

Analyse waterkeringen Limburg

Hoogwater juli 2021



Analyse waterkeringen Limburg

Hoogwater juli 2021

Auteur(s)

Theo Stoutjesdijk

Raymond van der Meij

Jochem Caspers

Laura Halbmeijer

Partners

HKV Lijn in Water, DELFT

Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V, DEVENTER

Analyse waterkeringen Limburg

Hoogwater juli 2021

Opdrachtgever	Waterschap Limburg
Contactpersoon	de heer drs. A.G.A Janssen
Referenties	
Trefwoorden	Hoogwater 2021 Limburg, waterkeringen, evaluatie gedrag

Documentgegevens

Versie	2.2
Datum	22-12-2022
Projectnummer	11207700-007
Document ID	11207700-007-ZWS-0010
Pagina's	55
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Theo Stoutjesdijk	
	André Koelewijn	
	Jochem Caspers (HKV Lijn in Water)	
	Laura Halbmeijer (Witteveen + Bos)	
	Nathalie Asselman	

Samenvatting

Waterschap Limburg heeft Deltares gevraagd onderzoek uit te voeren naar de waterkeringen langs de Maas naar aanleiding van het hoogwater in juni 2021 om van deze ervaringen te kunnen leren. Deze studie is oriënterend waarin een analyse is uitgevoerd van een viertal locaties. Doel van de analyse van de vier cases is om meer inzicht in en gevoel te krijgen voor de uitwerking en toepasbaarheid van de beoordeling van de waterkeringen op basis van de beoordelingsystematiek van het WBI (Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017). Voor zover dat mogelijk is worden mogelijke verbeteringen geïdentificeerd.

Eerst zijn de door het waterschap geobserveerde incidenten tijdens het hoogwater geïventariseerd en vervolgens is gekeken of deze observaties overeen komen met resultaten uit de beoordeling van de kering. Het is relevant te zien of bijvoorbeeld de incidenten met zandmeevoerende wellen vooral waargenomen zijn op locaties die onder de signaleringswaarde zitten. Of had men op basis van de beoordeling juist op andere locaties incidenten verwacht?

In overleg met het waterschap zijn vier locaties geselecteerd die nader zijn onderzocht. Daarbij zijn ook enkele interessante locaties buiten beschouwing gelaten, aangezien deze al in ander kader (bijvoorbeeld bij versterking van de kering) uitvoerig door het waterschap worden onderzocht. Bij deze vier locaties wordt de case in detail beschreven, de bevindingen van het hoogwater gerapporteerd en worden eerste conclusies per locatie getrokken. Deze uitkomsten worden gebruikt om, indien mogelijk, meer algemene lessen te trekken. De uitgewerkte cases laten zien dat het zinvol is om de uitkomsten uit de veiligheidsbeoordeling en de werkelijk waargenomen verschijnselen tijdens een hoogwaterperiode met elkaar te vergelijken.

Er zijn vier mogelijke uitkomsten:

- Een kering voldoet rekenkundig aan de norm op doorsnedeniveau en er worden geen signalen waargenomen die duiden op het optreden van een faalpad; dit is consistent; deze situaties zijn verder niet onderzocht.
- Een kering voldoet rekenkundig aan de norm, maar er zijn waarnemingen die wijzen op het optreden van een bepaald faalpad.
- Een kering voldoet rekenkundig niet aan de ondergrens- of signaleringswaarde, maar er zijn geen waarnemingen die dit bevestigen.
- Een kering voldoet rekenkundig niet aan de ondergrens- of signaleringswaarde, en waarnemingen geven aan dat de situatie mogelijk onveilig is.

Van al deze vier gevallen valt te leren, al past enige terughoudendheid om op basis van slechts vier cases conclusies te trekken die op systeemniveau geldig zijn. Zoals in de vier cases is gedaan is het op lokaal niveau nuttig om te kijken waar er verschillen in beoordeling en waarneming bij het hoogwater optreden. Dit kan aanleiding zijn om bijvoorbeeld de opgestelde schematisatie en daarmee de beoordeling aan te scherpen ofwel de beoordelingsmethode aan te passen.

Hierbij zijn drie eerste aanbeveling te maken:

- Iedere (lokale) beoordeling is maatwerk op basis van een beperkte set aan (lokale) gegevens. Daarom is het voor veel meer dan de uitgevoerde vier cases aan te bevelen om de ervaring en waarneming met elkaar te vergelijken.
- Opgetreden discrepanties tonen aan dat het, indien daar aanwijzingen voor zijn, lucratief is om de (lokale) schematisering aan te scherpen ten behoeve van de beoordeling. Dit

vereist soms meer grondonderzoek of het toepassen van meer arbeidsintensieve rekenmethodes.

- Bij de case studies is de vergelijking gemaakt ten opzichte van de beoordeling met voor een groot deel hogere waterstanden met een langere tijdsduur. Het beter meenemen van bv tijdseffecten en faalpaden kan tot een meer precies oordeel leiden.

Op een meer generiek niveau geven de cases aanwijzingen dat er nader onderzoek nodig is om te kijken wanneer er in bredere zin aanleiding kan zijn om hetzij schematisaties, hetzij beoordelingsmethoden aan te passen.

Hierbij valt te denken aan:

- Een minder grof raster voor de lokale waterstandsstatistiek voor beoordeling om lokale effecten beter in rekening te kunnen brengen.
- De invloed van aanwezig voorland minder conservatief in te kunnen schatten buiten de standaard werkwijze in de huidige beoordelingsmethode.
- Er speelt een discussie omtrent de invloed van grove zand- en grindlagen en tevens de aanwezigheid van tussenzandlagen. Ook in enkele van de uitgewerkte cases is duidelijk dat dit van overheersend belang is voor de beoordeling van de kans op piping, dus als hier meer duidelijkheid in kan komen is dat winst.
- De tijdsduur van een hoogwater heeft invloed. Deze invloed is in de hoogwaterstatistiek en in rekenmodellen nog maar beperkt in rekening te brengen. Hier zit ruimte voor verbetering. Het WBI biedt hier ingangen toe door middel van faalpaden.
- Verticale stromingscomponenten bij piping en kunstwerken goed meenemen, voornamelijk bij twee-lagensystemen in de ondergrond.
- Een scherpere beoordeling kunnen geven met probabilistische analyses afgezet tegen de huidige semi-probabilistische analyses; in naar verwachting 80 % van de gevallen¹ is hiermee een scherper oordeel te verwachten.

Er is tot op heden in de beoordelingssystematiek weinig aandacht voor het meenemen van ervaringen tijdens hoogwater in de beoordeling van de veiligheid van waterkeringen. Het verhaal van de kering kan hier praktische handvatten voor bieden. In de wettelijke beoordelingen (van na juli 2021) van waterschap Limburg zijn ervaringen van het hoogwater meegenomen en veelal verwerkt in de beoordelingsresultaten middels 'bewezen sterkte' (wegstrepen van de faalkans bijdrage van overleefde waterstanden). De onderhavige (oriënterende) studie laat zien dat hier nog meer voordeel in kan zitten.

Dit (deel)onderzoek is uitgevoerd in samenwerking tussen Deltares, HKV Lijn in Water en Witteveen+Bos. Dit onderzoek Waterkeringen is een onderdeel van een brede watersysteemanalyse voor Waterschap Limburg.

¹ De semi-probabilistische eis werkt met een (conservatieve) regressielijn door probabilistische analyses waardoor in 80% van de analyses het probabilistische resultaat gunstiger is dan het semi-probabilistische oordeel.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Achtergrond	8
1.2	Opzet systeemanalyse	8
1.3	Onderzoek waterkeringen Maas	9
1.4	Leeswijzer	9
2	Vergelijking beoordeling keringen en incidenten juli 2021	10
2.1	Overzicht van eerder uitgevoerde beoordeling waterkeringen	10
2.2	Overzicht van waargenomen incidenten juli 2021	11
2.3	Reflectie en selectie van nader te onderzoeken locaties	13
3	Analyse van nader onderzochte locaties	16
3.1	Aasterberg (82-1)	16
3.1.1	Beschrijving	16
3.1.2	Bevindingen hoogwater	17
3.1.3	Waterstandsanalyse	18
3.1.4	Conclusies	19
3.2	Ohé & Laak – Stevensweert (81-1)	20
3.2.1	Beschrijving	20
3.2.2	Bevindingen hoogwater	22
3.2.2.1	Sint-Annakapel (cat. V)	23
3.2.2.2	Eiland (cat. IV)	24
3.2.3	Conclusies	25
3.3	Nattenhoven – Roosteren (83-1)	26
3.3.1	Beschrijving	26
3.3.2	Bevindingen hoogwater	26
3.3.2.1	Roosteren (cat. IV)	27
3.3.3	Conclusies	31
3.4	Roermond Merum-Ool-Herten (77-1)	31
3.4.1	Beschrijving	31
3.4.2	Bevindingen hoogwater	32
3.4.2.1	Piping bij Kunstwerken (PKW)	35
3.4.2.2	Locatie (1)	35
3.4.2.3	Locatie (2)	37
3.4.3	Conclusies	38
4	Synthese	39
4.1	Erosie binnentalud door onderschatting belasting (Aasterberg)	39
4.2	Piping (Ohé & Laak – Stevensweert en Nattenhoven – Roosteren)	39
4.3	Piping bij kunstwerken (Roermond Merum – Ool – Herten)	40

5	Conclusies en aanbevelingen	41
	Referenties	43
A	Fragility curves	44
B	Voorland	45
B.1	Boringen voorland 83-1	46
C	Overzicht interessante locaties	47

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In juli 2021 zijn grote delen van Limburg getroffen door hevige regenval. In korte tijd steeg het water in de Limburgse beken tot recordhoogte. Dit leidde op verschillende plaatsen tot overstromingen en daarmee tot schade aan huizen en bedrijven. Ook delen van België en Duitsland langs de Maas overstromden, met zeer veel schade en verlies aan mensenlevens tot gevolg. De neerslag en de daarmee gepaard gaande hoogwaters op rivieren en beken, betrof een extreme en unieke gebeurtenis met enorme impact.

Naar aanleiding van het hoogwater van juli 2021 is vanuit de samenwerkende partijen de behoefte ontstaan om te starten met een watersysteemanalyse. Tevens is vanuit de beleidstafel Hoogwater en Wateroverlast de opdracht geformuleerd om te onderzoeken wat de aanleiding was van het hoogwater (spoor 1) en wat mogelijke oplossingsrichtingen zijn om dit soort situaties beter het hoofd te bieden (spoor 2). De provincie Limburg en het waterschap Limburg hebben Deltares gevraagd om te starten met een watersysteemanalyse en daarbij ook mogelijke maatregelen te verkennen die ingezet kunnen worden om de risico's gekoppeld aan dit soort overstromingen te verkleinen en de veerkracht van het systeem te vergroten.

Voorafgaand aan de systeembrede analyse voor heel Zuid-Limburg is aan Deltares gevraagd de wateroverlast en overstromingen in vier 'casestudies' te analyseren. Deze casestudies zijn:

- Valkenburg.
- De Geulmonding nabij Meerssen en Bunde.
- De Roermonding nabij Roermond.
- Eyselshoven.

De analyses voor de casestudies waren vooral bedoeld om van te leren. Met behulp van de casestudies is een eerste beeld verkregen van het functioneren van het watersysteem in Limburg en de verschillende soorten wateroverlast en overstromingen die zich daar voor kunnen doen. De rapporten over de casestudies zijn in het voorjaar van 2022 opgeleverd (De Jong & Asselman, 2022; Geertsema & Asselman, 2022; Van Heeringen et al., 2022a,b).

Na afronding van de casestudies is gestart met de systeembrede analyse. Daarbij is ook de wateroverlast in andere gebieden en gemeenten onderzocht en is gekeken naar het functioneren van de waterkeringen langs de Maas.

1.2 Opzet analyse

De systeemanalyse bestaat uit meerdere deelonderzoeken. Drie onderzoeken richten zich op het hydrologisch en hydraulisch functioneren van de Geul, de Geleenbeek en de Roer. In een vierde onderzoek wordt in meer detail gekeken naar oppervlakkige afstroming, in dit geval in twee deelstroomgebieden van de Geul. Een vijfde onderzoek bestudeert het overstromingsgevaar en de kans op schade en mogelijk ook slachtoffers in de drie genoemde beeksystemen. Het zesde onderzoek kijkt naar de waterkeringen langs de Maas. Dit rapport betreft dit laatste onderzoek.

1.3 Onderzoek waterkeringen Maas

Het doel van het onderzoek naar de waterkeringen langs de Maas is:

- Verkrijgen van een overzicht van de in juli 2021 opgetreden incidenten.
- Meer inzicht krijgen in de uitwerking en toepasbaarheid van de beoordeling van de waterkeringen op basis van de beoordelingssystematiek van het WBI (Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017).

Bij dit deelonderzoek naar de waterkeringen langs de Maas is gestart met het beantwoorden van de vraag 'wat is er gebeurd in juli 2021 en hoe heeft het systeem gefunctioneerd?' Er is een overzicht gemaakt van locaties waar tijdens het hoogwater van juli 2021 sprake was van een incident. Vervolgens is gekeken of deze observaties/incidenten overeen komen met resultaten uit de beoordeling van de kering. Het is relevant te zien of bijvoorbeeld de incidenten met zandmeevoerende wellen vooral waargenomen zijn op locaties die onder de signaleringswaarde zitten. Of had men op basis van de beoordeling juist op andere locaties incidenten verwacht?

In overleg met het waterschap is een aantal locaties geselecteerd die nader zijn onderzocht. Doel van deze onderzoeken is om te bepalen of en waarom er sprake was van tegenstrijdigheden tussen de waargenomen incidenten en de resultaten van de beoordeling.

De uitkomsten van deze onderzoeken kunnen mogelijk worden gebruikt om meer algemene lessen te trekken: zijn de bevindingen aanleiding om de beoordelingen op een andere manier uit te voeren? Zijn er aanvullende methodieken nodig om het beoordelingsproces te ondersteunen, of is er een aanleiding om de werkprocessen aan te passen om de beoordeling beter te ondersteunen?

1.4 Leeswijzer

Na deze inleiding volgt in hoofdstuk 2 de vergelijking van de locaties waar in juli 2021 sprake was van een incident en wordt dit gezien in het licht van de eerder uitgevoerde beoordeling van de waterkeringen. In dit hoofdstuk staat ook welke locaties zijn geselecteerd voor nader onderzoek en waarom. De resultaten van de gedetailleerdere onderzoeken staan gerapporteerd in hoofdstuk 3. Een synthese met de geleerde lessen ten aanzien van de beoordeling van waterkeringen in de Maasvallei is te vinden in hoofdstuk 4. Hoofdstuk 5 geeft een overzicht van de belangrijkste conclusies.

2 Vergelijking beoordeling keringen en incidenten juli 2021

2.1 Overzicht van eerder uitgevoerde beoordeling waterkeringen

In opdracht van Waterschap Limburg hebben HKV en Witteveen+Bos tussen 2019 en 2022 de beoordeling uitgevoerd van een groot aantal dijktrajecten in samenwerking met het waterschap. Het totale aantal trajecten in het beheersgebied van Waterschap Limburg is 46, en de lengte bedraagt circa 185 kilometer. Voor ieder dijktraject is het veiligheidsoordeel bepaald aan de hand van de afstand van de berekende overstromingskans tot de wettelijke norm. Het veiligheidsoordeel is uitgedrukt in vijf categorieën, zie Tabel 2.1. Indien het veiligheidsoordeel categorie C of D is, betekent dit dat het dijktraject niet voldoet aan de wettelijke norm. In Tabel 2.2 zijn de dijktrajecten van Waterschap Limburg inclusief het veiligheidsoordeel opgenomen. Hieruit volgt dat meer dan 40% van de beoordeelde trajecten een categorie C of lager als veiligheidsoordeel heeft.

Tabel 2.1 Categorieën van het veiligheidsoordeel.

Categorie	Categorie oordeel dijktraject	Begrenzing categorie
A+	Voldoet ruim aan de signaleringswaarde	$P_{f,traject} < 1/30 P_{eis,sign}$
A	Voldoet aan de signaleringswaarde	$1/30 P_{eis,sign} < P_{f,traject} < P_{eis,sign}$
B	Voldoet aan de ondergrens, maar niet aan de signaleringswaarde	$P_{eis,sign} < P_{f,traject} < P_{eis,onder}$
C	Voldoet niet aan de ondergrens	$P_{eis,onder} < P_{f,traject} < 30 P_{eis,onder}$
D	Voldoet ruim niet aan de ondergrens	$P_{f,traject} > 30 P_{eis,onder}$

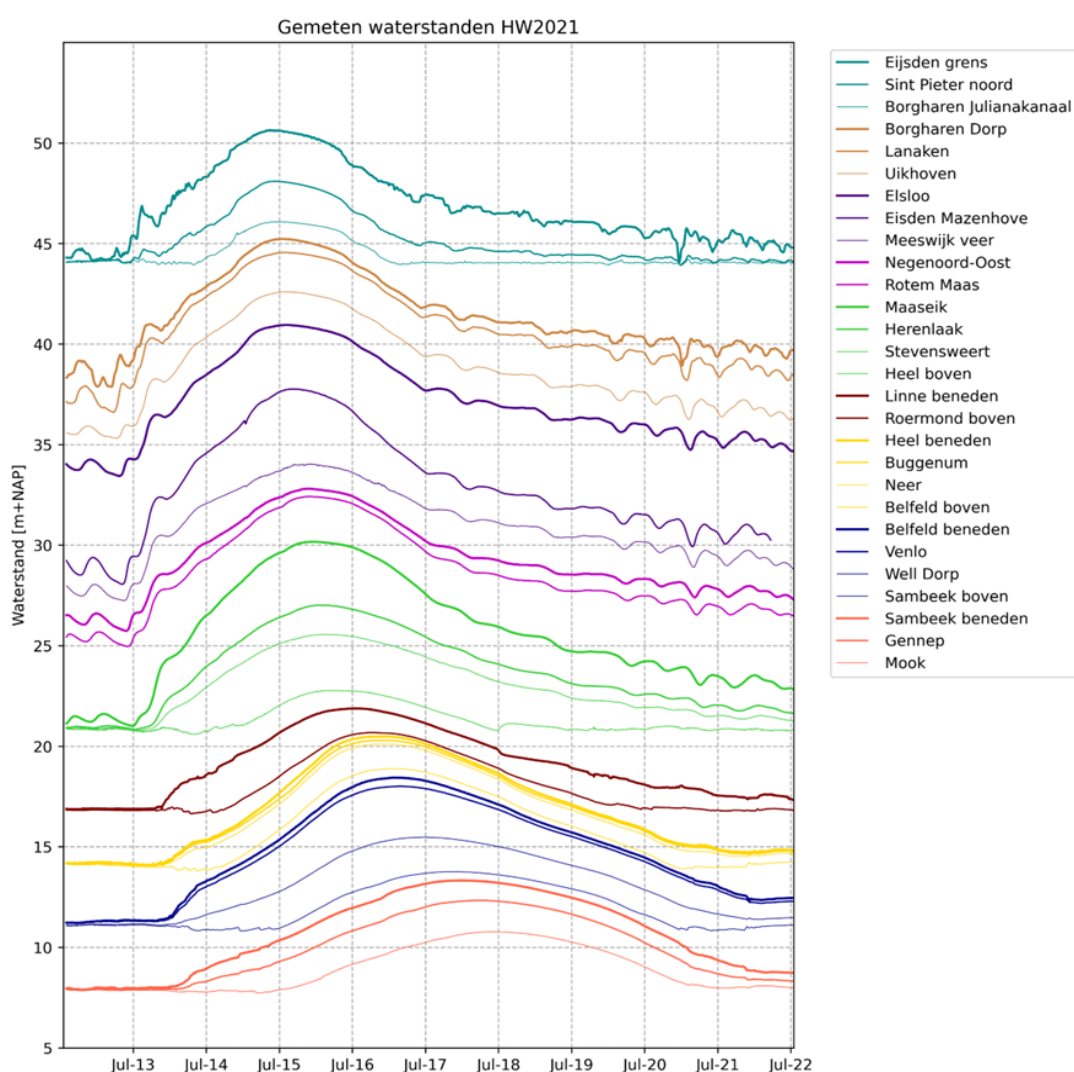
Tabel 2.2 Beoordeelde dijktrajecten in het beheersgebied van Waterschap Limburg inclusief het veiligheidsoordeel (bron: Waterveiligheidsportaal.nl).

Dijktraject	Veiligheidsoordeel	Dijktraject	Veiligheidsoordeel
41-4 Molenhoek	C	76-1 Roermond	C
54-1 Ottersum-Mook	D	76-2 Roermond-Alexanderhaven	A
55-1 Gennepe	C	76a-1 Roermond Hammerveld	C
56-1 Afferden	B	77-1 Roermond Merum-Ool-Herten	C
57-1 Nieuw-Bergen	B	78-1 Heel	B
59-1 Aijen-Bergen	B	78a-1 Beegden	A
60-1 Well	B	79-1 Thorn-Wessem	C
61-1 Wanssum-Geijsteren	B	80-1 Clauscentrale	B
62-1 Wanssum-Blitterswijk	B	81-1 Ohé & Laak-Stevensweert	C
63-1 Ooijen	A	82-1 Aasterberg	B
63-2 Boltweg	A	83-1 Nattenhoven-Roosteren	C
64-1 Broekhuizervorst	B	84-1 Visserweert	B
65-1 Arcen	A	85-1 Urmond	A
66-1 Lottum	B	86-1 Maasband	A
67-1 Grubbenvorst	B	87-1 Meers	C
68-1 Venlo	C	88-1 Geulle aan de Maas	A

Dijktraject	Veiligheidsoordeel	Dijktraject	Veiligheidsoordeel
68-2 Velden	C	89-1 Voulwames	B
69-1 Blerick	C	90-1 Maastricht-Oost	C
70-1 Baarlo	A	91-1 Itteren	C
71-1 Belfeld	B	92-1 Borgharen	B
73-1 Beesel	A	93-1 Bosscherveld	C
74-1 Neer	C	94-1 St. Pieter	C
75-1 Buggenum	A	95-1 Eijsden	C

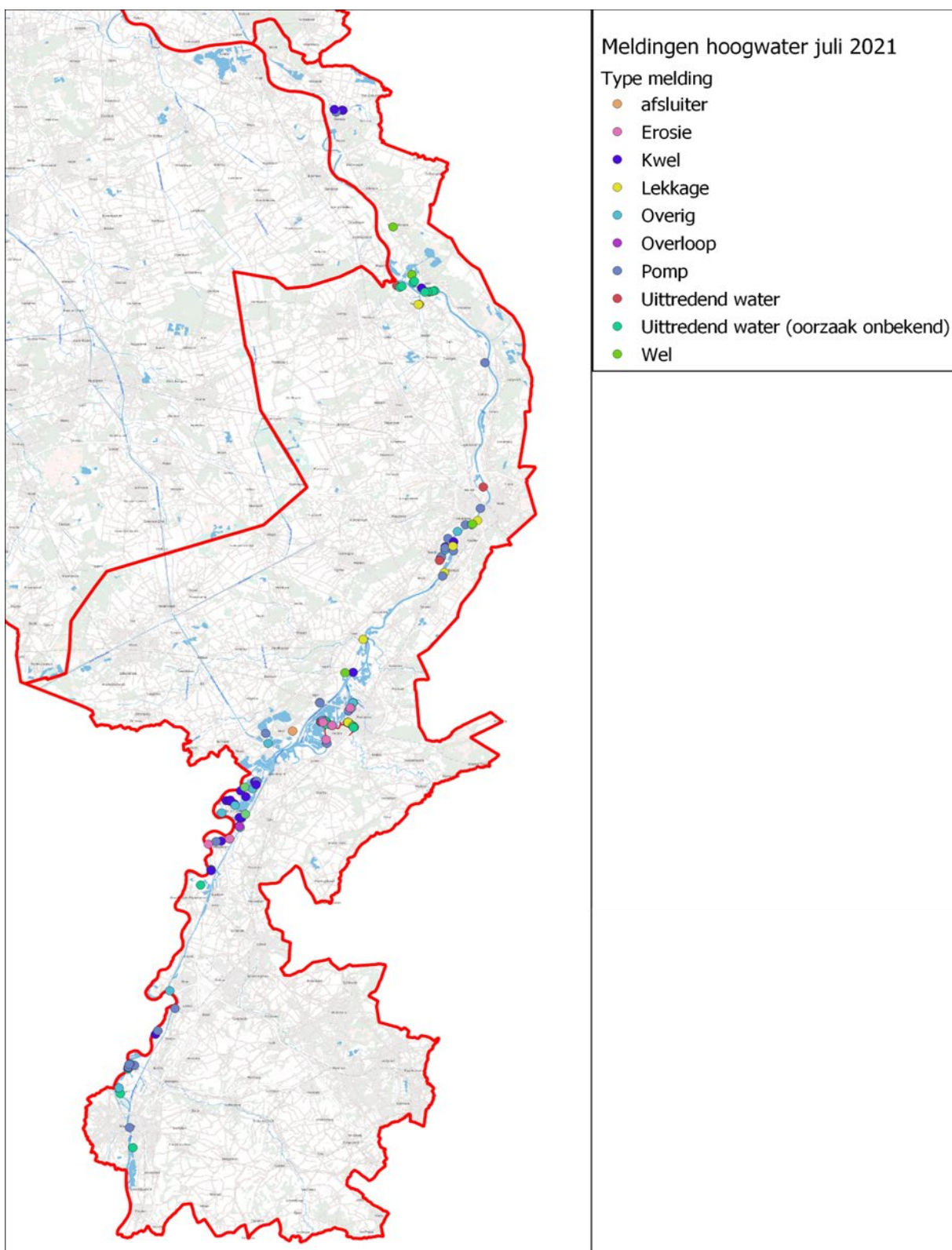
2.2 Overzicht van waargenomen incidenten juli 2021

In juli 2021, halverwege de looptijd van het beoordelingsproject heeft een hoogwatergolf op de Maas plaatsgevonden. In Figuur 2.1 is de afvoergolf gegeven voor verschillende meetpunten van Rijkswaterstaat langs de Maas. In het zuiden van Limburg is de afvoergolf kortdurend maar hoog in piekwaterstand geweest. Naarmate het hoogwater op de Maas zich richting het noorden verplaatste is de piek afgezwakt.



Figuur 2.1 Door Rijkswaterstaat tijdens het hoogwater in juli 2021 gemeten waterstanden (bron: waterinfo.rws.nl).

Tijdens het hoogwater zijn er langs verschillende dijktrajecten meldingen geweest, zie Figuur 2.2. In Tabel 2.3 is een beknopt overzicht gegeven van de verschillende meldingen tijdens het hoogwater.



Figuur 2.2 Overzicht van de meldingen langs de Maas tijdens het hoogwater (bron: Waterschap Limburg).

Tabel 2.3 Overzicht van de meldingen bekend bij Waterschap Limburg langs de Maas tijdens het hoogwater 2021.

Type melding	Bijzonderheden
Afsluiter	Bij Heel en Horn zijn afsluiters dichtgezet nadat de retentiebekken vol waren
Erosie	Zowel binnen- als buitendijks erosie van het talud of voorland waargenomen, deels veroorzaakt door uitstroom van pompen
Kwel	Veel kwel waargenomen binnendijks, maar grotendeels zonder zand
Lekkage	Lekkages traden voornamelijk op bij afsluiters en coupures
Overloop	Waterpeil stond boven de kering
Pomp	Langs diverse dijktrajecten zijn pompen geplaatst, locaties zijn opgenomen als melding, omdat niet alle locaties onderdeel van het draaiboek waren
Uittredend water	Verschillende oorzaken voor uittredend water
Uittredend water (oorzaak onbekend)	Vaak gemeld op basis van luchtfoto waardoor de oorzaak niet bekend is
Wel	Voornamelijk watervoerend, maar ook enkele zandmeevoerende wellen, grotendeels opgekist na ontdekking
Overig	Veelal lokale zwakke plek zoals gat in dijk, ingezakte kruin, lokale laagte, etc.

2.3 Reflectie en selectie van nader te onderzoeken locaties

Op basis van het veiligheidsoordeel van de dijktrajecten en de meldingen tijdens het hoogwater is een vergelijking gemaakt van de verschillende locaties. Hierbij is de focus gelegd op drie verschillende situaties:

- Een kering voldoet rekenkundig aan de norm, maar er zijn waarnemingen die wijzen op het optreden van een bepaald faalpad.
- Een kering voldoet rekenkundig niet aan de ondergrens- of signaleringswaarde, maar er zijn geen waarnemingen die dit bevestigen.
- Een kering voldoet rekenkundig niet aan de ondergrens- of signaleringswaarde, en waarneming geven aan dat de situatie mogelijk onveilig is.

Er wordt geen nadere aandacht besteed keringen die rekenkundig voldoen aan de norm, en waar geen relevante observaties zijn gedaan.

In eerste instantie resulteerde bovenstaande analyse in 27 locaties langs de Maas bij 11 verschillende dijktrajecten, dit is opgenomen in bijlage C. Na uitgebreid overleg met het waterschap is dit gereduceerd tot 8 locaties bij 4 dijktrajecten, onderverdeeld in 4 hotspots. De locaties die zijn afgevallen bevinden zich onder andere bij dijktrajecten die op dit moment in versterking zijn, op locaties waar het waterschap zelf al uitvoerig onderzoek doet, of bij situaties waar eerst nader grondonderzoek nodig is.

Tabel 2.4 zijn de nader onderzochte hotspots weergegeven. In Hoofdstuk 3 wordt dieper ingegaan op de vier overgebleven hotspots. Dit is uiteraard een beperkte selectie, waarmee wel getracht is enkele illustratieve en representatieve cases te selecteren. Er past wel enige terughoudendheid om op basis van slechts vier cases conclusies te trekken die op systeemniveau geldig zijn.

Tabel 2.4 Overzicht nader onderzochte hotspots, bestaande uit 4 locaties.

Nummer	Dijktraject	Faalmechanisme	Beschrijving
1	82-1 Aasterberg	Overloop	Tijdens het hoogwater is sprake geweest van een overloopsituatie, oftewel de waterstand stond hier hoger dan de kruin van de dijk.
2	81-1 Ohé & Laak – Stevensweert	Piping	Bij 81-1 zijn verschillende dijkvakken afgekeurd op het faalmechanisme piping. Bij 1 dijkvak is een zandmeevoerende wel waargenomen, maar bij de overige dijkvakken niet.
3	83-1 Nattenhoven – Roosteren	Piping	Dit dijkvak is afgekeurd in de beoordeling, maar er is meer voorland aanwezig dan meegenomen kan worden volgens het WBI2017.
4	77-1 Roermond Merum – Ool – Herten	Piping bij kunstwerk	Bij twee kunstwerken (keermuur en damwandconstructie) is zandtransport binnendijks waargenomen.

3 Analyse van nader onderzochte locaties

3.1 Aasterberg (82-1)

Dijktraject 82-1 heeft in de landelijke beoordeling een score B gekregen. Deze score is tot stand gekomen middels het Wettelijk BeoordelingsInstrumentarium 2017. Het traject voldoet aan de ondergrens, maar niet aan de signaleringswaarde.

3.1.1 Beschrijving

In deze paragraaf zijn de belangrijkste bevinden uit de beoordelingsrapportage van traject 82-1 opgenomen (Waterschap Limburg, 2020). Voor de onderbouwing van de bevindingen wordt verwezen naar de beoordelingsrapportage.

Dijktraject 82-1 beschermt het dorp Aasterberg (met circa 40 inwoners) in gemeente Echt-Susteren tegen hoogwater van de Maas (Figuur 3.1). Het dijktraject wordt zowel aan de noord- als aan de zuidzijde begrensd door een aansluiting op de dijk langs het Julianakanaal.

De waterkering betreft een groene waterkering ('een met gras bekleed grondlichaam') en er bevinden zich geen constructies of kunstwerken in de dijk. Zowel aan de noordzijde als de zuidzijde wordt de dijk gekruist door de Aasterbergweg. Aan de zuidzijde ligt de weg, inclusief het cunet, bovenop de waterkering. Aan de noordzijde doorsnijdt de wegconstructie het dijklichaam.



Figuur 3.1 Dijktraject 82-1 Aasterberg.

Er zijn verschillende achterliggende oorzaken waarom het dijktraject 82-1 niet voldoet aan de signaleringswaarde. De belangrijkste reden is dat het dijktraject nooit is ontworpen om te voldoen aan de norm van 1/300 per jaar.

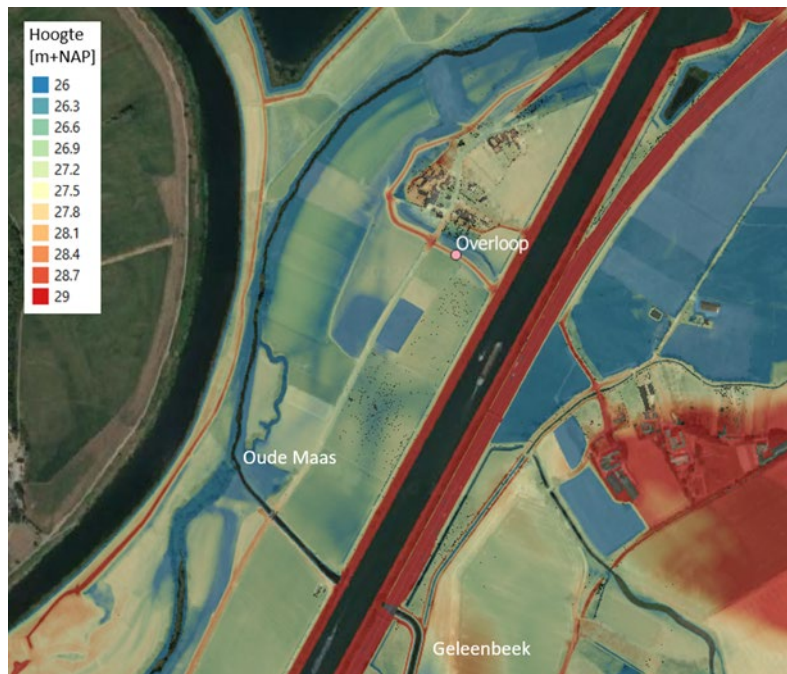
Voor dijktraject 82-1 heeft dat tot gevolg dat:

- Het dijktraject mogelijk (niet) voldoet aan de ondergrens van het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts (STBI) omdat er op het zuidelijke stuk sprake is van een relatief hoog overslagdebiet waardoor de dijk als volledig verzadigd is geschematiseerd in combinatie met een relatief steil binnentalud.
- Het dijktraject mogelijk (niet) voldoet aan de ondergrens van het faalmechanisme erosie kruin en binnentalud (GKKB) omdat er op een klein deel van het traject een fragmentarische graszode aanwezig is als het gevolg van bomen op- en tegen de waterkering².

De beheerder herkent zich in het geschetste veiligheidsbeeld uit het technische oordeel.

3.1.2 Bevindingen hoogwater

Tijdens het hoogwater in juli 2021 is melding gemaakt van een overloopsituatie bij Aasterberg, zie Figuur 3.2. Voorafgaand aan de piek waterstand op de Maas heeft een medewerker van het waterschap waargenomen dat er veel water stroomde langs de kanaaldijk van het Julianakanaal in noordelijke richting naar Aasterberg. Vermoedelijk werd dit veroorzaakt door de hoge afvoer van de Geleenbeek die normaal via de Oude Maas afstroomt, maar dat nu niet kon vanwege de verhoogde waterstand op de Maas. Het perceel langs de kanaaldijk van het Julianakanaal ligt laag.



Figuur 3.2 Hoogte rondom dijktraject 82-1.

Als noodmaatregel tegen de hoge waterstand zijn zandzakken geplaatst op de kruin van de dijk. In Figuur 3.3 en Figuur 3.4 zijn foto's weergegeven die tijdens en na het hoogwater zijn gemaakt.

² Deze locatie komt **niet** overeen met de locatie waar overloop is opgetreden. Het dijkvak wat niet voldoet op GKKB ligt in het noorden van het dijktraject, tussen dijkpaal 82.036+36 en 82.036+75.



Figuur 3.3 Dijktraject 82-1 (linksonder) op 16 juli 2021.

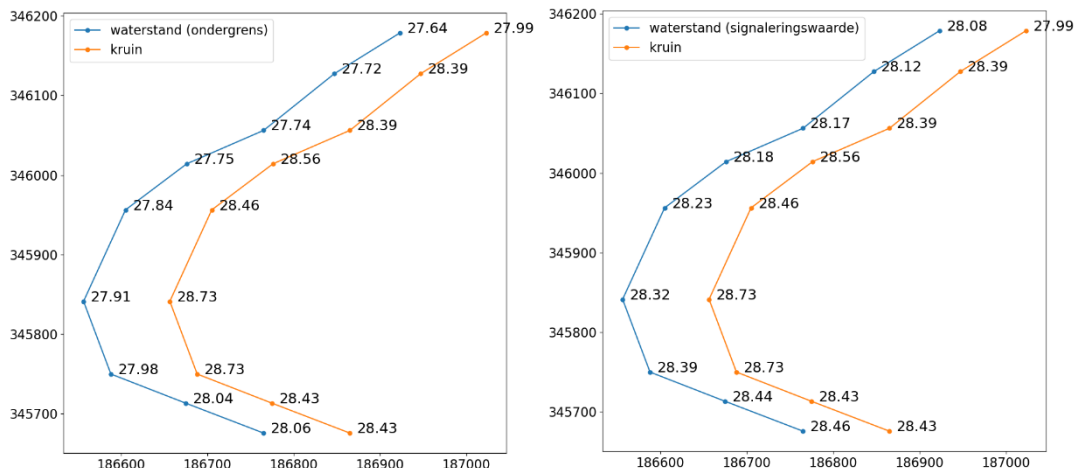


Figuur 3.4 Links: zuidzijde dijktraject 82-1 op 16 juli 2021; rechts: zuidzijde dijktraject 82-1 op 19 juli 2021.

Daarnaast is na afloop van het hoogwater de hoogst zichtbare drijflijn gemeten als indicatie van de opgetreden waterstand. Bij het zuidelijke deel van traject 82-1 kwam deze waterstand overeen met NAP +27,81 meter.

3.1.3 Waterstandsanalyse

Op basis van de beoordeling is een waterstandsanalyse gemaakt tussen de kruinhoogte van traject 82-1 en de waterstanden bij signaleringswaarde en ondergrens, zie Figuur 3.5. Hieruit blijkt dat de kruinhoogte ter plaatse van de melding bijna even hoog ligt als de en hoger dan de ondergrenswaterstand bij signaleringswaarde (1/300 per jaar) en hoger dan de waterstand bij de ondergrens (1/100 per jaar). Indien de kruinhoogte gelijk is aan de waterstand bij de signaleringswaarde of de ondergrens, en een afvoergolf optreedt met dezelfde terugkeertijd, betekent dit niet dat er geen water over de dijk kan stromen, maar dat de hoeveelheid water niet leidt tot falen van de dijk.



Figuur 3.5 Bovenaanzichten van dijktraject 82-1 Aasterberg met de RD-coördinaten op de x- en y-as. Links: de kruinhoogte (oranje) op de aslijn van de dijk uitgezet tegen de waterstand bij ondergrens t.o.v. m NAP (blauw). Rechts: de kruinhoogte (oranje) op de aslijn van de dijk uitgezet tegen de waterstand bij signaleringswaarde t.o.v. m NAP.

Binnen het landelijke werkspoor 5 is een waterstandsmodel ontwikkeld waarbij de hoogwatergolf van juli 2021 is nagebootst. Uit dit model komt een voorspelde waterstand van NAP +28,36 meter ter plaatse van de melding. Bij het model is een aanbeveling gegeven over het meenemen van het effect van de zijbeken op de waterstanden in de Maas. De conclusie was dat dit geen heel groot effect heeft als gekeken wordt naar de totale afvoer en bijbehorende waterstanden op de Maas, maar dat het lokaal wel voor veel verschil kan zorgen.

Uit de waterstandsanalyse blijkt dat zowel de hoogst gemeten drijflijn als de gemodelleerde waterstand uit werkspoor 5 de werkelijk opgetreden waterstand onderschatten. De kruinhoogte ter plaatse van de melding ligt immers hoger.

3.1.4 Conclusies

Het dijktraject van Aasterberg sluit zowel aan de noord- als de zuidzijde aan op hoog gelegen grond, waardoor de bergingscapaciteit van het achterland beperkt is. Dit betekent dat het belangrijk is om rekening te houden met de komberging van het achterland. Tijdens een hoogwatersituatie kan er namelijk sprake zijn van een overstroming in het achterland door overslaand water, zonder dat de dijk is bezwaken.

Daarnaast is een hoogtetekort geen faalmechanisme voor een waterkering. Het kan wel een inleidende gebeurtenis zijn voor overslag en erosie van de binnenbekleding, of voor infiltratie van overslaand water in het binnentalud en daarmee bezwijkmechanismen als microstabiliteit en macrostabiliteit. In dit geval is de opgetreden waterstand echter hoger dan dat de modellen voorspellen. Dit veroorzaakt hogere overloop-/ overslaggebieden dan dat op ontworpen is, en vormt daarom een risico.

Het overlopen van de waterkering is te wijten aan lokale wateropstuwung, aangezien geen overloop verwacht was op basis van de beschikbare analyses. Het waterstandsmodel bevat een grof raster (breedte gridcellen is 1 à 2 kilometer) wat onvoldoende precisie geeft voor lokale opstuwungen. De situatie bij Aasterberg laat zien dat fluctuaties op een kleinere schaal dus relevant zijn. Daarnaast is bij het waterstandsmodel van werkspoor 5 gekeken naar het verschil in ruwheden van de vegetatie van het zomer- en winterbed en het effect daarvan op de waterstand. Hieruit volgde dat de verschillen in ruwheden op lokale schaal voor veel opstuwung kunnen zorgen.

Aangezien het waterstandsmodel voor het berekenen van de normwaterstanden hetzelfde grove raster gebruikt, rijst de vraag of de berekende waterstanden kloppen bij de terugkeertijd van de signaleringswaarde en de ondergrens. Aan de andere kant kan de oorzaak dus ook liggen in het verschil tussen de gemodelleerde ruwheid en de werkelijk aanwezige ruwheid tijdens het hoogwater. Geadviseerd wordt om dit nader te onderzoeken.

3.2 Ohé & Laak – Stevensweert (81-1)

Dijktraject Ohé & Laak – Stevensweert heeft in de landelijke beoordeling een score C gekregen. Deze score is tot stand gekomen middel het Wettelijke Beoordelingsinstrumentarium. Het traject voldoet niet aan de ondergrens.

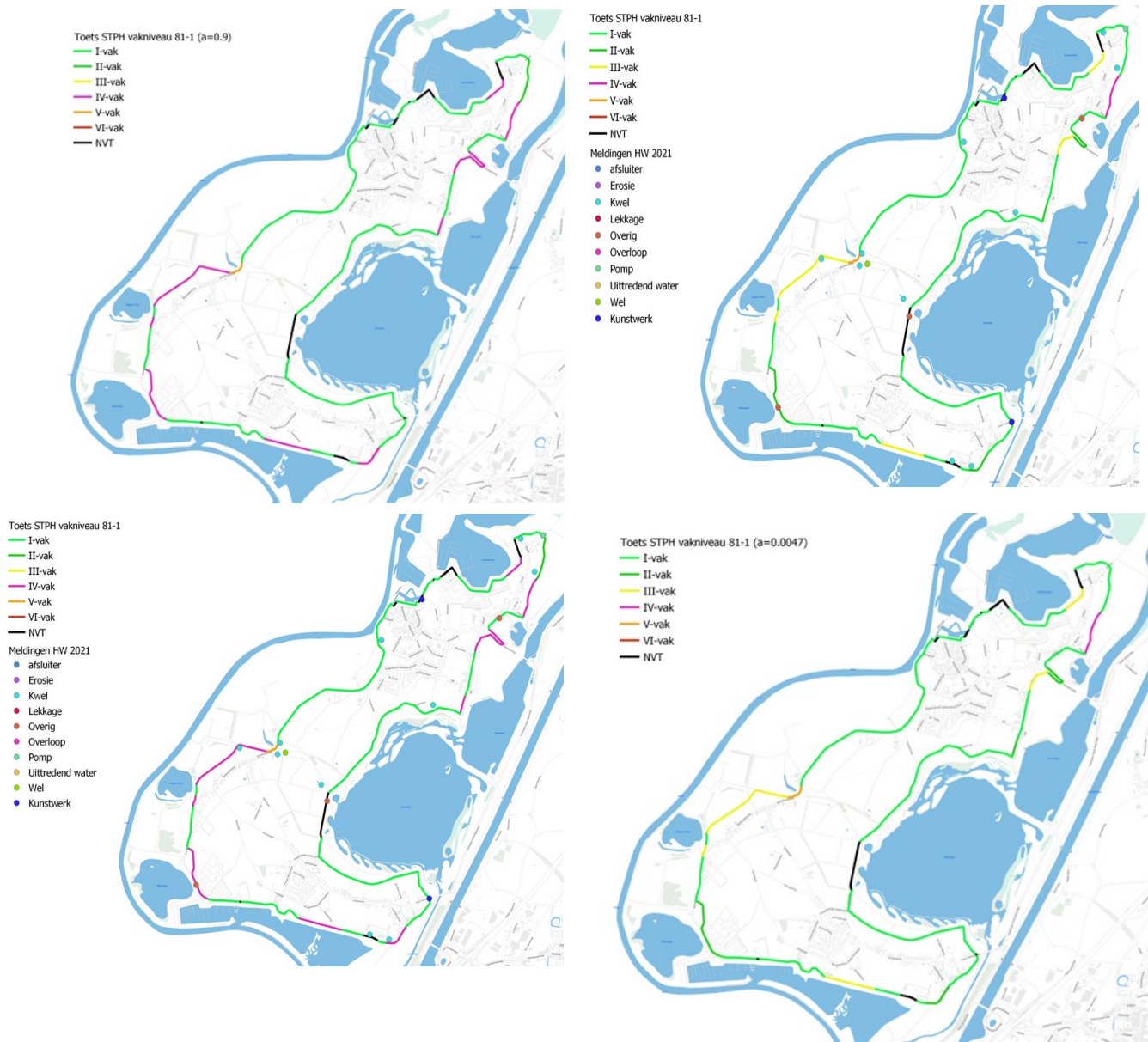
3.2.1 Beschrijving

De belangrijkste reden waarom dijktraject 81-1 niet voldoet aan de ondergrens is dat het dijktraject is ontworpen op de oude normering en dus op basis van oude rekenregels voor de verschillende faalmechanismen. Met name de rekenregels voor piping zijn strenger geworden in de huidige beoordelingssystematiek. De hoge faalkansen voor piping worden op dit dijktraject voornamelijk veroorzaakt door de mogelijkheid dat er een zandlaag direct op het grindpakket ligt. Dit is voor dit dijktraject een maatgevende situatie voor piping, omdat een hoge doorlatendheid (als gevolg van het grind) wordt gecombineerd met een relatief kleine korrel diameter (van de bovenliggende zandlaag). Hierdoor kunnen zandkorrels in deze zandlaag relatief snel wegspoelen waardoor er een pipe ontstaat (Waterschap Limburg, 2022a).

De faalkans op trajectniveau conform de beoordelingsrapportage voor het toetsspoor piping (STPH) is 1/25 per jaar. Op basis van het hoogwater van juli 2021 blijkt dat de faalkans op trajectniveau naar verwachting niet groter is dan 1/76 per jaar is, mogelijk nog kleiner. 1/76 is de waterstand welke 24 uur heeft aangehouden waarbij geen falen is opgetreden. Ook bij een faalkans van 1/76 valt het traject in categorie VC 'voldoet niet aan de ondergrens' (Waterschap Limburg, 2022a).

In Figuur 3.6 zijn de resultaten op vakniveau (één representatieve doorsnede) gegeven. In de eerste figuur staan de resultaten zonder rekening te houden met het hoogwater van 2021 (dus zonder minimale ondergrens), in de tweede figuur de resultaten aangepast op basis van de ondergrens vanuit het hoogwater van juli 2021. Deze aanpassing³ is uitgevoerd door de lengte-effect parameter "a" (de mechanismegevoelige fractie) aan te passen (Waterschap Limburg, 2022a).

³ Om in de gebruikte software, Ringtoets 18.1.1.3, een faalkans op trajectniveau te rapporteren is het lengte-effect dusdanig aangepast zodat de trajectkans gelijk is aan 1/76 per jaar. De enige parameter die aanpasbaar is in Ringtoets is de "a-factor" (de mechanismegevoelige fractie). Ten behoeve van de assemblage is deze factor aangepast van 0,9 (standaard) naar 0,0047.



Figuur 3.6 Beoordelingsresultaten Piping (STPH) Traject 81-1 (boven: zonder en onder: met ondergrens op basis van bewezen sterkte tijdens hoogwater van juli 2021).

Op basis van de uitgevoerde pipinganalyse in het kader van de Wettelijke Beoordeling is een hoge faalkans op trajectniveau (en op diverse vakken) berekend met de éénlaagse rekenregel van Sellmeijer. Grofweg kan worden gesteld dat bij de aanwezigheid van een doorlopende zandlaag onder de kering de vakken ruim onvoldoende scores. Bij het optreden van een hoogwater, zoals in juli 2021, is de verwachting dat er mogelijk op meerdere locaties bij dijkvakken met Categorie IV, V en VI, zand meevoerende wellen optreden. Dit is echter niet noodzakelijk vanwege de volgende mogelijkheden:

- De beoordeling vindt plaats met veilige rekenwaarden. Zelfs bij categorieën V en VI is het mogelijk dat er geen signalen plaatsvinden.
- De gekozen schematisatie en/of modellering doen mogelijk onvoldoende recht aan de werkelijke situatie.

Het hoogwater kende een piekwaterstand van 25,57m boven NAP, met een aanhoudende waterstand boven de 25,31m boven NAP gedurende 24 uur. De piekwaterstand vond plaats op 2021-07-16 14:40:00 (+01:00).

3.2.2 Bevindingen hoogwater

De bij dit hoogwater opgetreden topwaterstanden liggen over het gehele traject structureel boven de signaalwaarde waarmee in deze beoordeling is uitgevoerd. Waterschap Limburg had deze waterstanden niet verwacht op basis van de afvoer zoals die bij het meetpunt Sint Pieter door RWS bij deze hoogwatergolf is bepaald. Dit komt onder andere door de hoge ruwheden in het rivierbed gedurende de zomer.

Ten zuidoosten van de Sint-Annakapel is een zandmeevoerende wel waargenomen op de grens tussen de niet geroerde ondergrond en de zandaanvulling die is aangebracht bij de herinrichting van het Stevolgebied (zie Figuur 3.7). Vroeger liep hier een geul, waardoor het logisch is dat er zand aanwezig is in de ondergrond. Op basis van het gedrag van dit dijktraject tijdens het hoogwater heeft Waterschap Limburg ook het vermoeden dat dit dijkdeel voor een groot deel verzadigd was. De wel is ontdekt nadat de door het hoogwater ontstane kwel pas na een aantal dagen was weggezaakt. Er is beperkt zand uitgespoeld (zie Figuur 3.7), wetende dat het hoogwater van juli 2021 relatief kortdurend was. Ten tijde van het hoogwater stond er (kwel)water boven deze zandmeevoerende wel. Dit kwelwater werd tijdens het hoogwater constant weggepompt (Waterschap Limburg, 2022a).



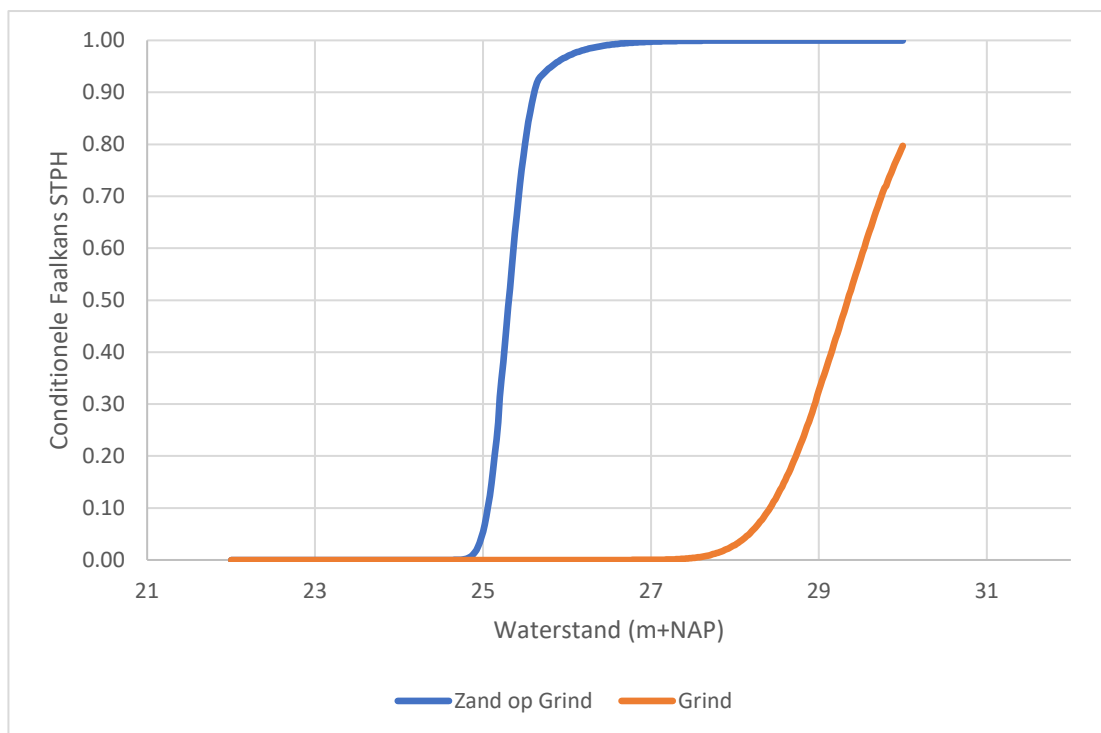
Figuur 3.7 Locatie zandmeevoerende wel te Sint-Annakapel (120 cm diameter).

Deze locatie te Sint-Annakapel is overigens ook het meest kritische doorsnede vanuit de beoordeling (cat. V), in oranje weergegeven in Figuur 3.6. De bevinding vanuit het hoogwater is daarmee consistent met het resultaat vanuit de beoordeling. Er wordt momenteel vanuit het waterschap al onderzoek gedaan naar deze locatie, middels grondonderzoek wordt getracht de afkomst van het uittredende zand te bepalen om zo de groei van de pipe te onderzoeken.

In de volgende paragraaf wordt kort de locatie toegelicht, maar ligt de focus op het op één na meest kritische vak ten oosten van Eiland. Dit vak heeft vanuit de beoordeling een cat. IV, en is in de rechterkant in Figuur 3.6 weergegeven in roze. Het is een interessante constatering dat er maar één zandmeevoerende wel is opgetreden in een slecht scorend traject met hoge faalkansen voor diverse vakken.

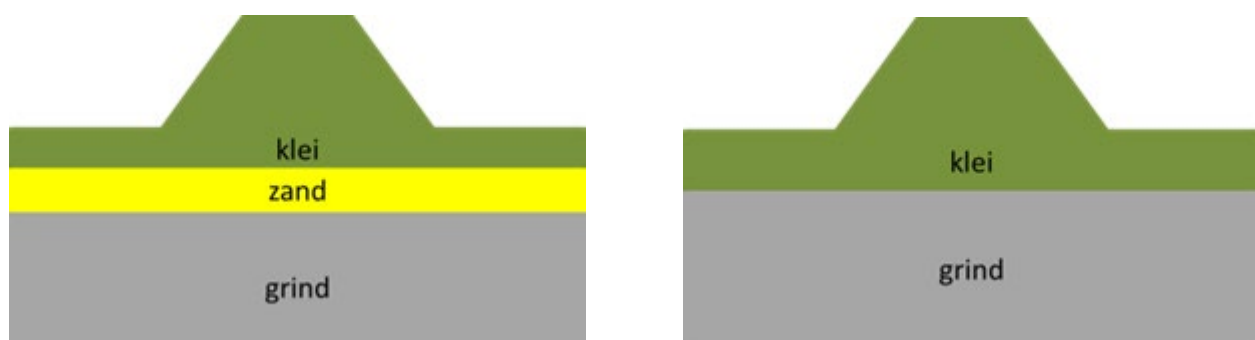
3.2.2.1 Sint-Annakapel (cat. V)

Bij dit dijkvak zijn twee fragility curves⁴ (faalkans piping conditioneel op de waterstand) beschikbaar vanuit de WBI-beoordeling. Een curve voor een grindondergrond en een curve voor een zand op grind-ondergrond, zie Figuur 3.8. In Figuur 3.9 zijn de bijbehorende ondergrondscenario's weergegeven. Beide scenario's wegen voor 50% mee in de totale faalkans. De faalkans gerelateerd aan het hoogwater van juli 2021 bedraagt 1/2, geheel gedomineerd door het scenario "zand op grind". Een meer geavanceerde analyse, bijvoorbeeld een D-Geo Flow berekening, zal naar verwachting leiden tot een lagere faalkans.

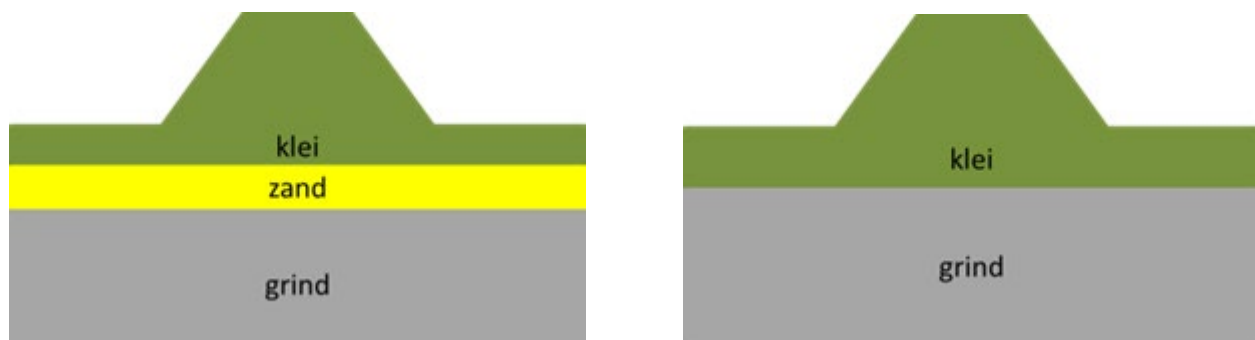


Figuur 3.8 Fragility curves dijkvak Sint-Annakapel (in WBI beoordeling 'Gk14').

Kijkende naar de rest van het dijktraject zien we echter meerdere als kritiek beoordeelde vakken op het faalmechanisme piping. In onderstaande paragraaf wordt stilgestaan bij het één na kritische vak ten oosten van Eiland, met wederom de mogelijke scenario's "zand op grind" of "grind" voor de watervoerende laag. Het is voor zover bekend dat er geen zandmeevoerende wel is waargenomen, enkel kwelwater.



⁴ Zie Bijlage A voor meer achtergrondinformatie over de fragility curves



Figuur 3.9 Ondergrondscenario's (links: zand op grind, rechts: grind).

3.2.2.2 Eiland (cat. IV)

Een nadere analyse is uitgevoerd voor dit dijkvak middels een D-Geo Flow (DGF) berekening voor het tweelagensysteem. Dit in tegenstelling tot de Sellmeijer-regel uit de WBI-beoordeling, welke is gebaseerd op een éénlaags-systeem. In de WBI beoordeling is voor het scenario "zand op grind" een bulkdoorlatendheid van grind aangehouden, en de korreldiameters gedefinieerd per zandlaag. In de D-Geo Flow-analyse worden doorlatendheden toegekend aan de zandlaag (20 m/dag) en aan de grindlaag (200 m/dag, conform de default waarden uit de WBI schematiseringshandleiding).

Voor de overige uitgangspunten (korreldiameters, kwelweglengtes etc.) zijn de karakteristieke waarden uit de WBI beoordeling gehanteerd. De geometrie is versimpeld in D-Geo Flow. In Figuur 3.10 is de schematisering in DGF weergegeven.



Figuur 3.10 D Geo Flow schematisatiedijkvak Eiland (in WBI beoordeling dijkvak GK30).

Met D-Geo Flow is een drietal analyses uitgevoerd:

1. Schematisering zoals bovenstaand weergegeven, met een zandlaag op een grindlaag.
2. Schematisering met enkel grind.
3. Schematisering met enkel grind, waarbij de korreldiameter (d_{70}) van zand is toegepast op het bovenste gedeelte (waar de zandlaag mogelijk aanwezig is).

De resultaten van deze drie analyses geven een bandbreedte waarbinnen het resultaat kan liggen, met 3) als conservatief scenario, 2) als bovengrens (gunstig) scenario en 1) een realistische inschatting.

Het resultaat is in Tabel 3.1 weergegeven. In de tabel zijn ook de twee scenario's uit de beoordeling weergegeven. Het opgetreden verval (aangehouden gedurende 24 uur) tijdens het hoogwater van juli 2021 bedraagt orde 1,90 meter op deze locatie.

Tabel 3.1 Resultaten D-Geo Flow berekeningen.

	Kritiek verval [m]	Faalkans [1/jaar]
DGF analyse 1)	1,56	Orde 1/150
DGF analyse 2)	1,90	Orde 1/700
DGF analyse 3)	0,98	Orde 1/10
WBI beoordeling - zand op grind	0,72	1/3
WBI beoordeling - grind	2,05	1/1.300

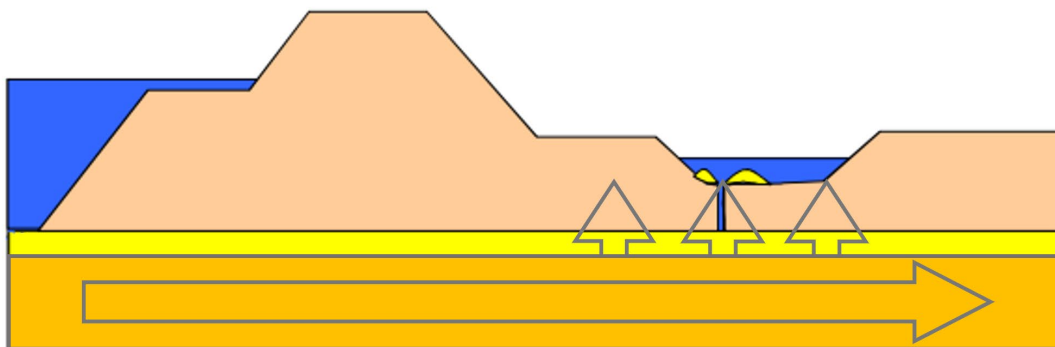
Gegeven de opgetreden waterstand tijdens het hoogwater van 2021, kan geconcludeerd worden dat de dijk een waterstand heeft overleefd van 1/76 per jaar. De scenario's uit DGF (analyse 1 en 2) lijken daarom een realistischere inschatting dan de boven- en ondergrens volgend uit de WBI beoordeling. Zeker gezien het opgetreden verval in de orde grootte ligt van het optimistische scenario uit D-Geo Flow (analyse 2).

3.2.3 Conclusies

Gezien de hoge faalkansen die zijn berekend bij de beoordeling zou men verwachten dat tijdens het hoogwater van juli 2021 op meerdere locaties sprake zou zijn van zandmeevoerende wellen. Aangezien enkel in het dijkvak te Sint-Annakapel een zandmeevoerende wel is geconstateerd en niet in de overige vakken (wel sprake van kwelwater), lijkt de beoordeling van een aantal vakken conservatief. Hier kunnen verschillende oorzaken aan ten grondslag liggen:

- a) De beoordeling vindt plaats met conservatieve rekenwaarden conform het WBI veiligheidsframework. Zelfs bij categorieën V en VI is het daardoor mogelijk dat er geen signalen (indicaties faalmechanisme) optreden.
- b) De gekozen schematisatie en/of modellering doet mogelijk onvoldoende recht aan de werkelijke situatie. Naar verwachting is de grondopbouw, de aanwezigheid van een tussenzandlaag tussen het grindpakket en de afsluitende deklaag, niet in deze verhoudingen aanwezig. Dan wel door het ontbreken van een afsluitende deklaag, dan wel door het niet aanwezig zijn van een aaneensluitend zandpakket.
- c) De uitgangspunten, dan wel de beoordelingsmethode is conservatief. Dit is mogelijk het gevolg van het niet volledig beschouwen van het faalpad, het niet toepasbaar zijn van de rekenregels voor dit soort ondergronden, of dat er sprake is van een kennisleemte op dit gebied. Een D-Geo Flow berekening geeft voor dergelijke schematisaties een betere inschatting dan de vigerende rekenmethode.
- d) De tijdsduur van het hoogwater was te kort voor het ontwikkelen van een volledige pipe.

Naast deze mogelijke verschillen kan ook een kwalitatieve (en fysische) verklaring worden gegeven voor het beperkt uitgetreden zand en in grote hoeveelheid uittreden van kwelwater. Naar verwachting stroomt door het grindpakket veel kwelwater, wat in verticale richting door de dunne zandlaag stroomt. Dit kan worden gezien als heave. Na het verticale zandtransport blijft het water (in verticale richting) stromen, maar zal voor piping een horizontale stroming door de zandlaag benodigd zijn om voortschrijdende erosie van de zandlaag te ontwikkelen. Het faalmechanisme piping komt daarmee niet op gang. Elders, langs de Po-rivier in Italië, is dit verschijnsel op grotere schaal gesignaleerd en dergelijk onderzoek tot in een verder stadium ontwikkeld (García Martínez et al., 2017; Bezuijen, 2017). Dit fenomeen wordt met de huidige rekenmethode (welke geschikt is voor een eenlaagssysteem) overschat. Dit is indicatief weergegeven in Figuur 3.11.



Figuur 3.11 Verticale stroming (heave proces) in een zand op grind scenario.

3.3 Nattenhoven – Roosteren (83-1)

Dijktraject Nattenhoven - Roosteren heeft in de landelijke beoordeling een score C gekregen. Deze score is tot stand gekomen middel het Wettelijke Beoordelingsinstrumentarium. Het traject voldoet niet aan de ondergrens.

3.3.1 Beschrijving

De belangrijkste reden waarom dijktraject 81-1 niet voldoet aan de ondergrens is dat het dijktraject is ontworpen op de oude normering en dus op basis van oude rekenregels voor de verschillende faalmechanismen.. Met name de regels voor piping zijn een stuk strenger geworden in de huidige beoordelingssystematiek. De hoge faalkansen voor piping worden op dit dijktraject voornamelijk veroorzaakt door het scenario waarin er een zandlaag direct op het grindpakket ligt. Dit is bij de beoordeling gezien als de maatgevende situatie voor piping, waarbij een hoge doorlatendheid (als gevolg van het grind) wordt gecombineerd met een relatief kleine korreldiameter (van de bovenliggende zandlaag). Hierdoor kunnen zandkorrels in deze zandlaag relatief snel wegspoelen waardoor er een pipe ontstaat (Waterschap Limburg, 2021).

De faalkans op trajectniveau die volgt uit de beoordeling voor het toetspoo piping (STPH) is 1/13 per jaar. De hoge faalkansen op vakniveau waren in de basisanalyse (semi-probabilistisch) dusdanig hoog dat deze aangescherpt zijn aan de hand van een probabilistische analyse met onder andere overleefde waterstanden. De resulterende faalkans is vergelijkbaar met de overleefde waterstand op trajectniveau (ca. 1/11 per jaar waterstand 2003 en ca. 1/45 per jaar waterstand 1995)⁵. maatgevende zand-op-grind scenario (Waterschap Limburg, 2021).

Bij het optreden van een hoogwater, zoals in juli 2021, bestaat de kans dat op meerdere locaties met Categorie IV, V en VI beoordeling, zand meevoerende wellen optreden. Het hoogwater kende een piekwaterstand van 30,17m boven NAP. Met een aanhoudende waterstand boven de 29,77m boven NAP gedurende 24 uur. De piekwaterstand vond plaats op 2021-07-16 11:00:00 (+01:00).

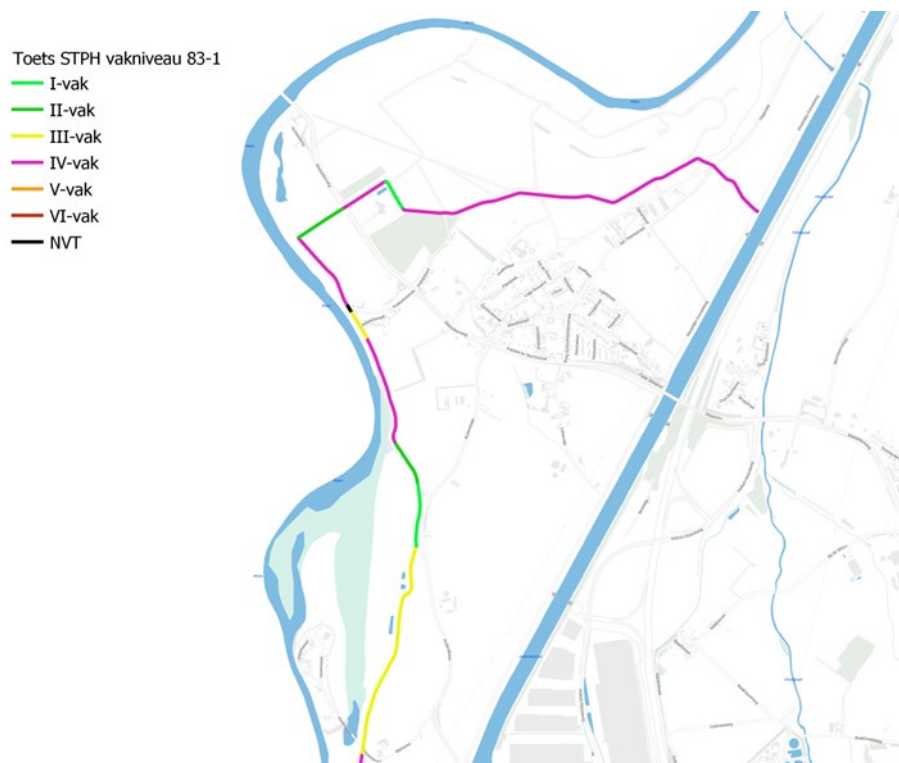
3.3.2 Bevindingen hoogwater

De bij dit hoogwater opgetreden topwaterstanden liggen over het gehele traject structureel boven de signaalwaarde waarmee in deze beoordeling is gerekend. Mogelijke oorzaken van dit verschil zijn besproken in Paragraaf 3.1 (Aasterberg). Bij het hoogwater van juli 2021 is ter plaatse van het WML-terrein (dijkpaal 83.149) beperkt water over de kruin van de dijk gestroomd, waarna op deze locatie zandzakken zijn gelegd waarmee het probleem is

⁵ De WBI beoordeling is afgerond in april 2021, voor het hoogwater van juli 2021.

verholpen. Op basis van het gedrag van dit dijktraject tijdens het hoogwater heeft WL ook het vermoeden dat dit dijkdeel voor een groot deel verzadigd was. Verder zijn geen bijzonderheden bij het dijktraject 83-1 geconstateerd (Bron: WBI-beoordeling 83-1).

De locatie in het noorden bij dijkvak GK29 (A t/m C) is een interessante locatie. Het toetsoordeel op vakniveau betreft categorie IVv voor het faalmechanisme piping (STPH), zie Figuur 3.12. Echter gedurende het hoogwater is er langs deze locatie geen sprake geweest van zandmeevoerende wellen. Dit staat haaks op de bevindingen vanuit de beoordeling, maar kan verklaard worden door dezelfde argumenten als in de vorige case in sectie 3.2.3. Met name een mogelijk conservatieve schematisering speelt hier een rol. Bij de pipingberekening in de WBI-beoordeling is alleen eenmaal de dijkbasis in het voorland meegenomen⁶, conform de rekenregels. In Figuur 3.12 is een beeld geschetst hoe het conditionele faalkansverloop eruit ziet bij tweemaal of driemaal de dijkbasis als voorlandlengte.



Figuur 3.12 Toets resultaat (vakniveau) spoor Piping (STPH) 83-1 Noord.

3.3.2.1 Roosteren (cat. IV)

Ten noorden van Roosteren ligt een dijkvak met categorie IV score (in de WBI beoordeling bekend als GK29 (A t/m C)). Er is sprake van een voorland 'De Rug'. Het intredepunt ligt voor alle dijkvakken in het voorland. Op basis van formules uit bijlage E van de schematiseringshandleiding piping is een fictief intredepunt bepaald. In de gedetailleerde toets mag het intredepunt niet verder dan éénmaal de dijkbasis van de dijkteen gelegd

⁶ De dubbele dijkbasislengte mag in rekening worden gebracht, uitgaande van de aanname dat de pipegroei tot de halve kwelweglengte nog een evenwichtssituatie gaat bereiken. Dit betekent dat in het geval van een kwelweglengte van 2x de dijkbasis (zie Figuur E.1) de pipe tot maximaal aan de buitenteen gaat doorgroeien. In dit geval kan ervan worden uitgegaan dat er boven de pipe voldoende deklaagdikte aanwezig zal zijn en geen doorbraak van de pipe door de deklaag gaat optreden (bron: schematiseringshandleiding Piping Bijlage E Bepaling intredepunt bij voorland).

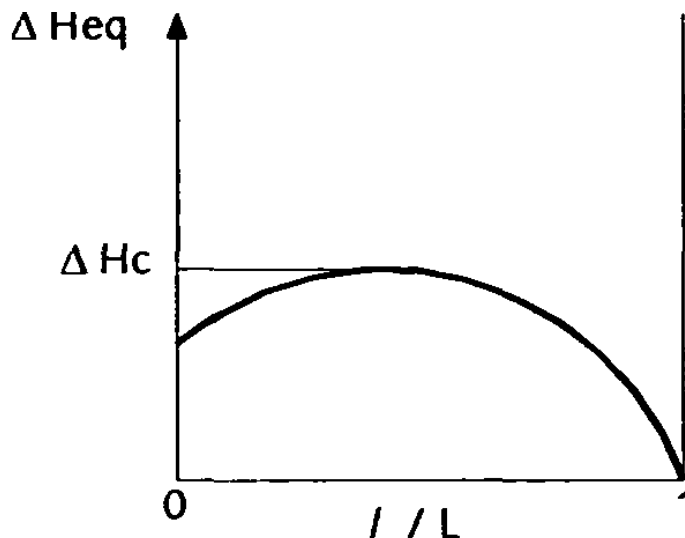
worden. Daarom is het intredepunt in de berekeningen op een afstand van éénmaal de dijkbasis van de teen gelegd, zie ook Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Intredepunt voorland STPH (maatgevende intredepunt in voorland in grijs gearceerd).

Dijkvak te Roosteren	d1 [m]	D [m]	λ_1 [m]	L1	fictieve lengte [m] [m]	breedte dijk kern [m]
GK29A	3,00	13,30	429,79	100	98,2	22,5
GK29B	3,00	13,30	429,79	100	98,2	21,7
GK29C	3,00	13,30	429,79	100	98,2	22,7

* waarin d1 kleidikte van het voorland, D dikte watervoerend pakket, λ_1 lek lengte van het voorland, L1 lengte van het voorland en de fictieve lengte als $\lambda_1 \tanh(L1/\lambda_1)$ ⁷.

De achtergrond hiervan is dat de modellering volgens Sellmeijer vereist dat er geen significante instroming plaatsvindt aan de bovenzijde van de reeds ontwikkelde pipe. Het kritieke verval ΔH_c (zie Figuur 3.13) treedt altijd al op als de pipelengte maximaal de helft van de kwelweglengte bedraagt. Vaak is deze kritische pipelengte echter korter, namelijk $1/3^e$ tot $1/4^e$ van de totale kwelweglengte, in uitzonderlijke gevallen zelfs minder dan $1/6^e$ van de totale kwelweglengte. De precieze locatie is afhankelijk van geometrische voorwaarden en de eigenschappen van het zand, en kan in modellen als D-Geo Flow worden berekend.



Figuur 3.13 Evenwichtsverval als functie van de ontwikkelde pipelengte l/L (figuur 4.3b uit Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen, TAW, 1999).

De kritieke pipelengte moet binnen de dijkbasis liggen om aan de gestelde voorwaarde voor de instroming van bovenaf te voldoen. Om voor een eerste oordeel een veilige regel te hebben, wordt in de schematiseringshandleiding de optie uitgewerkt uit te gaan van de meest ongunstige situatie met de helft van de kwelweglengte als kritieke pipelengte. In werkelijkheid kan dit echter te ongunstig uitpakken en kan er scherper worden geschematiseerd. Het WBI biedt handvaten hoe dit eventueel te doen.

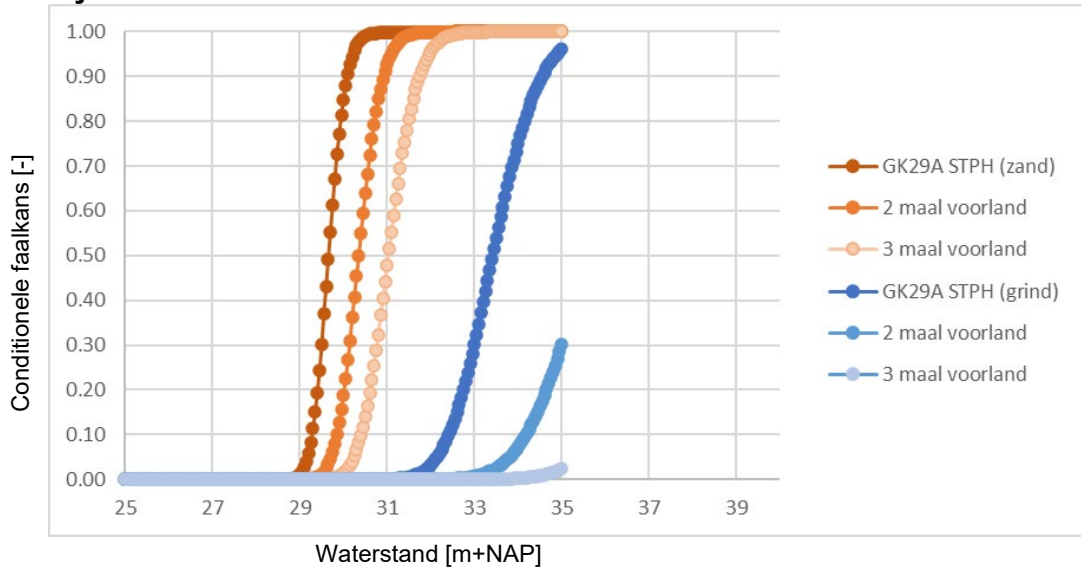
De beschikbare fragility curves⁸ uit de beoordeling, gebaseerd op eenmaal de dijkzate (breedte van de) als voorland, zijn nogmaals berekend met discrete stappen van tweemaal en driemaal de dijkzate als voorland, uitgaande van de ruimte die het instrumentarium biedt.

⁷ Voor meer informatie zie Bijlage E uit de schematiseringshandleiding Piping WBI 2017.

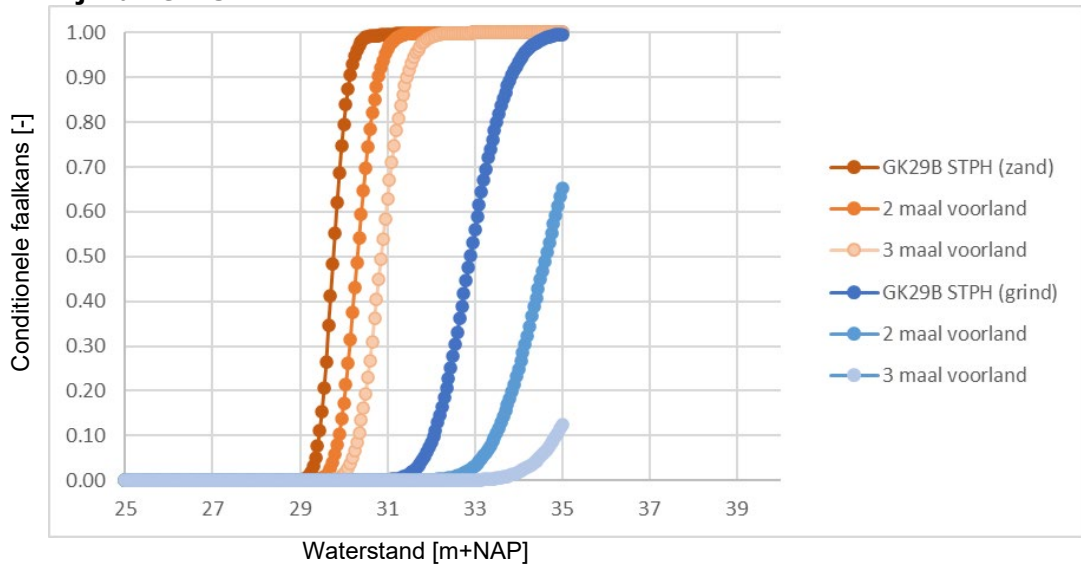
⁸ Zie Bijlage A voor meer achtergrondinformatie over de fragility curves

Als bovengrens geldt de fictieve lengte uit Tabel 3.2. Let op dat bij deze locatie(s) twee fragility curves beschikbaar zijn vanuit de WBI beoordeling. Een curve voor een grind ondergrond (blauw) en een curve voor een zand op grind ondergrond (rood), weergegeven in Figuur 3.14.

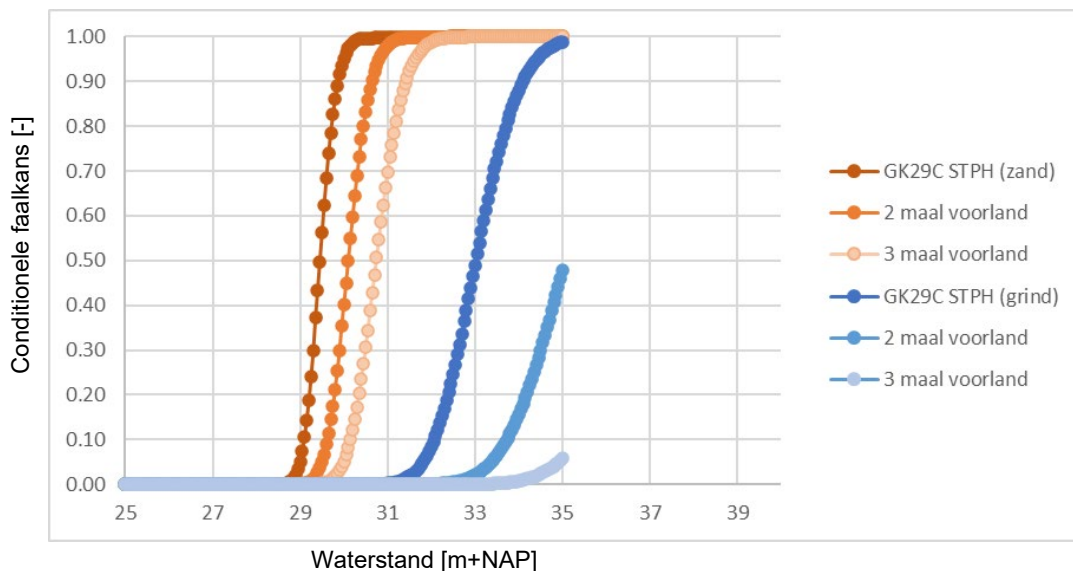
Dijkvak GK29A



Dijkvak GK29B



Dijkvak GK29C



Figuur 3.14 Fragility Curves dijkvakken te Roostere (in de WBI beoordeling vakGK29).

In Tabel 3.3 zijn de resultaten van het kritische verval over de kering opgenomen, met de mogelijke scenario's "zand op grind" of "grind" voor de watervoerende laag. Verder is het opgetreden verval over de kering, zoals tijdens het hoogwater juli 2021, toegevoegd aan de tabel. De gehanteerde rekeninstellingen, exclusief de voorlandlengte t.b.v. de gevoeligheidsanalyse, zijn conform de uitgevoerde beoordeling.

Tabel 3.3 : overzicht van het kritische verval over de kering.

Vak	Kansbijdrage <i>Scenario Zand</i>	Kansbijdrage <i>Scenario Grind</i>	Kritisch verval <i>zand</i> <i>scenario</i>	Kritisch verval <i>grind scenario</i>	Opgetreden verval <i>'HW2021'</i>
GK29A	50%	50%	1,29	2,44	2,03*
<i>tweemaal</i>			1,73	3,27	
<i>driemaal</i>			2,16	4,08	
GK29B	50%	50%	1,10	2,08	1,27**
<i>tweemaal</i>			1,46	2,76	
<i>driemaal</i>			1,80	3,41	
GK29C	50%	50%	1,24	2,33	1,70***
<i>tweemaal</i>			1,65	3,12	
<i>driemaal</i>			2,05	3,87	

Voor het opgetreden verval over de kering (tijdens het HW 2021) is het verschil tussen de opgetreden waterstand (gedurende 24 uur) en het maaiveldniveau binnendijks genomen:

*29,67-27,7 = 2,03m **29,37-28,1 = 1,27m ***29,3-27,6 = 1,70m.

3.3.3 Conclusies

Op basis van de resultaten zou worden verwacht dat tijdens het hoogwater van juli 2021 op meerdere locaties zandmeevoerende wellen zouden optreden. Gezien in geen enkel vak een zandmeevoerende wel is opgetreden, en maar enkel kwelwater, kunnen de uitgangspunten dan wel de beoordelingsmethodiek, als conservatief worden beschouwd. De kans is reëel dat dit terechte conservatisme is conform de beoordelingsmethodiek, mogelijk wordt dit veroorzaakt door conservatieve schematisaties of onvoldoende kennis van de ondergrond, of kennisleemtes op dit gebied. Nader onderzoek kan hier meer duidelijkheid over verschaffen.

Naar verwachting heeft het voorland een groter reducerend effect dan momenteel is meegenomen op basis van eenmaal de dijkbasis. Maar verder kan ook de grondopbouw, de aanwezigheid van een tussenzandlaag tussen het grindpakket en de afsluitende deklaag, niet in deze verhoudingen aanwezig zijn (anders zijn dan in de schematisatie is aangenomen). Dan wel door het ontbreken van een afsluitende deklaag, dan wel door het niet aanwezig zijn van een aaneensluitend zandpakket.

Kijkende naar de gegevens in dit voorland⁹ zien we het volgende (zie ook Tabel 3.4). Het voorland is toereikend om te voldoen aan indirecte faalmechanismen (zettingvloeiing, afschuiven, etc.). Hierbij wordt de invloedzone voor directe faalmechanismen niet geraakt (zie Bijlage B). Daarmee is te concluderen dat er meer voorland in rekening gebracht mag worden voor de faalmechanismen Opbarsten, heave en piping (STPH) en Macro-instabiliteit buitenwaarts (STBU). Dit komt overeen met de observatie(s) dat er geen zandmeevoerende wellen zijn geconstateerd.

Tabel 3.4 Voorland toetsing dijkvak GK29.

Dijkvak	Lengte voorland [m]	Invloedszone STPH [m]	Invloedszone STBU [m]
GK29_voorland	419	22,7	5,0

3.4 Roermond Merum-Ool-Herten (77-1)

Dijktraject 77-1 heeft in de landelijke beoordeling een score C gekregen. Deze score is tot stand gekomen middels het Wettelijk BeoordelingsInstrumentarium 2017. Het traject voldoet niet aan de ondergrens.

3.4.1 Beschrijving

In deze paragraaf zijn de belangrijkste bevindingen uit de beoordelingsrapportage van traject 77-1 opgenomen (Waterschap Limburg, 2022b). Voor de onderbouwing van de bevindingen wordt verwezen naar de beoordelingsrapportage.

Dijktraject 77-1 beschermt de wijken Merum-Ool-Herten in de gemeente Roermond tegen hoogwater van de Maas en de Roer (zie Figuur 3.15 voor het bovenaanzicht). In 2005 is dijktraject 77-1 opgenomen in de toenmalige Wet op de Waterkering (vervangen door de Waterwet) en heeft daarmee de status van primaire waterkering gekregen.

⁹ Zie Bijlage B voor meer achtergrondinformatie over de gegevens uit het voorland.



Figuur 3.15 Dijktraject 77-1 Roermond Merum-Ool-Herten.

Wat bij deze beoordeling het meeste opvalt:

- Er is sprake van een integraal hoogtetekort over het gehele dijktraject. De beoordeling laat zien dat het dijktraject 77-1 hierdoor voor bijna alle dijkvakken niet voldoet aan de ondergrens vanwege te hoge overslagdebieten voor het mechanisme erosie binnenbekleding.
- De grootste bijdrage aan de faalkans wordt veroorzaakt door het faalmechanisme piping (STPH). Deze grote bijdrage is goed verklaarbaar. Het oordeel van de dominante dijkvakken in faalkans is verklaard op basis van: (1) een verval tot circa 4,0 meter, (2) een relatief beperkte kwelweglengte en (3) dunne deklagen.
- Naast piping bij groene keringen is ook een grote bijdrage door piping kunstwerken. De grote bijdrage wordt veroorzaakt door keermuren zonder kwelscherm en een damwandconstructie. Bij beide locaties zijn tijdens het hoogwater van 2021 de eerste tekenen van het faalpad waargenomen.
- Het ander dominant faalmechanisme is stabiliteit binnenwaarts. Dit oordeel is verklaarbaar op basis van: (1) dunne binnendijkse deklagen en (2) steile taluds. Tijdens het hoogwater 2021 zijn geen dijken afgeschoven. Het hoogwater is voor stabiliteit binnenwaarts naar verwachting ook niet maatgevend (geweest) omdat de duur zeer kort was. De dijken waren naar verwachting niet verzadigd.
- De beoordeling laat duidelijk zien dat er sprake is van een integrale versterkingsopgave voor dit dijktraject.

3.4.2 Bevindingen hoogwater

Het veiligheidsoordeel voor dijktraject 77-1 Roermond Merum-Ool-Herten conform WBI2017 sluit aan bij het beeld dat Waterschap Limburg van de kering heeft en past bij de bevindingen tijdens het hoogwater van juli 2021. Bij meerdere dijkvakken (zie locatie 1 en 2 in Figuur 3.16) zijn tekenen van de faalpaden waargenomen (bij een waterstand lager dan de waterstand bij de ondergrens):

1. Bij twee dijkvakken aan de westzijde van de haven (HK10 en HK11 in de WBI-beoordeling, locatie (1) in Figuur 3.16) is veel kwel waargenomen, en in één dijkvak

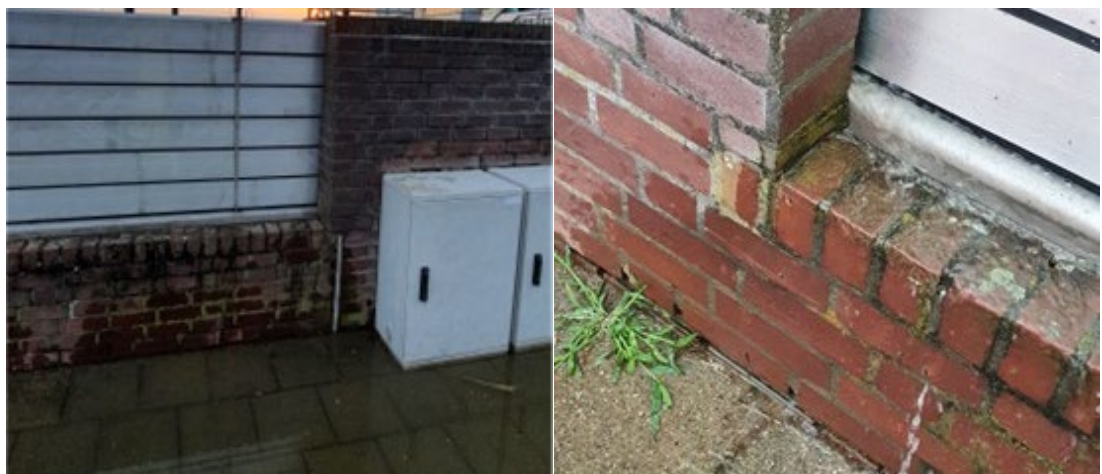
(HK11) is een beschadigde binnendijkse stoep waargenomen. Dit duidt op te weinig weerstand tegen piping. Dit komt overeen met het WBI-toetsoordeel.

2. In de vijver aan het park Hattem (HK26 in de WBI-beoordeling en locatie (2) in Figuur 3.16) zijn beginnende tekenen van piping gezien (uitspoelen zand). Dit komt overeen met het WBI-toetsoordeel (Waterschap Limburg, 2022b).



Figuur 3.16 Locatie meldingen bij Roermond Merum-Ool-Herten.

Bij locatie (1) was sprake van uittredend water door de demontabele kering tijdens het hoogwater, zie Figuur 3.17. Bij het veldbezoek dagen na het hoogwater bleek verder dat binnendijks de zandlaag onder de tegels was omgewoeld, en buitendijks de voegen waren uitgespoeld, zie Figuur 3.18.



Figuur 3.17 Uittredend water door de demontabele kering bij locatie (1) tijdens hoogwater.



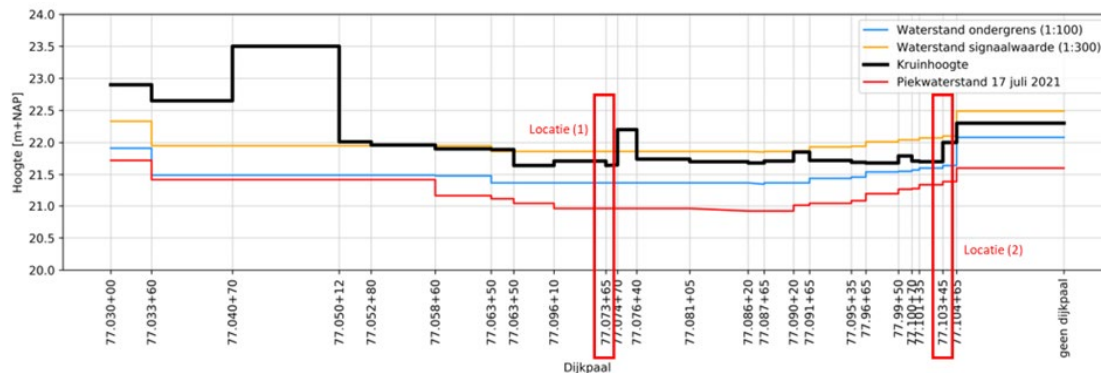
Figuur 3.18 Omgewoelde zandlaag binnendijks en uitgespoelde voegen buitendijks bij locatie (1) na hoogwater.

Bij locatie (2) zijn binnendijks zandmeevoerende wellen waargenomen tijdens het veldbezoek na hoogwater, zie Figuur 3.19.



Figuur 3.19 Zandmeevoerende wellen bij locatie (2) tijdens het veldbezoek na hoogwater.

In de WBI-beoordeling is een grafiek opgenomen van de waterstand bij de ondergrens, de signaleringswaarde, de kruinhoogte en de piekwaterstand tijdens 17 juli 2021, zie Figuur 3.20. De locaties van de meldingen zijn ook in de figuren opgenomen. Uit de grafiek blijkt dat de piekwaterstand voor het gehele traject lager is geweest dan de kruinhoogte van de dijk, en lager dan de waterstanden bij de ondergrens en de signaleringswaarde.



Figuur 3.20 Grafiek van de waterstand bij ondergrens en signaleringswaarde, de kruinhoogte en de piekwaterstand op 17 juli 2021 voor dijktraject 77-1 inclusief de locaties van de meldingen.

3.4.2.1 Piping bij Kunstwerken (PKW)

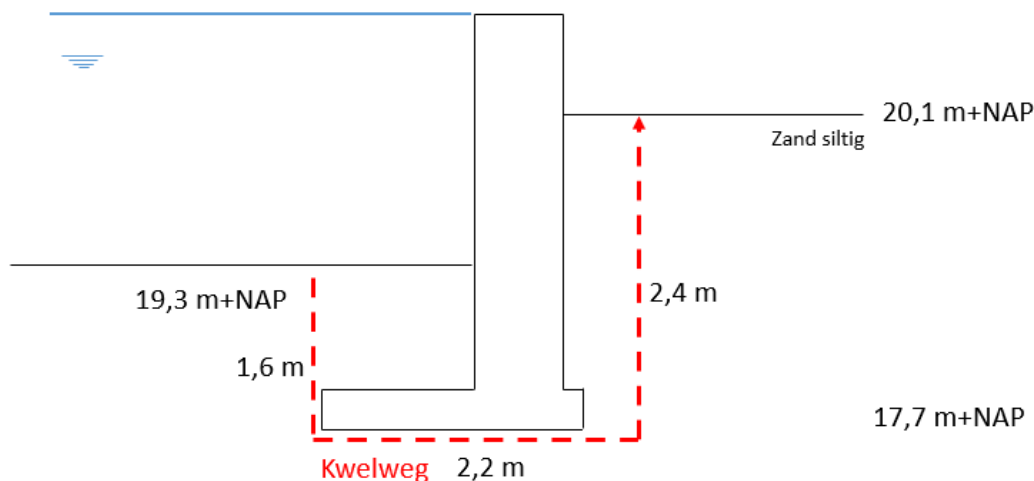
Het faalmechanisme piping bij kunstwerk valt binnen het WBI2017 in groep 4, wat betekent dat voor dit toetsspoor geen faalkans wordt berekend. Het kunstwerk krijgt het oordeel ‘voldoet ruim aan de signaleringswaarde’, ‘voldoet aan de signaleringswaarde’ of ‘voldoet niet aan de ondergrens’.

Piping bij kunstwerk wordt beoordeeld aan de hand van de drie deelfaalmechanismen: opbarsten, piping (terugschrijdende erosie) en heave. Als één van de deelfaalmechanismen voldoet aan de benodigde veiligheid, is een voldoende oordeel op het hoofdmecanisme bereikt.

In de WBI-beoordeling voor dijktraject 77-1 is voor beide locaties het oordeel ‘voldoet niet aan de ondergrens’ gegeven, waarbij voor locatie (1) gerekend is met de waterstand bij signaleringswaarde (NAP +21,86 m) en voor locatie (2) met de kruinhoogte van de constructie (NAP +21,7 m). Daarnaast is in de beoordeling aangegeven dat het oordeel overeen komt met de observaties van het hoogwater, aangezien op beide locaties uitspoeling van zand is waargenomen.

3.4.2.2 Locatie (1)

In Figuur 3.21 is de situatie bij locatie (1) schematisch weergegeven samen met de kortste kwelweg. De constructie bestaat hier uit een keermuur die deels demontabel is zonder kwel scherm. In Tabel 3.6 en Tabel 3.6 zijn de resultaten opgenomen van de berekening op piping (formule van Lane) en heave voor zowel de waterstand bij de signaleringswaarde (NAP +21,86 m) als de piekwaterstand van 17 juli 2021 (NAP +20,98 m). Er is geen berekening voor opbarsten omdat er geen deklaag aanwezig is binnendijs van het kunstwerk.



Figuur 3.21 Schematische weergave van de kwelweg bij locatie (1).

Tabel 3.5 Berekening op piping (formule van Lane) voor de waterstand bij signaleringswaarde en waterstand van juli 2021 bij locatie (1)

Parameter	Waterstand bij norm	Waterstand juli 2021
Verval over het kunstwerk ΔH	NAP +21,86 m – NAP +20,1 m = 1,76 m	NAP +20,98 m – NAP +20,1 m = 0,88 m
Horizontale kwelweg L_h	2,2 m	2,2 m
Verticale kwelweg L_v	4 m	4 m
Creep-factor $C_{w,creep}$	Creep-factor van 7, dit correspondeert met matig fijn zand	Creep-factor van 7, dit correspondeert met matig fijn zand
Veiligheidsfactor terugschrijdende erosie (Lane)	$\frac{\frac{2,2}{3} + 4}{21,86 - 20,1} = \frac{0,68}{1,76} = 0,38$	$\frac{\frac{2,2}{3} + 4}{20,98 - 20,1} = \frac{0,68}{0,88} = 0,77$

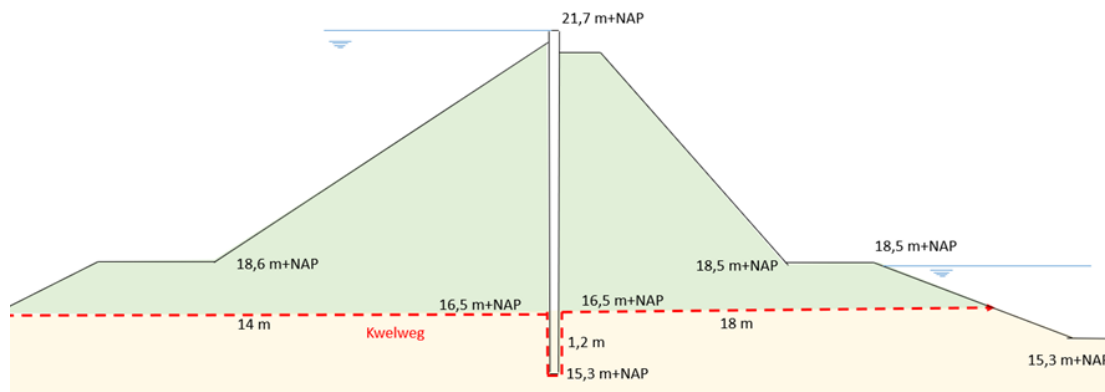
Tabel 3.6 Berekening op heave voor de waterstand bij signaleringswaarde en waterstand van juli 2021 bij locatie (1)

Parameter	Waterstand bij norm	Waterstand juli 2021
Stijghoogte onderzijde benedenstrooms kwelscherm ϕ_0	NAP +21,68 m	NAP +20,98 m
Freatisch niveau uittredepunt h_p	NAP +20,1 m	NAP +20,1 m
Lengte kwelscherm benedenstrooms $d_{kwelscherm}$	NAP +20,1 m – NAP +17,7 m = 2,4 m	NAP +20,1 m – NAP +17,7 m = 2,4 m
Kritieke heavegradiënt	0,5 [-]; omdat de kwelweg alleen door zandige lagen loopt	0,5 [-]; omdat de kwelweg alleen door zandige lagen loopt
Veiligheidsfactor heave	$\frac{0,50}{\frac{21,68 - 20,1}{2,4}} = \frac{0,50}{0,66} = 0,76$	$\frac{0,50}{\frac{20,98 - 20,1}{2,4}} = \frac{0,50}{0,38} = 1,36$

Uit bovenstaande tabellen (Tabel 3.5 en Tabel 3.6) berekeningen blijkt dat het gevonden oordeel bij de piekwaterstand van juli 2021 niet direct overeenkomt met de observaties. Bij locatie (1) was voldoende weerstand tegen heave aanwezig tijdens het hoogwater, maar toch heeft er stroming door de zandlaag binnendijks plaatsgevonden.

3.4.2.3 Locatie (2)

In Figuur 3.22 is de situatie bij locatie 1 schematisch weergegeven samen met de kortste kwelweg. In Tabel 3.7 en Tabel 3.8 In Tabel 3.7 en Tabel 3.8 zijn de resultaten opgenomen van de berekening op piping (formule van Lane) en heave voor zowel de waterstand gelijk aan de kruinhoogte (NAP +21,71 m) als de piekwaterstand van 17 juli 2021 (NAP +21,4 m). Er is geen berekening voor opbarsten omdat er geen deklaag meer aanwezig is bij het binnendijkse uittredepunt.



Figuur 3.22 Schematische weergave van de kwelweg bij locatie (2).

Tabel 3.7 Berekening op piping (formule van Lane) voor de waterstand bij signaleringswaarde en waterstand van juli 2021 bij locatie (2)

Parameter	Waterstand bij norm	Waterstand juli 2021
Verval over het kunstwerk ΔH	NAP +21,71 m – NAP +18,5 m = 3,21 m	NAP +21,4 m – NAP +18,5 m = 2,9 m
Horizontale kwelweg L_h	32 m	32 m
Verticale kwelweg L_v	2,4 m	2,4 m
Creep-factor $C_{w,creep}$	Creep-factor van 6, dit correspondeert met matig grof zand	Creep-factor van 6, dit correspondeert met matig grof zand
Veiligheidsfactor terugschrijdende erosie (Lane)	$\frac{\frac{\frac{32}{3} + 2,4}{6}}{21,71 - 18,5} = \frac{2,18}{3,21} = 0,68$	$\frac{\frac{\frac{32}{3} + 2,4}{6}}{21,4 - 18,5} = \frac{2,18}{2,9} = 0,75$

Tabel 3.8 Berekening op heave voor de waterstand bij signaleringswaarde en waterstand van juli 2021 bij locatie (2)

Parameter	Waterstand bij norm	Waterstand juli 2021
Stijghoogte onderzijde benedenstrooms kwelscherm ϕ_0	NAP +21,71 m	NAP +21,4 m
Freatisch niveau uittredepunt h_p	NAP +18,5 m	NAP +18,5 m
Lengte kwelscherm benedenstrooms $d_{kwelscherm}$	NAP +16,5 m – NAP +15,3 m = 1,2 m	NAP +16,5 m – NAP +15,3 m = 1,2 m
Kritieke heavegradiënt	0,5 [-]; omdat de kwelweg alleen door zandige lagen loopt	0,5 [-]; omdat de kwelweg alleen door zandige lagen loopt
Veiligheidsfactor heave	$\frac{0,50}{\frac{21,71 - 18,5}{1,2}} = \frac{0,50}{2,68} = 0,19$	$\frac{0,50}{\frac{21,4 - 18,5}{1,2}} = \frac{0,50}{2,42} = 0,21$

Uit bovenstaande tabellen (Tabel 3.6 en Tabel 3.7) blijkt dat het gevonden oordeel bij de piekwaterstand van juli 2021 wel overeenkomt met de observaties. Bij locatie (2) was onvoldoende weerstand tegen heave en terugschrijdende erosie aanwezig tijdens het hoogwater.

3.4.3 Conclusies

Bij locatie (1) is mogelijk geen sprake geweest van heave, maar alleen van grondwaterstroming onder de tegels. Vermoedelijk zijn de tegels alleen opgedrukt door het verschil in waterdruk over de keermuur, aangezien de constructie rekenkundig voldoet op heave met de waterstand van juli 2021. Aan de andere kant is het op basis van de observaties niet mogelijk om het optreden van heave uit te sluiten, hiervoor is nader onderzoek nodig.

4 Synthese

4.1 Erosie binnentalud door onderschatting belasting (Aasterberg)

Het gehanteerde waterstandsmodel kent een dermate grof raster (met gridcellen met een breedte van 1 à 2 kilometer) dat lokale opstuwingeffecten hierin niet worden meegenomen. Dit aspect is van praktisch belang zodra de waterstand de kruinhoogte benadert, zoals bij het hoogwater van juli 2021 het geval was.

Voor operationele omstandigheden is het gebruik van een enigszins grofmazig voorspellingsmodel niet onlogisch, gelet op de rekentijden. Daarbij is het van belang te rekenen meteen actueel model met de juiste ruwheid, behorend bij de tijd van het jaar waarin het hoogwater plaatsvindt.

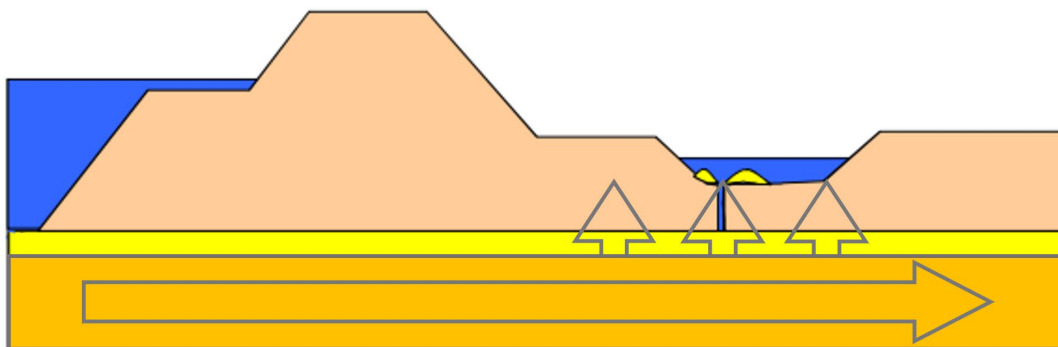
Voor het berekenen van de normwaterstanden behorend bij de signaleringswaarde en de ondergrenswaarde wordt aanbevolen om met een fijnmaziger model te rekenen waarin lokale opstuwingeffecten wel worden meegenomen. De rekentijd is dan minder van belang. Aanbevolen wordt om dan tevens berekeningen te maken met het operationele model, zodat de van plaats tot plaats te verwachten verschillen tussen de operationeel voorspelde waterstand en de werkelijk te verwachten waterstand bij benadering bekend zijn. Dan kan bij extreme afvoeren hiermee rekening worden gehouden.

4.2 Piping (Ohé & Laak – Stevensweert en Nattenhoven – Roosteren)

Op basis van de WBI-beoordeling zouden er mogelijk meer zandmeevoerende wellen moeten zijn waargenomen dan de ene wel nabij Sint-Annakapel. Verondersteld mag worden dat de schematisering van een tweelaagsmodel binnen de rekenregels conservatief is, waarbij de volgende aspecten een rol spelen:

- De beoordeling vindt plaats met conservatieve rekenwaardes conform het WBI veiligheidsframework. Zelfs bij categorieën V en VI is het mogelijk dat er geen signalen van beginnende faalpaden zijn omdat het mogelijk is dat de rekenwaardes van de parameters niet op deze locatie aanwezig zijn.
- Tijdsafhankelijkheid: het hoogwater kenmerkte zich door een uitzonderlijk korte piek, waardoor bergingseffecten in de ondergrond een rol kunnen spelen. De gehanteerde rekenmodellen uit het beoordelingsinstrumentarium veronderstellen een langdurige aanwezigheid van de piekwaterstand.
- Het veronderstelde éénlaagsmodel van Sellmeijer beschrijft onvoldoende wat er in werkelijkheid optreedt bij een meerlaags systeem. Bij een situatie met een relatief dunne zandlaag bovenop een grindlaag (zie Figuur 4.1 hierna) zal rond het uittredepunt zand uitspoelen, maar de verdere aanvoer van (kwel)water vindt plaats via de (nog) niet aan erosie onderhevige grindlaag waarbij het meer bovenstrooms gelegen zand niet uitgespoeld raakt.
- De zandlaag is mogelijk in mindere mate aanwezig dan in het rekenmodel is verondersteld, zo is het mogelijk dat de zandlaag niet doorlopend is.
- Het voorland is slechts in beperkte mate in rekening gebracht bij de huidige beoordeling, terwijl het in werkelijkheid wel aanwezig is waardoor de weerstand hoger is. Behalve dat het kritisch verval hierdoor hoger ligt dan in de berekeningen is aangenomen, is ook het verval waarbij uitspoeling van zand bij het uittredepunt optreedt hierdoor hoger en treden er pas later zandmeevoerende wellen op.

De mate waarin elk van deze factoren een rol speelt, verschilt uiteraard per locatie.



Figuur 4.1 Dominante stromingspatroon in een zand-op-grind-scenario.

4.3 Piping bij kunstwerken (Roermond Merum – Ool – Herten)

In het algemeen kan piping slechts optreden na opbarsten van de deklaag en heave (door de opgebarsten deklaag en langs de verticale delen van kunstwerken). Op twee locaties zonder deklaag en met een kunstwerk is uitspoelend zand geconstateerd.

Op de ene locatie betrof dit zand dat tussen de voegen van tegels doorspoelde, waarbij ook omwoeling van het zand onder de tegels optrad. Volgens de berekeningen met de waterstand van juli 2021 zou hier geen heave optreden. Vermoedelijk is hier sprake van een lokaal uitspoelings probleem, mede veroorzaakt door de aanwezigheid van de tegels. Met andere woorden: zonder tegels was er vermoedelijk ook geen uitspoeling van zand opgetreden en slechts kwel. De modellering is hier dan correct, zij het dat de lokale effecten van betegeling hierin niet zijn meegenomen.

Op de andere locatie zou er volgens de berekeningen onvoldoende weerstand tegen heave en terugschrijdende erosie aanwezig zijn geweest bij de piekwaterstand. De observaties stemmen hier mee overeen. De ontwikkeling van een pipe door uitspoeling van zand vergt echter tijd en waarschijnlijk was het boven-kritieke verval voldoende kort aanwezig om niet tot falen te leiden.

5 Conclusies en aanbevelingen

De uitgewerkte vier cases (hot spots) laten zien dat het zinvol is om de uitkomsten uit de veiligheidsbeoordeling en de werkelijk waargenomen verschijnselen tijdens een hoogwaterperiode met elkaar te confronteren. Er zijn vier mogelijke uitkomsten:

- Een kering voldoet rekenkundig aan de norm op doorsnedeniveau en er worden geen signalen waargenomen die duiden op het optreden van een faalpad; dit is consistent; deze situaties zijn verder niet onderzocht.
- Een kering voldoet rekenkundig aan de norm, maar er zijn waarnemingen die wijzen op het optreden van een bepaald faalpad.
- Een kering voldoet rekenkundig niet aan de ondergrens- of signaleringswaarde, maar er zijn geen waarnemingen die dit bevestigen.
- Een kering voldoet rekenkundig niet aan de ondergrens- of signaleringswaarde, en waarneming geven aan dat de situatie mogelijk onveilig is.

Van al deze vier gevallen valt te leren. Zoals in de vier cases is gedaan is het op lokaal niveau nuttig om te kijken waar er verschillen in beoordeling en waarneming bij het hoogwater optreden. Dit kan aanleiding zijn om bijvoorbeeld de opgestelde schematisatie en daarmee de beoordeling aan te scherpen ofwel de beoordelingsmethode kritisch te beschouwen. Hierbij zijn drie eerste aanbevelingen te maken:

- Iedere (lokale) beoordeling is maatwerk op basis van een beperkte set aan (lokale) gegevens. Daarom is het voor veel meer dan de uitgevoerde vier cases aan te bevelen om de ervaring en waarneming met elkaar te vergelijken.
- Opgetreden discrepanties tonen aan dat het, indien daar aanwijzingen voor zijn, lucratief is om de (lokale) schematisering aan te scherpen ten behoeve van de beoordeling.
- Bij de case studies is de vergelijking gemaakt ten opzichte van de beoordeling waarbij meestal hogere waterstanden met een langere tijdsduur optreedt.

Op een meer generiek niveau geven de cases aanwijzingen dat er nader onderzoek nodig is om te kijken wanneer er in meer brede zin aanleiding kan zijn om hetzij schematisaties, hetzij beoordelingsmethoden aan te passen. Enige terughoudendheid past echter om op basis van slechts vier cases conclusies te trekken die op systeemniveau geldig zijn.

Er valt te denken aan:

- Een minder grof raster voor de lokale waterstandsstatistiek voor beoordeling om lokale effecten beter in rekening te kunnen brengen.
- De invloed van aanwezig voorland minder conservatief in te kunnen schatten buiten het standaard kader in de huidige beoordelingsmethodiek. Dit kan bijvoorbeeld met D-Geo Flow.
- Er speelt een discussie omtrent de invloed van grove zand- en grindlagen en tevens de aanwezigheid van tussenzandlagen. Ook in enkele van de uitgewerkte cases is duidelijk dat dit van overheersend belang is voor de beoordeling van de kans op piping, dus als hier meer duidelijkheid in kan komen is dat winst.
- De tijdsduur van een hoogwater heeft invloed. Deze invloed is in de hoogwaterstatistiek en in rekenmodellen nog maar beperkt in rekening te brengen. Hier zit ruimte voor verbetering. Aan de andere kant is de korte duur van deze hoogwatergolf een reden dat niet alle keringen zonder meer kunnen worden goedgekeurd op basis van bewezen sterkte.
- Verticale stromingscomponenten bij piping en kunstwerken goed mee te nemen voornamelijk bij twee-laagsystemen in de ondergrond en bij anisotrope.

- Een scherpere beoordeling te kunnen geven met probabilistische analyses afgezet tegen de huidige semi-probabilistische analyses; conform de kalibratie geeft 80% van de beoordeling een gunstiger rekenresultaat wanneer probabilistisch wordt gerekend.

Er is tot op heden in de beoordelingssystematiek weinig aandacht voor het meenemen van ervaringen tijdens hoogwater in de beoordeling van de veiligheid van waterkeringen. In de wettelijke beoordelingen (van na juli 2021) van waterschap Limburg zijn ervaringen van het hoogwater meegenomen en veelal verwerkt in de beoordelingsresultaten middels 'bewezen sterkte' (wegstrepen van de faalkansbijdrage van overleefde waterstanden). Het verhaal van de kering kan hier praktische handvatten voor bieden. De onderhavige (oriënterende) studie laat zien dat hier wel veel voordeel in kan zitten.

Referenties

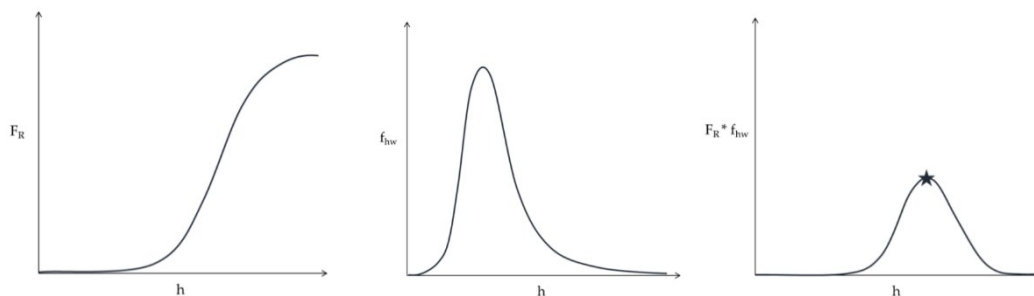
- Bezuijen, 2017. A. Bezuijen, The influence of the leakage length on the initiation of backward erosion piping, Proceedings 25th meeting of the European Working Group on Internal Erosion in Embankment Dams & their Foundations, Delft, 4-7 September 2017, 88-96.
- De Jong & Asselman, 2022. J. de Jong & N. Asselman, Analyse overstromingen Geulmonding – Watersysteemanalyse Waterschap Limburg, rapport 11207700-000-ZWS-0013, Deltares, Delft, 28 april 2022.
- García Martínez et al., 2017. M.F. García Martínez, M. Marchi, L. Tonni, G. Gottardi, A. Bezuijen & A. Rosso, Numerical simulation of the groundwater flow leading to sand boil reactivation in the Po River, Proceedings 25th meeting of the European Working Group on Internal Erosion in Embankment Dams & their Foundations, Delft, 4-7 September 2017, 79-87.
- Geertsema & Asselman, 2022. T. Geertsema & N. Asselman, Analyse hoogwater Roermonding – Watersysteemanalyse Waterschap Limburg, rapport 11207700-000-ZWS-0020, Deltares, Delft, 5 mei 2022.
- Van Heeringen et al., 2022a. K-J. van Heeringen, N. Asselman & L. van Wolfswinkel, Analyse wateroverlast Eyselshoven – Watersysteemanalyse Waterschap Limburg, rapport 11207700-000-ZWS-0010, Deltares, Delft, 25 april 2022.
- Van Heeringen et al., 2022b. K-J. van Heeringen, N. Asselman, A. Overeem, J. Beersma & S. Philip, Analyse overstroming Valkenburg – Watersysteemanalyse Waterschap Limburg, rapport 11207700-000-ZWS-0014, Deltares, Delft, 26 april 2022.
- Waterschap Limburg, 2020. Waterschap Limburg, WBI Beoordeling Aasterberg, dijktraject 82-1, documentnummer 2020-D80564, Waterschap Limburg, Roermond, 30 december 2020
- Waterschap Limburg, 2021. Waterschap Limburg, WBI Beoordeling Nattenhoven-Roosteren, dijktraject 83-1, documentnummer 2021-D10731, Waterschap Limburg, Roermond, 27 april 2021.
- Waterschap Limburg, 2022a. Waterschap Limburg, WBI Beoordeling Ohé & Laak-Stevensweert, dijktraject 81-1, documentnummer WLLDOC-2066690340-14239, Waterschap Limburg, Roermond, 15 april 2022.
- Waterschap Limburg, 2022b. Waterschap Limburg, WBI Beoordeling Roermond Merum-Ool-Herten, dijktraject 77-1, documentnummer WLLDOC-2066690340-15170, Waterschap Limburg, Roermond, 19 mei 2022.

A Fragility curves

Fragility curves tonen de faalkans bij een bepaald faalmechanisme van een dijkdoorsnede gegeven een bepaalde waterstand, ook wel de conditionele faalkans genoemd. Onderstaand Figuur toont een illustratie van een fragility curve. In deze curve is op de y-as de F_R getoond, de cumulatieve kansdichtheid van de sterkte. Dit is gelijk aan de conditionele faalkans P_f . Op de x-as is de waterstand weergegeven.

Een fragility curve toont, zoals gezegd, conditionele faalkansen (faalkans gegeven de waterstand). Om tot een totale faalkans te komen, dient de fragility curve te worden gecombineerd met de kansdichtheidsfunctie van de waterstand (waterstandsstatistiek). Onderstaande figuur toont een voorbeeld van een dergelijke kansdichtheidsfunctie.

Het vermenigvuldigen van de fragility curve met de waterstandsstatistiek resulteert in de faalkansbijdrage per waterstand. De grafiek van deze faalkansbijdrage is getoond in onderstaande figuur (rechts). Hierin is voor de verschillende waterstanden zichtbaar hoeveel zij bijdragen aan de jaarlijkse faalkans van de doorsnede, en is meteen inzichtelijk welke waterstanden het meest bijdragen aan deze jaarlijkse faalkans (de ster in onderstaande figuur rechts). De jaarlijkse faalkans van de doorsnede is gelijk aan de oppervlakte onder de grafiek van de faalkansbijdrage.



Figuur bijlage A.1 Fragility curve (links), kansdichtheidsfunctie (midden) en faalkansbijdrage (rechts).

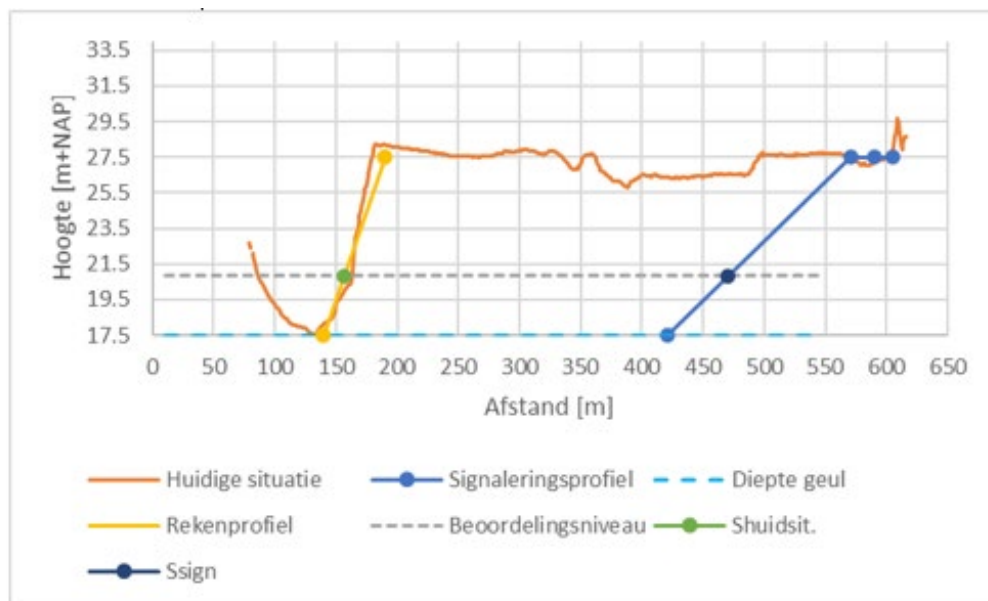
B Voorland

In het voorland ten noorden van het dijktraject 83-1 zijn meerdere boringen beschikbaar. Deze zijn via het Waterschap Limburg beschikbaar. De in rood omcirkelde locaties zijn samengevat in onderstaande tabel. In deze bijlage bevinden zich verder uittreksels van de (.gef) bestanden.



Figuur 5.1 Boringen voorland dijkvak GK29.

Verder is er vanuit de wettelijke beoordeling ook een toets op het voorland uitgevoerd. In Figuur 5.1 wordt geïllustreerd dat de invloedzone voor directe faalmechanismen niet wordt geraakt bij indirecte faalmechanismen in het voorland.



Figuur 5.2 Voorland toetsing dijkvak GK29.

B.1 Boringen voorland 83-1

OBJECTID	FILENAME	DATUM	RD_X	RD_Y	Z_NAP
11763	B60A1829.gef	2007-02-15	185797	344818	29.7
11762	B60A1828.gef	2006-12-06	185272	344734	29.32
11761	B60A1827.gef	2007-02-26	185118	344836	29.38
11760	B60A1786.gef	2005-09-28	185669	344714	29.71
11605	B60A1167.gef	1996-01-01	185287	344840	27.46
11606	B60A1168.gef	1996-01-01	185471	344793	28.08
11323	B60A0405.gef	1991-11-01	185020	344780	28.09
11325	B60A0427.gef	1995-04-28	185285	344685	27.48
11324	B60A0425.gef	1995-04-21	185310	344795	28.1
11327	B60A0431.gef	1995-09-01	185674	344724	27.8
11326	B60A0430.gef	1995-09-01	185800	344825	27

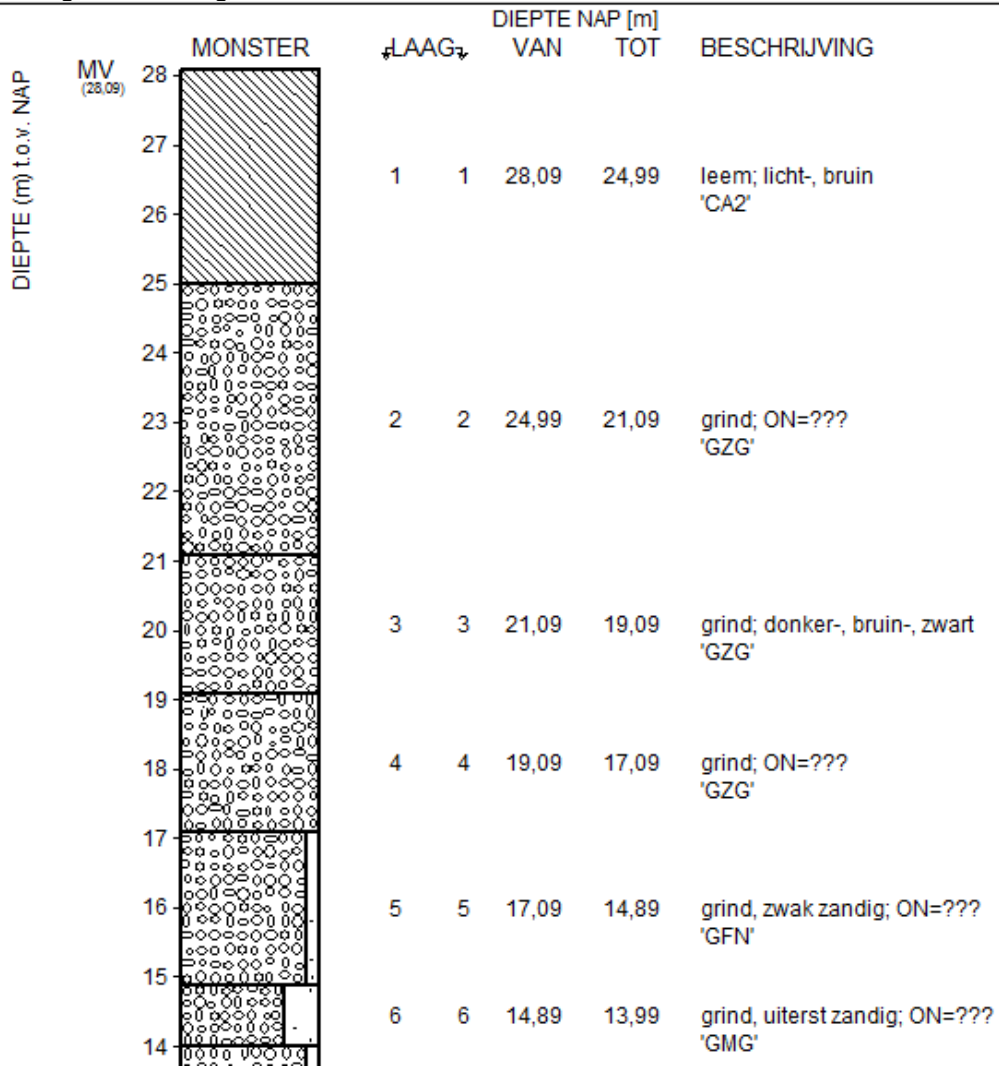
OBJECTID	Uitvoer-der	V_hor_niv	Boormeth	Voor-gegr	Eind-diepte	Grondw s
11763	Dura Vermeer			0	160	0
11762	Dura Vermeer		LUC	20	213	0
11761	Dura Vermeer			0	403	0
11760	Haitjema		LUC	0	175	0
11605		maaiveld	HAN	0	2.1	0
11606		maaiveld	HAN	0	2.7	0
11323	Gruner	maaiveld	PUL	0	24	0
11325	Gruner	maaiveld	PUL	0	30	0
11324	Gruner	maaiveld	PUL	0	18	0
11327	De Ruiter	maaiveld	PUL	0	20.6	6
11326	De Ruiter	maaiveld	PUL	0	20.4	0

In deze boringen is een orde 2 à 3 meter dikke leemlaag terug te vinden ('CA1', 'CA2' of 'CA3'). In sommige boringen zijn er sterke sporen van zand aanwezig. Dit leidt dus niet tot een sluitende conclusie, daarvoor is meer grondonderzoek benodigd. Maar het is wel de verwachting dat het voorland hier door de aanwezigheid van klei en leem een reducerende werking heeft door een verhoging van de intredeweerstand.

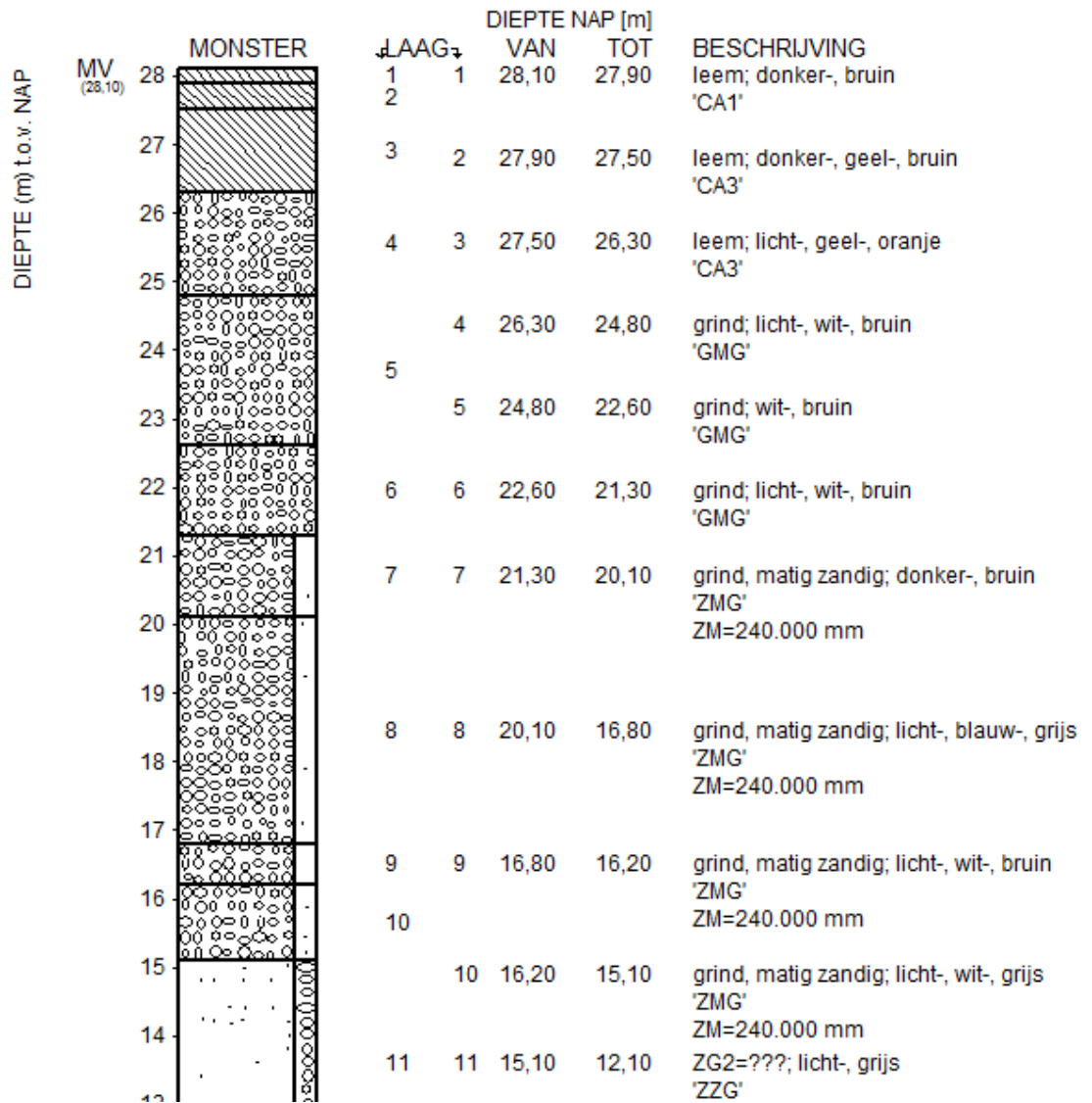
C Overzicht interessante locaties

Nr.	Dijktraject	Aantal bekeken locaties	Faalmechanisme	Omschrijving	Meegenomen als hotspot in rapportage?
1	81-1 Ohé & Laak-Stevensweert	3	Piping	Meerdere dijkvakken binnen het traject zijn afgekeurd op piping, maar slechts op 1 locatie is een zandmeevoerende wel gemeld	Ja, in 3.2
2	83-1 Nattenhoven-Roosteren	2	Piping	Twee dijkvakken afgekeurd op piping, maar geen zandmeevoerende wellen waargenomen	Nee, omdat dit type observatie al wordt uitgezocht voor traject 81-1
3	82-1 Aasterberg	1	Overloop	Overloopsituatie waarbij zandzakken zijn geplaatst op de kern	Ja, in 3.1
4	83-1 Nattenhoven-Roosteren	1	Piping	Afgekeurd dijkvak waarbij 1x de dijkbasis als voorlandlengte is meegenomen, maar veel meer voorland aanwezig is	Ja, in 3.3
5	77-1 Roermond Merum-Ool-Herten	3	Piping bij kunstwerk	3 meldingen binnengekomen over kwel/piping ter plaatse van kunstwerken	Ja, in 3.4
6	70-1 Baarlo	3	Piping	Tijdens hoogwater zijn wellen opgetreden achter de dijk, maar het risico op piping was niet bekend.	Nee, traject wordt al versterkt
7	77-1 Roermond Merum-Ool-Herten	4	Erosie binnentalud	Tijdens hoogwater verschillende meldingen van erosie op het binnentalud, maar locaties liggen in een stromingsluw gedeelte	Nee, erosie in het binnentalud is niet goed te onderzoeken in een bureaustudie
8	68-1 Venlo	2	Macrostabieleit	Tijdens hoogwater wellen binnendijs gemeld, en dijkvak is afgekeurd op macrostabieleit	Nee, wordt al onderzocht binnen het waterschap
9	57-1 Nieuw-Bergen	1	Piping	Tijdens hoogwater zijn wellen opgetreden achter de dijk, en het risico op piping was bekend.	Nee, traject wordt al versterkt
10	60-1 Well	3	Piping	Tijdens hoogwater zijn wellen opgetreden achter de dijk, en het risico op piping was bekend.	Nee, traject wordt al versterkt
11	75-1 Buggenum	2	Piping	Tijdens hoogwater zijn wellen opgetreden achter de dijk, en het risico op piping was bekend.	Nee, traject wordt al versterkt
12	Roermond	1	Erosie binnentalud	Tijdens hoogwater verschillende meldingen van erosie op het binnentalud, maar locaties liggen in een stromingsluw gedeelte	Nee, erosie in het binnentalud is niet goed te onderzoeken in een bureaustudie

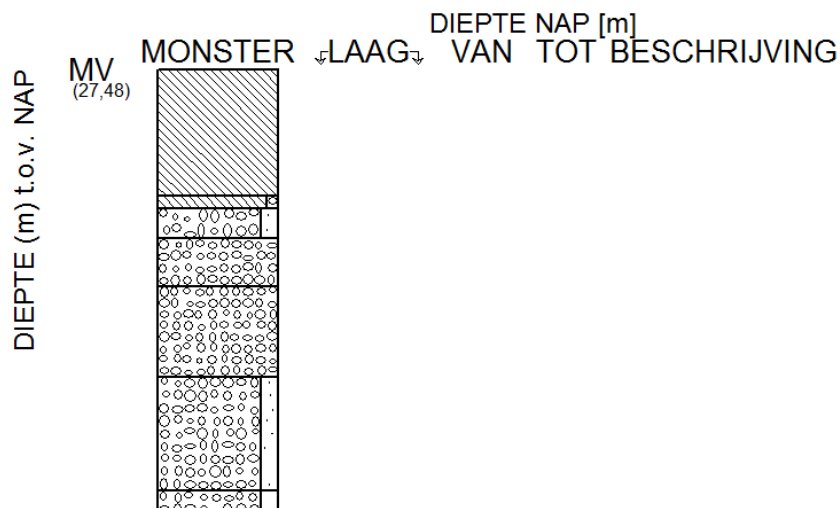
13	Gennep	1	Stabiliteit	Locatie Genneperhuisweg is afgekeurd, maar hoogwatergolf was zodanig uitgezakt dat zich geen kritische situatie heeft voorgedaan.	Nee, hoogwater was te kortdurend
----	--------	---	-------------	---	----------------------------------



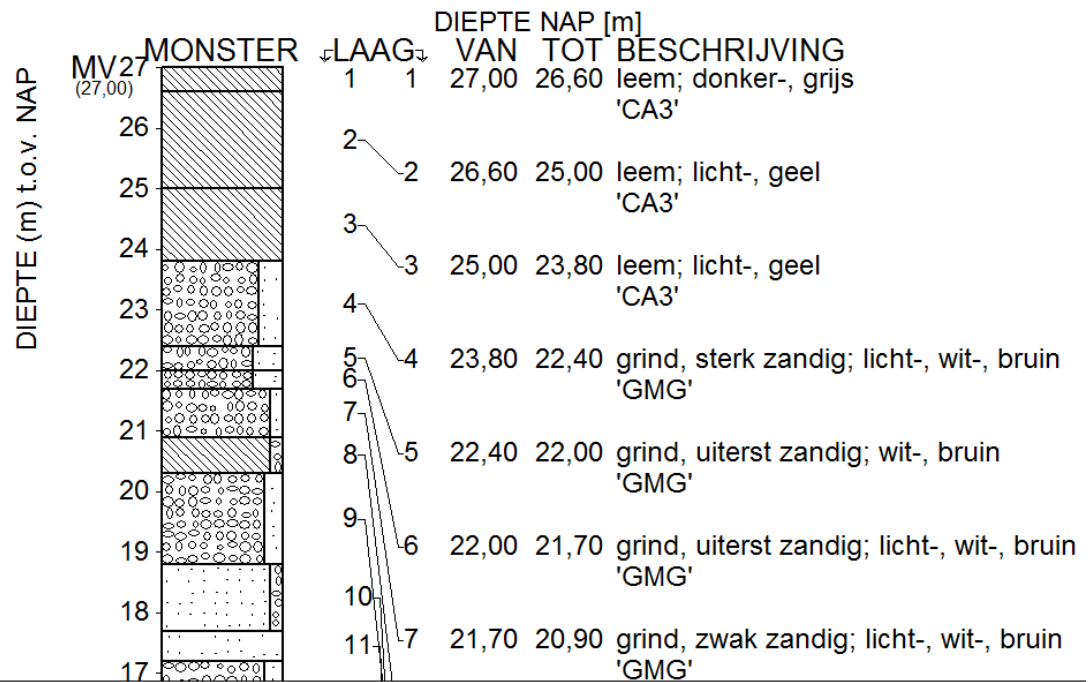
Boring B60A0425.gef



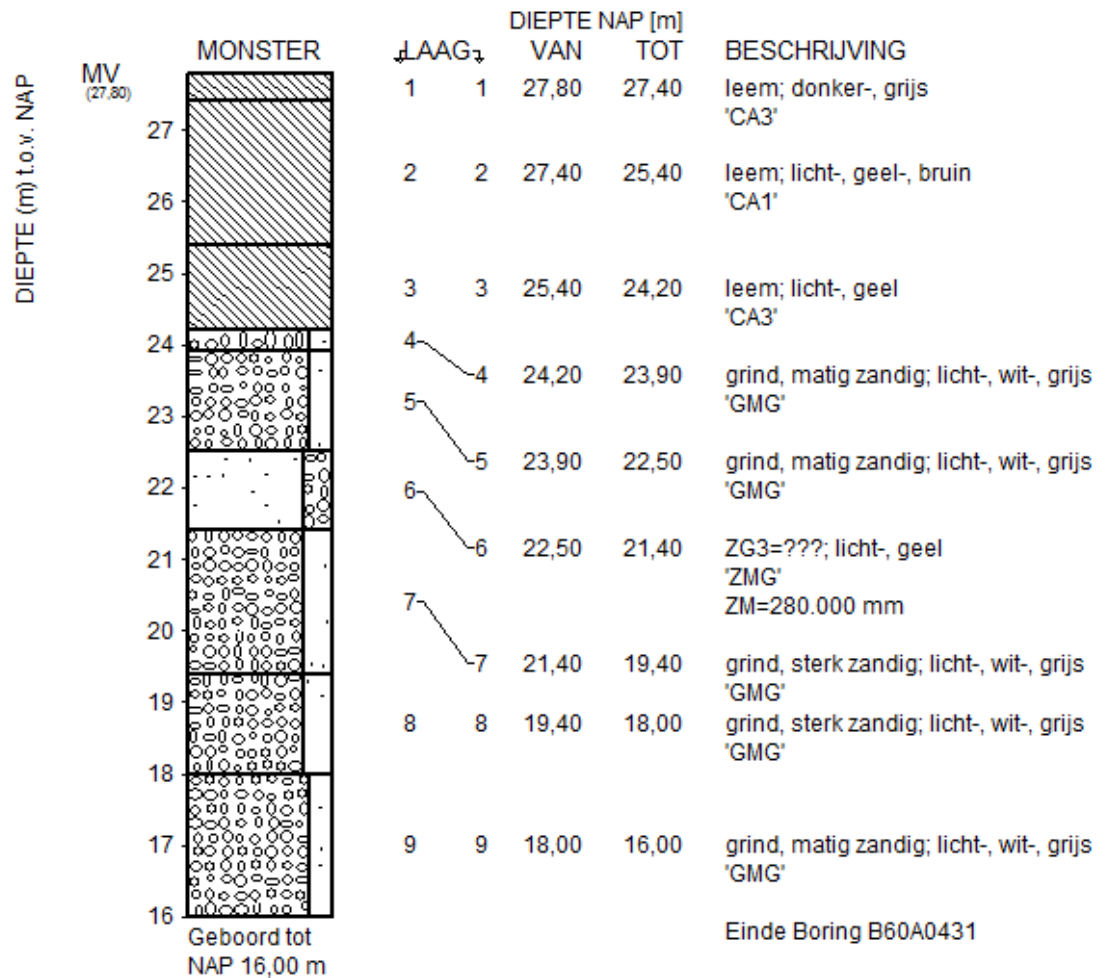
Boring B60A0427.gef



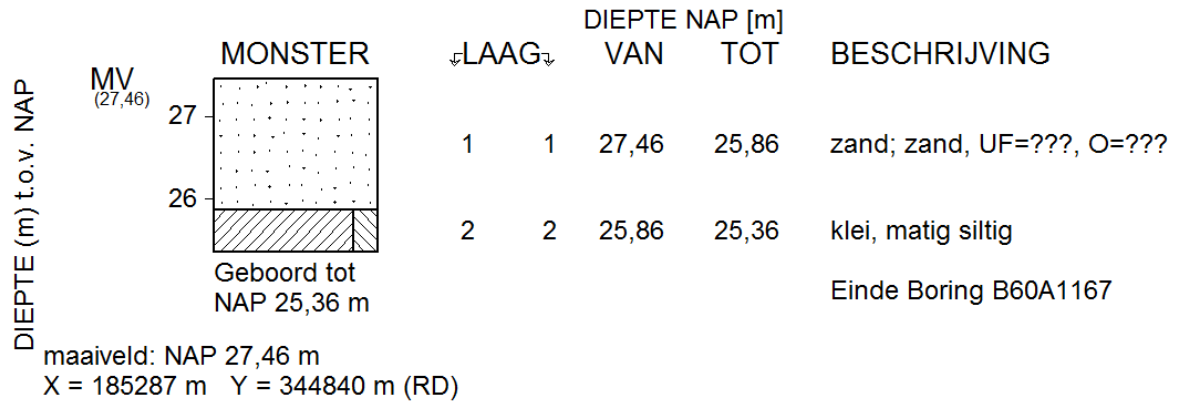
Boring B60A0430.gef



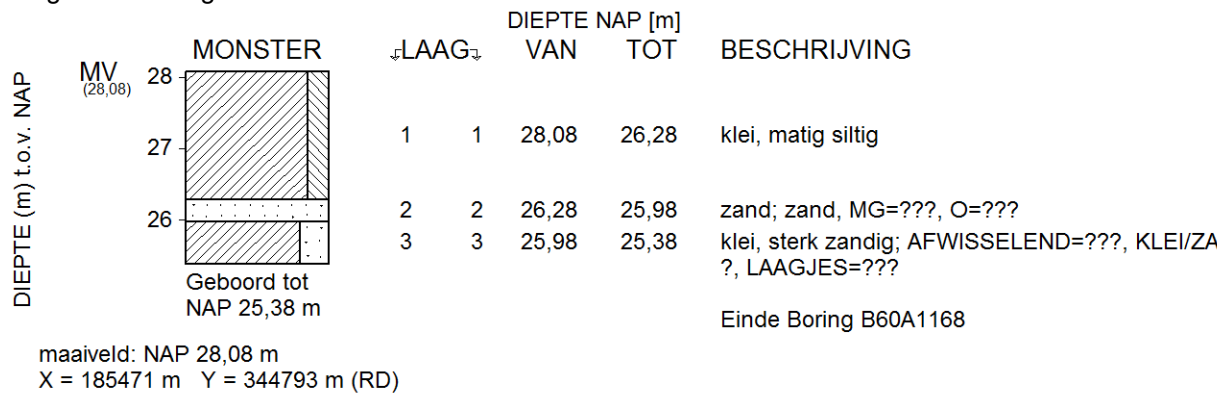
Boring B60A0431.gef



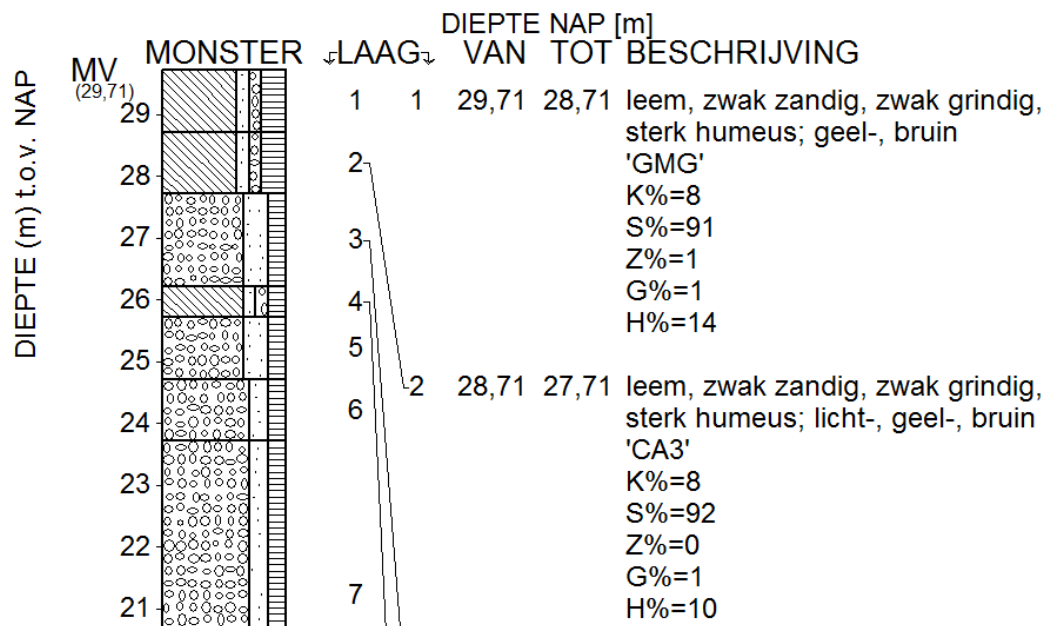
Boring B60A1167.gef



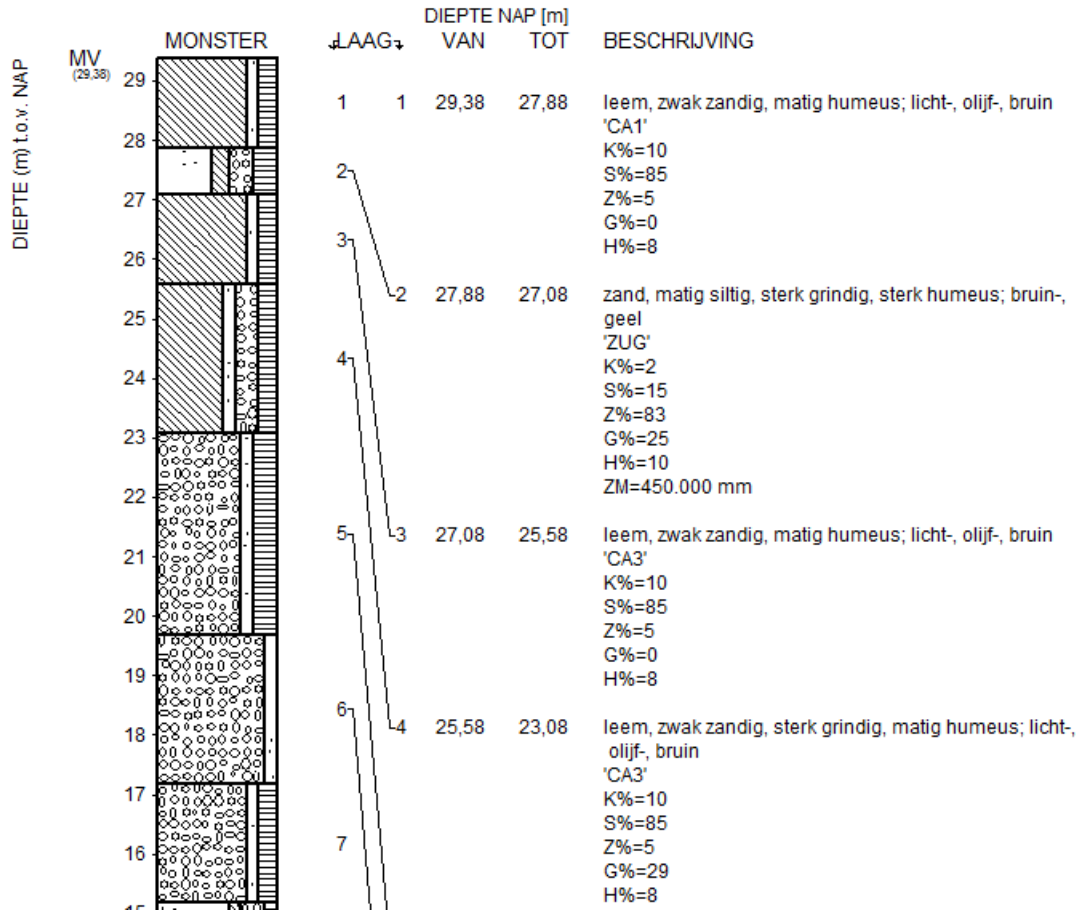
Boring B60A1168.gef



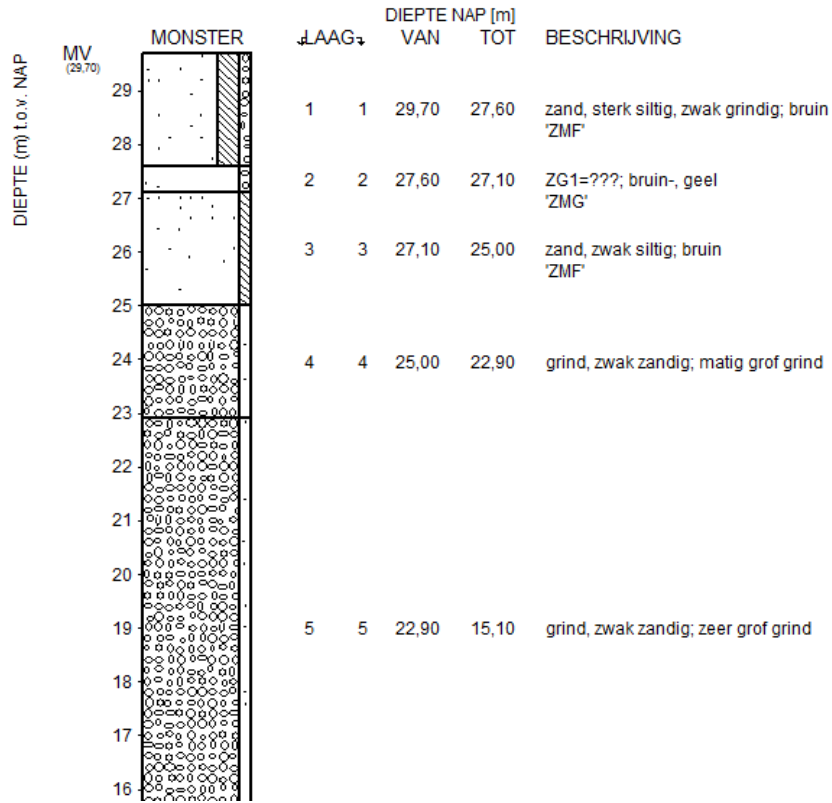
Boring B60A1786.gef



Boring B60A1827.gef



Boringen B60A1829.gef



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