverloop in het benedenrivierengebied een combinatie is van de waterstand verlopen in het bovenrivierengebied en aan de kust.

Aan de bovenstroomse zijde worden de hydraulische belastingen bepaald door rivierafvoeren en de waterstandsverlopen sterk lijken sterk op die van het bovenrivierengebied. Een hoogwater belasting in de orde van 4 weken duren, waarbij de belasting geleidelijk toeneemt en dan weer afneemt en de top circa 1 week duurt.

Aan de benedenstroomse zijde wordt het waterstandsverloop vooral bepaald door stormopzet veroorzaakt door storm (intensiteit en richting) en astronomisch getij. Een hoogwater duurt hier circa 40 uur met een top van 2 tot 4 uur.

6.3 Narratief

In het narratief wordt het gehele faalpad geschetst en de voorwaarden beschreven voor een overstroming door piping. Het fysische proces van iedere knoop wordt kort toegelicht en vervolgens worden de kenmerkende aspecten van het gebied die het optreden van het betreffende mechanisme sterk kunnen beïnvloeden in *italics* uitgelicht. Een samenvatting van de meest belangrijke aspecten van het gebied volgt bij het 'Overzicht van het faalpad en belangrijke aspecten'.

6.3.1 Knoop 1. Buitenwaterstand stijgt en waterspanning in het WVP aan de rivierzijde van de kering stijgt

De waterstand stijgt en de stroomsnelheid in de rivier neemt toe. Na verloop van tijd stromen uiterwaarden onder.

De belastingduur in het benedenrivierengebied zijn richting het westen eerder vergelijkbaar met die in het getijdengebied, en richting het oosten eerder vergelijkbaar met het bovenrivierengebied.

Toename van de waterstand leidt tot toename van waterspanning in de watervoerende lagen. Door toename van de stroomsnelheid in de rivier neemt de weerstand van de rivierbodem, indien deze aanwezig was, af.

De aanwezigheid van voorland, en de lengte hiervan en doorlatendheid van de deklaag beïnvloeden de toename van de waterspanning.

Daarnaast hebben de eigenschappen van het zandpakket waarin de rivier insnijdt effect. Wanneer het gaat om het perimariene gebied en er sprake is van getijdenafzettingen, dan is het onderscheid tussen getijdenplaat en getijdengeulafzettingen van belang. Getijdengeulen zullen veelal doorlatender zijn en minder anisotropie hebben dan getijdenplaatafzettingen, waardoor de waterspanning bij die eerste ook dieper in het WVP meer toe kan nemen. Bij minder doorlatende, meer anisotrope, afzettingen is er door de een grotere drukval over de ondiepere delen van het WVP minder toename van de waterspanning in de diepere delen van het WVP.

Bij fluviaatiele afzettingen is de doorlatendheid hoger en de mate van anisotropie minder dan bij getijdenafzettingen.

De dikte van de bovenste zandlagen, en of de rivier of de zandlagen direct in contact staan met het Pleistocene zand is ook van groot belang voor de toename van de waterspanning. Door de grotere doorlatendheid van het Pleistocene zand zal de waterspanning in de diepere lagen van het WVP sterker toenemen in situaties waar de rivier insnijdt in deze zanden, of waar de Holocene zanden in contact staan met het Pleistocene zand. Door het grote doorlatendheidscontrast tussen de zandigere en kleigere getijdenafzettingen in het WVP zal meerlaagsheid een grote rol spelen in het perimariene gebied. In het perimariene gebied kunnen getijdengeulen lokaal in contact staan met het Pleistocene zand, maar dit komt relatief minder voor dan in het getijdengebied, maar ook in het fluviaatiele gebied kan de rivier lokaal in contact staan met het WVP.

6.3.2 **Knoop 2. Waterspanning WVP aan de polderzijde van de kering stijgt en er ontstaat verticale stroming**

Toename van waterspanningen in WVP - voor en onder de dijk - leidt tot verhoging van de stijghoogte aan de binnenzijde van de dijk. De mate waarin de stijghoogte toeneemt hangt af van de eigenschappen van het WVP, de eigenschappen van de deklaag aan de binnenzijde en de geohydrologische situatie binnendijks. Door de hogere stijghoogte ontstaat een verticale stroming door de deklaag welke leidt tot kwel. Aan de binnenzijde van de dijk ontstaan natte plekken.

De dikte en doorlatendheid van de deklaag in het achterland beïnvloeden de opbouw van de waterspanning onder de deklaag. Een dikke ondoorlatende deklaag zal enerzijds tot hoge waterspanningen leiden doordat er weinig lek naar het achterland is. Anderzijds kan door berging de toename van de waterstand gedempt worden.

De afmetingen van de bovenste zandlaag, met name hoe ver deze doorloopt in het achterland heeft een sterke invloed op de toename van de waterspanning. In het benedenrivierengebied, de Lek is hier een goed voorbeeld van, kan de overgang van zand naar deklaag in het achterland zeer abrupt zijn waardoor de waterspanning bij deze overgang oploopt en er relatief snel opbarsten zal plaatsvinden.

De laagopbouw en de doorlatendheidseigenschappen van het WVP zoals genoemd in knoop 1 beïnvloeden ook de toename van waterspanning in het achterland als gevolg van een hogere waterspanning buitenwaarts. Een dunnere zandige afzetting met lagere doorlatendheid en hogere anisotropie factor zoals in het perimariene gebied het geval kan zijn bij getijdenplaatafzettingen zal de toename van waterspanningen onder de deklaag binnendijks sterk afremmen. Bij getijdengeulen zorgt de hogere doorlatendheid voor meer stroming, echter de afmetingen van de geul, of en hoever deze doorloopt in het achterland, en eventuele kortsluiting met het Pleistocene zandpakket spelen een belangrijke rol. Getijdengeulen kunnen echter afmetingen van honderden meters hebben.

Bij fluviale afzettingen kunnen kleinere crevassegeulen lokaal verder doorlopen in het achterland. Deze zullen veelal niet in contact staan met het Pleistocene zand, waardoor er minder debiet doorheen stroomt en waardoor het effect op de toename van de waterspanning minder is. Ze kunnen wel in contact staan met oudere rivierafzettingen die in contact staan met het Pleistocene zand.

De aanwezigheid van rivierduinen, donken, nabij de rivier is ook van belang, aangezien deze veelal een hogere doorlatendheid hebben, waardoor ook hier de waterspanning opbouwt bij de overgang naar de dikkere deklaag in het achterland.

De dynamiek van de grondwaterstand en de oppervlaktewaterstand hebben een belangrijke invloed op de toename van waterspanningen aan de polderzijde. In het geval dat er binnendijks bemalen (peilbeheer) wordt remt dit de ontwikkeling van de waterspanningen onder de deklaag. Het oppervlaktewaterbeheer beïnvloedt de waterspanningen ook.

6.3.3 **Knoop 3. Opbarsten en geconcentreerde verticale stroming**

Het vervolg van het doorbraakproces is afhankelijk van de aanwezigheid en eigenschappen van de binnendijkse deklaag.

Onderscheid wordt gemaakt tussen:

- Een dikke deklaag.
Deklagen met een dikte van meer dan 10 m kunnen in het benedenrivierengebied voorkomen. Het is onwaarschijnlijk dat deze op zullen barsten.

De deklaag dikte kan lokaal sterk variabel zijn door aanwezigheid van geulen (getijden- of crevasse geulen) en rivierduinen (zie knoop 1 & 2).

- Deklaag aanwezig die enkele meters dik is (maar waarschijnlijk minder dan 5 m) zonder gaten of sloten die door de gehele dikte van de deklaag snijden. Bij deze deklaag zorgt toename van de stijghoogte voor opdrijven van de deklaag. Afhankelijk van de eigenschappen kan de deklaag scheuren waardoor verticale stroming geconcentreerd optreedt. Deze is zichtbaar als een (schone) wel. Opbarsten kan op één of op meerdere locaties optreden. Het opbarsten zorgt voor een uittredepunt, dat nodig is voor het verdere piping proces.

De deklaag dikte kan lokaal sterk variëren. Wanneer lokaal een dunnere deklaag aanwezig is kan de dikkere deklaag daarnaast of in het achterland tot een sterke mate van concentratie van stroming naar de wel leiden. Dit zal ook het geval zijn als een geul doodloopt in het achterland. Wellen kunnen dan verder van de kering ontstaan. De toestroom naar de wel wordt dan ook beïnvloed door de architectuur van het watervoerend pakket (aanwezigheid van geul en afmetingen daarvan, meerlaagsheid, kortsluiting, zie ook knopen 1 en 2).

Op locaties waar de deklaag bestaat uit getijdenafzettingen met een afwisseling van klei en zandlaagjes is de vraag of de waterspanning hieronder voldoende toe kan nemen voor opbarsten, hoe een dergelijke deklaag opbarst, en of een opbarstkanaal stabiel blijft.

Ook kan het voorkomen dat deklagen vooral uit veen bestaan, waardoor deze op een andere manier, of misschien helemaal niet, opbarsten dan deklagen die vooral uit klei bestaan.

6.3.4 Knoop 4. Heave

Stroming concentreert zich naar het uittredepunt. Door concentratie van stroming naar het uittredepunt, neemt de gradiënt in het zand toe, en worden zandkorrels gefluidiseerd. Door hoge verticale stroomsnelheden in het verticale kanaal worden korrels opgetild. Het gefluidiseerde zand vult het verticale kanaal. Wanneer de stroomsnelheid hoog genoeg is kunnen de korrels worden getransporteerd naar het maaiveld.

Wanneer de suspensie van korrels in het gat een evenwicht bereikt met de stroomsnelheid resulteert de suspensie in een drukval in de wel, waardoor de drukval over het watervoerende pakket afneemt. Bij hogere stroomsnelheden worden de korrels uit de wel weggespoeld. Als er niet meer zand geërodeerd wordt kan de wel ook alleen water meevoeren ('kokende' wel). De drukval in de wel is nagenoeg nul en draagt niet bij aan de drukval over het pakket.

De drukval in de wel wordt sterk beïnvloed door het debiet naar de wel en de korrelgrootte van korrels in de wel. Door de fijnere korrelgrootte van getijdenzanden kunnen korrels makkelijker uit de wel gespoeld worden. Echter het debiet is mogelijk ook kleiner door de eigenschappen van het WVP. Het netto effect is onduidelijk.

Met name bij een deklaag met veel organisch materiaal (veen) is het mogelijk dat heave een bepalendere rol speelt dan opbarsten vanwege het lage volumieke gewicht van veen. Echter er zijn weinig voorbeelden bekend van zandmeevoerende wellen onder een veen deklaag (zie ook knoop 3).

6.3.5 Knoop 5. Horizontaal zandtransport en pipe vorming

Horizontaal zandtransport treedt op doordat de horizontale hydraulische gradiënt hoog genoeg is om korrels te eroderen. Aan het maaiveld is een zandmeevoerende wel zichtbaar. Wanneer de hydraulische gradiënt vanuit de rivierzijde hoog genoeg, is groeien pipes richting de rivierzijde.

Boven de pipe is een cohesieve deklaag nodig anders stort deze in, wat de ontwikkeling van de pipe vertraagt.

Voor het perimariene gebied geldt evenals voor het getijdengebied dat bij getijdenplataafzettingen de kleine dikte, de lage doorlatendheid van het WVP, en de hoge anisotropie daarvan, leiden tot lagere stroming naar de pipe. In getijdengeulafzettingen is de doorlatendheid van het watervoerende pakket hoger en zijn minder doorlopende laagjes klei te verwachten dan in getijdenplataafzettingen waardoor de kans op terugschrijdende erosie hierin groter is. De pakkingsdichtheid beïnvloedt ook de weerstand tegen erosie, een lagere pakkingsdichtheid zoals in getijdengeulen kan worden verwacht, is erosiegevoeliger.

Getijdenzanden hebben een kleinere korrelgrootte dan rivierzanden, wat op zichzelf kan leiden tot meer erosie. Echter de aanwezigheid van de fijne fractie leidt in laboratoriumproeven tot een hogere weerstand tegen erosie. Daarnaast zal de aanwezigheid van dunne kleilaagjes in het zandpakket tot grotere weerstand leiden doordat de pipe hieromheen moet groeien. Dit effect is wel afhankelijk van de concentratie van deze laagjes en de afmetingen daarvan, en zal bij getijdenplataafzettingen veelal meer effect hebben dan bij getijdengeulen. Nadere toelichting van de factoren die bijdragen aan de hogere weerstand tegen terugschrijdende erosie is beschreven in paragraaf 5.5.5 voor het getijdengebied.

Voor het fluviaatiele gebied kan de aanwezigheid van fines ook tot een toegenomen weerstand tegen erosie leiden, dit moet nog nader onderzocht worden. Ook afwisseling van korrelgrootte of doorlatendheid in de baan van de pipe kan tot een hogere weerstand tegen erosie leiden.

Zoals bij knopen 1-3, zal ook hier de architectuur van het WVP en de doorlatendheidseigenschappen een belangrijke rol spelen die de stroming naar de pipe beïnvloeden. Zeker bij wellen die ontstaan in geulen, zowel in het fluviaatiele als in het perimariene gebied is de vraag of het aanstroomdebiet voldoende is om ook bij terugschrijdende erosie een pipe te vormen die door kan groeien. Daarvoor zijn de afmetingen van de geulen van belang (evenals het kortsluiten daarvan met het Pleistocene zand). Daarnaast is het doorlopen van de pipinggevoelige zandbaan onder de dijk van belang. Dit leidt weliswaar sneller tot opbarsten door de concentratie van de waterspanning onder de deklaag bij de overgang, maar het effect op terugschrijdende erosie is in de huidige modellen minder belangrijk. Opgemerkt wordt dat in relatie hiertoe nog kennisvragen spelen met betrekking tot de invloed van 3D concentratie van stroming naar de pipe.

Daarnaast wordt de stroming naar de pipe beïnvloed door de drukval in het opbarstkanaal, die wordt veroorzaakt door een slurry van korrels en water in het opbarstkanaal. Deze weerstand kan zeker bij een dikke deklaag en een laag verval een groot deel van het verval bepalen. Eventueel opkisten verhoogt de drukval ook. De dichtheid van de slurry bepaald, naast de hoogte van het opbarstkanaal, de hoogte van de drukval, hoewel deze vaak als 1,3 maal het volumiek gewicht van water wordt beschouwd kan de dichtheid zowel hoger als lager zijn zoals benoemd in Knoop 4.

Bij signalering van een zandmeevoerende wel bij inspectie kunnen maatregelen worden getroffen indien het risico op piping groot genoeg wordt geacht.

Wanneer door de veelal dikke deklagen wellen slechts op enkele locaties ontstaan is de kans op succesvolle maatregelen groter. In een calamiteitenplan kan rekening gehouden worden met bekende zwakke plekken. Wellen die vormen als gevolg van concentratie van stroming door een plotselinge overgang van zand naar deklaag zullen veelal bij een lager verval initiëren, waarbij terugschrijdende erosie nog in beperkte mate optreedt. Daardoor kan het relevant zijn om na te gaan bij welke waterstanden dergelijke wellen wel tot terugschrijdende erosie kunnen leiden bij de afweging of maatregelen nodig zijn.

6.3.6 Knoop 6. Doorgaande pipe

Als de pipe vormt kan deze bij gelijkblijvend verval een evenwichtssituatie bereiken, dan groeit de pipe alleen door wanneer de rivierwaterstand toeneemt. Bij de overschrijding van een zeker verval bereikt de pipe een lengte waarbij deze bij gelijkblijvende waterstand door zal groeien, mits geen vreemde elementen de pipegroei verstoren. De pipe maakt kortsluiting met het buitenwater bij het intredepunt.

Doordat de belasting door getij en storm van belang zijn voor de piekwaterstanden in het westelijke deel van het benedenrivierengebied is de duur van de relevante belasting korter en is de kwelweglengte van belang. De pipe dient wel de tijd te hebben om terug te schrijden tot het intredepunt. De pipegroeisnelheid is relatief onzeker, al is op basis van beschikbare informatie een snelheid van maximaal 2 mm/s gevonden in van Beek (2016). Instorten van de deklaag kan de pipe ook (tijdelijk) blokkeren waardoor deze een nieuw pad moet zoeken wat het proces vertraagt.

De aanwezigheid van dunne kleilaagjes in het watervoerend pakket leidt ook tot een toename in kwelweglengte en kan het doorgroeien hinderen. Hierbij zal het effect afhangen van de hoeveelheid en afmetingen van deze kleilaagjes, die in getijdenplaatafzettingen groter is dan bij getijdengeulen. Daarnaast kan de demping door compressibiliteit van de deklaag in het achterland (knoop 2) ervoor zorgen dat de waterspanningen met vertraging reageren.

In een situatie met een voorland en dikke deklaag is ook de vraag waar het intredepunt is. De dikte en sterkte eigenschappen van de deklaag beïnvloeden of deze stabiel blijft als een pipe onder het voorland komt.

In het fluviaatiele gebied is de duur van de hoogwaterbelasting langer doordat de rivierafvoer hier van groter belang is, waardoor deze knoop minder belangrijk is met betrekking op het tijdsaspect. Echter, de afwisseling van fijnere en grovere lagen in de baan van de pipe hindert het doorgroeien, zowel doordat de totale stroming naar de pipe door fijnere lagen wordt gehinderd, als doordat horizontale gradiënten in grovere lagen lager zijn en korrels dus minder makkelijk losgemaakt worden. Ook kan het langer duren, doordat de pipe een zwakker pad zoekt. Wanneer de diepte van de deklaag helt heeft dit invloed op het korreltransport, wat de pipegroei kan hinderen of vergemakkelijken als de helling over de gehele kwelweglengte gelijk is. Afwisseling van de diepte van de deklaag op een kleinere schaal leidt naar verwachting altijd tot een lagere faalkans.

Zoals ook bij knopen 1-5 zal ook hier de architectuur van het WVP en de doorlatendheidseigenschappen een belangrijke rol spelen het doorgroeien van de pipe beïnvloeden.

6.3.7 Knoop 7. Ruimen, (verbreding en verdieping van de pipe)

Wanneer de pipes aan de buitenzijde kortsluiting maken met het buitenwater neemt de erosiecapaciteit van het water sterk toe en wordt de pipe verbreed en verdiept (ruimen). Voorwaarde hiervoor is wel dat de waterstand in het buitenwater hoog blijft. De instroom van water erodeert zand bovenstrooms dat de pipe benedenstrooms tijdelijk verstopt totdat het proces weer doorgaat. Zo vergroot de pipe van bovenstrooms naar benedenstrooms.

Evenals in knoop 6 is hier de duur van het hoogwater met name van belang in het westelijke deel van het bovenrivierengebied. Ook dit proces zal vergt tijd. Daarnaast is ook hier de stabiliteit van de deklaag en het instorten daarvan van belang evenals in knoop 6.

6.3.8 Knoop 8. Kruinverlaging

De holte onder de dijk leidt tot verzakking van de dijk.

De sterkte en vervormingseigenschappen van de dijk en eventueel aanwezige deklaag beïnvloeden ook de mate van kruinverlaging.

6.3.9 Knoop 9. Maatregelen ineffectief

Wanneer pipingverschijnselen op tijd worden waargenomen en effectieve beheersmaatregelen inzetbaar zijn kan een overstroming worden voorkomen. Indien dat niet het geval is kan bresgroei optreden.

Voor het nemen van maatregelen is detectie nodig om de wellen tijdig te constateren. De frequentie van inspectie beïnvloedt de kans op het tijdig detecteren van wellen, evenals de zichtbaarheid van de verschijnselen. De inzet van monitoringsequipment zoals drones, kan de kans op detectie ook verhogen. De kans dat wellen in een (diepe) sloot over het hoofd gezien worden is groter, en 's nachts is de zichtbaarheid ook lager dan overdag. Op basis van kennis van de geohydrologische situatie kan een risico gestuurd plan van inspectie overwogen worden. Aangezien (grote) getijdengeulen veelal piping gevoeliger zullen zijn dan getijdenplatafzettingen kan een goede kartering daarvan leiden tot effectieve inspectie in het primariene gebied. In het fluviaatle gebied zou kartering gericht op crevassegeulen en donken relevant zijn.

Gezien de veelal dikke deklaagen zullen naar verwachting relatief weinig wellen voorkomen en de registratie van bestaande wellen kan dan ook helpen bij het inrichten van het calamiteitenplan.

De mogelijkheid tot het nemen van maatregelen wordt beïnvloed door factoren als de aanwezigheid van voldoende materiaal en mensen. Bij extreme situaties is het mogelijk onveilig om maatregelen te treffen. De tijd die beschikbaar is voor het meenemen van maatregelen beïnvloedt de effectiviteit hiervan. Omdat wellen veelal relatief vroeg in het pipingproces zullen ontstaan bij een situatie met een lange leklengte (door bijvoorbeeld een dikke deklaag) is de verwachting dat er meer tijd is voor maatregelen dan bij een dunne of afwezige deklaag.

Om te besluiten of maatregelen noodzakelijk zijn is het van belang na te gaan of wellen tot piping kunnen leiden (bijvoorbeeld doordat deze veroorzaakt worden door lokale concentratie van stroming bij een doodlopende geul die voorts niet genoeg debiet aanvoert voor het doorgroeien van een pipe) en hoeveel tijd benodigd is voor het groeien van de pipe en hoe dit zich verhoudt tot de duur van het hoogwater. Hierbij is het wel van belang om de mogelijkheid van reeds ontwikkelde pipes die mogelijk gereactiveerd kunnen worden te beschouwen.

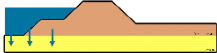
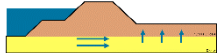
6.3.10 Knoop 10. Bresgroei

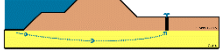
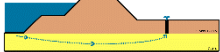
Indien de kruinverlaging zodanig is dat water over de kruin heen stroomt leidt dit tot bresgroei.

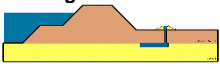
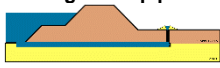
De vervormingen in de dijk die tot bresgroei leiden zijn ook afhankelijk van de opbouw van de dijk, van het materiaal waaruit de dijk bestaat en van de geometrie van de dijk. Bij dijken met een zandkern en kleibekleding zal een kleine vervorming al snel leiden tot erosie van de kern en bresgroei, terwijl een kleidijk meer vervorming kan verdragen. De dikte en cohesie van de deklaag beïnvloeden de deformatie van de dijk. De mate van vervorming die nodig is voor overstroming hangt ook af van de hoogte van de dijk, in relatie tot de buitenwaterstand.



6.4 Overzicht faalpad en belangrijke aspecten

Tabel 6-1 Overzicht faalpad en belangrijke aspecten benedenrivierengebied

Faalpad	Narratief	Belangrijkste aspecten
<p>1. buitenwaterstand stijgt en waterspanning in het WVP aan de rivierzijde van de kering stijgt</p> 	<p>De waterstand stijgt, door storm of getij. Toename van de waterstand leidt tot toename van waterspanningen in de watervoerende lagen buitenwaarts.</p>	<p>Waterstandsverloop de beperkte duur van de (piek) belasting (in het westelijke deel)</p> <p><u>Geohydrologische situatie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Laagopbouw (dikte, doorlatendheid, en anisotropie en meerlaagsheid in WVP): - architectuur van getijdengeulen en getijdenzanden en meer kleiige of organische getijdenafzettingen - meerlaagsheid en kortsluiting tussen Holoceen en Pleistoceen WVP, <p><u>Geohydrologische situatie:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - netto intredeweerstand (deklaag voorland, inrichting voorland) - bij kort of afwezig voorland doorlatendheid en anisotropie in bovenste WVP - Laagopbouw (dikte, doorlatendheid, en anisotropie en meerlaagsheid in WVP): - in oosten architectuur van getijdengeulen en getijdenzanden en meer kleiige of organische getijdenafzettingen - meerlaagsheid, staan ondiepe zanden in contact met Pleistoceen? - beperkte dikte en afmetingen ondiepe zanden - insnijden rivier in Pleistoceen en weerstand rivierbodem
<p>2. waterspanning WVP aan de polderzijde van de kering stijgt en er ontstaat verticale stroming</p> 	<p>Toename van waterspanningen in watervoerend pakket - voor en onder de dijk - leidt tot verhoging van de stijghoogte aan de binnenzijde van de dijk.</p>	<p><u>Geohydrologische situatie</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - leklengte en hydrologische randvoorwaarden achterland (bepaald door de lokale situatie, peilbeheer, grondwaterstand, stijghoogte WVP) - scherpe overgang tussen WVP en deklaag (bij jonge rivierlopen als Lek en Waal) -preferente stroombanen (getijdengeulen/crevassegeulen/donken): afmetingen en doorlatendheid daarvan, eventueel in combinatie met doodlopen van stroombaan - dikte, doorlatendheid, en anisotropie en meerlaagsheid in WVP (knoop 1) - elastische berging in deklaag

Faalpad	Narratief	Belangrijkste aspecten
<p>3. opbarsten en geconcentreerde verticale stroming</p> 	<p>De stijghoogte aan de polderzijde is voldoende om de deklaag op te tillen en te scheuren, dit resulteert in een opbarstgat.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - eigenschappen deklaag: <ul style="list-style-type: none"> - effect van horizontale gelaagdheid deklaag op opbarsten - effect hoog veen gehalte - sterkte (cohesie) en dikte deklaag <u>Geohydrologische situatie</u> <ul style="list-style-type: none"> - lokale zwakke plekken -preferente stroombanen (getijdengeulen/crevassegeulen/donken): afmetingen en doorlatendheid daarvan, eventueel in combinatie met doodlopen van stroombaan (knoop 2) - dunne deklaag of kopsloten -leklengte & hydrologische randvoorwaarden achterland i.v.m. concentratie van stroming naar wel (knoop 2) - dikte, doorlatendheid, en anisotropie en meerlaagsheid in WVP (knoop 1&2) - intredeweerstand voorland (knoop 1) - elastische berging in deklaag (knoop 2)
<p>4. Heave</p> 	<p>Door concentratie van stroming naar het uitrededepunt worden zandkorrels gefluïdiseerd; door hoge verticale stroomsnelheden worden korrels opgetild in het verticale kanaal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - korrelgrootte en debiet in wel beïnvloeden weerstand in het opbarstkanaal relatie aan 0,3D regel - dikte deklaag <u>Geohydrologische situatie</u> <ul style="list-style-type: none"> - lokale zwakke plekken -preferente stroombanen (getijdengeulen/crevassegeulen/donken): afmetingen en doorlatendheid daarvan, eventueel in combinatie met doodlopen van stroombaan (knoop 2) - dunne deklaag of kopsloten -leklengte & hydrologische randvoorwaarden achterland i.v.m. concentratie van stroming naar wel (knoop 2) - dikte, doorlatendheid, en anisotropie en meerlaagsheid in WVP (knoop 1&2) - intredeweerstand voorland (knoop 1) - elastische berging in deklaag (knoop 2)

Faalpad	Narratief	Belangrijkste aspecten
<p>5. horizontaal zandtransport en pipe vorming</p> 	<p>Een of meerdere pipes ontstaan doordat de horizontale gradiënten hoog genoeg zijn om korrels te eroderen. Doordat de gradiënt vanuit de rivier zijde hoog is groeien pipes globaal stroomopwaarts.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - stabiliteit deklaag als dak boven pipe - extra weerstand tegen erosie door fijne fractie en brede korrelgrootteverdeling - effect horizontale afwisseling zand en kleilaagjes in het WVP op pipegroei (getijdenplaatafzetting in perimarien gebied) -extra weerstand als gevolg van heterogeniteit WVP in de baan van de pipe (opeenvolgende lagen op verschillende schalen, van cm tot dm tot m, met verschillende doorlatendheid, korrelgrootte, of het niet doorlopen van pipinggevoelig zandlichaam. Diepteligging onderkant deklaag). -weerstand in het opbarstkanaal (0,3D regel) (en dikte deklaag, en eventueel opkisten) <p><u>Geohydrologische situatie</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - dikte, doorlatendheid, en anisotropie en meerlaagsheid in WVP (knoop 1&2) - doorlatendheid deklaag voorland (knoop 1) - leklengte achterland & hydrologische randvoorwaarden (knoop 2) beïnvloed de concentratie van stroming naar pipe in 3D - preferente stroombanen (getijdengeulen): doorlatendheid en afmeting daarvan (knoop 2) beïnvloedt de concentratie van stroming naar pipe in 3D
<p>6. doorgaande pipe</p> 	<p>Wanneer de stijghoogte bovenstrooms van de pipe voldoende hoog is en blijft, en geen vreemde elementen de pipegroei verstoren, kan de pipe naar bovenstrooms groeien totdat de pipe kortsluiting maakt met het rivierwater bij het intredepunt.</p>	<p>Deze knoop met name voor gebied met kortere belastingsduur.</p> <p>Waterstandsverloop (knoop 1) in relatie tot kwelweglengte en pipegroeisnelheid (en eventuele demping door samendrukking deklaag).</p> <p>Aanwezigheid, dikte en stabiliteit van de deklaag en aanwezigheid van zwakke plekken beïnvloeden locatie van intredepunt.</p> <p>Aanwezigheid kleilaagjes in het WVP, en continuïteit en dichtheid daarvan.</p> <p>Het al dan niet doorlopen van het pipinggevoelige zandlichaam</p> <p><u>Geohydrologische situatie</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - dikte, doorlatendheid, en anisotropie en meerlaagsheid in WVP (knoop 1&2) - doorlatendheid deklaag voorland (knoop 1) - leklengte achterland & hydrologische randvoorwaarden (knoop 2) beïnvloed de concentratie van stroming naar pipe in 3D - preferente stroombanen: doorlatendheid en afmeting daarvan (knoop 2) beïnvloedt de concentratie van stroming naar pipe in 3D

Faalpad	Narratief	Belangrijkste aspecten
<p>7. ruimen, (verbreding en verdieping van de pipe)</p> 	<p>Vanaf bovenstrooms begint de pipe te verbreden, en dit proces propageert zich terug naar het uitredepunt.</p>	<p>Deze knoop met name voor gebied met kortere belastingsduur.</p> <p>Waterstandsverloop (knoop 1) in relatie tot duur voorgaande processen en duur van het ruimen.</p> <p>Stabiliteit van de deklaag.</p>
<p>9. maatregelen ineffectief</p> 	<p>De mitigerende maatregelen zijn niet tijdig getroffen, of de mitigerende maatregelen zijn niet effectief.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - het aantal wellen, bij weinig wellen is de kans op succesvolle maatregelen groter - inspectiefrequentie en inspectie gebaseerd op ondergrondschematisatie en kennis van lokale zwakke plekken - inschatting van mogelijke consequenties van een wel: <ul style="list-style-type: none"> - kan de pipe teruggroeien in de tijd van het hoogwater? - is de wel veroorzaakt door lokale concentratie van stroming maar loopt WVP niet door of levert dit onvoldoende water voor pipevorming?

7 Referenties

- Chbab, H., 2012 *Waterstandsverlopen Meren*. Deltares-Rapport 1204143-003-ZWS-0027-r
- Chbab, H., 2015 *Waterstandsverlopen Kust*. Deltares Rapport 1220082-002-HYE-0003.
- Chbab, H., 2016. *Waterstandsverlopen Rijntakken en Maas*. Deltares rapport 1220082-002-ZWS-0002.
- Chbab, H., Stuparu, D., 2016 *Waterstandsverlopen Vecht- en IJsseldelta*. Deltares Rapport 1220082-002-HYE-0005.
- Kieftenburg, A., Stuparu, D., 2016 *Waterstandsverlopen Benedenrivierengebied voor WTI2017*. Deltares Rapport 122082-002-HYE-0004.
- Fugro, 2019. Onderzoeksproject Anisotropie / HPT-AMPT - Fase 2: Vergelijkingsonderzoek meettechnieken en analyse schaaffect, Fugro rapport 1217-0051-000.R12.
- Gouw, M. J. (2008). Alluvial architecture of the Holocene Rhine–Meuse delta (the Netherlands). *Sedimentology*, 55(5), 1487-1516.
- Hijma, M.P., Lam, K.S., 2015a. Globale stochastische ondergrondschematisatie (WTI-SOS) voor de primaire waterkeringen, Deltares report 1209432-004-GEO-0006.
- Hijma, M.P., Lam, K.S., 2015b. Globale stochastische ondergrondschematisatie (WTI-SOS) voor de primaire waterkeringen, Deltares report 1209432-000-GEO-0006.
- Hijma, M.P., 2018. Waarom zijn er weinig zandmeevoerende wellen in West-Nederland?, Deltares report 11202560-015-GEO-0006_v1.0.
- Hijma, M.P., Oost, A.P., 2018. Getijdenafzettingen en piping: een quickscan - Karakterisatie, inventarisatie en demonstratie, Deltares report 11202560-012-GEO-0001.
- Hijma, M.P., 2019. KvK Piping deelproject 011: Getijdenafzettingen en piping (2) - Proeven, begrijpen, toepassen, Deltares report 11203719-011-GEO-0001.
- Kanning, W., 2019. Methodiek afleiden rekenwaarden anisotropiefactor Spui, Deltares memo 11202960-002-BGS-0015.
- Kruse, G., Hijma, M.P., 2015. WTI 2017: Handleiding lokaal schematiseren met WTI-SOS, Deltares report 1209432-004-GEO-0002.
- Methorst, A.J., 2020. Piping in sandy tidal deposits. M.Sc.-thesis, TUDelft/Deltares, pp. 127.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017. Schematiseringshandleiding piping WBI 2017, Definitief, versie 2.2.
- Rosenbrand, E., van Beek, V., 2020. Mogelijkheid van uitsluiten mechanisme piping door doorlatende deklaag in het achterland. Deltares Memo referentie 11203719-015-GEO-0006.
- Rosenbrand, E., Knoeff, H., 2020. KvK 2019 onderzoek faalpaden en piping. Deltares Rapport referentie 11203719-028.
- Van Asselen, S., Hijma, M.P., Kanning, W., 2018. Anisotropie in doorlatendheid - Een literatuuronderzoek naar anisotropie in doorlatendheid en de effecten hiervan op piping, Deltares report 11202960-002-BGS-0002.
- Van Beek, V.M., 2016. Toelichting snelheid pipe ontwikkeling. Deltares Memo referentie 1220077-005-HYE-0004
- Van der Hulst, P.G., 2017 Piping in the Maasvallei, A possibility or far-fetched scenario? MSc Thesis Delft University of Technology.
- Vos, P.C., Van der Meulen, M.J., Bazelmans, J., Weerts, H.J.T., 2018. Atlas van Nederland in het Holocene. Landschap en bewoning vanaf de laatste ijstijd to nu., RCE, TNO en Deltares, Prometheus (9e druk), Amsterdam.

A Bijlage: Bovenrivierengebied Rijntakken: karakteristieken

Onderstaande bijlage is overgenomen uit Rosenbrand & Knoeff (2020).

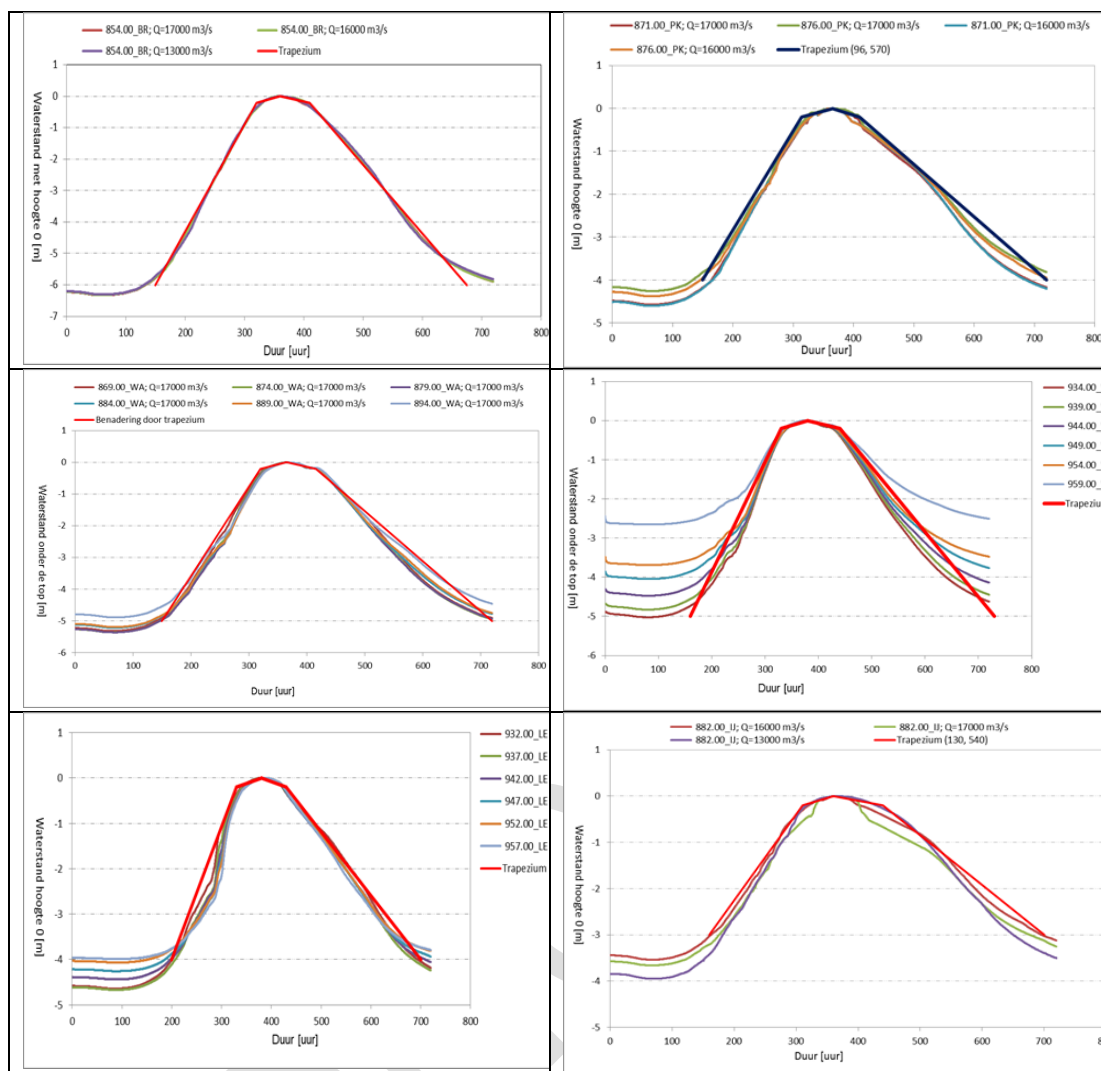
Het bovenrivierengebied Rijntakken is in deze context het gebied waar de hoogwaterbelasting niet door zee of meren wordt beïnvloed, alleen door rivierafvoer en eventueel aanvullend door wind.

Het bovenrivierengebied kent een variabele bodemopbouw. Dit heeft invloed op de stappen die voorkomen in het proces waarbij piping tot een overstroming kan leiden, niet alle stappen zijn altijd noodzakelijk. In de volgende alinea's worden de eigenschappen benoemd die bepalend zijn voor het pipingproces in het rivierengebied.

A.1 Belasting uit de rivier

Aan de belastingszijde is de vorm van de hoogwatergolf. De combinatie van het optredende verval en de duur van de belasting zijn van belang voor het piping proces. Enkele waterstandsverlopen voor de Rijntakken en de Maas zijn in Figuur A1 weergegeven [Deltares 2016a]. In het rivierengebied zal een hoogwater belasting in de orde van 4 weken duren, waarbij de belasting geleidelijk toeneemt en dan weer afneemt en de top circa 1 week duurt.

Aangezien bezwijken door piping een proces is dat bestaat uit meerdere stappen, die allemaal ook tijd nodig hebben kan een doorbraak alleen plaatsvinden als een hoge waterstand zodanig lang duurt dat deze ook allen op zullen treden. Hierbij is van belang om ook de mogelijkheid dat pipes in de loop van meerdere hoogwaterbelastingen doorgroeien te onderkennen.



Figuur A.1 Kenmerkend tijdsverloop en geschematiseerd tijdsverloop voor Bovenrijn (linksboven), Pannerdensch Kop (rechtsmidden), Waal bovenstrooms (linksminder) en Waal benedenstrooms (rechtsonder), Lek bovenstrooms (linksonder), IJssel (rechtsonder) (Deltares, 2016a)

A.2 Ondergrond

A.2.1 Deklaag

In het bovenrivierengebied zijn de deklaag veelal dunner dan richting het westen van het land. Deklagen dikker dan 5 m komen er nauwelijks voor. De gehele afwezigheid van een deklaag is ook onwaarschijnlijk. Deklaag diktes zijn typisch in de orde dikte van 0.5 tot 3 m. Dunnere deklaag, <1 m dik zullen eerder gestructureerd zijn waardoor de doorlatendheid hoger is en de kans op reeds aanwezige gaten ook groter is.

De deklaag bestaat voornamelijk uit klei, veen komt in dit gebied nauwelijks voor.

De samenstelling van de klei kan ook variëren. Zowel siltige of zandige klei als humeuze klei kunnen aangetroffen worden. Siltigere/zandigere deklaag zullen veelal een hogere doorlatendheid hebben dan humeuze klei, maar ook een hoger volumiek gewicht.

Typische waarden in het bovenrivierengebied zijn:

- Siltige zandige klei: volumiek gewicht: 14 tot 18 kN/m³ , doorlatendheid 0.04 tot 0.004 m/dag.
- Humeuze klei: volumiek gewicht: 12 tot 14 kN/m³ , doorlatendheid 0.04 tot 0.004 m/dag.

Over het algemeen komen de zandige en siltige kleien dichter bij de rivieren voor, de humeuze kleien verder weg.

A.2.2 Watervoerend pakket

Het watervoerend pakket beïnvloed zowel de toename van de waterspanningen binnendijks, de stroming naar de pipe zodra deze vormt, en de erosieweerstand van de korrels.

De geologie en het afzettingsmilieu zijn bepalend voor de eigenschappen van het watervoerend pakket. De ondiepere zandafzettingen die in het bovenrivierengebied het meest worden aangetroffen onder de dijken zijn rivierafzettingen van meanderende rivieren, en door de wind afgezette dekzanden (Deltares, 2016b). Afzettingen van vlechtende rivieren vormen onder bijna het gehele rivierengebied de top van het dieper liggende Pleistocene pakket. Er zijn ook vrij veel dijken die direct op een deklaag op Pleistoceen vlechtend rivierzand staan in het oosten. De huidige rivier is daar in ingesneden, en de dijken zijn gezet rond de overgang van de huidige rivierafzettingen en de pleistocene rivierafzettingen (met dikkere deklaag daarbovenop).

Waar het bovenste watervoerende pakket bestaat uit meanderende rivierafzettingen of dekzanden kan dit pakket gescheiden zijn van het onderliggende Pleistocene pakket door een kleilaag, echter dit is niet altijd het geval, dan is er sprake van een gefundeerd pakket. Aangezien het Pleistocene pakket veelal een hogere doorlatendheid zal hebben kan dit sterk bijdragen aan de pipinggevoeligheid van het bovenliggende pakket.

Onderstaande is een samenvatting van de karakteristieken van meanderende rivierafzettingen in Deltares (2016b).

Meanderende rivierensystemen bestaan veelal uit een zandige beddinggordel die geflankeerd is door fijnkorrelige kom afzettingen. Relatief smalle crevassegeulen die de kom instromen kunnen leiden tot de aanwezigheid van lokaal zandige geulen die moeilijk karteerbaar zijn. In het oostelijke rivierengebied zijn veel Holocene beddinggordels gefundeerd, ze maken contact met het onderliggende Pleistocene watervoerende pakket.

Afzettingen van meanderende rivieren hebben sterk wisselende korrelgroottes over korte afstanden. De gemiddelde mediane korrelgrootte is ca. 350 µm, maar het minimum is 75 µm en het maximum is 660 µm. Door afwisseling van hoge en lage afvoeren zijn afwisselend laagjes met grover en fijner zand afgezet onder hoeken van ca 45 graden (laterale accretievlakken). Fining upward sequenties, waar de korrelgrootte afneemt met afnemende diepte komen ook veel voor.

Deze eigenschappen dragen naar verwachting bij aan de erosieweerstand van het zand, namelijk door een bredere korrelsortering, groter aandeel van de fijne fractie en variatie van doorlatendheid in de baan van de pipe. Ook de eigenschappen van het watervoerend pakket die invloed hebben op de pipinggevoeligheid zullen hierdoor veelal positief beïnvloed worden, aangezien gelaagdheid op kleine schaal leidt tot anisotropie op grotere schaal.

Een literatuurstudie naar anisotropie in Deltares (2019) geeft voor rivierafzettingen verschillende waarden van anisotropie factor (verhouding horizontale doorlatendheid / verticale doorlatendheid) aan afhankelijk van de aard van de afzetting (met de nadruk dat deze niet voor ontwerp/beoordeling kunnen worden gebruikt). Voor beddingafzettingen (fijn tot matig grof) wordt een bandbreedte van 1-5 genoemd. Voor oeverafzettingen en crevasseafzettingen wordt een waarde van 10.4 genoemd.

Onderstaande is een samenvatting uit Deltares (2016b) van de karakteristieken van dekzandafzettingen:

Dekzand is een relatief fijnkorrelig zand, met een mediane korrelgrootte van 105-210 μm . Er kan onderscheid gemaakt worden tussen Oud dekzand, dat over grote oppervlakken voorkomt, horizontaal gelaagd is en lemige banden bevat, en Jong Dekzand, dat vooral in de vorm van langgerekte ruggen is afgezet. Jong Dekzand bevat vrijwel geen gelaagdheid en is vaak losgepakt.

Voor windafzettingen geven Deltares (2019) anisotropie factoren van 1.9 voor fijn tot matig grove windafzettingen, en 3.7 voor fijn (lemig) zand (meest: dekzand, crevasse afzettingen).

Onderstaande is een samenvatting uit Deltares (2016b) van de karakteristieken van vlechtende rivierafzettingen:

Vlechtende rivierafzettingen zijn vaak zeer heterogeen en gemiddeld grover dan de meanderende beddingordelafzettingen. De gemiddelde mediane korrelgrootte is 400 μm , met een minimum van 90 μm en een maximum van 990 μm . De top van de afzetting is golvend met een reliëf van 1-2 m.

In Deltares (2019) wordt een anisotropiefactor van 1.1 voor vlechtende rivierafzettingen genoemd.

Glaciale afzettingen komen ook voor in het bovenrivierengebied, het is de vraag in hoeverre het pipingproces in deze afzettingen anders verloopt dan in rivierafzettingen. Aanbevolen wordt om dit in een aparte analyse te beschouwen.

A.3 Dijkprofiel

Onderstaande is overgenomen uit GeoDelft (2002).

T. Huitema schrijft in 1947

“Doordat hevige golfslag en hoge overloop bij rivierdijken niet voorkomen varieert het dwarsprofiel van deze dijken veel minder dan bij de zeedijken. Is in de hoogte ten opzichte van de hoogste waterstanden al betrekkelijk weinig verschil, ook in de helling van de buitenbelopen zijn geen grote variaties. Langs de bovenrivieren is het buitenbeloop zelden steiler dan 1 op 2 en zelden flauwer dan 1 op 3. Alleen langs de benedenrivieren, waar deze het karakter hebben van zeeboezems komt soms een flauwer beloop voor tot hoogstens 1 op 5, maar vindt men ook verdedigde belopen van 1 op 1,5. ... Langs schaaldijken wordt bij verbetering van dijken het buitenbeloop met steenglooiing bekleed. De steenglooiingen hebben een helling van 1 op 2 à 1 op 1,5 en zijn soms nog iets steiler. ... De gebruikelijke hellingen variëren voor binnenbelopen van 1 op 1,5 tot 1 op 2,5. ... Rivierdijken zijn over het algemeen geheel van klei gemaakt.”

Door de dijkversterkingen die daarna zijn uitgevoerd varieert het dwarsprofiel van een rivierdijk veel meer dan in 1947. Bij deze dijkverzwaringen hebben tijd, ruimte, en technisch inzicht een grote rol voor het uiteindelijk profiel gespeeld.

In de loop der tijd heeft de maatschappij steeds meer inspraak gehad bij dijkversterkingsprojecten. Daarnaast worden naast een waterkerende, steeds meer andere functies aan de (omgeving van de) dijk toegekend. Voorbeelden zijn woon-, natuur-, landschappelijke -, cultuur historische - of recreatieve functies. Deze functies zijn vaak tegenstrijdig bij dijkversterkingen. Zo kunnen bij bebouwing binnendijks verzwaringen het best aan de buitenzijde van de dijk worden uitgevoerd. In het kader van 'ruimte voor de rivier' is dit juist uit de boze.

Ook een voortschrijdend technisch inzicht heeft invloed op de geometrie van een dijk. Zo heeft men pas sinds de jaren 80 rekening gehouden met het mechanisme opdrijven.

Deze aspecten zorgen, naast variatie in belasting en ondergrond, ervoor dat geen één dijkversterkingsproject hetzelfde is en bijna alle denkbare alternatieven voor een dijkprofiel in het rivierenlandschap van Nederland voorkomen.

Algemeen kan worden opgemerkt dat bij recentere dijkversterkingen binnendijkse verzwaringen in zand worden uitgevoerd. Bij buitendijkse verzwaringen wordt alleen klei gebruikt. Soms zijn in het kader van dijkversterkingsprojecten geheel nieuwe dijken gerealiseerd. De dijkverzwaringen hebben dan vaak een kern van zand en een toplaag van klei. Taludhellingen lopen niet steiler dan 1:2,5.

De kernen van de dijken in het bovenriviereengebied zijn weliswaar van klei maar hebben een groter volumegewicht en doorlatendheid dan in het benedenriviereengebied. Schaaldijken komen minder voor dan langs de dijken in het benedenriviereengebied. In het bovenriviereengebied komen uiterwaarden voor waardoor er sprake kan zijn van een breed voorland, waarin al dan niet begroeiing, geulen en plassen of zelfs bebouwing aanwezig zijn. In het verleden is hier echter ook wel klei of grind gewonnen, waardoor er lokaal diepe gaten in de deklaag aanwezig zijn.

Piping, microstabiliteit zijn naast macrostabiliteit en overloop belangrijk voor het ontwerp van de dijk.

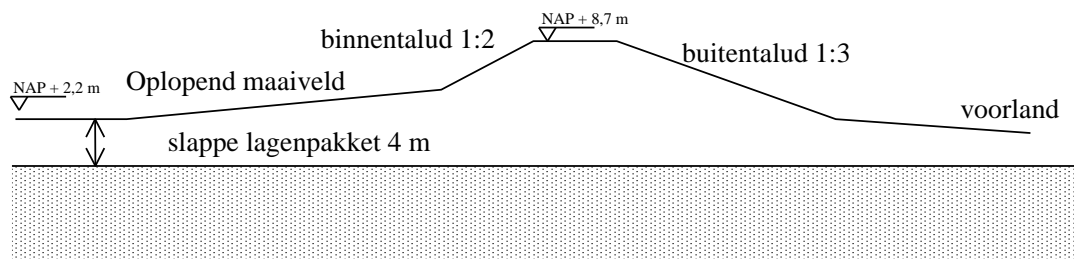
Het materiaal waaruit de dijken zijn opgebouwd heeft niet alleen een iets grotere doorlatendheid maar is in het algemeen ook sterker en taaier dan in het benedenriviereengebied. De vervormingen die een bezwijkmechanisme inleiden zullen daarom kleiner zijn dan in het benedenriviereengebied waar het materiaalgedrag van klei grotere vervormingen toelaat voordat het scheurt.

Bij dijkversterkingsprojecten langs de Lek Waal en Maas speelde in het verleden ruimte niet zo'n grote rol. Langs de dijken in het bovenriviereengebied is minder bebouwing aanwezig dan in het benedenriviereengebied. Beheersaspecten van een dijk hebben daardoor een grotere invloed op het dijkprofiel. Flauwe taluds is daar een voorbeeld van. In onderstaande alinea's worden twee karakteristieke profielen voor het bovenriviereengebied beschreven.

De belangrijkste versterkingen langs de Lek en Waal aan het eind van vorige eeuw betroffen het verflauwen van taluds, het vernieuwen van bekledingen en het aanbrengen van pipingbermen in de vorm van een oplopend maaiveld. Een karakteristiek dwarsprofiel langs de Lek in de Culemborger Waard is afgebeeld in onderstaande figuur. Op de 5,5 m brede kruin loopt een weg. De dijk bestaat geheel uit klei. Ook tijdens de laatste dijkversterkingen is geen gebruik gemaakt van zand. Langs de dijk is bebouwing aanwezig

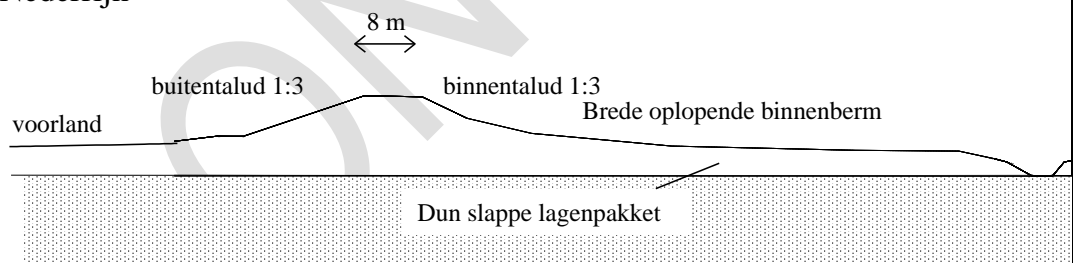
Culemborger Waard

Lek



De Malburgse Dam is gelegen langs de Nederrijn nabij Arnhem. In onderstaand profiel zijn de belangrijkste elementen van de dijk aangegeven. Kenmerkend is een oplopend maaiveld in de richting van de dijk die zorgt voor weerstand tegen piping. Aan de binnenzijde is vaak een teensloot aanwezig die soms door de afdeklaag heen steekt. Zowel het binnen – als buitentalud hebben hellingen van circa 1 op 3. Voorland in de vorm van brede uiterwaarden is vaak aanwezig in het bovenriviereengebied.

Nederrijn



B Bijlage: Bovenrivierengebied Rijntakken: Narratief

Onderstaande bijlage is overgenomen uit Rosenbrand & Knoeff (2020).

B.1 Knoop 1. Buitenwaterstand stijgt en waterspanning in het WVP aan de rivierzijde van de kering stijgt

Doordat er meer water door de Rijntakken wordt afgevoerd stijgt de waterstand en neemt de stroomsnelheid in de rivier toe. Na verloop van tijd stromen uiterwaarden onder.

Toename van de waterstand leidt tot toename van waterspanningen in de watervoerende lagen. Door toename van de stroomsnelheid in de rivier neemt de weerstand van de rivierbodem, indien deze aanwezig was, af. De aanwezigheid van geulen (al dan niet meestromend), kolken en zandwinputten, en sloten in de uiterwaarden beïnvloeden de toename van de waterspanning in het watervoerend pakket (WVP).

Op de rivierbodem ontstaat onder dagelijkse omstandigheden mogelijk een minder doorlatende laag die zorgt voor een intredeweerstand waardoor de stijghoogte in het watervoerende pakket (WVP) minder toeneemt dan de verhoging van de buitenwaterstand. Wanneer de rivier insnijdt in een grover WVP is het echter de vraag of die laag aanwezig is. Tijdens een extreme hoogwatersituatie nemen stroomsnelheden in de rivier toe, waardoor deze laag weggespoeld kan worden. Dit leidt tot een hogere respons van de stijghoogte in het WVP op de buitenwaterstand bij extreme situaties dan in vaker voorkomende hoogwaters.

De deklaag in het voorland remt de stroming naar het WVP. De weerstand van het voorland tegen intredend water, die wordt bepaald door dikte en doorlatendheid van de deklaag, zal niet sterk beïnvloed worden door het onderlopen van het voorland, omdat stroomsnelheden ter plaatse van het voorland lager zullen zijn dan in de rivier.

In het voorland kunnen kolken, zandwinputten, nevengeulen en sloten aanwezig zijn. Op de bodem daarvan zal veelal een sliblaag gevormd zijn die weerstand biedt tegen inzijgend water. De mate waarin deze weerstand afneemt tijdens een hoogwater hangt af van de stroomsnelheid, aanwezigheid van begroeiing, de eigenschappen van de sliblaag en de stromingsrichting. Nevengeulen kunnen vanaf bepaalde waterstanden meestromend worden. Indien er in het WVP in eerste instantie hogere waterspanningen zijn dan de freatische waterstand in de nevengeul of sloten (voordat de geul meestroomt of het voorland onderstroomt) kan de verticale stroming omhoog gericht zijn en de sliblaag uitspoelen.

Lokale erosie bij constructies als kribben, gebouwen, kaden/dijken, wegen maar ook langs randen van plassen en geulen is mogelijk. De mate van (verwachte) erosie kan worden ingeschat door het beoordelen van (de verandering van) het stroombeeld in het gebied.

Het is de verwachting dat de aanwezigheid van sloten of gaten (m.u.v. kolken en zandwinputten) in het voorland slechts een minimaal effect hebben op de toename van de waterspanningen onder de kering. De 'gemiddelde' dikte en doorlatendheid van het voorland bepalen daarmee de toestroom naar het WVP.

De hoogte van het maaiveld, de aanwezigheid van zomerkades en de hoogte bepalen wanneer uitwaarden onderstromen.

Indien een voorland smal of afwezig is en waterspanningen vooral stijgen door intrede vanuit de rivier hebben de eigenschappen van het WVP een relatief belangrijker effect op de toename in de waterspanningen. Anisotropie in het WVP remt dan de toename van de waterspanningen, en dit is ook het geval voor situaties met horizontale gelaagdheid (waardoor de bulk doorlatendheid van het WVP ook als anisotroop beschouwd kan worden).

B.2 **Knoop 2. Waterspanningen in het WVP aan de polderzijde stijgt en er ontstaat verticale stroming**

Toename van waterspanningen in WVP - voor en onder de dijk - leidt tot verhoging van de stijghoogte aan de binnenzijde van de dijk. De mate waarin de stijghoogte toeneemt hangt af van de eigenschappen van het WVP, de eigenschappen van de deklaag aan de binnenzijde en de geohydrologische situatie binnendijks. Door de hogere stijghoogte ontstaat een verticale stroming door de deklaag welke leidt tot kwel. Aan de binnenzijde van de dijk ontstaan natte plekken.

De mate waarin de waterspanningen binnendijks toenemen hangt af van de weerstand van het WVP. Een lage doorlatendheid en een dun pakket zorgen voor minder toename van de waterspanningen in het achterland dan een dik doorlatend pakket.

Een gefundeerd pakket (kortsluiting tussen de Holocene en Pleistocene pakket) kent een hogere stroming (door de grotere doorlatendheid van het Pleistocene pakket) welke de waterspanningen in het WVP beïnvloedt. Wanneer het WVP bestaat uit afwissende lagen die grover en fijner zijn (laterale accretievlakken), zoals het geval kan zijn bij rivierafzettingen geeft dit een lagere netto doorlatendheid waardoor er minder toename van de binnendijkse waterspanning is. De anisotropie van de doorlatendheid van het WVP beïnvloedt ook de ontwikkeling van de stijghoogte onder de deklaag binnendijks, doordat er bij een lagere verticale doorlatendheid minder water bij de rivier het pakket intreedt en in het achterland weer omhoog stroomt.

Bij een doorlatendere dünnere deklaag is er meer kwel naar het achterland, waardoor waterspanningen minder oplopen. De leklengte van het achterland is een belangrijke parameter die de toename van waterspanningen in het achterland beïnvloed.

Het kan voorkomen dat het zandlichaam onder de dijk niet ver naar het achterland doorloopt, (maar wel onder de dijk uitkomt door de beperkte afmeting van een geul bij rivierafzettingen) dit leidt tot een concentratie van stroming en hogere waterspanningen onder de deklaag.

De dynamiek van de grondwaterstand en de oppervlaktewaterstand hebben een belangrijke invloed op de toename van waterspanningen aan de polderzijde. Hoge gronden in het achterland kunnen bijdragen aan een sterkere toename van de waterspanning onder de deklaag wanneer deze zorgen voor een stroming van de hoge gronden richting de rivier. In het geval dat er binnendijks bemalen (peilbeheer) wordt remt dit de ontwikkeling van de waterspanningen onder de deklaag. Het oppervlaktewaterbeheer beïnvloedt de waterspanningen ook. De aanwezigheid van een onverzadigde zone in het WVP achterland remt de toename van de waterspanningen binnendijks, doordat er freatische berging in de onverzadigde zone is. Dit zorgt ook voor vertraging, waardoor de duur van de hoogwaterbelasting belangrijk wordt. De geschiedenis, recente hoogwaters, beïnvloeden de bergingscapaciteit van het achterland en daarmee te toename van de waterspanningen. Daarnaast kunnen ook drainage maatregelen aanwezig zijn om de ontwikkeling van de waterspanningen onder de deklaag te remmen.

B.3 Knoop 3. Opbarsten en geconcentreerde verticale stroming

Het vervolg van het doorbraakproces is afhankelijk van de aanwezigheid en eigenschappen van de binnendijkse deklaag.

Onderscheid wordt gemaakt tussen:

- Deklaag aanwezig die enkele meters dik is (maar waarschijnlijk minder dan 5 m) zonder gaten of sloten die door de gehele dikte van de deklaag snijden. Bij deze deklaag zorgt toename van de stijghoogte voor opdrijven van de deklaag. Afhankelijk van de eigenschappen kan de deklaag scheuren waardoor verticale stroming geconcentreerd optreedt. Deze is zichtbaar als een (schone) wel. Opbarsten kan op één of op meerdere locaties optreden. Het opbarsten zorgt voor een uittredepunt, dat nodig is voor het verdere piping proces.

Vanaf de vorming van een wel kan deze gesignaleerd worden bij inspectie en kunnen maatregelen worden getroffen indien het risico op piping groot genoeg wordt geacht.

Indien er een intacte deklaag aanwezig is in het achterland en de waterspanning voldoende stijgt om deze op te tillen vindt opdrijven plaats. Hierdoor kan de deklaag scheuren, opbarsten. Het opbarsten is onwaarschijnlijk bij deklaagen met een dikte groter dan 5 m, echter in het bovenriviereengebied zijn deklaagen veelal dunner. Het scheuren van de deklaag wordt mogelijk verhinderd door cohesie in de deklaag. Een zandigere deklaag is naar verwachting gevoeliger voor scheuren, echter deze zal ook doorlatender zijn waardoor waterspanningen minder toenemen. Een situatie met een tussenzandlaag kan ook voorkomen, waarbij het de vraag is of opbarsten nog mogelijk is. De aanwezigheid van opbarstlocaties en wellen beïnvloed de waterspanningen (deze nemen af) en zo het ontstaan van nieuwe wellen. Dit zal een lokaal effect hebben, echter op een afstand van 50-100 meter is dit effect vermoedelijk minimaal, zeker in gevallen met een relatief korte leklengte door een relatief doorlatende deklaag.

- Dunne doorlatende deklaag, mogelijk met scheuren. Opbarsten is niet nodig voor het verdere verloop van het pipingproces. De hogere stijghoogte leidt direct tot verticale uitstroom wat nodig is voor verticaal zandtransport, de volgende stap in het pipingproces.

Indien er een dunne deklaag is waarbij de sloot in het WVP insnijdt, of wanneer er gaten (bijvoorbeeld krimpscheuren of slecht afgedichte boorgaten) in de deklaag zijn, is opbarsten niet nodig om een uittredepunt te creëren. Door structuurvorming zal een dunne deklaag vaak erg doorlatend zijn, waardoor er minder concentratie van stroming naar het uittredepunt is.

- Afwezige deklaag of deklaag doorsneden door een sloot. Verticale stroming en verticaal zandtransport is niet noodzakelijk. Het pipingproces gaat verder met horizontaal zandtransport.

Het is mogelijk dat wellen ontstaan op enige afstand van de kering, op lokale zwakke plekken waar het maaiveld lager is, of waar de deklaag dunner of lokaal afwezig (bijvoorbeeld in sloten). Indien tussen de wel en de kering een deklaag aanwezig is kan de pipe hieronder terugschrijven. Indien dit niet het geval is vormen deze wellen geen risico op een overstroming door piping, echter kunnen wel bij hogere waterstanden wellen dicht bij de kering ontstaan.

B.4 Knoop 4. Heave

Stroming concentreert zich naar het uittredepunt voor situaties met een deklaag. Door concentratie van stroming naar het uittredepunt, neemt de gradiënt in het zand toe, en worden zandkorrels gefluïdiseerd. Door hoge verticale stroomsnelheden in het verticale kanaal worden korrels opgetild. Het gefluïdiseerde zand vult het verticale kanaal. Wanneer de stroomsnelheid hoog genoeg is kunnen de korrels worden getransporteerd naar het maaiveld.

Wanneer de suspensie van korrels in het gat een evenwicht bereikt met de stroomsnelheid resulteert de suspensie in een drukval in de wel, waardoor de drukval over het watervoerende pakket afneemt. Bij hogere stroomsnelheden worden de korrels uit de wel weggespoeld. Als er niet meer zand geërodeerd wordt kan de wel ook alleen water meevoeren ('kokende' wel). De drukval in de wel is nagenoeg nul en draagt niet bij aan de drukval over het pakket.

Bij signalering van een kokende wel bij inspectie kunnen maatregelen worden getroffen indien het risico op piping groot genoeg wordt geacht.

Wanneer het zand erg grof is zijn korrels zwaarder en worden deze minder makkelijk getransporteerd, wat verdere erosie belemmert. Bij een situatie van een grof zand bovenop een fijn zand, zijn gradiënten in het grove zand mogelijk te laag om korrels te eroderen. Bij de omgekeerde situatie, een fijn zand boven een grof zand zullen gradiënten in het fijne zand juist hoog zijn en is verticaal transport makkelijker.

Hoe dikker en ondoorlatende de deklaag in het achterland, hoe meer concentratie van stroming. Indien er meerdere opbarstgaten zijn neemt de concentratie van stroming af. De aanwezigheid van sloten parallel aan de kering, zeker als die in het WVP insnijden doet de concentratie van stroming afnemen. Een kopsloot daarentegen zorgt juist voor concentratie van stroming, als het uitstroompunt inderdaad in de kop van deze sloot is. Bij een doorlatend achterland neemt de concentratie van stroming eveneens af, zeker wanneer het WVP daarnaast ook anisotrop is waardoor water minder makkelijk naar boven stroomt.

De aanwezigheid van opbarstlocaties en wellen beïnvloedt de waterspanningen en zo de concentratie van stroming die nodig is voor heave.

B.5 Knoop 5. Horizontaal zandtransport en pipe vorming

Horizontaal zandtransport treedt op doordat de horizontale hydraulische gradiënt hoog genoeg is om korrels te eroderen. Aan het maaiveld is een zandmeevoerende wel zichtbaar. Wanneer de hydraulische gradiënt vanuit de rivierzijde hoog genoeg, is groeien pipes richting de rivierzijde. Boven de pipe is een cohesieve deklaag nodig anders stort deze in, wat de ontwikkeling van de pipe vertraagt. In situaties zonder deklaag kan een pipe alleen ontstaan en doorgroeien wanneer een geconcentreerde uitstroom bij de binnentoe van de kering ontstaat.

Bij signalering van een zandmeevoerende wel bij inspectie kunnen maatregelen worden getroffen indien het risico op piping groot genoeg wordt geacht.

In situaties met een deklaag met een gat, zorgt concentratie van stroming naar dat gat voor lokaal hogere hydraulische gradiënten, waardoor er eerder horizontaal transport op kan treden. In situaties zonder deklaag is er minder sprake van concentratie van stroming, hier kan op meerdere plekken zandtransport optreden. De onder Heave toegelichte factoren die invloed hebben op de concentratie van stroming gelden ook voor horizontaal zandtransport. Daarnaast heeft de weerstand in de wel die door heave (en eventueel opkisten) veroorzaakt wordt effect op de gradiënt voor horizontaal zandtransport.

Bij een situatie van een grof zand bovenop een fijn zand, zijn gradiënten in het grove zand mogelijk te laag om korrels te eroderen. Grotere korrels in een grover pakket zijn zwaarder om te transporteren en hebben daarmee een hogere erosieweerstand. Een breder gesorteerd zand heeft ook een hogere weerstand tegen erosie (Schmertmann, 2000). De aanwezigheid van fines belemmert de pipegroei eveneens, in ieder geval bij getijdenzanden (Hijma en Oost, 2018) maar mogelijk speelt dit effect ook bij rivierzanden. Dicht gepakt zand (met een hoge relatieve dichtheid (RD)) is ook moeilijker om te eroderen.

Wanneer een wel ver weg van de rivier ontstaat (mogelijk door meer stroming uit het achterland bij een situatie van hoger liggende gronden) is de gradiënt richting de rivier mogelijk niet voldoende voor de ontwikkeling van de pipes richting de rivier. De zandmeevoerende wel wordt gevoed door de erosielens die onder de deklaag ontstaat.

Indien er een wel ontstaat op enige afstand van de binnenteen van de kering in een situatie zonder deklaag is het onwaarschijnlijk dat deze terug groeit naar de kering.

B.6 Knoop 6. Doorgaande pipe

Als de pipe vormt kan deze bij gelijkblijvend verval een evenwichtssituatie bereiken, dan groeit de pipe alleen door wanneer de rivierwaterstand toeneemt. Bij de overschrijding van een zeker verval bereikt de pipe een lengte waarbij deze bij gelijkblijvende waterstand door zal groeien, mits geen vreemde elementen de pipegroei verstoren. De pipe maakt kortsluiting met het rivierwater bij het intredepunt.

Het langer worden van een pipe of meerdere pipes kan leiden tot een evenwichtssituatie waardoor de pipe stopt met groeien doordat de belasting nu wordt verdeeld over een langere pipe. Concentratie van stroming naar de pipe wordt beïnvloed door de onder Heave en Horizontaal Zandtransport toegelichte factoren.

De aanwezigheid van drains, kwelschermen of damwanden voorkomt het doorgroeien van de pipe. De pipe kan ook niet doorgroeien wanneer het pipinggevoelige zandlichaam niet doorloopt tot het intredepunt. Instorten van de deklaag kan de pipe ook (tijdelijk) blokkeren waardoor deze een nieuw pad moet zoeken wat het proces vertraagt.

Wanneer het zand in de baan van de pipe een afwisseling van fijnere en grovere lagen bevat, hindert dit het doorgroeien, zowel doordat de totale stroming naar de pipe door fijnere lagen wordt gehinderd, als doordat horizontale gradiënten in grovere lagen lager zijn en korrels dus minder makkelijk losgemaakt worden. Ook kan het langer duren, doordat de pipe een zwakker pad zoekt. Wanneer de diepte van de deklaag helt heeft dit invloed op het korreltransport, wat de pipegroei kan hinderen of vergemakkelijken. Heterogeniteit kan zowel invloed hebben op het benodigde verval om de pipe langer te laten worden als op de snelheid waarmee de pipe langer wordt.

In de aanwezigheid van een breed voorland is de vraag waar de pipe kortsluiting zal maken met de rivier. Bij een dik voorland zonder gaten of sloten zal de pipe nog onder het hele voorland uit moeten groeien. Bij een dun voorland, eventueel met sloten of gestructureerd kan de pipe al eerder op een gat sluiten en daardoor kortsluiting maken. Dat een pipe hier uitkomt is toeval omdat de initiële pipe niet afhankelijk is van deze locatie.

B.7 Knoop 7. Ruimen

Wanneer de pipes aan de rivierzijde kortsluiting maken met de rivier neemt de erosiecapaciteit van het water sterk toe en wordt de pipe verbreed en verdiept (ruimen). Voorwaarde hiervoor is wel dat de waterstand in de rivier hoog blijft. De instroom van water erodeert zand bovenstrooms dat de pipe benedenstrooms tijdelijk verstopt totdat het proces weer doorgaat. Zo vergroot de pipe van bovenstrooms naar benedenstrooms.

Het ruimproces wordt kan eventueel worden beïnvloed door het instorten van de kering boven de pipe. Dit kan optreden bij grotere pipes, bijvoorbeeld in grovere watervoerende pakketten. Dat vertraagt of stopt het proces totdat de pipe een andere weg heeft gevonden. Dit wordt mede beïnvloed door de dikte en cohesie van de deklaag en door de opbouw van de dijk zelf.

B.8 Knoop 8. Kruinverlaging

De holte onder de dijk leidt tot verzakking van de dijk.

De mate van kruinverlaging hangt af van de grootte van de holte onder de dijk. Indien de pipinggevoelige laag slechts dun is, kan de holte onder de dijk kleiner zijn waardoor minder kruinverlaging optreedt.

De sterkte en vervormingseigenschappen van de dijk en eventueel aanwezige deklaag beïnvloeden ook de mate van kruinverlaging.

B.9 Knoop 9. Maatregelen ineffectief

Wanneer pipingverschijnselen op tijd worden waargenomen en effectieve beheersmaatregelen inzetbaar zijn kan een overstroming worden voorkomen. Indien dat niet het geval is kan bresgroei optreden.

Inspectiemethoden die gehanteerd kunnen worden om wellen tijdig te constateren zijn:

- *Visuele inspectie.*
- *Monitoring van grondwaterstanden.*
- *Drones.*

Mogelijke maatregelen die genomen kunnen worden wanneer een wel gedetecteerd is zijn onder meer (zie ook paragraaf 4.3):

Reguliere maatregelen:

- *Het opkisten van de wel.*
- *Peil opzetten met een kwelkade.*
- *Drainage maatregelen.*

Innovatieve maatregelen¹:

- *Het aanbrengen van een gravel suspensie in het opbarstgat of de wel waardoor de weerstand in het kanaal hoog blijft (of de variant hierop de USACE paraplu, hiervan).*
- *Het toepassen van nooddrainage*

De frequentie van inspectie beïnvloedt de kans op het tijdig detecteren van wellen, evenals de zichtbaarheid van de verschijnselen. De kans dat wellen in een (diepe) sloot over het hoofd gezien worden is groter, en 's nachts is de zichtbaarheid ook lager dan overdag. Op basis van kennis van de geohydrologische situatie kan een risico gestuurd plan van inspectie overwogen worden.

De mogelijkheid tot het nemen van maatregelen wordt beïnvloed door factoren als de aanwezigheid van voldoende materiaal en mensen. Bij extreme situaties is het mogelijk onveilig om maatregelen te treffen. Bij aanwezigheid van veel wellen bestaat de kans dat de kritieke wel niet wordt gedetecteerd of dat daar geen maatregelen worden getroffen. De tijd die beschikbaar is voor het meenemen van maatregelen beïnvloedt de effectiviteit hiervan.

Om te besluiten of maatregelen noodzakelijk zijn is het van belang na te gaan of wellen tot piping kunnen leiden (bijvoorbeeld bij wellen ver van de kering in situaties zonder deklaag tussen de wel en de kering) en hoeveel tijd benodigd is voor het groeien van de pipe en hoe dit zich verhoudt tot de duur van het hoogwater.

B.10 Knoop 10. Bresgroei

Indien de kruinverlaging zodanig is dat water over de kruin heen stroomt leidt dit tot bresgroei.

¹ Waarvan de werking nog dient te worden aangetoond.

In de situatie dat er een dunne laag piping gevoelig zand bovenop een grindlaag is, is de erosie van alleen deze bovenste laag mogelijk onvoldoende om tot bezwijken te leiden.

De vervormingen in de dijk die tot bresgroei leiden zijn ook afhankelijk van de opbouw van de dijk, van het materiaal waaruit de dijk bestaat en van de geometrie van de dijk. Bij dijken met een zandkern en kleibekleding zal een kleine vervorming al snel leiden tot erosie van de kern en bresgroei, terwijl een kleidijk meer vervorming kan verdragen. De dikte en cohesie van de deklaag beïnvloeden de deformatie van de dijk. De mate van vervorming die nodig is voor overstrooming hangt ook af van de hoogte van de dijk, in relatie tot de buitenwaterstand.

CONCEPT

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl