

Feitenrelaas falen overlaat Bosscherveld

Oorzakelijk onderzoek



Feitenrelaas falen overlaet Bosscherveld
Oorzakelijk onderzoek

Auteur(s)

Feitenrelaas falen overlaat Bosscherveld
Oorzakelijk onderzoek

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Zuid-Nederland District Limburg, hoofdkantoor Maastricht
Contactpersoon	Dhr. [REDACTED]
Referenties	Overlaat, stuw, Maas
Trefwoorden	Overlaat Bosscherveld, stuw, faalmechanismen, hydrodynamica, geotechniek, waterbouw, oorzakelijk onderzoek

Documentgegevens	
Versie	1.0
Datum	16-07-2024
Projectnummer	11210464-000
Document ID	11210464-000-HYE-0002
Pagina's	76
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)		

Gebruik van deze tabellen is voor de controle van de juiste uitvoering door Deltares van de opdracht. Ieder ander klantgebruik en externe verspreiding is niet toegestaan.

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord
0.11			
1.0			

Samenvatting

Op 3 januari 2024 is een deel van de overlaatdam bij Bosscherveld (langs de Stuwweg bij Maastricht) beschadigd, waardoor een bres is ontstaan en de overlaat heeft gefaald (zie Figuur S.1). Hierbij is een woonboot losgeraakt en tegen een nabijgelegen brug gedreven. Zowel de woonboot als de brug zijn hierdoor zwaar beschadigd. De brug is niet meer bruikbaar voor verkeer. Woonbooteigenaren in het gebied zijn na het ontstaan van de schade uit voorzorg geëvacueerd. Er zijn geen mensen gewond geraakt. Er zijn tijdelijke nooddammen aangelegd om het peil op de Maas weer veilig te stellen.

Rijkswaterstaat Zuid-Nederland heeft Deltares als onafhankelijk kennisinstituut gevraagd onderzoek uit te voeren naar de oorzaak van het falen van de overlaat. Intussen is gestart met het ontwerp van een nieuwe overlaat op dezelfde locatie, die voor het komende hoogwaterseizoen gereed moet zijn.



Figuur S.1: Schade aan de overlaat Bosscherveld, 4 januari 2024, Rijkswaterstaat.

Het rapport bestaat uit een feitenrelaas met betrekking tot het falen van de overlaat Bosscherveld, mogelijke oorzaken (hypothesen) en een beschrijving van de oorzaak of oorzaken. Hierin is ook een analyse van recente schades uit het verleden meegenomen. Het onderzoek is uitgevoerd op basis van beschikbare data door middel van literatuur- en bronstudie (o.a. op basis van fotomateriaal), analyse van waterstandsdata, een veldbezoek en gesprekken met bewoners. Dit leidt tot de volgende zes onderbouwde hypothesen, die we tezamen zien als verklaring voor het falen van de overlaat.

1. *Het waterstandsverval over de overlaat is de laatste decennia significant toegenomen.*

Het systeem rond Bosscherveld is flink veranderd sinds de aanleg in 1930. Door de grootschalig zand- en grindwinning (vooral in de jaren 50) en de rivierverruiming na 1995 (project Grensmaas) is de waterstand in de Grensmaas net benedenstrooms van de overlaat met meer dan 3 meter gedaald (bij eenzelfde totaalafvoer van de Maas). Daarnaast overstroomt de overlaat tegenwoordig wel pas bij hogere Maasafvoeren (bij ca. 650 m³/s in 1930 en ca. 1700 m³/s in 2023), en bij hogere afvoeren nemen de benedenwaterstanden juist toe. Deze twee effecten samen zorgen er voor dat het verval in waterstand over de overlaat, als er afvoer overheen gaat, is toegenomen van ca. 0,5 meter in de periode 1930-2011 tot 1,5 meter vanaf 2017. Door de gesloten scheepvaartopening bij de stuw Borgharen (vanaf november 2023), gaat de overlaat al weer overstroomen bij lagere Maasafvoeren (ca. 1000-1100 m³/s). Hierdoor is de benedenstroomse waterstand lager en is het verval verder toegenomen naar 2,5 meter.

2. Een groter waterstandsverval zorgt voor hogere belastingen op de overlaat.

De hydraulische belasting op de overlaat zelf is een combinatie van hoge stroomsnelheden op het afgaande talud en drukfluctuaties onder de watersprong. Deze watersprong treedt op ergens benedenstrooms van de overlaat en vormt de overgang tussen schietend water (op het talud) en stromend water (in het benedenstroomse pand). Hierbij wordt veel energie vernietigd. Bij een groter verval over de overlaat treden er hogere stroomsnelheden op aan de benedenstroomse helling en meer turbulentie. Door het grotere verval over de overlaat is er meer energie te vernietigen en leidt de combinatie van snelheden en drukfluctuaties tot een zwaardere belasting van de bekleding (trek-/drukkrachten).

3. De aangebrachte balk en kleppen op de overlaat zorgen voor een hogere belasting op de overlaat.

Om te zorgen voor een hogere bergingscapaciteit in de zomer, is de overlaat in de loop der jaren verhoogd door een balk en kleppen (sinds 2004), ingegoten met beton. Deze verhoging zorgt er echter voor dat de stroming de vorm van de overlaat niet meer goed kan volgen en daarom 'loslaat'. Op de locatie waar de stroming vervolgens weer aan komt te liggen (op korte afstand van de kruin) is de stroming sterker en de turbulentie groter geworden. Ook dit gaat gepaard met drukfluctuaties die de bekleding zwaarder belasten. Het meest kwetsbare deel van de constructie is daar waar het beton eindigt en overgaat in de steenbekleding. De schadebeelden geven echter geen inzicht of de schade hier begon.

4. De aanwezige begroeiing heeft bijgedragen aan het falen van de overlaat.

Oneffenheden op de overlaat, door bijvoorbeeld begroeiing (maar ook door eerdere reparaties) zorgen voor lokale contracties van de stroming en vervolgens versnellingen en fluctuaties. Dit kan lokaal leiden tot hogere hydraulische belastingen. Daarnaast werken de hydraulische krachten ook op de begroeiing en de begroeiing kan daarmee extra aan de bekleding trekken. De begroeiing hoorde niet op de bekleding aanwezig te zijn. Het is denkbaar dat hierdoor delen van de bekleding gevoeliger zijn voor losraken.

5. De bekleding en de staat van de bekleding konden de hydraulische belasting niet aan.

De bekleding van de overlaat was niet bestand tegen de snellere stroming, turbulentie en de daarmee gepaarde drukfluctuaties, waarna er stenen zijn losgeraakt. Als er stenen losraken, zorgt de stroming voor het verder wegspoelen van stenen en onderliggend materiaal. De staat van de bekleding (deels begroeid) heeft niet bijgedragen aan het optimaal functioneren ervan.

6. Interne erosie kan hebben bijgedragen aan het falen van overlaat.

Vanwege het grotere verval is het denkbaar dat de grondwaterstroming onder de overlaat is toegenomen. Dit kan hebben bijgedragen aan een extra druk tegen de bekleding aan. Door het ontbreken van informatie over de precieze opbouw van de dam, kan geen uitspraak worden gedaan in hoeverre hier sprake van is, noch over de waarschijnlijkheid van (interne) erosie. De invloed van dit mechanismen op het falen kan echter niet uitgesloten worden, omdat door de aanwezige begroeiing de opsluiting van de bekleding slecht zichtbaar was. De schadebeelden die er zijn duiden niet direct op interne erosie als faaloorzaak.

Gelet op klimaatverandering en systeemingrepen is het aannemelijk dat de belastingen op meer (verouderde) constructies in de toekomst gaan veranderen of dat deze al veranderd zijn. Dat kan wezenlijke impact hebben op het functioneren van deze constructies. Deskundig uitgevoerde inspecties en beoordelingen kunnen een belangrijke rol spelen om schade te voorkomen. Daarbij dient ook gelet te worden op cascade-effecten bij, schade uitval en/of algeheel falen.

Naast de overlaat bij Bosscherveld zijn er nog meer stuwen / overlaten aanwezig in het Maasdal. De vraag is in hoeverre hier ook risico's bestaan voor schades en falen als gevolg van systeemveranderingen. Wij bevelen aan deze op korte termijn beter onder de loep te nemen om de eventuele (toekomstige) risico's te bepalen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	10
1.1	Aanleiding	10
1.2	Doel	11
1.3	Organisatie en bijdragen	11
1.4	Leeswijzer	11
2	Beschrijving van de overlaat	12
2.1	Oorspronkelijk ontwerp	12
2.2	Aanpassingen in de loop der jaren	15
2.3	Beheer en onderhoud	16
2.3.1	Begroeiing op de overlaat door de tijd heen	18
3	Systeembeschrijving	19
3.1	Stuw- en sluizencomplex rondom Borgharen	19
3.1.1	Stuw Borgharen	21
3.1.1.1	Beschadigde scheepvaartopening	22
3.1.2	Tijdlijn	23
3.2	Ontwikkeling bodem in het zomerbed	23
3.3	Hydraulische randvoorwaarden	25
3.3.1	Ontwikkeling sinds de aanleg van de overlaat	25
3.4	Hydraulische belastingen op de overlaat	30
3.4.1	Ontwikkeling hydraulische belastingen sinds de aanleg van de overlaat	31
3.5	Veldbezoek overlaat Bosscherveld	32
4	Recente schades en herstelwerkzaamheden	33
4.1	September 2014	33
4.1.1	Herstel schade	34
4.2	Juli 2021	35
4.2.1	Herstel schade	37
4.3	Januari 2024	40
4.4	2003 en 2004	43
4.5	Conclusie / beschouwing	46
5	Mogelijke faalhypothese	47
5.1	Te hoge hydrodynamische belastingen	47
5.1.1	Stroomsnelheden en watersprong	47
5.1.2	Kruin	48
5.1.3	Talud	49

5.1.4	Teen van de overlaat	49
5.2	Bekleding en begroeiing	50
5.3	Interne erosie	53
6	Andere overlaten in het systeem	55
6.1	Instroomwerk natuurpark Bosscherveld	55
6.2	Stuwweg bij overlaat Bosscherveld	57
6.3	Overlaat nabij stuw Linne	58
6.4	Drempels Lateraal-Kanaal-West	59
6.5	Overlaat Groene Rivier Roermond	61
6.6	Overlaat van Contelmo	63
6.7	Overige overlaten (zonder gevolgen stuwpand)	64
7	Conclusies en aanbevelingen	65
7.1	Conclusies	65
7.2	Aanbevelingen voor verder onderzoek	66
8	Referenties	69
A	Luchtfoto's	71

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Op 3 januari 2024 is een deel van de overlaatdam bij Bosscherveld (langs de Stuwweg bij Maastricht) beschadigd. Hierbij is een woonboot losgeraakt en tegen een nabijgelegen brug gedreven, die daardoor beschadigd raakte en niet meer bruikbaar is voor verkeer. Het gat in de overlaatdam is met stenen gevuld en er is een eerste tijdelijke nooddam aangelegd (stroomopwaarts), waardoor het peil op de Maas weer veilig is gesteld. Een tweede tijdelijke nooddam (stroomafwaarts) is steviger en moet meegaan totdat de nieuwe gereed is (Figuur 1.1). Intussen is al gestart met het ontwerp van de nieuwe overlaat op dezelfde locatie, die voor het komende hoogwaterseizoen gereed moet zijn.



Figuur 1.1 Situatieschets overlaat Bosscherveld. Bron: RWS¹

Rijkswaterstaat Zuid Nederland heeft Deltares gevraagd onderzoek uit te voeren naar de oorzaak van het falen van de overlaat.

Het oorzakelijk onderzoek bestaat uit de volgende fasen:

0. Een snel inzicht in de eerste bevindingen.

Deze fase is reeds afgerond, het resultaat daarvan is gepresenteerd in een Powerpointpresentatie aan RWS-ZN op 9 februari 2024.

1. Feitenrelaas

- a. Het opstellen van een feitenrelaas;
- b. Het formuleren van mogelijke hypothesen voor het bezwijken;
- c. Advisering omtrent de doelmatigheid van het uitvoeren van verdere analyse (het testen van de hypothesen)

¹ <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/projectenoverzicht/maas-herstel-overlaatdam-en-brug-bij-bosscherveld>

2. Extra analyses en verdere uitwerking (eventuele vervolgopdracht)
 - a. Het uitwerken van mogelijke analyses (geotechnisch, hydraulisch)
 - b. Het rapporteren van het oorzakelijk onderzoek
 - c. Uitwerken narratief en visualisaties

Deze rapportage bevat de bevindingen van fase 1, het feitenrelaas.

1.2 Doel

Het doel van deze rapportage is het geven van een feitenrelaas met betrekking tot het falen van de overlaat Bosscherveld en het formuleren van hypothesen voor het bezwijken. Daarnaast worden aanbevelingen gedaan voor het uitvoeren van verdere analyses in een eventuele volgende fase van de opdracht met een advisering over de doelmatigheid hiervan.

1.3 Organisatie en bijdragen

Deze rapportage is opgesteld door verschillende personen bij Deltares met uiteenlopende relevante inhoudelijke expertise. De projectleiding en eindredactie lag daarbij in handen van 00. 00 heeft algemene systeemexpertise van de Maas ingebracht, 00 en 00 en 00 hun expertise van de detailhydrodynamica rond constructies, 00 de expertise rond bekledingen van dijken, 00 expertise op het gebied van geotechniek en ervaring rond het hoogwater van 2021 en 00 de expertise op het gebied van de geotechniek. Daarbij is gebruik gemaakt van veel informatie die is aangeleverd door RWS. Daarnaast zijn er interviews afgenomen met twee bewoners nabij de overlaat en de informatie die hier uit naar voren is gekomen is ook meegenomen in de rapportage. Een interne review heeft plaatsgevonden bij Deltares door inhoudelijk expert 00

Leeswijzer

1.4

In hoofdstuk 2 wordt een beschrijving gegeven van het oorspronkelijke ontwerp van de overlaat, de aanpassingen die in de loop der jaren zijn gedaan en wat er gedaan is aan beheer en onderhoud van de overlaat. De beschrijving van het systeem rond de overlaat en de veranderingen hierin sinds de bouw, komen aan bod in hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 gaat in op de recente schades aan de overlaat. Mogelijke faalmechanismen komen aan bod in hoofdstuk 5. Hoofdstuk 6 geeft een korte beschrijving van de overige overlaten in het systeem van de Maas. De uiteindelijke conclusies en aanbevelingen worden gegeven in hoofdstuk 7.

2 Beschrijving van de overlaat

2.1 Oorspronkelijk ontwerp

Het ontwerp van de overlaat Bosscherveld dateert uit 1930 en is in combinatie met stuw Borgharen in de Maas gebouwd. Toen werd het verbindingskanaal aangelegd om de scheepvaart tussen de Maas en de Zuid-Willemsvaart mogelijk te maken, via de Bosscherveld-sluis (Figuur 2.1). Het afleidingskanaal, een zijtak van het verbindingskanaal, stond ook open voor de Maas. Het doel was om overtollig water via de Bosscherveld-overlaatdam naar de Grensmaas te leiden. Een vaste drempel bij de overlaatdam zorgde ervoor dat het waterpeil in zowel het verbindingskanaal als het afleidingskanaal stabiel bleef tijdens gestuwde omstandigheden.

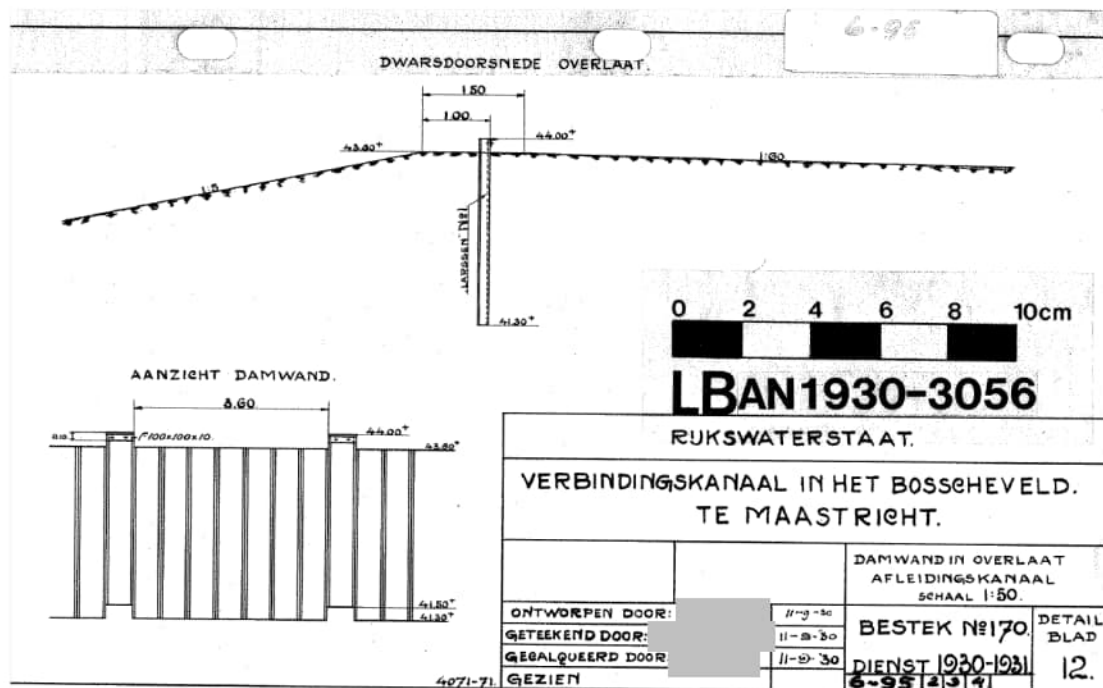


Figuur 2.1 Situatieschets overlaat Bosscherveld. Bron: RWS² aangepast.

Enkele kenmerken van de overlaatdam Bosscherveld waren (Figuur 2.2):

- Kruinniveau op 43,80 m+NAP. De overlaatdam had destijds bij de bouw een kruinhoogte die 20 cm lager lag dan het peil van de stuw Borgharen.
- Lengte van 130 m.
- Damwandscherm in de overlaat, waarbij een deel van de damwandplanken uitsteekt tot 44,0 m+NAP (wat overeenkomt met het stuwpeil bij lage afvoer).
- Afwaarts talud met een verhouding van 1:5.
- Opwaarts talud met een verhouding van 1:60.

² <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/projectenoverzicht/maas-herstel-overlaatdam-en-brug-bij-bosscherveld>



Figuur 2.2 Tekening september 1930 (Bron: RWS)

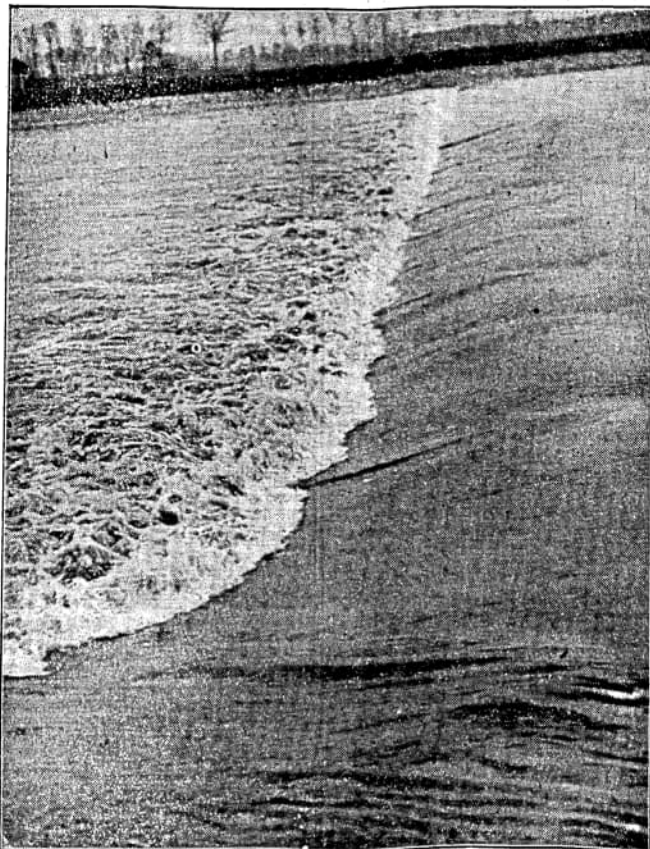
Bij ingebruikname had de overlaatdam een kruinhoogte die 20 cm lager was dan de stuwpeil, wat resulteerde in een continue stroming over de dam (Figuur 2.3 en Figuur 2.4). Vermoedelijk werden bij lage afvoeren balken tegen de uitstekende delen van de damwand gelegd om daarmee het stuwpeil van 44,0 m+NAP te halen.

~ Veeleer lijkt ons de hoogte van den drempel in den overlaat die, zooals wij zagen, op 43.80 M. + N. A. P. ligt, wat erg aan den lagen kant!

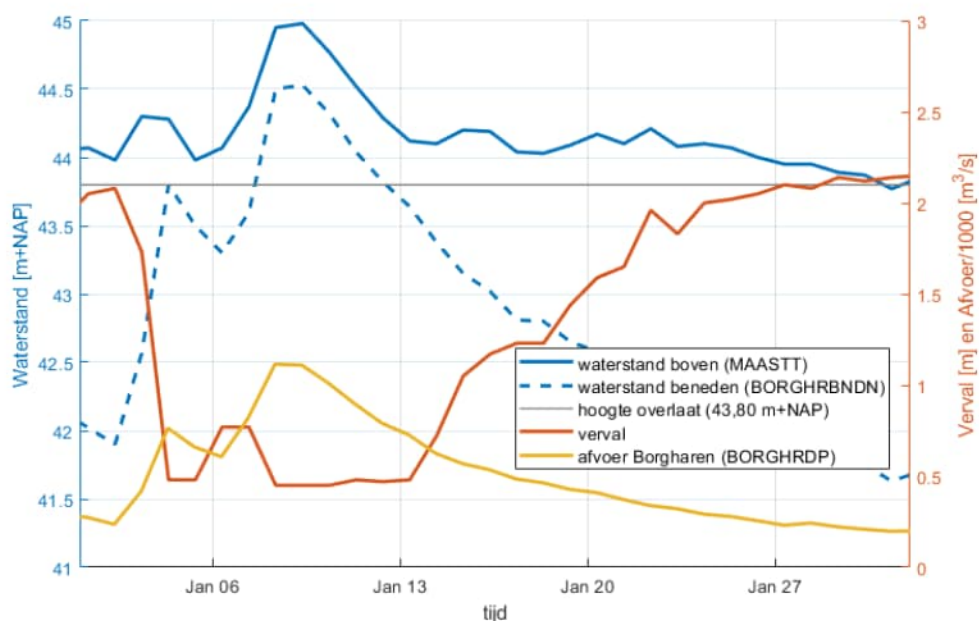
Immers bij een ongewijzigde handhaving van het stuwpeil op 44 Meter „werkt” hij zomer en winter met ten minste 20 c.M. en laat zodoende aldoor omstreeks 13 kub. meter Maaswater per seconde nutteloos wegvloeden. Maar zooveel kan de rivier in droge zomers niet missen, zonder de voeding van het Julianakanaal ernstig in gevaar te brengen.

Een men zal dus hebben te kiezen tusschen een tijdelijke verhooging van den overlaat, of een dito-verlaging van het stuwpeil, met 20 c.M., om dit schadelijk waterverlies te verhinderen.

Figuur 2.3 Uit de Limburger Koerier, 31 maart 1931.



Figuur 2.4 Foto uit de Limburger Koerier: 26 januari 1932 (exacte datum foto onbekend).

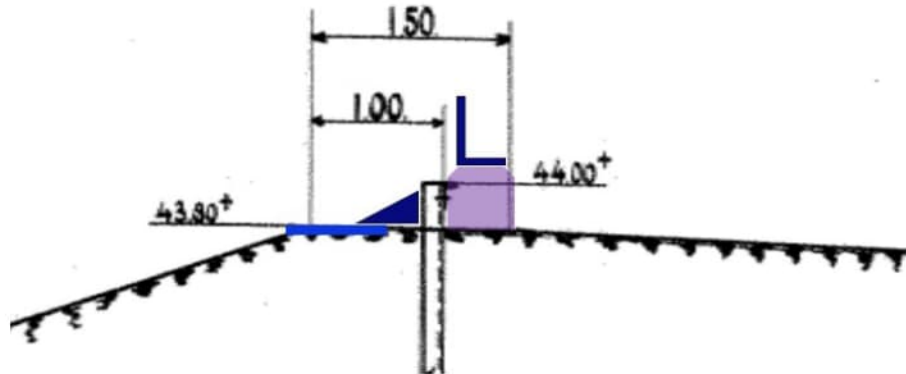


Figuur 2.5 Waterstandsverloop boven- en benedenstrooms van Borgharen (linker y-as), verval (boven – beneden) en afvoer/1000 bij Borgharen (rechter y-as) in januari 1932.

Figuur 2.4 betreft een foto van de overlaat, waarbij het vermoeden is dat deze rond 9 januari 1932 gemaakt is. De benedenwaterstand is hoog: er is haast geen verval (zie ook Figuur 2.5). Er is een gladde stroming over de kruin te zien, maar er zijn ook sporen van de uitstekende delen van de damwand zichtbaar in het water.

2.2 Aanpassingen in de loop der jaren

Op een bepaald moment (tijd niet bekend) werd de hoogte van de dam verhoogd tot een niveau van 44,05 m+NAP (een niveau 5cm hoger dan de stuwpeil) door (permanent) een houten balk stroomopwaarts van de oorspronkelijke damwand te plaatsen en een betonnen rand stroomafwaarts van de damwandrand.



Figuur 2.6 Overzicht aanpassingen op de kruin van de overlaat. De figuur is afgeleid op basis van gesprekken met RWS.

In 2004 is besloten om verdere aanpassingen te doen aan de overlaat (RWS, 2022). Er is een regelbare klep geïnstalleerd met een hoogte van 44,17 m+NAP, waardoor in de zomer water wordt vastgehouden op het stuwpand Borgharen (Figuur 2.7). Tijdens de winter ligt de klep plat en is de hoogte 44,05 m+NAP. Het nadeel hiervan was dat het afvoerkanaal achter de overlaat in de zomer gedurende langere periodes geen water ontving, wat leidde tot ecologische schade. Om dit probleem aan te pakken, zijn er drie buizen in de overlaat geplaatst op een niveau net onder het stuwpeil in het midden van de overlaat. Deze buizen zorgen voor een constante aanvoer van 0,5 m³/s benedenstrooms (Figuur 2.7).



Figuur 2.7 Foto van de neerklapbare klep (links) gemonteerd op de oudere reeds bestaande balk. Het mechanisme om de klep omhoog te houden is zichtbaar; terwijl de wijze waarop deze vastgezet wordt in neergeklapte positie niet te zien is. Aan de rechterkant van de afbeelding zijn de drie 'doorlaat' buizen in de overlaat te zien van bovenaf (bron: RWS, 2022).

Bij lage Maasafvoeren staan de kleppen altijd omhoog geklapt, en bij voldoende water (meestal in de winter) worden de kleppen weer omlaag geklapt. Dit gebeurt door de aannemer na een signaal van RWS-ZN TEM.

2.3 Beheer en onderhoud

Enkele hierna genoemde bronnen geven informatie over de beheer- en onderhoudsinspanning. De onderhoudsinspanning is doorgaans afhankelijk van het beheer- en onderhoudsplan (assetmanagement) van de overlaat, het beheer- en onderhoudscontract (de afgesproken onderhoudsinspanning) en een (actueel) beeld van de staat van onderhoud en het functioneren van de overlaat. Daartoe worden doorgaans inspecties uitgevoerd en de staat van onderhoud gerapporteerd.

Op basis van de beschikbare informatie omtrent het beheer en onderhoud valt op dat:

- overlaat en het gebied benedenstrooms in perioden hevig begroeid zijn geweest;
- er afspraken bestaan over de mate van beheer en onderhoud (ook in relatie tot begroeiing); er inspectieresultaten bestaan en er herstelwerkzaamheden zijn gerapporteerd;
- er in 2021 acuut herstel bij schade heeft plaatsgevonden (ENW, 2021);
- er een instandhoudingsplan aanwezig was.

In 2014 stelt aannemerscombinatie Mourik – Imtech voor om herstelwerkzaamheden uit te voeren vanwege schade (Mourik – Imtech, 2014). Uit het document kan worden afgeleid dat er sprake was van een onderhoudscontract, er schade is herkend en deze is hersteld. Bij het voorstel van herstel in 2014 wordt benoemd begroeiing te verwijderen ten behoeve van de inspectie van de schadelocatie. Bij de herstelwerkzaamheden wordt geen melding gemaakt van (het verwijderen van) de overige begroeiing. Er is dan sprake van zeer zware begroeiing benedenstrooms van de overlaat. Dit is terug te zien in Figuur 2.9.

In de beslisnota van Rijkswaterstaat, aan de Minister van Infrastructuur en Waterstaat, d.d. 12 februari 2024 antwoorden op kamervragen over het bericht 'brug Maastricht dreigt in te storten na aanvaring losgeslagen woonboot' wordt melding gemaakt van conditiemetingen (bijlage 02.1 en 02.3) en een inspectierapport (bijlage 02.4 van de nota).

In het instandhoudingsrapport (Rijkswaterstaat, 2021) wordt melding gemaakt van schades aan bodembescherming en de schotbalk, beide geconstateerd in 2020. In een risico-inventarisatie en -classificatie uit het instandhoudingsrapport (d.d. 15-1-2021) worden beide schades geduid als onacceptabel, waarbij melding is gemaakt van mogelijk grote gevolgkosten bij falen. De begroeiing en de bekleding komen in het instandhoudingsrapport niet terug. Of daarna deze zaken zijn hersteld is onduidelijk.

Zowel op 9 september 2022 als op 28 juli 2023 (ID Verde, 2022 en 2023) blijkt uit inspecties dat de gehele overlaatdam Bosscherveld in, volgens de inspectierapporten, "uitstekende staat" verkeert en geen nader onderzoek behoeft. De rapporten maken melding dat de conditiemeting conform NEN2767-1 is.

In bovengenoemde gevallen zijn de begroeiing, de belemmering van de stroming als gevolg daarvan, de gevolgen die de begroeiing mogelijk heeft voor de bekleding en de eventuele (constructieve) gevolgen voor het functioneren van de overlaat niet benoemd. Dit roept de vraag op of de inspecteurs betrokken bij deze inspecties de begroeiing hebben geobserveerd of hebben geconcludeerd dat deze geen gevolgen voor het functioneren van de overlaat heeft.

De inspectierapporten uit 2022 en 2023 definiëren op een foto de overlaat als enkel het afstromend talud, waardoor het stroomgebied van de overlaat buiten de scope lijkt te vallen. De begroeiing (direct benedenstrooms van het talud) is in elk geval niet benoemd. Deze begroeiing is o.m. terug te zien in Figuur 2.8. De opstaande rand van de overlaat wordt als "beschoeiing" aangeduid en staat van de bekleding als uitstekend gerapporteerd, terwijl de bekleding op de foto's uit de inspecties duidelijk (deels) begroeid is. De bekleding (in het

rapport als elementverharding benoemd) wordt als “inspecteerbaar” aangeduid, terwijl de begroeiing op foto de inspectie maakt dat het onwaarschijnlijk is dat de gehele bekleding te inspecteren is (Figuur 2.10).



Figuur 2.8 Begroeiing rond de overlaat, RWS ZN, november 2023



Figuur 2.9 Begroeiing rond de overlaat (vooral benedenstrooms), de foto is gemaakt in 2014 na de ontstane schade (bron: onbekend, aangeleverd door Rijkswaterstaat).



Figuur 2.10 De bekleding lijkt deels niet goed zichtbaar door de dichte begroeiing (linkerzijde van de foto), bron: inspectierapport 2023.

2.3.1 Begroeiing op de overlaat door de tijd heen

Uit gesprekken met bewoners blijkt dat de overlaat in het verleden vrij werd gehouden van begroeiing, maar dat er vanaf eind jaren tachtig, begin jaren negentig veel meer begroeiing aanwezig was (er stonden zelfs bomen op). Pas vanaf 2004-2005 is er weer meer onderhoud geweest.

In 2013/2014 is er binnen RWS een bezuiniging geweest op groen onderhoud bij natte objecten. Door deze actie mocht RWS toen geen steenbestorting meer onderhouden. In 2019 is de huidige onderhoudsaannemer gestart met het huidige contract op basis van "in stand houden" van de toestand van het hele areaal van RWS-ZN op dat moment. Er was toen dus al achterstand opgelopen, die "in stand" is gehouden en dus sindsdien niet meer erger is geworden.

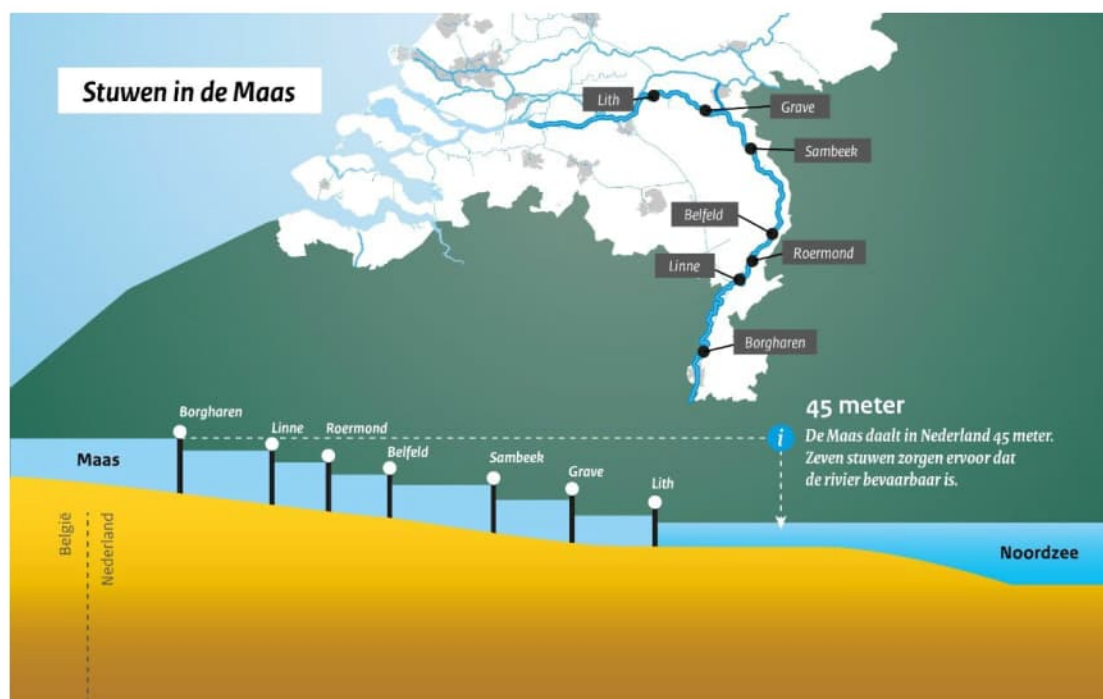
In de Bijlage A geven luchtfoto's het beeld vanaf 2014 t/m 2023. De meeste foto's zijn gemaakt in het vroege voorjaar, zodat er relatief weinig begroeiing zichtbaar is (maar deze is duidelijk wel aanwezig). In de foto van augustus 2020 is de begroeiing veel duidelijker aanwezig.



Figuur 2.11 Foto van de overlaat op 13 februari 2020.

3 Systeembeschrijving

In het Nederlandse deel van de Maas kunnen ruwweg 6 trajecten worden onderschreden. De overlaat Bosscherveld ligt op de overgang tussen het traject van de BovenMaas en de Gemeenschappelijke Maas, ongeveer ter hoogte van rivierkilometer (rkm) 16. De BovenMaas is onderdeel van het stuwpand dat loopt van stuw Lixhe in België tot stuw Borgharen (zie Figuur 3.1). De Gemeenschappelijke Maas (ook wel Grensmaas genoemd) is het vrij afstromende deel van de Maas dat de grens vormt tussen Nederland en Vlaanderen over het traject Borgharen-Thorn, net bovenstrooms gelegen van stuw Linne.



Figuur 3.1 De zeven sluis- en stuwcomplexen in de Maas (Rijkswaterstaat, 2024)

3.1 Stuw- en sluizencomplex rondom Borgharen

De overlaat van Bosscherveld is onderdeel van het systeem rondom stuwcomplex Borgharen dat ten noorden van Maastricht en ten zuidoosten van het dorp Borgharen ligt.

Het stuw- en sluizencomplex rondom Borgharen omvat de volgende kunstwerken, die in rood in Figuur 3.2 zijn aangegeven:

1. Stuwcomplex Borgharen (schuifstuw en schutsluis)
2. Overlaat Bosscherveld
3. Sluis Bosscherveld
4. Keersluis Limmel
5. Instroomwerk rivierverruiming Bosscherveld

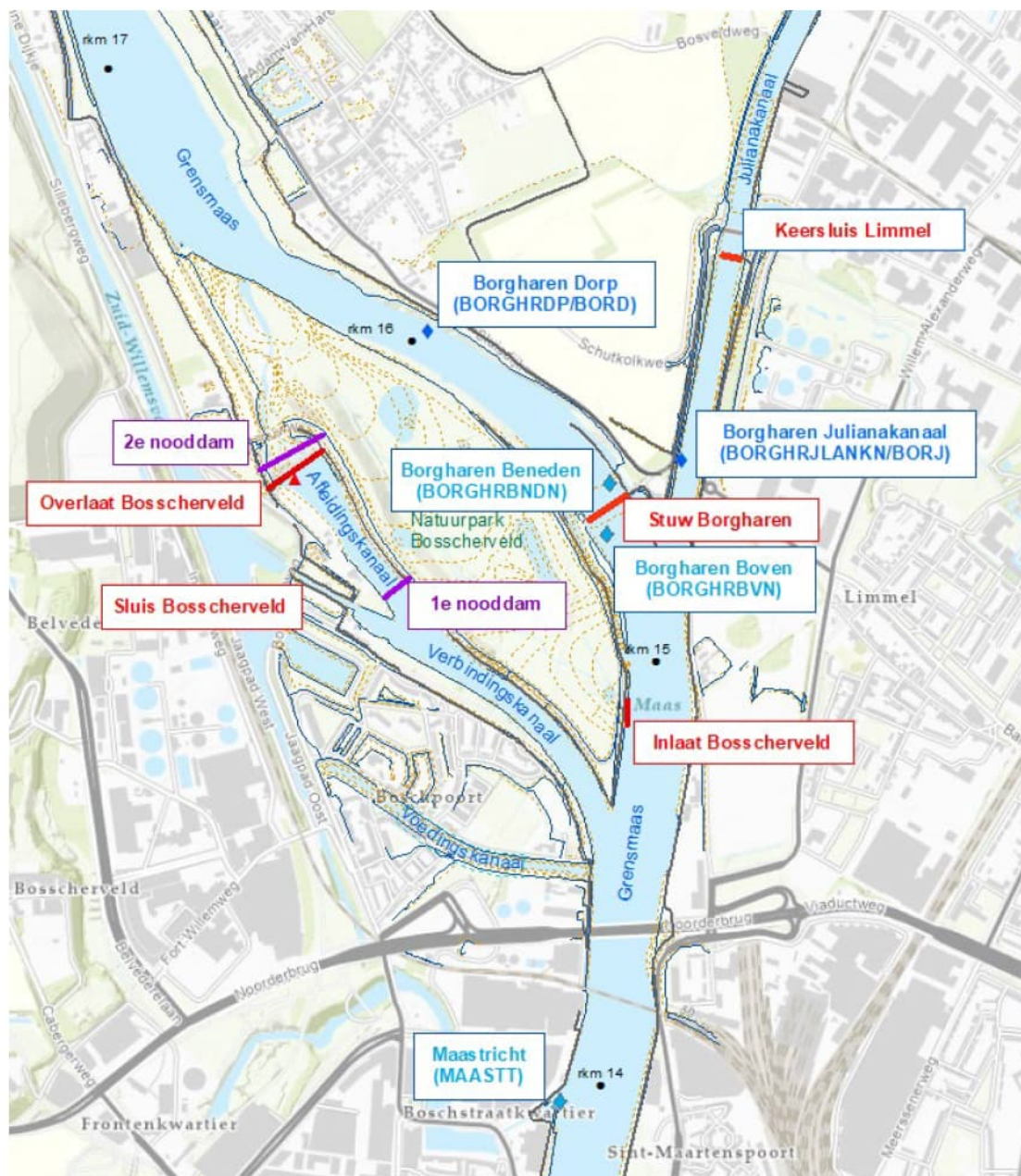
Het stuwcomplex Borgharen (bestaande uit schuifstuw en schutsluis) werkt volledig automatisch met het doel om het peil van zowel de Maas in het bovenliggende stuwpand (Lixhe-Borgharen) als op het Julianakanaal tussen Sluis Ternaaien en Sluis Born binnen de gestelde marges (voornamelijk voor scheepvaart) te houden en om onnatuurlijke afvoerpieken (door bovenstroomse waterkrachtcentrales) zoveel mogelijk te dempen (Aubel, 2023).

De **Stuw Borgharen** is in 1928 in de Grensmaas gebouwd (, 2023). Bovenstrooms van de stuw ligt het **Verbindingskanaal in het Bossche Veld**. Dit kanaal is in 1930 aangelegd als scheepvaartverbinding van de westoever van de Maas tot en met **Sluis Bosscherveld** (gereed in 1930), die doorgang biedt van het verbindingskanaal naar de **Zuid-Willemsvaart**. Het net iets zuidelijker gelegen **Voedingskanaal** was al in 1867 aangelegd, maar deze was niet voor de scheepvaart.

Het **Afleidingskanaal Maastricht** is een zijarm van het verbindingskanaal Bossche Veld. Het Afleidingskanaal loopt tot **overlaat Bosscherveld**. De overlaat Bosscherveld heeft als functie om in gestuwde situaties het water te keren en het peil te handhaven, maar om bij hoge afvoer water door te laten richting de Grensmaas (Rijkswaterstaat Zuid-Nederland, 2014).

In 1934 is het **Julianakanaal** opgeleverd als belangrijke scheepvaartverbinding. Het kanaal is een aftakking aan de oostzijde van de Maas die begint ten noorden van het verbindingskanaal Bossche Veld en net ten zuiden van stuw Borgharen. Het kanaal ligt over een lengte van 36 km parallel aan de Maas en takt bij Maasbracht weer aan. Tussen het Julianakanaal en de Maas lag het **sluizencomplex Sluis Limmel** (1934 – 2018). Dit complex was actief tussen afvoeren van 1200 en 1700 m³/s om het Julianakanaal en het achterland te beschermen tegen hoog water op de Maas. De sluis moet voorkomen dat de waterstand op het Julianakanaal hoger stijgt dan 44,17 m+NAP. Daarvoor ging de sluis ongeveer vanaf afvoeren hoger dan 1700 m³/s geheel dicht (Rijkswaterstaat, 2015). In 2018 is het sluizencomplex Sluis Limmel vervangen door de nieuwe **Keersluis Limmel**. De schutfunctie, die wel aanwezig was bij sluizencomplex Sluis Limmel, is verdwenen voor de nieuwe Keersluis, omdat de waterstanden door ingrepen op de Gemeenschappelijke Maas zijn afgenomen. Het duurt langer voordat de waterstand door stijgende afvoeren te ver toeneemt (> 44,17 m+NAP) voor het Julianakanaal en het achterliggende land. Hierdoor is de schutfunctie tussen 1200 en 1700 m³/s overbodig geworden. Keersluis Limmel heeft daarom alleen nog maar de keerfunctie, door te sluiten als de verwachting is dat de waterstand op het Julianakanaal gaat stijgen tot boven 44,17 m+NAP, dit gebeurt ongeveer bij afvoeren hoger dan 1700 m³/s.

In het kader van de rivierverruiming die na de hoogwaters van 1993 en 1995 in de Gemeenschappelijke Maas heeft plaatsgevonden, is het **Natuurpark Bosscherveld** (~37 ha.) ontwikkeld. Het natuurpark Bosscherveld beslaat het eiland ten noorden van Maastricht, dat ligt tussen het Verbindingskanaal en de Maas. Het is de meest zuidelijke Grensmaas-locatie binnen het Grensmaasproject. De werkzaamheden zijn in 2008 gestart, maar hebben tijdelijk stilgelegen vanwege stagnerende grindafzet en zijn in 2016 weer gestart met afronding in 2019. De gehele locatie is vergraven en in het zuidoosten is een regelbaar inlaatwerk met overlaat (**instroomwerk natuurpark Bosscherveld**) geplaatst. Bij de inlaat wordt minimaal 0,5 m³/s tot maximaal 10 m³/s water ingelaten via 3 evenwijdige duikers. Daarnaast functioneert bijna de gehele westelijke dijk van het Bosscherveld als overlaat met een hoogte van 45,3 m+NAP, die ongeveer bij afvoeren vanaf 2000 m³/s overstroomt (Consortium Grensmaas, 2019).



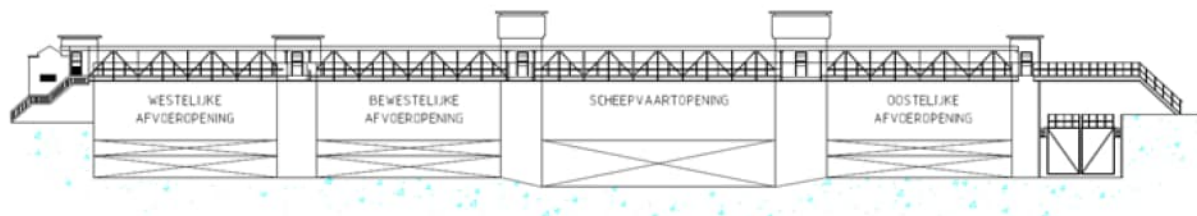
Figuur 3.2 Situatieschets van het systeem rond overlaat Bosscherveld. rood=kunstwerken, paars=tijdelijke kunstwerken, donkerblauw=meetpunten (huidig), lichtblauw=meetpunten (historisch), bron: Deltares.

3.1.1 Stuw Borgharen

Stuw Borgharen ligt ter hoogte van rkm. 15,4 en bestaat uit de volgende onderdelen:

1. Een sluisje met puntdeuren (7,5 x 57 m)
2. Vier stuwoeningen
3. Een vistrap

De stuw heeft vier stuwoeningen. Eén van deze openingen is een scheepvaartschuif (de scheepvaartopening) met een breedte van 30 m. Deze schuif is 1,10 m dieper dan de andere drie openingen die een breedte hebben van 23 m. De scheepvaartopening heeft alleen een wielschuif van 5,5 m hoogte, die geheven kan worden bij toenemende afvoeren. De andere drie openingen hebben niet alleen een 2,5 m hoge wielschuif, maar ook 1,9 m hoge scharnierende regelkleppen bovenop de schuiven (Imtech, 2015).



Figuur 3.3 Schematisch stuw aanzicht vanaf de bovenstroomse kant van Stuw Borgharen uit: [redacted] (2023).

Bij een Grensmaasafvoer tot ca. 200 m³/s geldt het klepbedrijf waarbij er alleen water over de drie kleppen wordt afgevoerd. De kleppen worden bij toenemende afvoer neergelaten tot ze plat op de schuif liggen. Vanaf afvoeren hoger dan 200 m³/s wordt overgestapt op het schuifbedrijf waarbij de vier schuiven (dus ook de scheepvaartschuif) steeds verder omhoog worden getrokken en de afvoer onder de schuiven doorstroomt. Bij de lagere afvoeren stroomt er zowel water onder de schuiven door, als over de drie kleppen heen, deze overgangsfase is het zeegbereik. Vanaf een afvoer van ca. 1600 m³/s, is de stuw volledig gestreken en hangen alle 4 de schuiven boven het wateroppervlak. De scheepvaartopening wordt dan handmatig verder tot in de nok getrokken om een ontsnapmogelijkheid voor stuurloze schepen te creëren (Imtech, 2015 en [redacted], 2023).

Sinds 1993 stuurt de stuw volledig automatisch. Elke tien minuten worden de gegevens van diverse waterstands- en debietmeetstations (LMW³) verwerkt naar een verstelling van de kleppen of schuiven. De peilen zijn gebaseerd op de waterstandsmeter Borgharen-Julianakanaal. De stuw stuurt in de winter op een streefpeil van 44,05 m+NAP bij het LMW meetpunt Borgharen-Julianakanaal. In de zomer wordt dit peil verhoogd naar 44,10 m+NAP.

In de sturing van stuw Borgharen zit een vooralarm voor de waterstand op het Julianakanaal voor 44,17+m NAP en een alarm voor een waterstand van 44,20 m+NAP. In de zomer stijgt de waterstand incidenteel boven 44,17 m+NAP. Dit kan zowel plaatsvinden bij (zeer) lage afvoeren als bij hoge afvoeren. Bij lage afvoeren en het bereiken van de vooralarm waterstand gaat de keersluis van Limmel niet dicht, maar wordt de stuwstand aangepast.

Bij hoge afvoeren en een waterstand van 44,17 m+NAP voor het meetpunt Borgharen Julianakanaal (ongeveer vanaf 1700 m³/s) is de stuw al volledig gestreken en wordt de keersluis Limmel gesloten (Rijkswaterstaat Maaswerken, 2010).

3.1.1.1 Beschadigde scheepvaartopening

Een constructieve inspectie van de sterkte van de Scheepvaartopening (SVO) van stuw Borgharen heeft in november 2023 uitgewezen dat er schade en slijtage is opgetreden aan de geleideconstructie voor het heffen en neerlaten van de SVO. Het eventueel gebruik van de SVO vormt een groot risico en kan leiden tot meer schade of zelfs bezwijken van de schuif. Om deze reden is besloten om tot herstel mogelijk is (voorjaar/zomer 2024) de scheepvaartschuif op de grond te houden zodat deze alleen water kan keren tot de bovenkant van de schuif. De andere drie openingen functioneren conform het normale stuwbeheer. Doorat de stuw niet geheel gestreken kan worden bij toenemende afvoeren is de bovenstroomse waterstand voor afvoeren vanaf ongeveer 1100 m³/s hoger dan gebruikelijk waardoor de overlaat Bosscherveld en inlaat Bosscherveld eerder en meer meestromen dan normaal. Daarnaast wordt keersluis Limmel ook eerder gesloten voor verwachte afvoeren tussen 1100 en 1200 m³/s i.p.v. afvoeren vanaf 1600 tot 1800 m³/s (Rijkswaterstaat, 2023).

³ Landelijk Meetnet Water

Tijdslijn

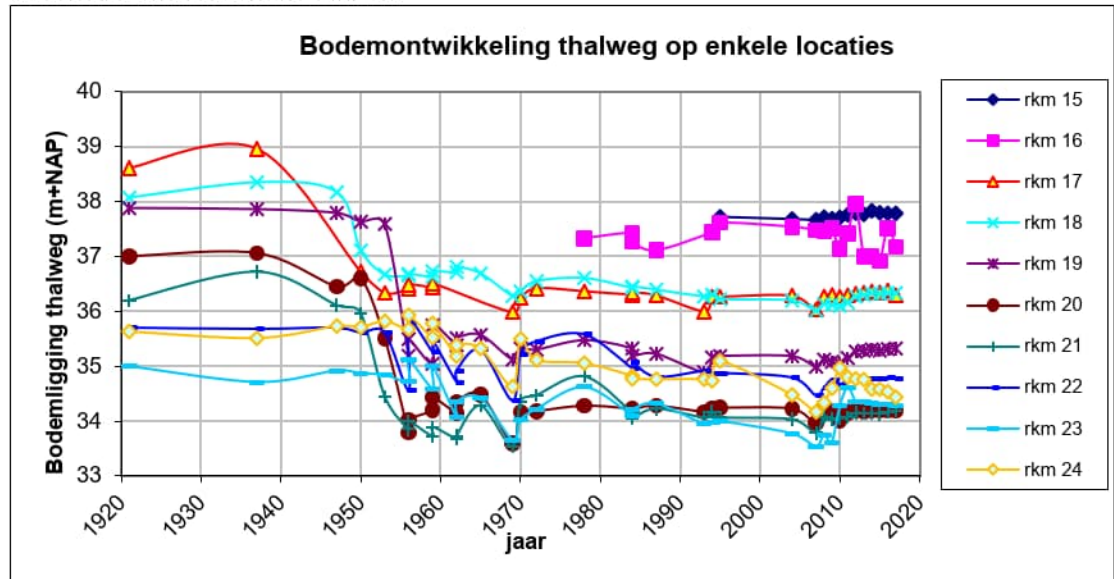
Jaar	Activiteit	Bron
1867	Aanleg voedingskanaal	Rijkswaterstaat Zuid-Nederland (2014)
1928	Bouw Stuw Borgharen	(2023)
1930	Aanleg verbindingskanaal Bossche Veld en Bouw Sluis Bosscherveld	Rijkswaterstaat Zuid-Nederland (2014)
1930	Overlaat Bosscherveld	
1934	Oplevering Julianakanaal	Rijkswaterstaat (2015)
1934	Oplevering sluizencomplex Sluis Limmel	Rijkswaterstaat (2015)
1993	Stuw Borgharen: Stuwcomplex functioneert volledig automatisch	(2023)
2001	Stuw Borgharen: Stuwregeling softwarematig en hardware matig vervangen	Imtech (2015)
2007	Stuw Borgharen: Aanleg vispassage met een debiet van 4 m ³ /s of 2,5 m ³ /s tijdens lage afvoeren	Imtech (2015), (2023)
2010	Stuw Borgharen: versterken van het stortebed in verband met groter verval over de stuw Borgharen na uitvoering van de geplande verruiming Grensmaas in het kader van de Maaswerken.	Rijkswaterstaat Maaswerken (2021)
2011	Stuw Borgharen: Nieuwe balk onder de schuif gemonteerd die ± 20 cm hoger is dan de vorige. De maximale hoogte van de kleppen en daarmee de stuwstand is hierdoor toegenomen van 43,97 tot 44,17 m+NAP	Imtech (2015)
2014	Stuw Borgharen: de STUW Regelalgoritme Applicatie (STURA) wordt in gebruik genomen. Hierbij zijn ook QF waarden in gebruik genomen. Dit betreft het gebruik van QFwaarden uit het Landelijk Meetnet Water (LMW).	Imtech (2015)
2015	Stuw Borgharen: bedieningssysteem vervangen i.v.m. project Regiocentrale Zuid	Imtech (2015)
2018	Oplevering Keersluis Limmel ter vervanging van sluizencomplex Sluis Limmel	Rijkswaterstaat (2015)
2019	Oplevering Bosscherveld met inlaatwerk Bosscherveld	Consortium Grensmaas (2019)
2023	Stuw Borgharen: Beschadigde scheepvaartopening	Rijkswaterstaat (2023)

3.2 Ontwikkeling bodem in het zomerbed

Uit bodempeilingen blijkt dat het zomerbed van de Maas de afgelopen eeuw gemiddeld één tot drie meter gezakt is. Op de Gemeenschappelijke Maas, net benedenstrooms van de overlaat, is het zomerbed in de afgelopen honderd jaar met wel 3 meter gedaald, zie Figuur 3.4. Bovenstrooms van de overlaat en stuw Borgharen zijn alleen gegevens beschikbaar vanaf 1995.

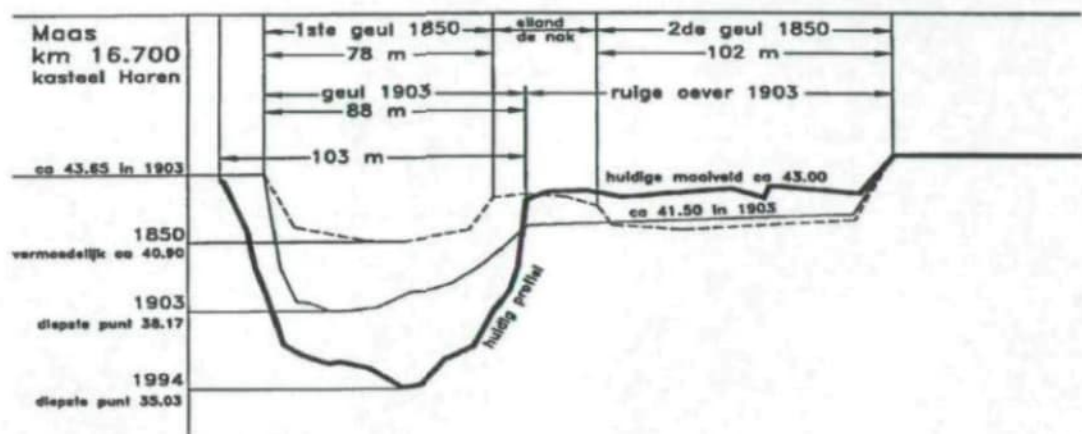
Belangrijke oorzaken voor de bodemdaling zijn de normalisaties (smallere en rechte rivierloop) in de periode van 1850-1940 welke resulteerden in grotere stroomsnelheden en insnijding van de Maas. Deze insnijding is verder versterkt door de zand- en grindwinning in het zomerbed (Duizendstra, 1999). De afgelopen eeuw zijn jaarlijks honderdduizenden kubieke meters sediment aan de rivier onttrokken. Daar staat naar verwachting vrijwel geen

aanvoer van sediment tegenover. Er komt namelijk heel weinig zand en grind van bovenstrooms Nederland binnen.



Figuur 3.4 Bodemontwikkeling in de afgelopen 100 jaar in het midden van de rivier op enkele locaties langs de Grensmaas (op basis van [redacted] & [redacted] 2008).

De Maas is hierdoor veranderd van een zeer bewegelijke meanderende rivier met banken en eilanden in 1850 naar een ingesneden rivierbak. Dit is goed zichtbaar in Figuur 3.5 dat het dwarsprofiel van de Gemeenschappelijke Maas ter hoogte van rkm. 16,7 toont.



Figuur 3.5 Versmalling en verlaging zomerbed bij Borgharen (kasteel/borg van de familie [redacted]) tussen 1850 en 1994 (Waterloopkundig Laboratorium, 1994d uit: [redacted] 1999). De afwatering benedenstrooms van de overlaat komt in principe uit ter hoogte van de locatie van de eerste geul.

In de Gemeenschappelijke Maas zijn niet alleen in de jaren 40, maar ook recent grote hoeveelheden zand en grind gewonnen. De rivierverruiming die na de hoogwaters van 1993 en 1995 in de Zandmaas en de Gemeenschappelijke Maas heeft plaatsgevonden, is namelijk in het kader van het Grensmaasproject in combinatie met zand- en grindwinning tot stand gekomen. Langs de Gemeenschappelijke Maas gaan de werkzaamheden nog door tot 2027 (Rijkswaterstaat Maaswerken, 2021).

Door het dalen van de rivierbodem zal ook de waterstand in de rivier mee zakken. Dit betekent dat bij eenzelfde afvoer de waterstand lager komt te liggen.

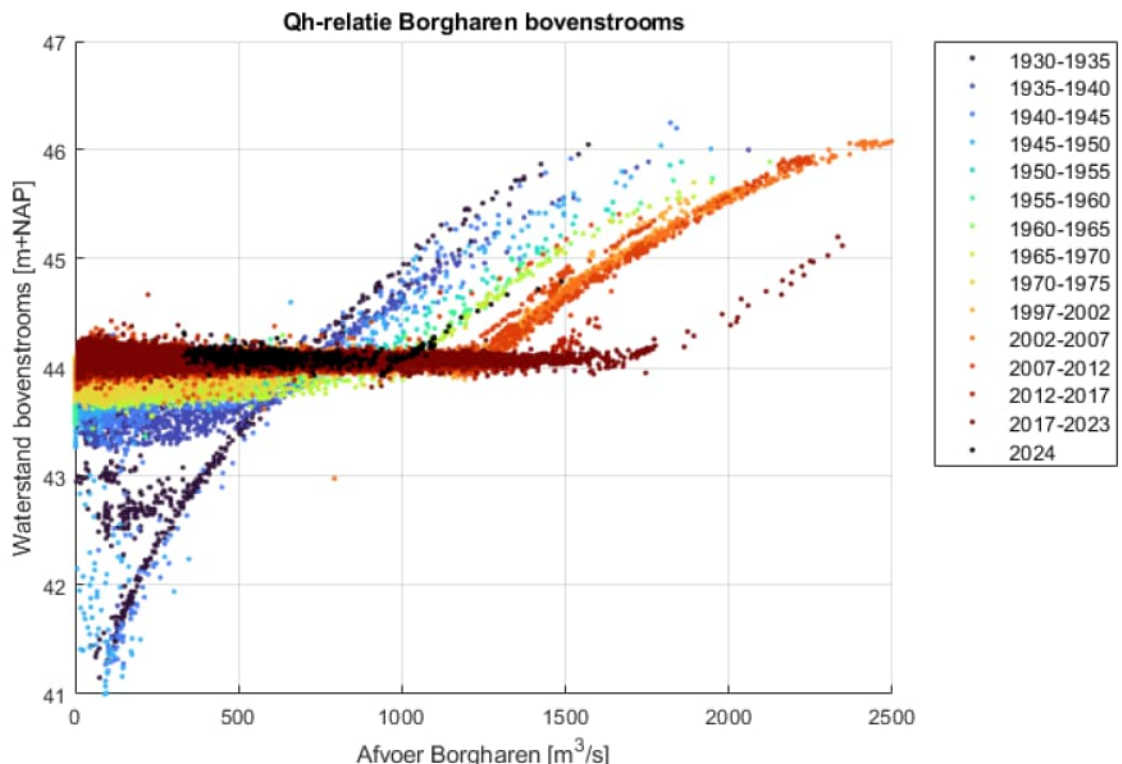
3.3 Hydraulische randvoorwaarden

De stroming over een overlaat wordt voor een groot deel bepaald door de bovenstroomse en benedenstroomse waterstanden. In deze paragraaf wordt gekeken naar de ontwikkeling van deze waterstanden sinds de aanleg van de overlaat.

3.3.1 Ontwikkeling sinds de aanleg van de overlaat

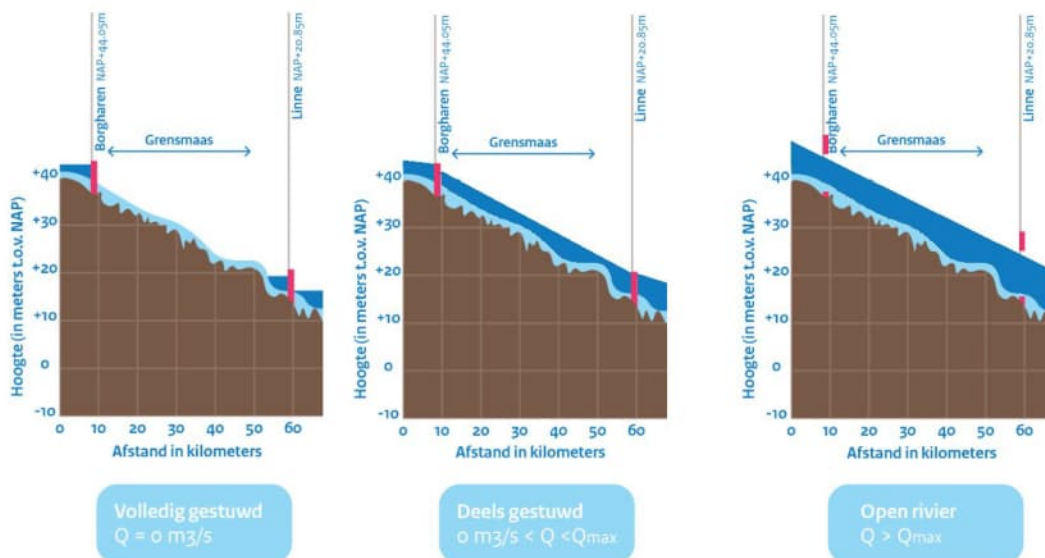
Sinds de aanleg van de overlaat in 1930 is er flink wat veranderd in het systeem van de Maas, zoals in de vorige twee paragrafen is beschreven. Dit heeft ook zijn weerslag gehad op de waterstanden bij stuw Borgharen en overlaat Bosscherveld.

Als je kijkt naar de waterstand bovenstrooms van de stuw, dan is zichtbaar dat het stuwpeil in de loop der tijd iets is aangepast, zie Figuur 3.6. Oorspronkelijk werd gestuurd op een peil van rond de 43,8 m+NAP en het huidige stuwpeil is 44,05 m+NAP in de winter en 44,10 in de zomer.



Figuur 3.6 Waterstand bovenstrooms van stuw Borgharen afgezet tegen de afvoer van Borgharen van 1930 tot 2023 (tot 1975 op basis van meetpunt Maastricht, vanaf 1997 op basis van meetpunt Borgharen Julianakanaal).

Het stuwpeil kan worden gehandhaafd tot een bepaalde Maasafvoer. Als de afvoer toeneemt wordt de stuw steeds verder geopend zodat het peil bovenstrooms (het stuwpeil) gelijk blijft. Met de toenemende afvoer neemt ook de waterstand benedenstrooms toe. Op een zeker moment is de stuw helemaal geopend en zal bij een nog verder toenemende afvoer ook de waterstand bovenstrooms toenemen (zie Figuur 3.7). De afvoer tot waar gestuurd kan worden is in de loop der jaren flink veranderd. Rond 1930 werd het peil gehandhaafd tot een afvoer van ca. 700 m³/s, in 2008 (voor de start van de Maaswerken) was dit ca. 1250 m³/s, maar vanaf 2018 (na Maaswerken) is deze opgelopen tot ca. 1700 m³/s. Dit is het gevolg van de lagere bodemligging en de daardoor lagere waterstand benedenstrooms waardoor de stuw meer water kan afvoeren.

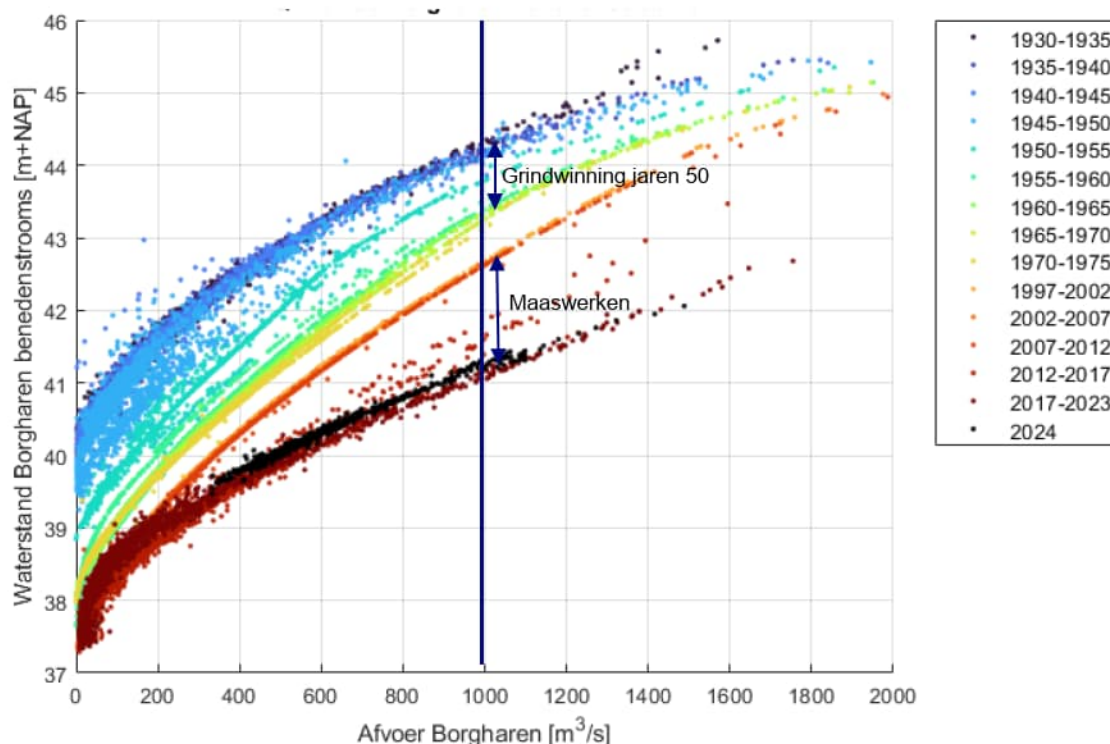


Figuur 3.7 Schematische weergave werking gestuwde rivier met Q = de rivierafvoer op een bepaald moment en $Q_{\max}$ = het strijkdebiet van de stuwen (aangepast figuur uit Rijkswaterstaat Informatie, 2023).

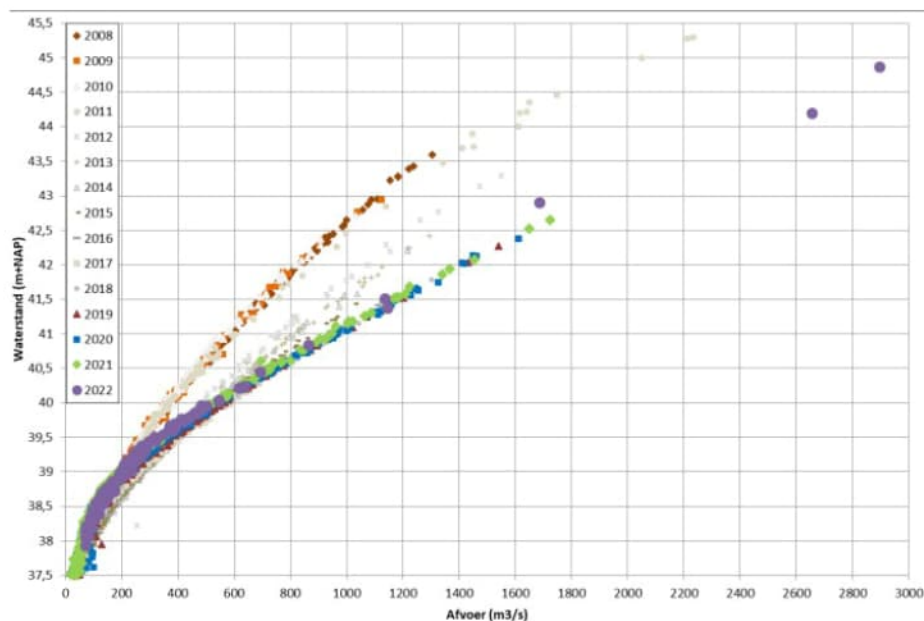
In 2024 is het effect van de gesloten scheepvaartsluis (en dus minder afvoercapaciteit) duidelijk zichtbaar in Figuur 3.6: de stuw wordt nu al gestreken bij een afvoer van ca. 1000 m³/s op de Maas.

Als je kijkt naar de waterstand benedenstrooms van de stuw, dan is deze in de loop der jaren flink gedaald bij dezelfde totaalafvoer van de Maas (Figuur 3.8). Bij een afvoer van 1000 m³/s was de waterstand in 1930 rond de 44,2 m+NAP en in 2023 nog maar ca. 41,1 m+NAP, oftewel een daling van meer dan 3 meter. Hierin is het effect van de grootschalige zand- en grindwinning in de jaren 50 zichtbaar (waterstands daling van ca. 1 meter) en het effect van het Grensmaas project tussen 2008 en 2018 (waterstands daling van ca. 1,5 meter). Hierdoor zijn ook de stroomsnelheden ter hoogte van stuw Borgharen toegenomen en de bodembescherming achter de stuw (stortebed en verder) is daarom in 2010 versterkt binnen het programma Maaswerken (Rijkswaterstaat Maaswerken, 2021).

Het effect van het Grensmaasproject is ook weergegeven in Figuur 3.9. Hierin is de ontwikkeling van de waterstand versus de afvoer (Q_h -relatie) bij meetpunt Borgharen-dorp te zien tijdens de loop van het project van 2008 tot 2022. In 2012 en 2013 is een voortschrijdende waterstanddaling zichtbaar in de metingen, die in 2014 weer tot stilstand is gekomen. In 2015 is de waterstandverlaging weer iets groter geworden door de voortgang in lterren. In 2016 en 2017 liggen de waterstanden nog iets lager. Vanaf 2018 lijken de effecten op de waterstanden bij hogere afvoeren min of meer gestabiliseerd te zijn.



Figuur 3.8 Waterstand benedenstrooms van stuw Borgharen afgezet tegen de afvoer van Borgharen van 1930 tot 2023 (tot 1975 op basis van meetpunt Borgharen beneden, vanaf 1997 op basis van meetpunt Borgharen Dorp).



Figuur 3.9 Qh-relatie (waterstand versus afvoer) bij LMW-station Borgharen-dorp voor de periode 2008-2022 (Bron: Consortium Grensmaas, 2022)

Er spelen dus twee ontwikkelingen tegelijkertijd, die van invloed zijn op de hydraulische randvoorwaarden. Omdat er meer water door de stuw kan (door lagere waterstand beneden de stuw) kan het stuwpeil langer worden gehandhaafd en gaat de overlaat pas bij hogere afvoeren meestromen. En ondanks de hogere afvoeren, is de waterstand benedenstrooms dan nog steeds lager.

In Tabel 3.1 en Tabel 3.2 zijn de gegevens van de voorgaande figuren gecombineerd om een inschatting te maken van de verandering van het verval over de overlaat, wanneer deze net

gaat meestromen en met 80 cm waterstand boven de kruin (als er flink wat water over de overlaat gaat).

Er is hierbij vanuit gegaan dat de waterstand bovenstrooms en benedenstrooms van stuw Borgharen (waarvoor metingen beschikbaar zijn) een goede maat zijn voor de waterstanden bovenstrooms en benedenstrooms van de overlaat. Dit geldt in ieder geval voor de situatie wanneer de overlaat net meestroomt (Tabel 3.1). In werkelijkheid zal de bovenstroomse waterstand bij de overlaat voor middelhoge Maas-afvoeren (ca. 1000-2000 m³/s) iets hoger zijn (ca. 20-30 cm) dan die bovenstrooms van stuw Borgharen, omdat het verval over het Verbindingskanaal en het Afleidingskanaal lager zal zijn. De benedenstroomse waterstand bij de overlaat zal bij deze Maas-afvoeren ook iets hoger zijn (ca. 10-50 cm) dan die benedenstrooms van de stuw, doordat dit punt net iets hoger ligt. Voor de situatie met dichte scheepvaartschuif zal dit effect groter zijn, omdat er dan meer afvoer via de overlaat gaat in vergelijking met door de stuw en het verval tussen het punt benedenstrooms van de overlaat en het punt benedenstrooms van stuw Borgharen dus groter zal zijn.

Tabel 3.1 Verandering in Maas-debiet bij begin overstromen (waterstand bovenstrooms = hoogte overlaat) en verval over de overlaat sinds 1930.

Jaar	Hoogte overlaat (m+NAP)	Maas-debiet bij overstromen (m ³ /s)	Waterstand benedenstrooms stuw (m+NAP)	Verval (m)
1930	43,8	650	43,5	0,3
1975	43,8	1000	43,2	0,6
1997-2011*	44,05	1250	43,4	0,6
2012	44,05	1500	42,2	1,8
2017-2023**	44,05	1700	42,7	1,3
2024***	44,05	1000	41,2	2,8

*voor Grensmaas-project

**na Grensmaas-project

***met dichte scheepvaartschuif

Tabel 3.2 Verandering in Maas-debiet bij waterstand van 'hoogte overlaat + 80 cm' en verval over de overlaat sinds 1930.

Jaar	Hoogte overlaat + 80 cm (m+NAP)	Maas-debiet bij overstromen (m ³ /s)	Waterstand benedenstrooms stuw (m+NAP)	Verval (m)
1930	44,6	1000	44,1	0,5
1975	44,6	1250	44,0	0,6
1997-2011*	44,85	1600	44,4	0,5
2012	44,85	1800	43,8	1,0
2017-2023**	44,85	2200	43,2	1,6
2024***	44,85	1500	42,1	2,7

*voor Grensmaas-project

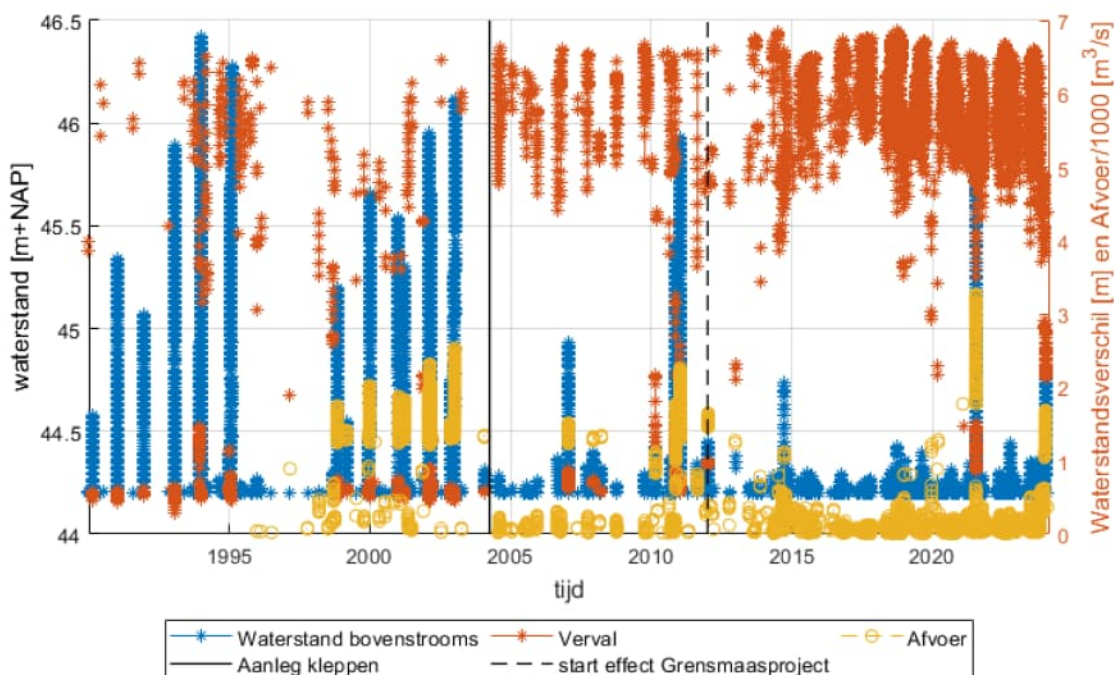
**na Grensmaas-project

***met dichte scheepvaartschuif

Wat hierbij opvalt is dat het verval over de overlaat sinds de start van het Grensmaas-project flink is toegenomen en dat dit met de gesloten scheepvaartschuif nog veel groter is geworden.

In Figuur 3.10 zijn vanaf 1990 de bovenstroomse waterstanden weergegeven samen met de waterstandsverschillen tussen boven- en benedenstrooms (verval) en de Maas-afvoer (vanaf 1997), voor alle situaties waarbij de bovenstroomse waterstand bij stuw Borgharen groter is dan 44,2 m+NAP en de overlaat dus in principe meestroomt. Vanaf de aanleg van de kleppen in 2004 en al helemaal vanaf de vervanging van de sluis bij Limmel (2015-2018)

komt de waterstand bovenstrooms vaker (net) boven de 44,2 m+NAP uit met daarbij een hoog verval (meer oranje stippen en met een hoge waarde). Dit kan worden verklaard doordat er sindsdien een ander zomerpeil en winterpeil wordt gehandhaafd en er minder strak wordt gestuurd op het stuwpeil. Er wordt meer rekening gehouden met de verwachte debieten (vooral ook voor het sluiten van keersluis Limmel). Dit wordt ook ondersteund door de beleving van de plaatselijke bewoners (meer fluctuaties in de waterstand).

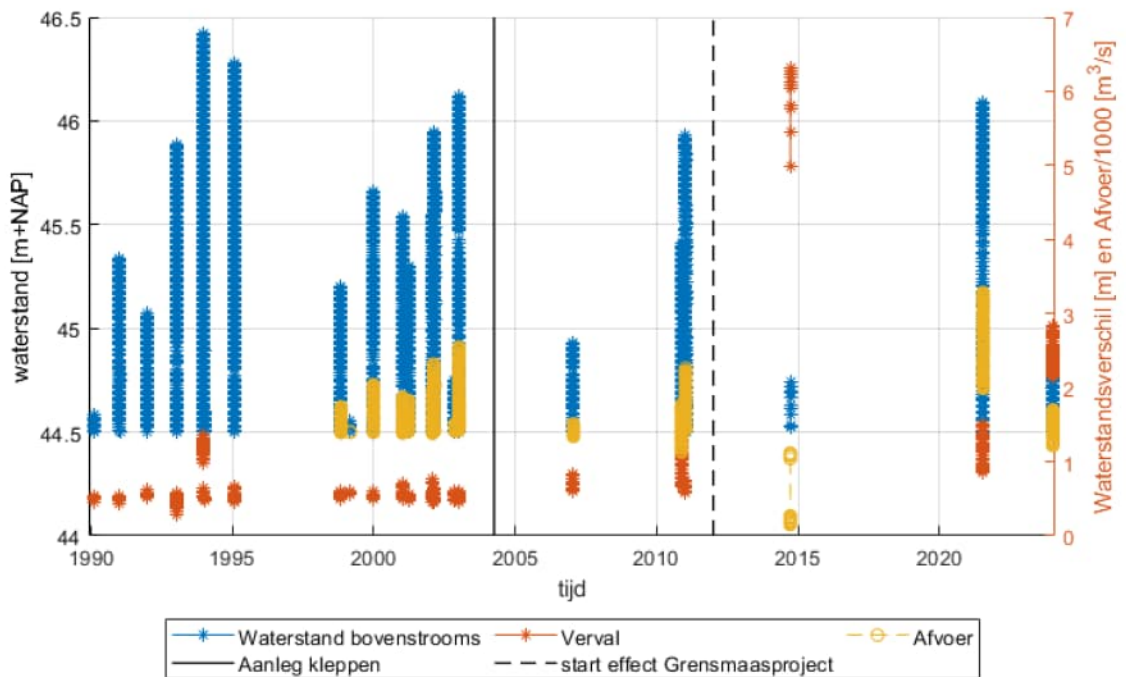


Figuur 3.10 Waterstanden bovenstrooms, waterstandsverschillen tussen beneden en bovenstrooms en afvoeren op de Maas van 1990 tot januari 2024 voor waterstanden bovenstrooms groter dan 44,2 m+NAP.

Figuur 3.11 geeft in principe hetzelfde weer als Figuur 3.10, maar dan alleen voor de situaties waarbij de bovenstroomse waterstand groter is dan 44,5 m+NAP, dus als er een significante afvoer over de overlaat plaatsvindt. Wat hierin opvalt is dat deze situatie vanaf 2012 (start effect Grensmaasproject) maar drie keer is voorgekomen. Het minder snel voorkomen van deze situatie kan worden verklaard, doordat het overstromen van de overlaat nu pas plaatsvindt bij een hogere Maas-afvoer. Echter het verval over de overlaat is dan ook hoger.

In alle drie de gevallen (sinds 2012) met een significant debiet over de overlaat is er schade opgetreden, zie hoofdstuk 4.

In november 2010 en januari 2011 zijn er ook hoogwaters geweest, waarbij de overlaat heeft meegestroomd (zie Figuur 3.11), maar toen is er geen schade ontstaan. De begroeiing en kleppen waren toen al wel aanwezig, maar het verval over de overlaat was toen nog niet zo groot (zie Tabel 3.1 en Tabel 3.2).



Figuur 3.11 Waterstanden bovenstrooms, waterstandsverschillen tussen beneden en bovenstrooms en afvoeren op de Maas van 1990 tot januari 2024 voor waterstanden bovenstrooms groter dan 44,5 m+NAP.

3.4 Hydraulische belastingen op de overlaat

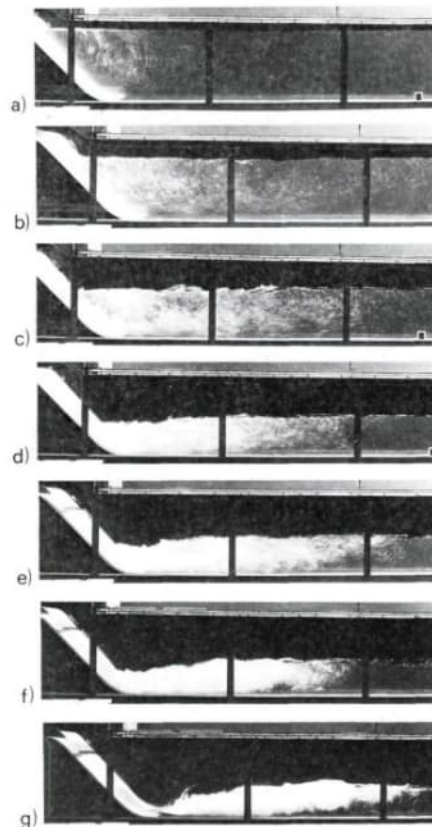
De hydraulische belasting op de overlaat is een combinatie van hoge snelheden en drukfluctuaties. Bij het overstromen van de overlaat vormt zich een snel stromende laag water met hoge snelheden vanaf de kruin tot bij de locatie van de benedenstroomse waterstand. Na de kruin is er daarin eerst een versnelling (die voor een lokaal kleinere laagdikte zorgt) en daarna een vertraging zodra er voldoende waterdiepte is in het benedenstroomse pand. Als er voldoende waterdiepte is om een watersprong te veroorzaken, wordt er over een korte afstand veel kinetische energie vernietigd (d.w.z. dat de stroomsnelheid snel afneemt). In de watersprong is er veel turbulentie.

Samenvattend: de locatie van hoogste stroomsnelheden is op het benedenstroomse talud van de overlaat stroomafwaarts van de kruin op het punt vlak voor de watersprong. De locatie van de hoogste druk-fluctuaties is ter plaatse van de watersprong. Omdat de hydraulische belasting een combinatie is van de hoge snelheid en turbulentie zal de locatie van maximale hydraulische belasting ergens op het benedenstroomse talud zijn, afhankelijk van de benedenstroomse waterstand en daarmee van de positie van de watersprong.

De typische ontwikkeling van het stroombeeld achter een overlaat is in figuur 3.12 geïllustreerd. De figuur geeft een kwalitatief beeld van de stroming bij een stijgende benedenstroomse waterstand. Hierin is te zien dat bij een stijgende benedenstroomse waterstand de locatie van maximale belasting ook stijgt.

Bij lage benedenstroomse waterstanden worden de hoogste snelheden gevonden vlak aan de teen van het benedenstroomse talud (omzetting van potentiële energie naar kinetische energie, zie situatie (g) in figuur 3.12). Het tegengestelde gebeurt bij een hoge benedenstroomse waterstand: in dit geval zijn de hoogste snelheden langs het talud te verwachten, verder van de bodem af en dicht bij de kruin van de overlaat (zie situatie (a) in figuur 3.12). Hierbij speelt ook mee dat een hogere benedenstroomse waterstand gepaard gaat met een hogere afvoer over de overlaat: het verval wordt kleiner, maar het debiet wordt

groter. Op voorhand is niet te zeggen op welke locatie langs het afgaande talud de belastingen (stroomsnelheden en drukfluctuaties) het grootst zullen zijn.



Figuur 3.12 Effect van de benedenstroomse waterstand op de positie van de watersprong voor een constant debiet ([redacted] (1988) B-jump in sloping channel, Journal of Hydraulic Research, 26:5, 539-558, DOI: 10.1080/00221688809499192)

3.4.1

Ontwikkeling hydraulische belastingen sinds de aanleg van de overlaat

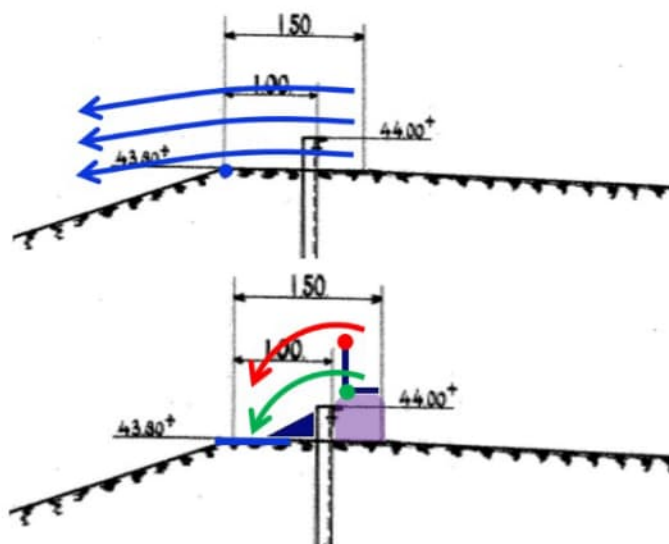
In de vorige paragrafen is de verandering van de hydraulische randvoorwaarden rondom de overlaat Bosscherveld beschreven. Sinds de aanleg van de overlaat zijn zowel de bovenstroomse waterstand (waarop gestuurd wordt) als de benedenstroomse waterstand significant veranderd.

Zoals aangegeven in paragraaf 3.3.1, is het bovenstroomse stuwpeil toegenomen, van de oorspronkelijke 43,8 m+NAP naar 44,05 m+NAP (44,17 m+NAP in de zomer). Tegelijkertijd is de benedenstroomse waterstand flink gedaald als gevolg van de grootschalige zand- en grindwinning en het Grensmaas project. Deze twee ontwikkelingen leiden respectievelijk tot waterstand verlagingen van ca. 1m en 1,5m.

Het gevolg hiervan is dat in de loop van de tijd er hogere snelheden aan de benedenstroomse helling zijn gaan optreden: een groter verval, hogere snelheden en dus meer te vernietigen energie ergens boven het afgaande talud. Dit zorgt dus voor een verhoogde aanval op het benedenstroomse talud.

Naast de verandering van de hydraulische randvoorwaarden zijn er in de loop van de tijd ook aanpassingen gedaan aan de vorm van de kruin die gevolgen kunnen hebben op de lokale stroombelasting (zie Figuur 3.13). Eerst is er een houten balk aangelegd die voor een verhoging van de kruin zorgt (van 43,8 m+NAP naar 44,05 m+NAP). Sinds 2004 zijn ook scharnierende stalen kleppen aangebracht over de gehele lengte van de overlaat. Deze

zorgen voor een verhoging van de bergingscapaciteit achter de overlaat tijdens de zomer, in het geval van lage Maas afvoeren (ophoging van de kruin naar 44,17 m+NAP).



Figuur 3.13 Verandering loslaatpunt aan de kruin van de overlaat. De gekleurde bolletjes geven aan de loslaatpunten voor verschillende configuraties: oorspronkelijke situatie (blauw), verhoogde kruin, ingeklapte scharnier klep (groen) en verhoogde kruin, uitgeklapte scharnier klep (rood).

De ophoging van de kruin leidt tot het creëren van een loslaatpunt aan de bovenzijde van de overlaat: dat was er nog niet op de (min of meer) gladde kruin. In beide gevallen van uitgeklapte of ingeklapte stalen klep ligt het loslaatpunt voor het stromend water hoger dan in het oorspronkelijke ontwerp; dit leidt tot een minder goed gestroomlijnde aanstroming van het benedenstroomse talud. De verhoogde verticale component in de snelheid van het water kan tot hogere lokale krachten leiden op korte afstand van de kruin (zie de verandering in de positie van de loslaatpunt in Figuur 3.13). Bij het beginnen van het overstromen van de overlaat leidt de nieuwe vorm van de kruin tot een aanval op het korte vlakke deel achter de balk. Dit deel van de overlaat is ingegoten met beton om de verhoogde aanval aan te kunnen. Het zwakste punt is dan te vinden daar waar de penetratie met beton eindigt.

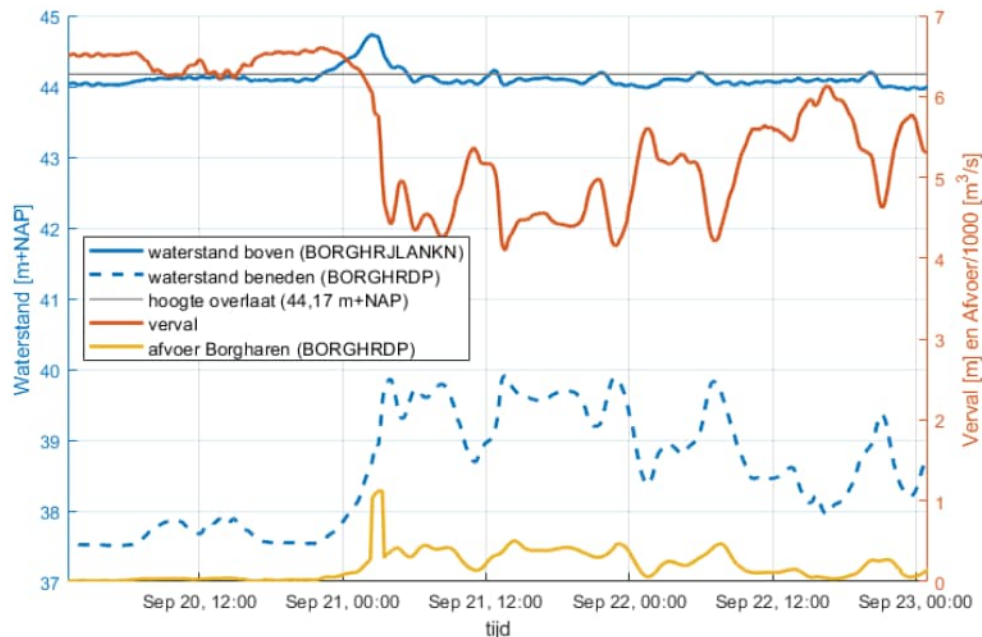
3.5 Veldbezoek overlaat Bosscherveld

Ten behoeve van het opstellen van het feitenrelaas is op 31 mei 2024 een veldbezoek gebracht aan de omgeving van overlaat Bosscherveld door drie medewerkers aan dit onderzoek vanuit Deltares samen met twee medewerkers van Rijkswaterstaat Zuid-Nederland. De afvoer op de Maas was op dat moment ca. 600 m³/s. Er kon een goed beeld worden gevormd van de situatie ter plekke. Van de oorspronkelijke overlaat was weinig meer zichtbaar, want deze is al verwijderd ten behoeve van de aanleg van de nieuwe overlaat. Ook de eerste tijdelijke overlaat is al verwijderd, maar de tweede tijdelijke overlaat kon goed worden bekeken. Wat opviel is dat de situatie benedenstrooms van de overlaat volledig is veranderd. De aanwezige begroeiing is volledig weggespoeld samen met flink wat sediment, ook uit de oevers. Om verdere erosie te voorkomen is op verschillende locaties stortsteen aangebracht. Daarnaast heeft het veldbezoek ook extra duidelijk gemaakt dat er niet alleen een technische kant aan het falen van de overlaat zit, maar ook een menselijke kant. Door de vele aanwezige woonboten in het gebied kan de impact voor de bewoners hiervan groot zijn. Het veldbezoek heeft de bevindingen uit dit rapport echter niet verder veranderd.

4 Recente schades en herstelwerkzaamheden

4.1 September 2014

Door een gerapporteerde omissie in de bediening van stuw Borgharen ontstond op 21 september een hele korte piek in de afvoer op de Maas bij de stuw, zie Figuur 4.1. De bovenstroomse waterstand liep daarbij op tot 44,4 m+NAP, terwijl de benedenstroomse waterstand slechts 39,9 m+NAP was. Dit leverde een verval over de overlaat op van 4,5 meter. Hierbij stond er geen water aan de teen van de overlaat. Aangezien dit in september plaatsvond, stond de klep op de overlaat nog omhoog (44,17 m+NAP).



Figuur 4.1 Waterstandsverloop boven- en benedenstrooms van Borgharen (linker y-as), verval (boven – beneden) en afvoer/1000 bij Borgharen (rechter y-as) in september 2014.

Figuur 4.2 geeft een indruk van de opgetreden schade. Waarneembaar is dat een deel van de steenbekleding, vanaf ongeveer een meter onder de kruin, is verdwenen evenals een deel van de onderliggende laag. Enkele meters lager is een deel van de bekleding nog wel aanwezig maar verzakt, wat mogelijk is veroorzaakt door het uitspoelen van de onderlaag. Waar de initiële schade is opgetreden is niet bekend. De onderhoudsaannemer schrijft in zijn voorstel tot herstel van de schade dat de 'stabilisatie' achter de overlaat (ter plaatse van de teen?) voor het overgrootste deel is weggespoeld. Maar of dit betekent dat de schade aan de teen is begonnen is onbekend.



Figuur 4.2 Schade aan de overlaat, september 2014, bron RWS.

4.1.1 Herstel schade

Er is een voorstel tot het herstel van de schade bekend. Daarin wordt voorgesteld om het geërodeerde materiaal aan te vullen met (volgens de factuur) opvulgrind en de bekleding met zetsteen (volgens de factuur 26 ton) te herstellen. Ook wordt voorgesteld om in verband met het wegspoelen van de stabilisatie achter de overlaat en de zetstenen en tussen de zetstenen, een betonlaag aan te brengen over de gehele breedte van de overlaat met een breedte van 1 meter. Het is niet duidelijk waar dit beton precies is aangebracht maar vermoedelijk aan de bovenzijde van de overlaat. Op de foto's van de schade in juli 2021 zijn betonplakkaten zichtbaar op de kruin, over de steenbekleding heen, zie ook Figuur 4.3.

In een overzicht van de herstelwerkzaamheden staat een opvallende opmerking:

Wat opvalt is dat veel basaltblokken gebarsten en gebroken zijn. De oorzaak is dat de steenzetter met zijn stootijzer op de steen klopt een deze gelijk in tweeën splijt. Extra aandacht aan besteden??? Expert naar laten kijken???

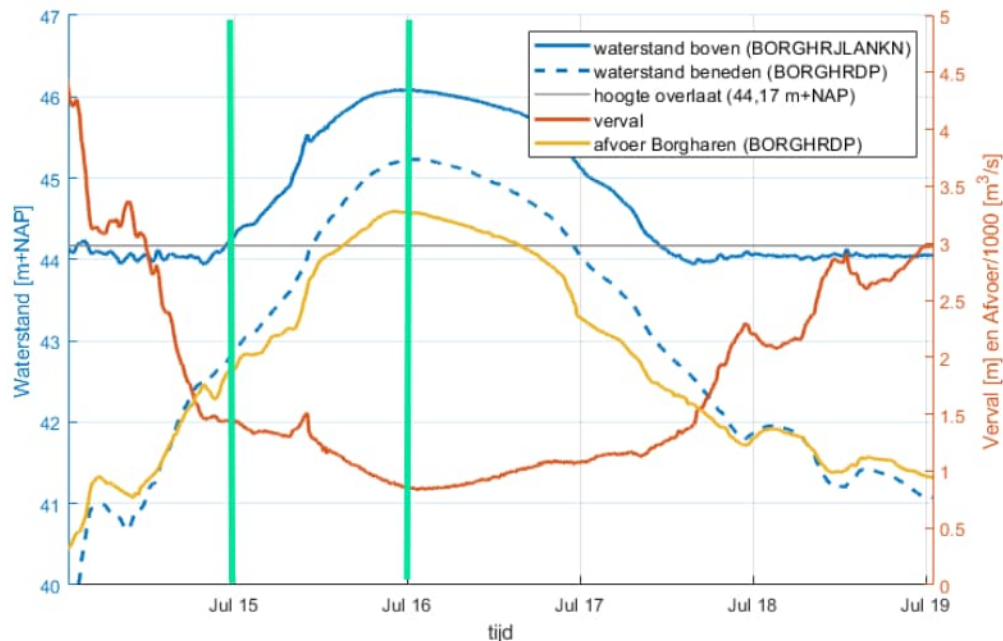
Het is niet duidelijk of er iets met deze opmerking is gedaan tijdens of na het herstel van de schade.



Figuur 4.3 Foto na aanleiding van de schade in juli 2021, overlaging met beton zichtbaar op kruin, mogelijk aangebracht in 2014, foto Deltares

4.2 Juli 2021

Tijdens het zomerhoogwater van juli 2021 liep de afvoer en de waterstand op de Maas snel op tot een afvoer van 3.310 m³/s bij Sint-Pieter. Aangezien het in de zomerperiode was, stond de klep op de overlaat omhoog (dus een kruinhoogte van 44,17 m+NAP). Ten tijde dat de overlaat begon met overstromen (zie eerste groene lijn in Figuur 4.4) was de afvoer op de Maas ca. 1750 m³/s en het verval over de overlaat ca. 1,5 meter. Tijdens de piek van het hoogwater (tweede groene lijn in Figuur 4.4) was de waterstand bovenstrooms opgelopen tot 46,1 m+NAP, maar de benedenstroomse waterstand was ook flink gestegen naar 45,2 m+NAP, zodat het verval over de overlaat nog maar 0,9 m bedroeg.



Figuur 4.4 Waterstandsverloop boven- en benedenstrooms van Borgharen (linker y-as), verval (boven – beneden) en afvoer/1000 bij Borgharen (rechter y-as) in juli 2021.

Uit de verslaglegging van de inzet van het Crisisexpert Team Waterkeringen (CTW) in de hoogwaterperiode van juli 2021 blijkt dat het CTW op 17-7-2021 een melding krijgt van een gat in een kade bij Maastricht, wat de overlaat Bosscherveld blijkt te zijn. Uit de beschrijving is af te lijden dat de hoogwaterpiek dan al voorbij is en de waterstand vermoedelijk al dusdanig gedaald dat de overlaat weer begaanbaar is, zie ook Figuur 4.4. Ter plaatse wordt geconstateerd dat de metalen klep over een lengte van circa 4 meter is verdwenen, met direct daarachter een erosiegat. Het erosiegat was breder dan het missende deel van de klep, circa 15 meter breed en tot wel 1,5 meter diep. Om verdere schade te voorkomen zijn zandzakken achter het resterende deel van de klep geplaatst en aan de oostelijke rand van de overlaat om uitspoelen langs de oever te voorkomen. Het erosiegat is voorzien van een geotextiel ter bescherming tot aan het moment van reparatie.

In het CTW verslag wordt gemeld dat er geen zichtbare vervorming van de kruin is waargenomen.

In de rapportage van het ENW over het hoogwater van 2021 (ENW, 2021) wordt in de paragraaf 4.7 over overlaat Bosscherveld opgemerkt: *Overigens is deze schade op dezelfde plaats als een eerdere schade, een kleine tien jaar geleden. De reparatie van destijds lijkt een zwakke plek te hebben gevormd.*

Mogelijk heeft de locatie van de schade met de eerdere reparatie te maken, het kan ook zo zijn dat de belasting op de overlaat hier het grootste is door bijvoorbeeld bodemligging bovenstrooms.

Op 23 juli 2021 is door drie Deltares collega's een veldbezoek gebracht en de schade aan de overlaat in beeld gebracht. De schade bestond uit het ontbreken van een deel van de steenbekleding en de onderlaag. Op basis van de foto's en het CTW verslag wordt de omvang geschat op 15 x 3 meter, beginnend 1 á 2 meter onder de kruin/ balk. Schade aan de teen van de overlaat is op de foto's niet waarneembaar. De bovenrand van de schade lijkt grofweg overeen te komen met de onderrand van het ingegoten/ overlaagde deel van de steenzetting.



Figuur 4.5 Zijaanzicht van de overlaat met de schade.



Figuur 4.6 Schade aan steenzetting en ingegoten steenzetting daarboven.

4.2.1

Herstel schade

De ontstane schade is in eerste instantie provisorisch gerepareerd met geotextiel en zandzakken om verdere schade bij een eventueel volgend hoogwater te voorkomen. Daarna is de schade hersteld door de onderlaag opnieuw aan te brengen, bestaande uit puin en vervolgens een steenzetting van basaltzuilen te plaatsen.



Figuur 4.7 Aanbrengen vlijlaag van puin.



Figuur 4.8 Herstel bekleding met basaltzuilen.

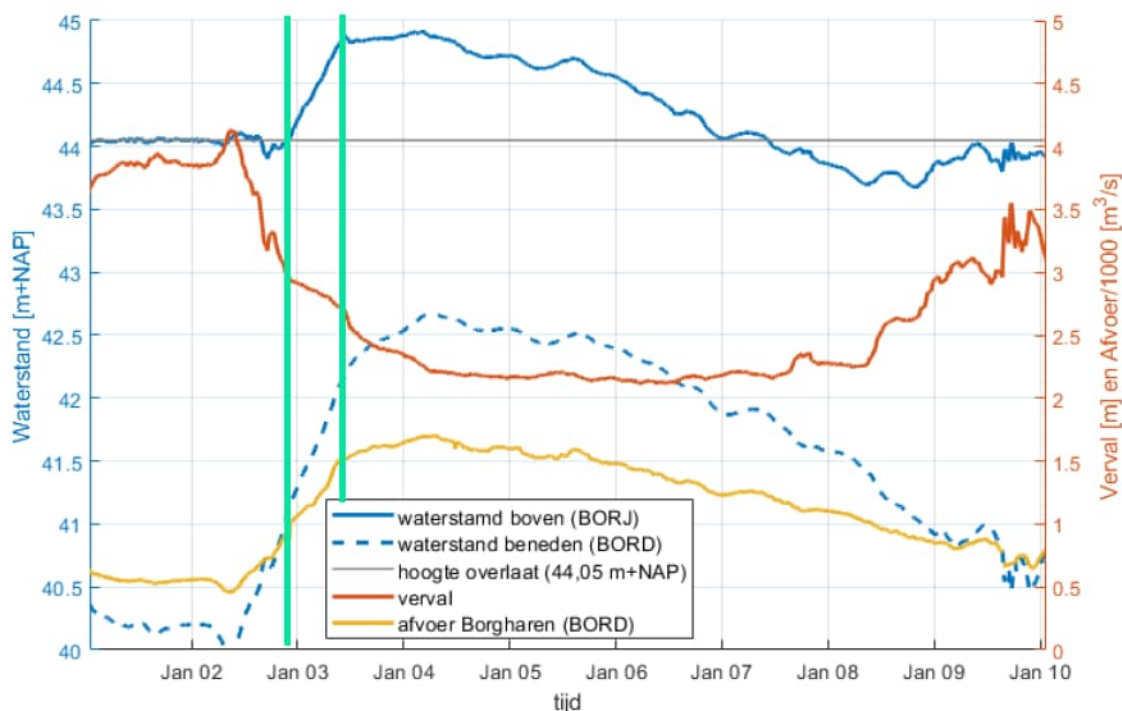


Figuur 4.9 Herstelde steenzetting, opvallend is dat ter plaatse van de herstellde steenzetting water tussen of onder de stenen doorstroomt en daarboven en daaronder over de steenbekleding.

4.3 Januari 2024

Ten tijde van het bezwijken van de overlaat in januari 2024 was er een kleine hoogwatergolf op de Maas. Omdat dit gedurende de winterperiode was, stond de klep omlaag en was de hoogte van de overlaat 44,05 m+NAP. Toen de overlaat begon met overstromen (zie eerste groene lijn in Figuur 4.10) was de afvoer op de Maas ca. 1000 m³/s en het verval over de overlaat circa 2,9 meter. Dit grote verval bij dit relatief lage debiet is toe te schrijven aan het feit dat de scheepvaartopening bij stuw Borgharen gesloten is. De knik die rond 12:00 op 3 januari te zien is in de bovenstroomse waterstand (rond 44,8 m+NAP) is waarschijnlijk het moment waarop de overlaat is bezweken (zie tweede groene lijn in Figuur 4.10). Deze knik wordt niet veroorzaakt door het overstromen van de (dichte) scheepvaartopening bij stuw Borgharen, want die overstroomt al bij een bovenstroomse waterstand van 44,2 m+NAP. De afvoer op de Maas was toen ca. 1500 m³/s en het verval was toen ca. 2,7 m (nog steeds relatief erg groot).

De schade in januari 2024 is van een andere orde dan de voorgaande schades. Er is een volledig bres ontstaan en er werd geen water meer gekeerd. Het moment van het ontstaan van schade is onbekend. Rond het middaguur op 3 januari was er al schade aanwezig. Er is een filmopname van de schade waarop te zien is dat de schade op dat moment vooral op de oostelijke helft van de overlaat plaatsvindt (zie Figuur 4.11). Op dat moment is een deel van de kruin van de overlaat al verdwenen, zichtbaar door de waterstandverlaging bovenstrooms van de kruinlijn. In 2021 was de schade vooral aan de westzijde van de overlaat aanwezig, net ten westen van de drie drainagebuizen die ongeveer in het midden van de overlaat zitten en herkenbaar zijn vanwege het aanwezige waarschuwbord. In de loop van de dag wordt de schade snel groter, zie ook Figuur 4.12.



Figuur 4.10 Waterstandsverloop boven- en benedenstrooms van Borgharen (linker y-as), verval (boven – beneden) en afvoer/1000 bij Borgharen (rechter y-as) in januari 2024.



Figuur 4.11 Schade op 3-1-2024 (tijd onbekend).

3 jan 2024 12:16:22
Bosscherweg 61
6219 NE Maastricht
Nederland



Figuur 4.12 Uitbreiding van de schade, 3 jan 24 12:16 uur.



Figuur 4.13 Groot deel van de overlaat is sterk verlaagd.

4.4 2003 en 2004

Behalve in 2014, 2021 en 2024 is er ook in 2003 en 2004 schade aan de overlaat waargenomen. In Figuur 4.14 is een gat in de steenzetting, direct onder de betonrand op de kruin zichtbaar. Ten tijde van de foto is de stalen klepconstructie nog niet aanwezig. Figuur 4.15 laat een schade zien in 2004, hier is inmiddels de klepconstructie aanwezig. Ook Figuur 4.16 laat schade zien, mogelijk is dit dezelfde schade als in Figuur 4.14, op beide foto's is namelijk de paal van het waarschuwingsbord behorende bij de drie doorlaatbuizen te zien.

Het is echter onduidelijk wanneer deze schade precies is ontstaan. De laatste relatief hoge afvoer op de Maas voorafgaand aan deze foto's (waarbij de overlaat goed heeft meegestroomd) is in januari 2003. In het interview met een bewoner wordt aangegeven dat dit gat jarenlang aanwezig is geweest en pas is hersteld bij de aanleg van de kleppen in 2004. Verdere details over schade en herstel zijn onbekend.



Figuur 4.14 Schade aan steenzetting in juli 2003 (bron: Rijkswaterstaat-Zuid Nederland (2024a))



Figuur 4.15 Schade aan steenzetting in april 2004 (bron: Rijkswaterstaat-Zuid Nederland (2024a))



Figuur 4.16 Schade aan steenzetting in april 2004 (bron: Rijkswaterstaat-Zuid Nederland (2024a))



Figuur 4.17 Schade aan steenzetting in april 2004 (bron: Rijkswaterstaat-Zuid Nederland (2024a))

4.5 Conclusie / beschouwing

Samenvattend zijn er in de laatste drie decennia een aantal keer schades gerapporteerd. Onderstaand nog even beknopt het overzicht:

- Er is in 2003 en 2004 schade aan de overlaat gerapporteerd. Deze bestaat uit een gat in de steenzetting, direct onder de betonrand op de kruin. In het interview met een bewoner wordt aangegeven dat dit gat jarenlang aanwezig is geweest en pas is hersteld bij de aanleg van de kleppen in 2004.
- In september 2014 was er een groot verval door een fout in de bediening van stuw Borgharen en bestaat de schade bij de overlaat uit het verdwijnen van de steenbekleding en de onderliggende laag en is vooral zichtbaar vlak onder de kruin. Dit is vervolgens hersteld. Daarbij wordt ook voorgesteld om een betonlaag aan te brengen, alleen is niet precies duidelijk of en waar dat heeft plaatsgevonden. Omdat het voorval plaatsvond tijdens de zomerperiode stonden de kleppen omhoog.
- Tijdens het zomerhoogwater van juli 2021 bestaat de schade uit het volledig verdwijnen van een klep over een lengte van 4 meter (deze stonden omhoog vanwege de zomerperiode) met direct daarachter (ca. 1-2 meter onder de kruin/balk) een erosiegat (ca. 15x3 meter) waarin een deel van de steenbekleding en de onderlaag ontbreekt. De bovenrand van de schade lijkt grofweg overeen te komen met de onderrand van het ingegoten/overlaagde deel van de steenzetting. Schade aan de teen van de overlaat is op de foto's niet waarneembaar. De schade is hersteld door de onderlaag opnieuw aan te brengen, bestaande uit puin en vervolgens een steenzetting van basaltzuilen te plaatsen.
- De schade in januari 2024 is van een andere orde dan de voorgaande schades. Doordat de scheepvaartopening bij stuw Borgharen dichtstond was er een veel hoger verval. Er is een volledig bres ontstaan en er werd geen water meer gekeerd. Er is een filmopname van de schade waarop te zien is dat de schade op dat moment vooral op de oostelijke helft van de overlaat plaatsvindt.

Alle opgetreden schades hebben gemeen dat de steenzetting op het benedenstroomse talud is beschadigd, waarbij stenen uit de steenzetting zijn verdwenen. De ontstane gaten verschillen qua afmeting. Opvallend is dat alle schades bovenaan het talud zijn gesitueerd, grenzend aan de overgang van betonrand of ingegoten steenzetting en niet ingegoten steenzetting. Er zijn geen schades onder aan de teen van de overlaat gerapporteerd. Waar de schade in januari 2024 is begonnen is op basis van de huidige gegevens niet te achterhalen.

In november 2010 en januari 2011 zijn er ook hoogwaters geweest, waarbij de overlaat heeft meegestroomd (zie Figuur 3.11), maar toen is er geen schade ontstaan. De begroeiing en kleppen waren toen al wel aanwezig, maar het verval over de overlaat was toen nog niet zo groot (zie Tabel 3.1 en Tabel 3.2).

5 Mogelijke faalhypothesen

In deze sectie proberen we wat licht te werpen op de mogelijke oorzaak van het falen van de overlaatdam. Dit doen wij aan de hand van hypothesen, waarna het onderliggend faalmechanisme kort is beschreven. De term 'falen' duidt op de gedeeltelijke of volledige instorting van de constructie, wat leidt tot een ongecontroleerde waterafvoer naar het benedenstroomse gebied. De hypothesen worden ofwel onderbouwd ofwel verworpen aan de hand van de geconstateerde feiten.

Het falen van de overlaatdam kan worden veroorzaakt door verschillende individuele factoren of combinaties daarvan, zoals overlopen, kwel en piping, in combinatie met veranderingen of verslechtingen van de sterkte van de constructie. Zodra er sprake is van schade kan vervolgens een eerste bres ontstaan. Als dan de belasting en hoge waterstanden stroomopwaarts aanhouden, zal de bres zich blijven ontwikkelen, waarna de overlaat zijn volledige functie verliest.

Afhankelijk van het bewijs kan een mate van waarschijnlijkheid worden gekoppeld aan de mogelijke oorzaak/oorzaken.

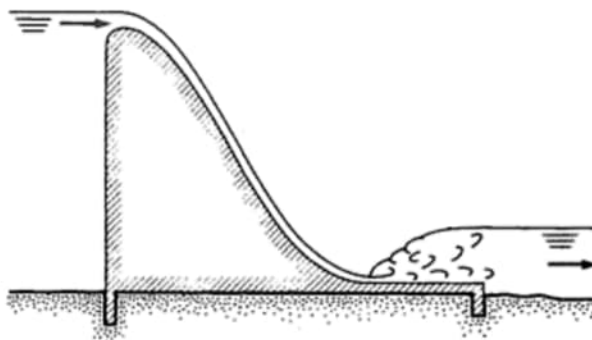
5.1 Te hoge hydrodynamische belastingen

De overlaat kan falen wanneer het debiet gedurende een lange periode hoger is dan het ontwerpdebiet.

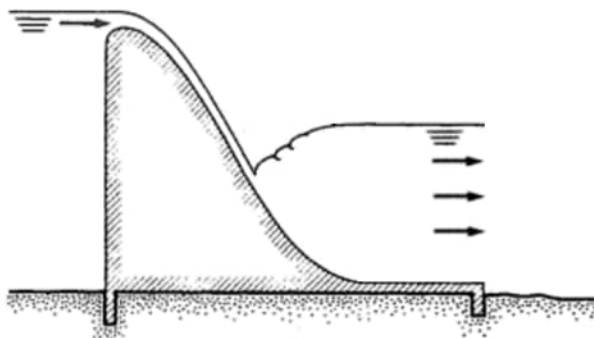
5.1.1 Stroomsnelheden en watersprong

In het algemeen zijn er twee situaties te onderscheiden:

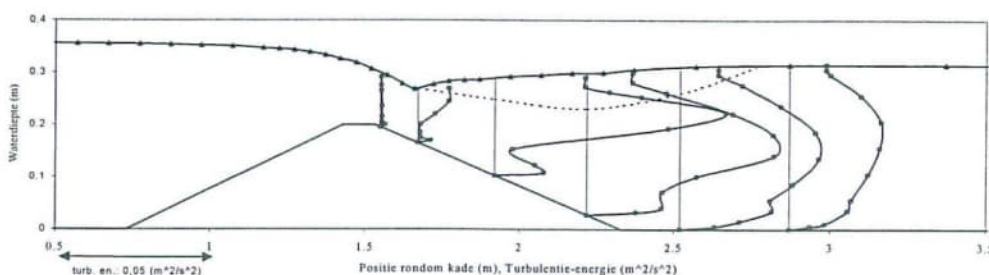
1. Lage benedenstroomse waterstand, die voor een volkomen overlaatstroming zorgt: de snelheden in het afstromende water over het talud lopen daarbij steeds verder op: potentiële energie (hoogte) wordt omgezet in kinetische energie (snelheid). De grootste snelheden worden in dit geval gevonden aan de teen van het benedenstroomse talud, dicht aan de bodem (zie onderstaande figuur). Ergens benedenstrooms van de dam zal dan een watersprong ontstaan.



2. Hogere benedenstroomse waterstand, maar nog steeds een volkomen overlaatstroming: de grootste snelheden worden in deze situatie gevonden op het benedenstroomse talud vlak boven de watersprong (zie de onderstaande figuur).



Naast hoge snelheden zijn er ook hoge snelheidsfluctuaties. De hoogste snelheidsfluctuaties vinden in dit geval plaats op de locatie van de watersprong (zie boven en figuur 5.1). De totale hydraulische belasting is een combinatie van snelheden, snelheidsfluctuaties en (daarmee samenhangend) drukfluctuaties (zie paragraaf 3.4).



Figuur 5.1 Gemeten snelheids- en turbulentie-profielen (relatief hoge benedenstroomse waterstand).

De plek waarop de hoogste hydraulische belasting gaat optreden zal dus in de loop van de tijd veranderen. In een eerste fase, door lage benedenstroomse waterstand, zullen hoge stroomsnelheden optreden aan de teen van de overlaat waar de hoogste hydraulische belasting gaat optreden. In een tweede fase neemt de benedenstroomse waterstand toe, waarbij er een watersprong ergens op het talud komt te staan. Hier wordt een hoog turbulentieniveau verwacht in samenhang met sterke drukfluctuaties op de bekleding. In dit geval volgt de hoogste hydraulische belasting uit een combinatie van de hoge snelheden langs het talud en de druk- en snelheidsfluctuaties geïntroduceerd door de watersprong.

5.1.2 Kruin

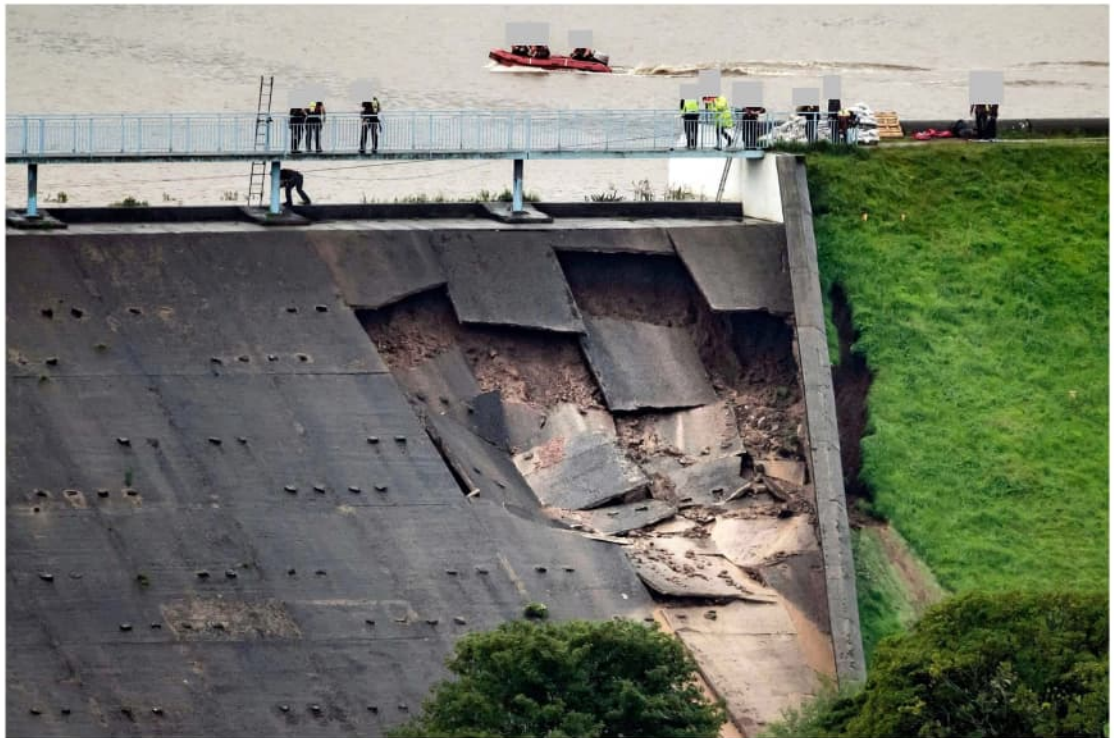
De vorm van de kruin bepaalt ook mede het stroombeeld. Bij scherpe randen zal de stroming loslaten. De locatie waar de stroming vervolgens weer gaat aanliggen is een locatie waar er vaak hogere hydraulische belastingen zijn, zowel door hoge stroomsnelheden als hoge fluctuaties in drukken en snelheden. Deze locatie is vaak ook dichtbij de kruin voor dit type overlaat.

Oneffenheden in de kruin zorgen ook voor lokale contracties en vervolgens versnellingen en fluctuaties. Deze leiden tot hogere hydraulische belastingen. De oneffenheden bij de kruin bij overlaat Bosscherveld kunnen komen door de balk met klep boven op de kruin. Eerdere reparaties (waar de overgang is tussen reparatie en oorspronkelijk materiaal) kunnen ook lokaal de belasting verhogen. Bij Bosscherveld zijn deze reparaties vooral op het benedenstroomse talud uitgevoerd maar wel dichtbij de kruin.

5.1.3 Talud

Oneffenheden op het talud zorgen voor lokale contracties en vervolgens versnellingen en fluctuaties. Deze leiden tot hogere hydraulische belastingen. De oneffenheden op het benedenstroomse talud bij het Bosscherveld overlaat zijn meestal gerelateerd aan lokale begroeiing.

Naast de oneffenheden is er op het benedenstroomse talud ook een versmalling van het doorstroomoppervlak door de overgang tussen het talud van de overlaat en het talud van de oevers. Door de versmalling zal er ook een contractie van de stroming optreden met hogere stroomsnelheden en belastingen tot gevolg. Deze zal voornamelijk dichtbij de overgang tussen oever en talud geconcentreerd blijven. Een dergelijke contractie kan (mede) leiden tot falen van de overlaat, zie Figuur 5.2. Dit blijkt niet het geval te zijn geweest bij overlaat Bosscherveld gezien de locaties van de opgetreden schade.



Figuur 5.2 Falen van de spillway bij Toddbrook reservoir in Whaley Bridge (Balmforth, 2020).

5.1.4 Teen van de overlaat

Het schietend water op het benedenstroomse talud zal uiteindelijk overgaan in sub-kritische stroming. Die overgang heet een watersprong. Er moet voldoende diepte beschikbaar zijn om tot een watersprong over te gaan.

Bij Bosscherveld is er in de loop de jaren minder waterdiepte beschikbaar gekomen aan de teen van de overlaat (door zowel bodemdaling van het zomerbed als rivierverruiming). Dat zou ertoe kunnen leiden dat de watersprong veel verder benedenstrooms plaatsvindt dan waar in het oorspronkelijk ontwerp mee rekening is gehouden. Als een watersprong plaatsvindt boven een gebied zonder bodembescherming kan de erosie fors en snel verlopen waardoor een grote erosiekuil ontstaat. Deze erosiekuil kan terugschrijdende erosie veroorzaken bij de teen die het talud ondermijnt. Dit is echter niet waargenomen.

Voor zover bekend zijn de schades steeds vrij hoog op het talud opgetreden en niet onderaan de teen. Dit zou kunnen samenhangen met het verloop van de waterstand onderaan het talud. Mogelijk dat deze door de stromingsweerstand van de sterke begroeiing wat verder benedenstrooms van de dam veel hoger heeft gestaan dan volgt uit de metingen langs de Maas, benedenstrooms van de stuw.

5.2 Bekleding en begroeiing

Zoals aangegeven in sectie 4.5 is de schade aan de bekleding veelal ontstaan nabij de overgangen tussen ingegoten bekleding en niet-ingegoten bekleding.

Een mogelijk bezwijkmechanisme van de bekleding is afgeleid uit Klein Breteler (1999). Hierin wordt de stabiliteit van met gietasfalt overgoten en ingezande basaltbekleding beschouwd dat door golfbelasting in de Deltagoot is getest.

De stabiliteit wordt daarbij in twee faalmechanismesparen bekeken, namelijk die van de bekleding inclusief ingegoten gietasfalt, als ook die van de bekleding en gietasfalt afzonderlijk. Het is gebleken dat voor de eerste situatie het faalmechanisme wordt bepaald door statische overdruk. Dit treedt vooral op bij grotere min of meer ondoorlaatbare oppervlakten en waarbij eveneens de duur van belasting waarbij de opwaartse druk groter is dan het eigen gewicht lang aanhoudt, zodat het geheel de gelegenheid heeft om naar buiten toe uit te buigen/bewegen. In de tweede situatie wordt het faalmechanisme bepaald door een dynamische belasting. De hechting tussen het gietasfalt en de basaltbekleding speelt in deze situatie een grote rol. Door de steeds wisselende druk ontstaan er namelijk blazen tussen het basalt en gietasfalt. De grootte hiervan neemt toe doordat het geheel steeds doorlatender wordt. Door de dynamische belasting ontstaan er ook watervoerende kanaaltjes waardoor het geheel nog meer doorlatend wordt zodat de beweging van de toplaag groter wordt totdat bezwijken optreedt.

Het eerste faalmechanisme beschrijft een statische overdruk. Een statische overdruk zou in het geval van Bosscherveld kunnen optreden zoals geschetst met situatie 1 in sectie 5.1.1 met een lage beneden waterstand. In plaats van gietasfalt hebben we bij Bosscherveld te maken met colloïdaal beton, maar zou de begroeiing wellicht ook tot eenzelfde afsluitende werking van de toplaag kunnen leiden. De dynamische belasting die leidt tot kortdurende overdrukken wordt vooral aangeduid met situatie 2 in sectie 5.1.1, waarbij de drukverschillen het grootst zullen zijn daar waar de golvende beweging van de watersprong aanwezig is.

De belangrijkste kenmerken en aandachtspunten uit het beschreven onderzoek in Klein Breteler (1999), die voor de situatie bij Bosscherveld mogelijkerwijs ook gelden, worden hieronder opgesomd. Het gaat hierbij dan om de faalmechanismen als gevolg van stijghoogteverschillen, wat het drukverschil is tussen buitenzijde en binnenzijde van de bekleding. De lek lengte, die een parameter is die de verhouding tussen de toplaag en filterlaag weergeeft, en daarmee het stijghoogteverschil bepaalt, is hierin belangrijk en neemt af door beschadigingen en onvolkomendheden. Tenslotte worden ook nog een aantal praktische aanbevelingen gegeven.

Faalmechanisme:

- De sterkte van de constructie is sterk afhankelijk van de duur van een overdruk. Bij een statische overdruk die iets groter is dan het eigen gewicht treedt direct een ontoelaatbare beweging op. De ontoelaatbare overdruk ontstaat als het over een groot oppervlak aangrijpt, en de duur ervan lang genoeg is zodat de bekleding de gelegenheid krijgt om in de loop van vele minuten omhoog te kruipen, zonder dat er sprake is van een invloed van verhinderde toestroming.

- Langdurige dynamische belasting heeft een cumulatief effect op het gietasfalt. Langzaam maar zeker wordt het gietasfalt steeds verder opgelicht van de basaltbekleding, waardoor blazen ontstaan die zelfs enkele zuilen kunnen overspannen. De dynamische belasting zal de blazen op den duur open breken.
- Voor het bezwijkgedrag tijdens de dynamische belasting speelt de staat van het gietasfalt een grote rol:
 - Als het gietasfalt de bekleding nog goed waterdicht houdt en de ondergrond een lage doorlatendheid heeft, hoeft een overdruk niet tot noemenswaardige beweging van de toplaag te leiden. De bekleding lijkt vastgezogen te zijn op de slecht doorlatende ondergrond.
 - Als de toplaag door beschadigingen in het gietasfalt meer doorlatend is geworden en in de ondergrond, door minimale bewegingen van de toplaag, kanaaltjes zijn gevormd, neemt de invloed van verhinderde toestroming sterk af. Daardoor worden de bewegingen van de toplaag onder de golfbelasting steeds groter, wat het meer doorlatend worden van toplaag en ondergrond weer versterkt.
- Tijdens een groot drukverschil beweegt de toplaag eerst omhoog en gaat vervolgens een oscillerende beweging maken. Er is een kans dat bij een lokaal minder goede afdichting en hechting met de zuilen de belasting tijdens de oscillaties aanleiding kan zijn tot een explosief schadegedrag, omdat tijdens een neerwaartse beweging er tijdelijk extra grote drukverschillen kunnen optreden.

Praktische aanbeveling:

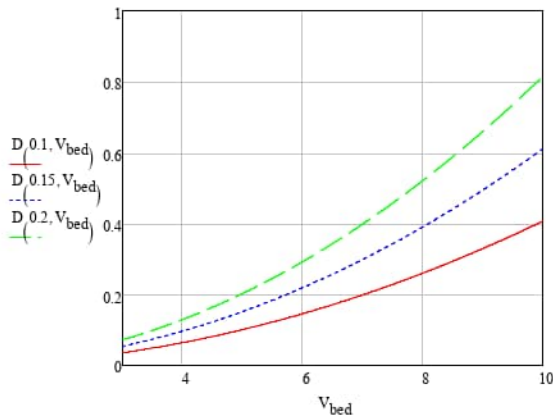
1. De statische overdruk moet altijd kleiner blijven dan het eigen gewicht van de bekleding.
2. Een dynamische belasting kan goed weerstaan worden als er een slecht doorlatende ondergrond aanwezig is en het gietasfalt in goede staat is.
3. Wanneer niet voldaan wordt aan de twee bovenstaande punten kan het gietasfalt door langdurige belasting beschadigd raken, en kunnen er kanaaltjes in de ondergrond ontstaan. Hierdoor worden de bewegingen van de bekleding steeds groter en ontstaat er het risico van explosief bezwijken. Waarschijnlijk kunnen ongelijke zettingen ook leiden tot een hogere doorlatendheid wat dus een negatief effect heeft op de stabiliteit.

Mogelijke impact van statische overdruk op de overlaat (punt 1)

Wanneer de situatie wordt beschouwd van een bekleding die dan wel met gietasfalt, dan wel met colloïdaal beton is vastgelegd, dan wel door begroeiing een groot ondoorlatend oppervlak vormt, dan kan de minimale dikte worden berekend zodat de mogelijke statische overdruk kleiner blijft dan het eigen gewicht.

De stroomsnelheid die opgetreden is bij recente schades is mogelijkwerwijs in de orde van 8 m/s geweest. Dat zou betekenen, zie ook Figuur 5.3, uitgaande van een liftcoëfficiënt van 0,15 dat de bekleding minimaal 0,4 m dik moet zijn om deze statische overdruk te kunnen weerstaan. Hoe dik de bekleding precies is geweest, is op dit moment niet bekend, maar uitgaand van de foto's in hoofdstuk 4 lijkt deze minder dan 0,4 m te zijn.

De vraag is daarnaast ook of de liftcoëfficiënt van 0,15 hier realistisch of conservatief is. Een liftcoëfficiënt van 0,15 komt overeen met de turbulentieparameter K_t van ongeveer 3 (Hawkshood et al, 2014). Een lift coëfficiënt van 0,10 komt overeen met een waarde van $K_t=2$. Deze laatste waarde is waarschijnlijk aanwezig wanneer situatie 1 uit paragraaf 5.1.1 optreedt. Echter wanneer er ook vegetatie aanwezig is, zal dit enerzijds effect hebben op een verlaging van de stroomsnelheid maar zal de turbulentie hierdoor sterk toenemen, waarbij de hoogste turbulentie waarschijnlijk zal optreden op de overgang van delen met en zonder vegetatie, omdat daar ook het grootste verschil in stroomsnelheid zal zijn. Een lift coëfficiënt van 0,15 en wellicht 0,2 zou dan zelfs tot de mogelijkheden kunnen horen.

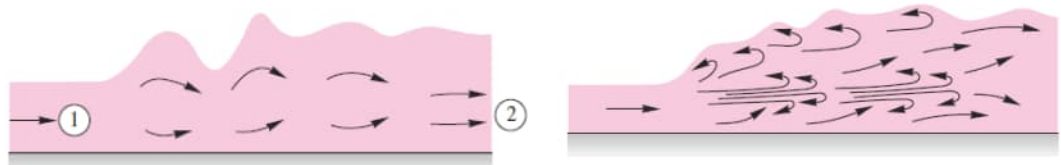


Figuur 5.3: Minimale dikte bekleding als functie van stroomsnelheid

Mogelijke impact van de dynamische belasting op de overlaat (punt 2)

Hoewel de gradiënt van de belastingsverandering tijdens de eerder beschreven fysieke modeltesten waarschijnlijk groter is geweest (de golfhoogte in de modeltest zijn typisch gezien namelijk groter dan in een watersprong), zijn de beschreven mechanismen wellicht ook van toepassing op stromingsbelasting met Froude getallen tussen 1 en 2,5 wat gekenmerkt wordt door golvende watersprong en welke is uitgebeeld in onderstaande figuur (links).

Naarmate het Froude getal toeneemt (2,5-4,5), ontstaan er ook brekende golven (rechts in Figuur 5.4). De golven zorgen voor versnellingen en vertraging van de stroming aan de bodem en creëren hier grote Reynolds schuifspanningen.



Figuur 5.4 Undular Jump (left) and oscillating Jump (right) (White, 2011)

Daarnaast zou ook de ondergrond kunnen gaan vervormen als de golven, met name als ze breken ($Fr > 2,5$), tot lokale overdrukken leiden.

De grootte van de golf blijkt ook afhankelijk te zijn van de vorm van de overlaat. Scherpe overlaten kunnen tot vier keer zo grote golven opwekken ten opzichte van gestroomlijnde overlaten (Wols, 2005). Hoewel de verhoging (balk met kleppen) van de overlaat bij Bosscherveld maar enkele decimeters is, kan dit voor grotere golven hebben gezorgd in het geval van een undular/oscilating jump. Het effect van deze drukschommelingen kun je verdisconteren in een grotere liftcoëfficiënt. Voor schroefstralen wordt zelfs (hoewel waarschijnlijk conservatief) een factor van 0,5 gehanteerd. Voor een watersprong lijkt 0,25 ($K_f=5$) waarschijnlijker.

Mogelijke wijze van falen van de overlaat (punt 3)

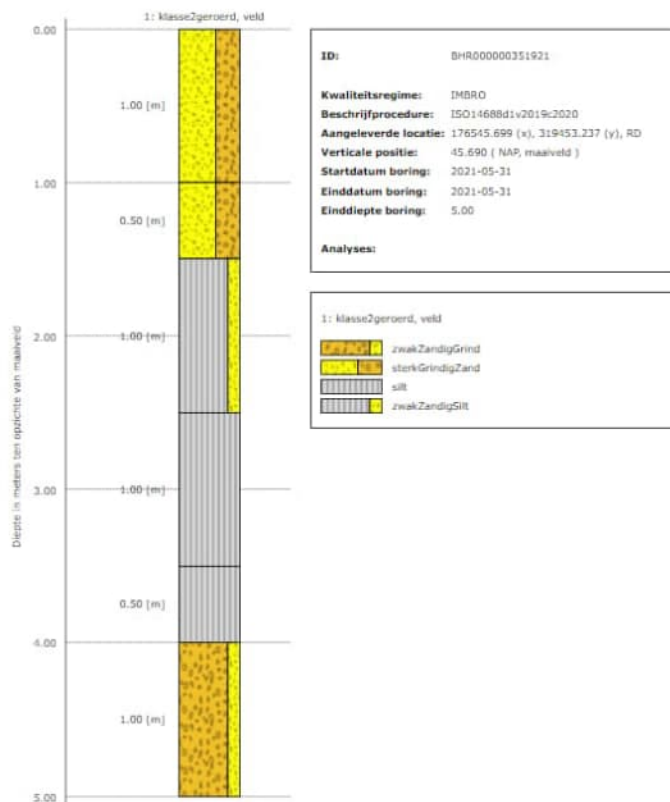
Zoals hierboven beschreven voor gietasfalt dat los kan laten en tot blazen kan leiden, kan ditzelfde mechanisme als gevolg van de dynamische belasting optreden voor begroeiing. Deze zou kunnen opbollen en afhankelijk van de dichtheid via de wortels kunnen gaan trekken aan de onderliggende bekleding waardoor kanaaltjes kunnen ontstaan en de toestroming van water (drukopbouw) gemakkelijker zal worden.

De vlijlaag van puin die bovenin is toegepast onder de steenzetting voldoet ook niet aan punt 2. Bij een doorlatende toplaag zou dat geen problemen moeten opleveren, maar bij een ingegoten steenzetting, dan wel volledig begroeide steenzetting kunnen de drukken zich gemakkelijk onder de steenzetting bewegen (en niet ontsnappen) en tot falen van de constructie leiden.

5.3 Interne erosie

Er zijn verschillende soorten van interne erosie die kunnen zorgen voor falen van een dijk of dam. Hieronder vallen verschillende erosiemechanisme van het damlichaam (door microinstabiliteit, suffosie, suffusie, heave) en door de fundering (piping). Of een mechanisme op kan treden hangt af van de ondergrondopbouw, eventuele constructieve elementen en optredende hydraulische gradiënten.

De ondergrondopbouw ter plekke van de dam is onduidelijk, er zijn geen doorsnedes in lengte- en breedterichting beschikbaar. Het (voor het nieuwe ontwerp) gedane onderzoek is vooral uitgevoerd in grondlichamen *naast* de dam. Deze laten een mix van klei, leem en zandige grindlagen zien tot ongeveer 36 m+NAP (bovenkant dam is ongeveer 44 m+NAP), zie Figuur 5.5. Lager dan 36 m+NAP ligt een harde mergellaag, welke volgens een geologisch rapport doorsneden wordt door met grind opgevulde erosiesleuven. De mergel wordt ook verondersteld relatief homogeen te zijn onder de dam. Alles boven de mergel is onduidelijk. De getrokken damwanden laten een lengte zien van orde 2,5 m (zie ook Figuur 2.2: damwand is van 41,50 tot 44,00 m+NAP). Dit resulteert waarschijnlijk in enkele meters met onbekend materiaal tussen onderkant damwand en bovenkant mergel, wat verschillende vormen van interne erosie tot gevolg kan hebben aangezien er water door de dam kan stromen. Hoe waarschijnlijk dit is, is niet te zeggen zonder aanvullend grondonderzoek en berekeningen ter plekke van de dam. Bij installatieproeven van damwanden ten behoeve van de nieuwe overlaat werden, op basis van mondelinge overbrenging, geen grote verschillen gevonden tussen de zijkanten en ter plekke van de dam. Wat enige mate van homogeniteit impliceert.



Figuur 5.5 Grondopbouw naast de dam (Bron: Presentatie [redacted] (2024))

Een aanwijzing of interne erosie een waarschijnlijk mechanisme was, kan worden gevonden in het ontstaan van zandmeevoerende wellen aan de benedenstroomse kant. Hier zijn geen meldingen van bekend, hoewel deze wellen ook makkelijk weggespoeld kunnen zijn door de hoge stroomsnelheden. Daarnaast laten de laatste beoordeling (LBO1) van de dijken in Maastricht zien dat hier geen pipingprobleem is (noordelijker wel). Een andere mogelijkheid is dat interne erosie heeft gezorgd voor verzakkingen onder de bekleding, wat weer een trigger kan zijn geweest voor erosie van de bekleding door overlopend water. De waarschijnlijkheid hiervan kan niet worden geduid zonder dat er duidelijke doorsnedes beschikbaar zijn.

Samengevat: de damopbouw is mogelijk gevoelig voor interne erosie. Er kan geen uitspraak worden gedaan over de waarschijnlijkheid van interne erosie door het ontbreken van informatie over de precieze opbouw van de dam. De schadebeelden duiden niet direct op interne erosie als faaloorzaak.

6 Andere overlaten in het systeem

Naast de overlaat bij Bosscherveld zijn er nog meer overlaten aanwezig in het Maasdal. De vraag is in hoeverre hier ook risico's bestaan voor schades en falen. Een algemeen punt is wel dat deze overlaten aanwezig zijn op veel kortere stuwpanden, waardoor er daar in de loop der jaren in principe veel minder grote waterstandsveranderingen hebben plaatsgevonden. In dit hoofdstuk wordt alleen een korte beschrijving gegeven van de andere aanwezige overlaten in het Maas-systeem, waarbij risico is op het leeglopen van een stuwpand. Het is aan te bevelen om deze nog een keer beter onder de loop te nemen om de eventuele (toekomstige) risico's te bepalen. Een opsomming van overlaten, waarbij geen risico is op het leeglopen van een stuwpand wordt gegeven in 6.7. De informatie is mede gebaseerd op informatie vanuit RWS-ZN (Rijkswaterstaat Zuid-Nederland, 2024b).

6.1 Instroomwerk natuurpark Bosscherveld

Het instroomwerk natuurpark Bosscherveld (de westelijke dijk met inlaat) is ook al beschreven in paragraaf 3.1. Deze constructie is aangelegd tussen 2008 en 2019 (zie Figuur 6.3 en Figuur 6.4). Bij de inlaat wordt minimaal 0,5 m³/s tot maximaal 10 m³/s water ingelaten via 3 evenwijdige duikers, zie Figuur 6.1. Het instroomwerk zelf heeft een hoogte van 45,3 m+NAP die ongeveer bij afvoeren vanaf 2000 m³/s op de Maas overstroomt (Consortium Grensmaas, 2019) en functioneert dan als overlaat. De waarde van 2000 m³/s geldt echter voor een volledig functionerende stuw Borgharen en met de oude afmetingen van overlaat Bosscherveld. Als de scheepvaartschuif van stuw Borgharen gesloten is overstroomt het instroomwerk bij natuurpark al bij ca. 1700 m³/s.



Figuur 6.1 De gerealiseerde inlaat met ontvangstvijver gezien vanuit het Bosscherveld (bron: Rijkswaterstaat, 2022).

De bovenkant van het instroomwerk bestaat uit een betonnen fietspad met aan weerszijden breuksteen in beton, zie Figuur 6.2. Het instroomwerk is gedimensioneerd op instroom met gevuld Bosscherveld, dus met tegendruk benedenstrooms. Het instroomwerk kent momenteel geen bescherming tegen erosie aan de benedenstroomse zijde in de teen of horizontaal vlak tegen terugschrijdende erosie. In 2021 is er ook schade aan bovenstroomse zijde opgetreden door suboptimale stroomgeleiding van de instroom. Deze schade is beperkt gerepareerd.

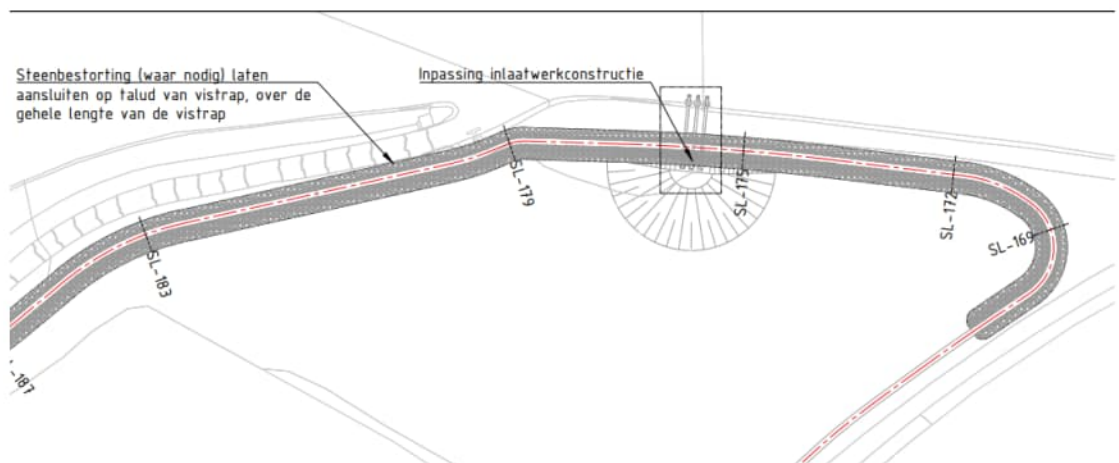
De aanleg van de nieuwe overlaat Bosscherveld kan er voor zorgen dat de hydrodynamische randvoorwaarden voor het instroomwerk Bosscherveld veranderen. Een hogere overlaat of een overlaat met een smaller doorstroomoppervlak kan er voor zorgen dat het instroomwerk eerder (bij lagere Maasafvoeren) gaat meestromen, waardoor de waterstand

benedenstrooms lager is en het verval hoger. Dit leidt tot grotere belastingen op het instroomwerk. Bij het ontwerp (en tijdens de uitvoering) van de nieuwe overlaat Bosscherveld moet hier rekening mee worden gehouden. Dit kan gedaan worden door er voor te zorgen dat de nieuwe overlaat niet leidt tot hogere belastingen op het instroomwerk bij rivierverruiming Bosscherveld of anderzijds door het instroomwerkdijk (indien nodig) aan te passen aan de condities die ontstaan door het nieuwe ontwerp van de nieuwe overlaat (bijv. door het toevoegen van een woelbak).

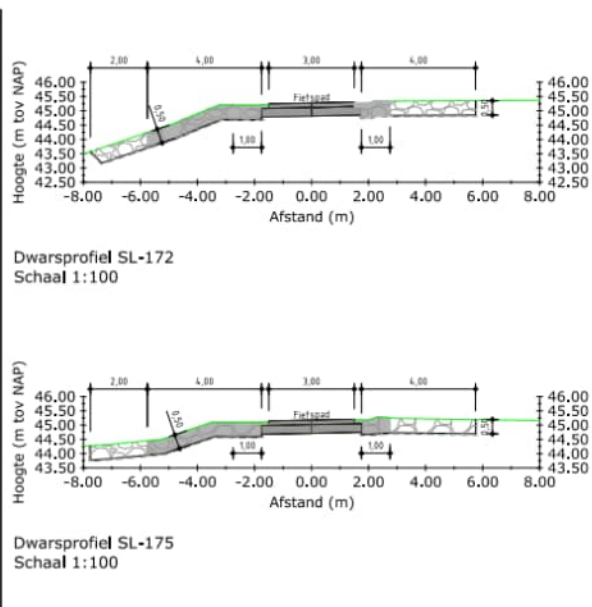
Ook tijdens het onderhoud van de scheepvaartschuif en beweestelijke schuif van stuw Borgharen dient er rekening mee te worden gehouden dat het instroomwerk (nog) eerder meestroomt en de constructie zou hierop getoetst moet worden (en eventueel aangepast).



Figuur 6.2 Westelijke dijk (instroomwerk) natuurpark Bosscherveld.



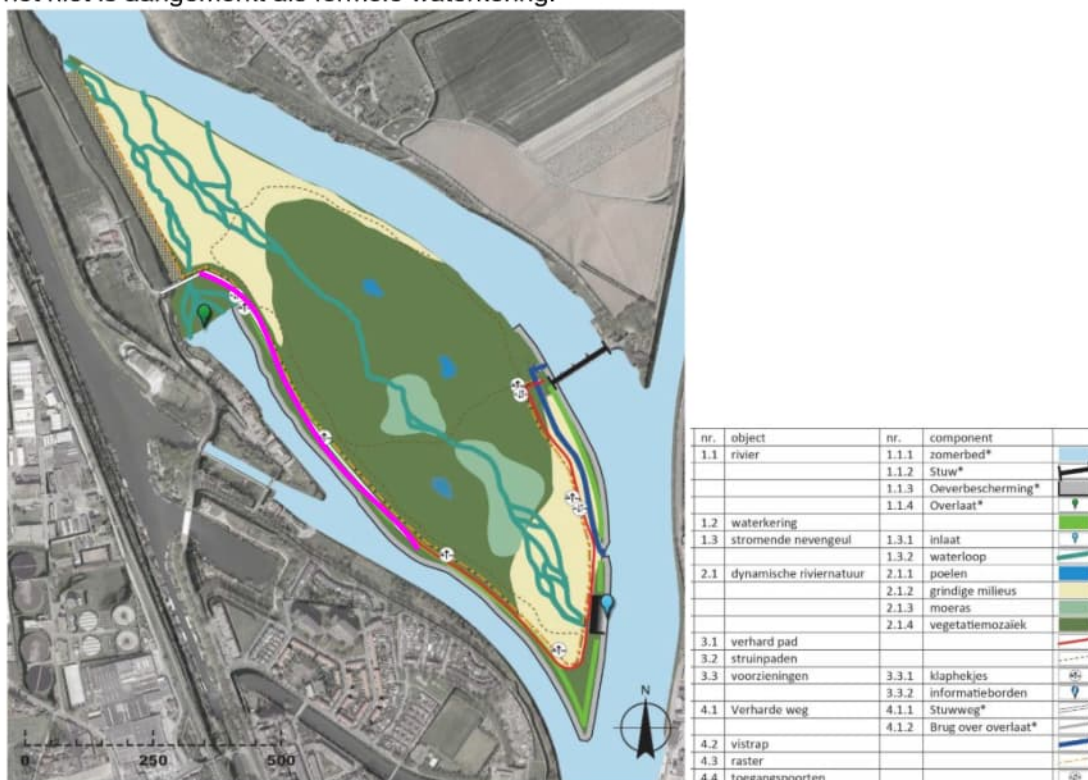
Figuur 6.3 Tekening instroomwerk bij natuurpark Bosscherveld inclusief locatie inlaat.



Figuur 6.4 Tekeningen doorsneden instroomwerk natuurpark Bossherveld.

6.2 Stuwweg bij overlaat Bossherveld

De Stuwweg ten zuid-westen van natuurpark Bossherveld is niet echt een dijk, maar meer een stroomgeleidewerk, zie Figuur 6.5 (roze lijn). De dijk overstroomt niet (de kruin ligt op 47,0 m+NAP), maar er is wel risico op piping en instabiliteit. Door uitvoering van rivierverruiming natuurpark Bossherveld is het verval over dijk Stuwweg toegenomen en is dit risico toegenomen. Tot op heden wordt de Stuwweg niet getoetst op deze aspecten omdat het niet is aangemerkt als formele waterkering.



Figuur 6.5 Overzichtskaart natuurpark Bossherveld (bron: Consortium Grensmaas (2019b)). Deroze lijn geeft de locatie van de Stuwweg aan.

6.3 Overlaat nabij stuw Linne

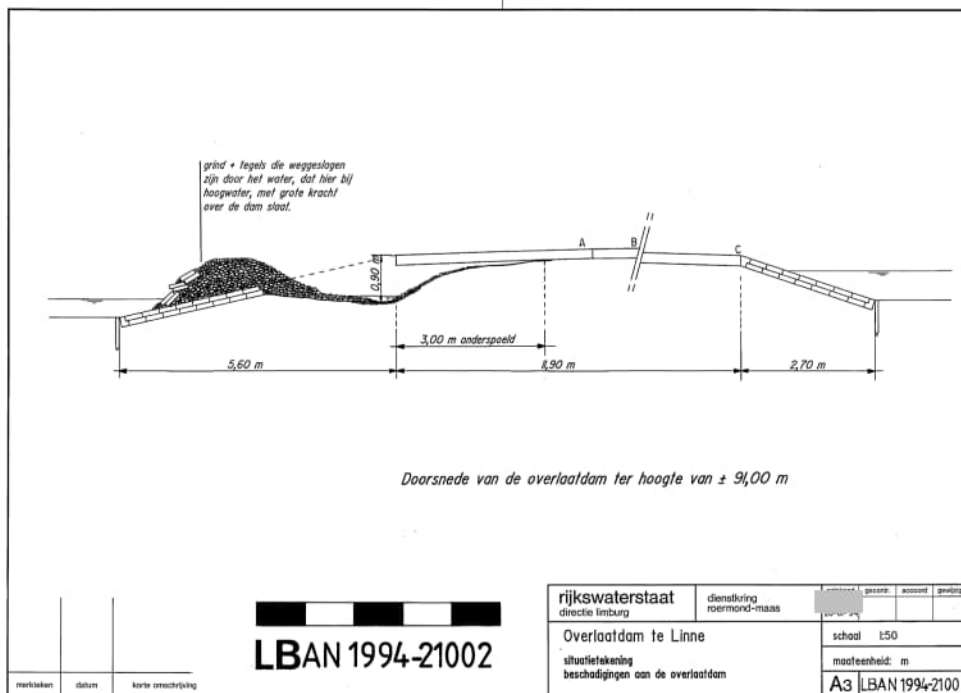
Het gebied achter de overlaat bij Linne is een uitbreiding van het doorstroomgebied van de Maas (zie Figuur 6.6) en treedt in werking boven een afvoer (debiet) van omstreeks 1600 m³/s, waardoor een bypass van stuw Linne wordt gecreëerd en de afgesneden Maasbocht direct benedenstrooms van de overlaat watervoerend wordt. De overlaat is bij de hoogwaters van 1993 en 1995 flink beschadigd geraakt (zie Figuur 6.8) en daarna hersteld met een zwaarder constructie in 1995 (zie Figuur 6.9). Net als bij de schades aan overlaat Bosscherveld is de schade hoog op het talud ontstaan en niet aan de teen.



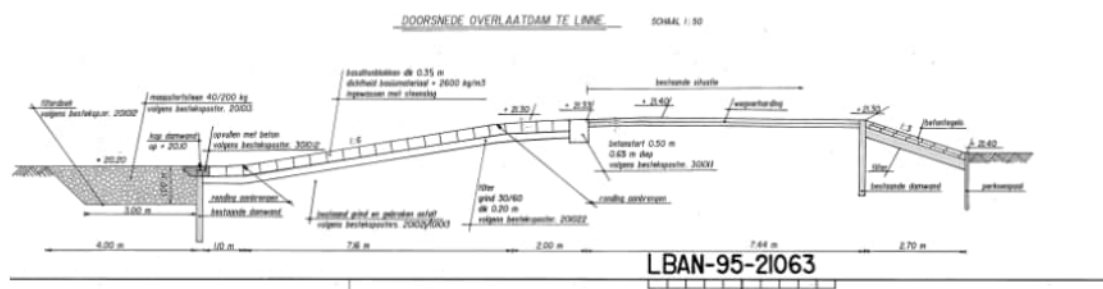
Figuur 6.6 Foto van de situatie rond de overlaat bij stuw Linne (bron: Google Maps). In rood is de locatie van de overlaat weergegeven.



Figuur 6.7 Foto van de overlaat Linne in 2020 (stroming van links naar rechts).



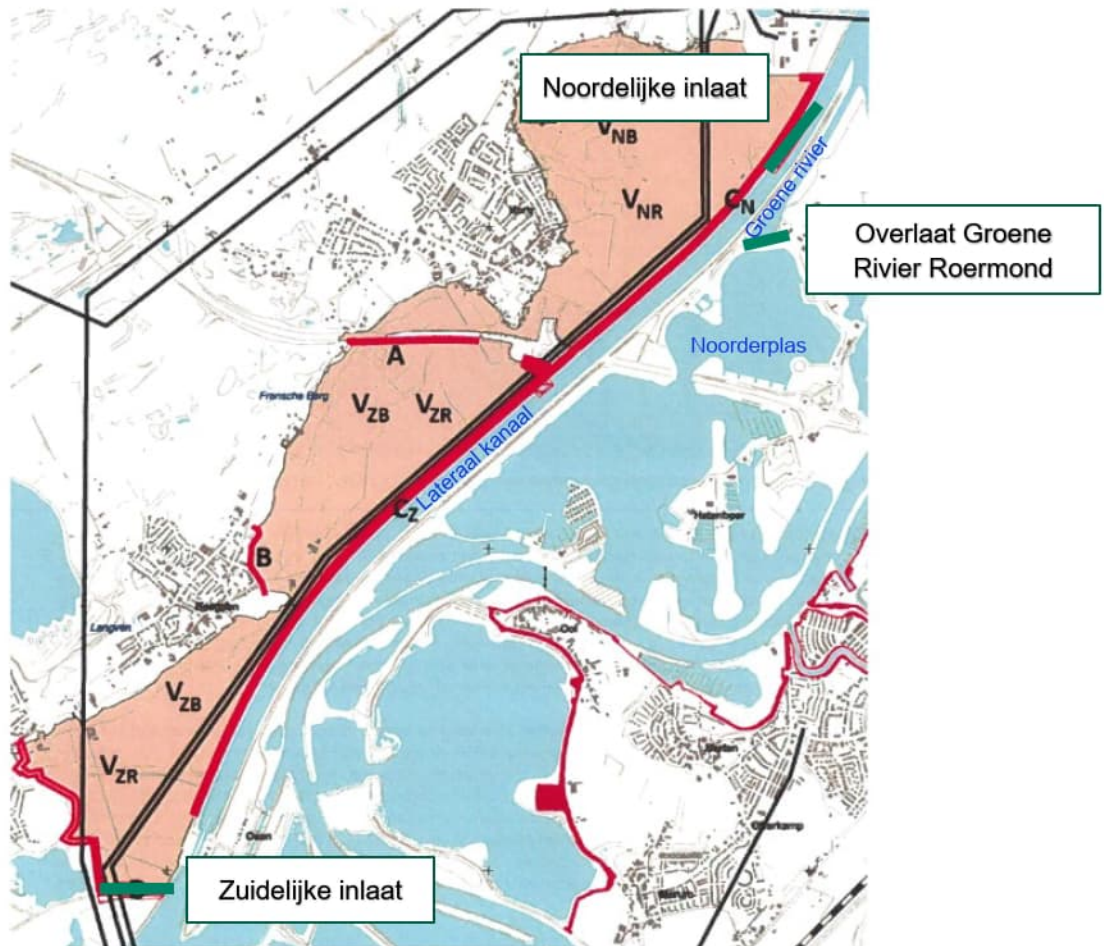
Figuur 6.8 tekening van schade aan overlaats Linne, na hoogwater 1994.



Figuur 6.9 Ontwerptekening overlaats nabij stuw Linne (stroming van rechts naar links).

6.4 Drempels Lateraal-Kanaal-West

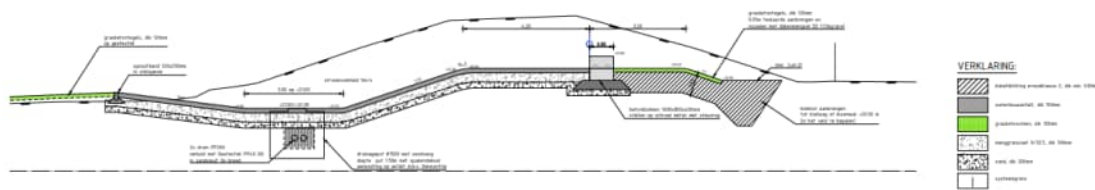
Vanaf 2004 is het retentiegebied Lateraalkanaal-West aangelegd als onderdeel van de Maaswerken. Het vormt een onderdeel van de hoogwaterbescherming van het gebied rondom de stad Roermond. Dit is een gebied dat bij extreem hoogwater bewust onder water wordt gezet. Dit bekken bestaat uit een noordelijk en een zuidelijk deel. Het water wordt in de deelgebieden ingelaten door middel van twee drempelconstructies met een lengte van 300-350 m, zie Figuur 6.10.



Figuur 6.10 Noordelijk en Zuidelijk bekken van retentiegebied Lateraalkanaal-West (POL ZM, 2002). Met groene lijnen zijn de locaties van de Noordelijke- en Zuidelijke inlaat aangegeven en de overlaat Groene Rivier Roermond.



Figuur 6.11 Foto van inlaatlocatie/instroom/overlaat drempel LKW-Zuid (de instroming is van links naar rechts). Datum onbekend.



Figuur 6.12 Ontwerptekening drempel Lateraal-Kanaal-West (zuid).



Figuur 6.13 Foto van de instroomdrempel van de noordelijke inlaat van Lateraal-kanaal west (benedenstroomse zijde). Datum onbekend.

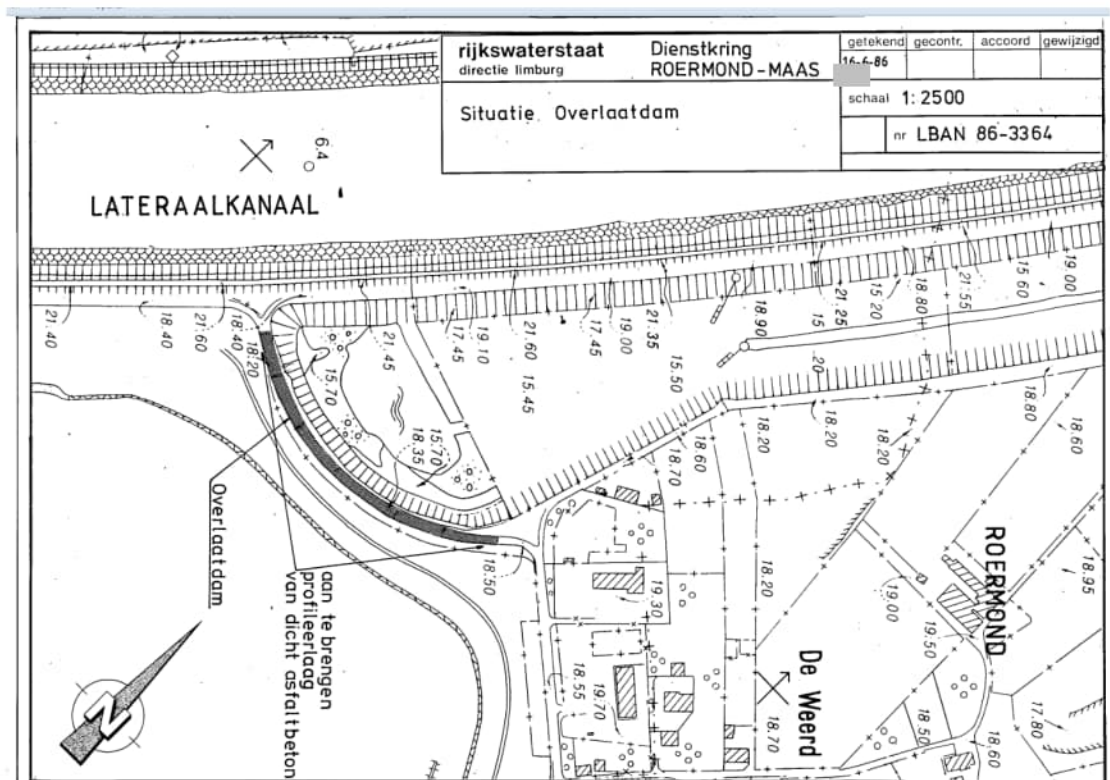
De beide constructies zijn relatief recent ontworpen en uitgevoerd en hebben een geringe afmeting (in hoogte). De zuidelijke inlaat is een constructie van asfalt beton en betonblokken en er is een drempel aanwezig op de kruin (zie Figuur 6.11 en Figuur 6.12) die in principe tot hogere hydraulische belastingen leidt. De vraag is in hoeverre dit hydraulisch is getoetst. Daarnaast is er veel (houtvormende) begroeiing zichtbaar op de noordelijke inlaat, zie Figuur 6.13, wat ook zou kunnen leiden tot schade aan de constructie. Bij doorbreken is er echter geen risico op het leeglopen van het stuwpand door de dijk langs het Lateraalkanaal. Het retentiegebied zou alleen (veel) langer onder water blijven staan.

6.5 Overlaat Groene Rivier Roermond

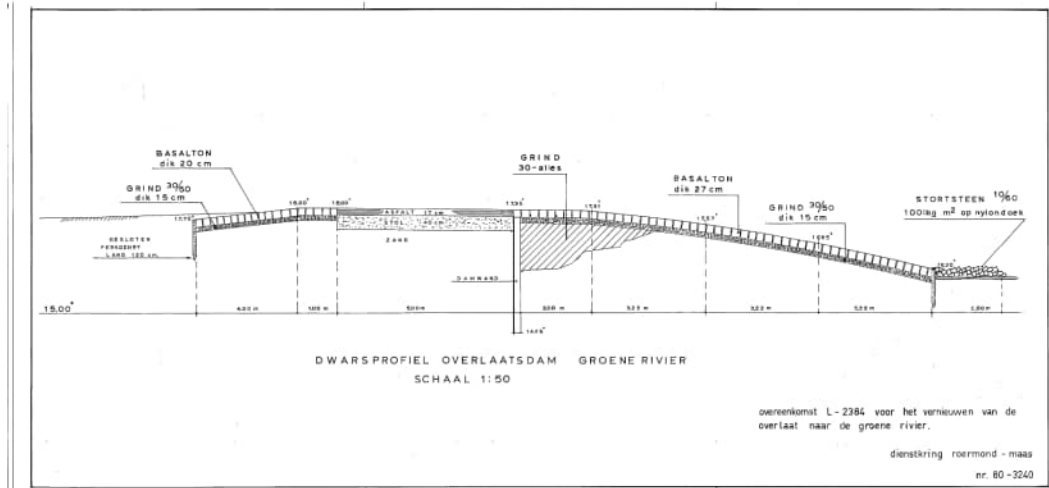
De overlaat De Weerd/Groene Rivier Roermond (zie Figuur 6.15) is aangelegd iets ten noordoosten van Roermond (zie Figuur 6.10) en vormt tijdens hoogwater (ca. 1750 m³/s) de verbinding tussen de Noorderplas, via de Groene Rivier (en beneden toelidskanaal sluis Roermond) naar het Lateraalkanaal en uiteindelijk de Maas. De dam heeft in de jaren 80 tijdens hoogwater ook een keer flinke schade opgelopen, maar daarna nooit meer. Net als in de herziene situatie bij Linne bestaat de overlaat uit een geleidelijke overgang in helling van de kruin naar het afwaartse talud (zie Figuur 6.16).



Figuur 6.14 Foto van de Overlaat Groene rivier Roermond (datum onbekend).



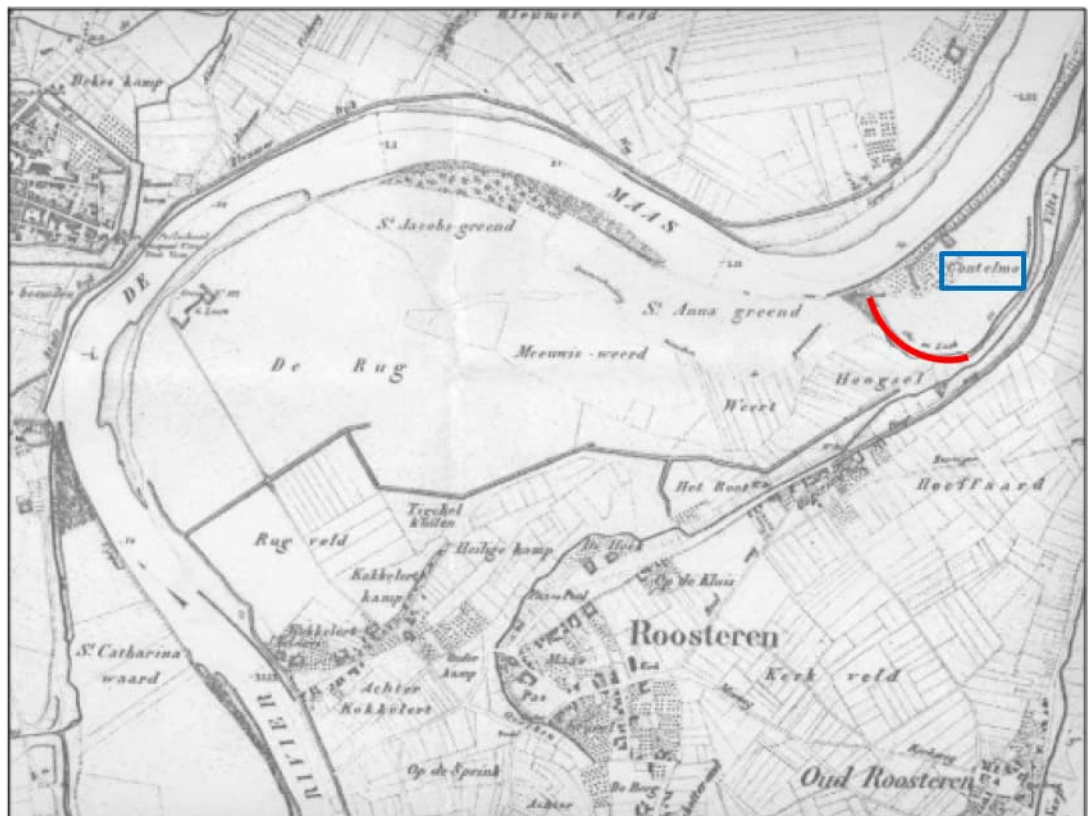
Figuur 6.15 Locatie van Overlaat Groene rivier Roermond.



Figuur 6.16 Dwarsprofiel van Overlaat Groene rivier Roermond (water stroomt van links naar rechts).

6.6 Overlaat van Contelmo

Het fort Contelmo (gebouwd vanaf 1633) lag strategisch nabij een overlaat waarbij met hoge waterstanden water via de Oude Maas kon worden geleid zodat het stroomafwaarts gelegen vestingstadje Stevensweer veilig op een eiland kwam te liggen. Deze overlaat ligt er nog steeds en werkt over zijn gehele lengte bij een afvoer van 3000 kubieke meter per seconde.



Figuur 6.17 Rivierkaart uit 1849 waarop duidelijk fort Contelmo (blauwe rechthoek) en de overlaat via de Oude Maas zichtbaar zijn. De rode lijn geeft de locatie van de overlaat aan.



Figuur 6.18 Stroming tijdens hoogwater januari 2003 bij overlaat Contelmo.

6.7 Overige overlaten (zonder gevolgen stuwpand)

Naast de bovengenoemde overlaten zijn er ook nog overlaten aanwezig in het systeem die geen gevolgen hebben voor het stuwpand. Deze zijn aanwezig op de volgende locaties:

- Rivierverruiming Itteren (Grensmaas)
- Rivierverruiming Meers (Grensmaas)
- Slapersdijk Grevenbicht
- Rivierverruiming Roosteren
- Overlaat Contelmo (hierboven al wel genoemd)
- Instroomwerk Retentiebekken Lateraalkanaal-West Noord (Horn, hierboven ook al genoemd)
- Hoogwatergeul Raaijweide
- Hoogwatergeul Lomm
- Hoogwatergeul Ooijen
- Hoogwatergeul Wanssum
- Hoogwatergeul Well-Aijen
- Overdiepse polder

Rijkswaterstaat heeft Deltares gevraagd om onafhankelijk onderzoek te doen naar de oorzaak van het falen van de overlaat Bosscherveld. Hiertoe heeft Deltares voorliggend feitenrelaas en de mogelijke verklarende hypothesen opgesteld. Een vervolgstap, om deze hypothesen al dan niet te testen aan de hand van modelmatige simulaties, is vooralsnog niet voorzien. Op basis van alle in dit rapport aangedragen feiten is het mogelijk de volgende conclusies te trekken. Gebaseerd daarop worden ook aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek en algemene aanbevelingen voor het ontwerp van de nieuwe overlaat.

7.1 Conclusies

- Het systeem rond overlaat Bosscherveld is sterk veranderd sinds de aanleg in 1930. Door de grootschalig zand- en grindwinning (vooral in de jaren 50) en de rivierversuiming na 1995 (project Grensmaas) is de waterstand in de Grensmaas net benedenstrooms van de overlaat met meer dan 3 meter gedaald (bij eenzelfde totaalafvoer van de Maas). Daarnaast overstroomt de overlaat tegenwoordig pas bij grotere Maasafvoeren (bij ca. 650 m³/s in 1930 en ca. 1700 m³/s in 2023). Deze twee effecten samen zorgen er voor dat het verval in waterstand over de overlaat is toegenomen van ca. 0,5 meter in de periode 1930-2011 tot 1,5 meter vanaf 2017.
- Sinds november 2023 wordt de scheepvaartopening bij stuw Borgharen op de grond gehouden (de andere drie openingen functioneren conform het normale stuwbeheer). Hierdoor is de bovenstroomse waterstand hoger bij toenemende Maasafvoeren (het water kan minder makkelijk door de stuw). Dit betekent dat de overlaat al gaat overstroomen bij lagere Maasafvoeren (ca. 1000-1100 m³/s), maar dan is de waterstand benedenstrooms nog lager. Dit betekent dat er dan een verval optreedt van ca. 2,5 meter (in plaats van 1,5 meter).
- De hydraulische belasting op de overlaat zelf is een combinatie van hoge stroomsnelheden op het afgaande talud en drukfluctuaties onder de watersprong. Deze watersprong treedt op ergens benedenstrooms van de overlaat en vormt de overgang tussen schietend water (op het talud) en stromend water (in het benedenstroomse pand). Hierbij wordt veel energie vernietigd. De locatie van hoogste stroomsnelheden is op het benedenstroomse talud net boven de watersprong en de locatie van de hoogste drukfluctuaties is ter plaatse van de watersprong. Bij een groter verval over de overlaat treden er hogere stroomsnelheden aan de benedenstroomse helling op en zijn de drukfluctuaties ook groter. Door het grotere verval over de overlaat is er meer energie te vernietigen en leidt de combinatie van snelheden en drukfluctuaties tot een verhoogde aanval op het benedenstroomse talud.
- Naast de verandering van de hydraulische randvoorwaarden zijn er in de loop van de tijd ook aanpassingen gemaakt aan de vorm van de kruin die gevolgen hebben op de lokale stroombelasting. Ten eerste is er een houten balk aangelegd die voor een verhoging van de kruin zorgt en sinds 2004 zijn ook scharnierende stalen kleppen aangebracht over de gehele lengte van de overlaat (deze zorgen voor een verhoging van de bergingscapaciteit achter de overlaat tijdens de zomer). De ophoging van de kruin leidt tot het creëren van een loslaatpunt voor de stroming aan de bovenzijde van de overlaat en dit leidt tot een minder goed gestroomlijnde aanstroming van het benedenstroomse talud. De locatie waar de stroming vervolgens weer gaat aanliggen is een locatie waar er vaak hogere hydraulische belastingen zijn, zowel door hoge snelheden als hoge fluctuaties van snelheden en turbulentie. De verhoogde verticale component in de snelheid van het water kan tot hogere lokale krachten leiden op korte afstand van de

kruin. Dit deel van de overlaat is ingegoten met beton om de verhoogde aanval aan te kunnen. Het zwakste punt is dan te vinden daar waar de penetratie met beton eindigt en overgaat in de steenbekleding.

- Vanaf 2012 (start van het effect van het Grensmaasproject en het hogere verval over de overlaat) is het drie keer voorgekomen dat er een significante afvoer over de overlaat heeft plaatsgevonden (september 2014, juli 2021 en januari 2024). In al deze drie gevallen is er schade aan de overlaat ontstaan. Alle opgetreden schades hebben gemeen dat de steenzetting op het benedenstroomse talud is beschadigd, waarbij stenen uit de steenzetting zijn verdwenen. De ontstane gaten verschilden qua afmeting. Het is in al deze gevallen echter niet bekend waar de initiële schade precies is ontstaan, maar de schade is vooral zichtbaar vanaf vlak onder de kruin van de overlaat, bij de overgang van het ingegoten/overlaagde deel van de steenzetting naar de steenbekleding.
- Oneffenheden, door bijvoorbeeld begroeiing, zorgen voor lokale contracties en vervolgens versnellingen en fluctuaties. Deze leiden tot hogere hydraulische belastingen. De begroeiing leidt ook mogelijk bij hoge stroming tot extra (trek)krachten die werken op de bekleding. Eerdere reparaties (waar de overgang is tussen reparatie en oorspronkelijk materiaal) kunnen ook lokaal de belasting verhogen. Bij overlaat Bosscherveld zijn deze reparaties vooral op het benedenstroomse talud uitgevoerd maar wel dichtbij de kruin.
- Naast de oneffenheden is er op het benedenstroomse talud ook een versmalling van het doorstroomoppervlak door de overgang tussen het talud van de overlaat en het talud van de oevers. Door de versmalling zal er ook een contractie van de stroming optreden en hogere snelheden en belastingen. Deze zal voornamelijk dichtbij de overgang tussen oever en talud geconcentreerd blijven, maar hier is voor zover bekend geen schade opgetreden.
- De damopbouw van de overlaat is mogelijk gevoelig voor (interne) erosie. Er kan echter geen uitspraak worden gedaan over de waarschijnlijkheid van (interne) erosie door het ontbreken van informatie over de precieze opbouw van de dam. De invloed van dit mechanisme op het falen kan echter niet uitgesloten worden, omdat door de aanwezige begroeiing de opsluiting van de bekleding slecht zichtbaar was. De schadebeelden die er zijn duiden niet direct op interne erosie als faaloorzaak.
- Uit de beschikbare informatie over het beheer en onderhoud van de overlaat kan worden geconcludeerd dat er meermaals sprake is geweest van schade en herstel. Uit twee inspectierapporten blijkt dat de staat van onderhoud (van o.m. de bekleding) niet volledig is vastgesteld en niet naar het functioneren van de gehele overlaat is gekeken.

Samenvattend

Het systeem rond en bij de overlaat Bosscherveld is flink veranderd sinds de aanleg. Door het grotere waterstandsverval over de overlaat (met name sinds het Grensmaas project en de dichte scheepvaartopening bij Borgharen) in combinatie met de aangebrachte kleppen en de aanwezige begroeiing op de overlaat zijn de krachten op het talud benedenstrooms toegenomen en hierop is de overlaat oorspronkelijk niet ontworpen.

7.2 Aanbevelingen voor verder onderzoek

Hydraulische randvoorwaarden

De hydraulische randvoorwaarden zijn nu gebaseerd op de metingen bovenstrooms en benedenstrooms van stuw Borgharen. Zoals eerder aangegeven is dit voor hogere afvoeren minder representatief voor de waterstanden boven- en benedenstrooms van de overlaat. Het zou wenselijk zijn om hiervoor een betere inschatting te krijgen door middel van modelberekeningen.

Het huidige hydrodynamische model van de Maas is echter ontwikkeld om globale waterstanden op de Maas te berekenen en is niet opgezet en afgeregeld om de lokale stroming rond overlaat Bosscherveld goed te representeren: de resolutie en uitlijning van het model met de overlaat en het kanaal er naar toe zijn daar nu niet voldoende voor. Verder is de modellering van de werking van alle stuwen op de Maas zodanig opgezet dat het alleen geschikt is voor de situatie dat de stuwen volledig in bedrijf zijn. Het model zou daarom aangepast moeten worden. Met het model kunnen dan ook andere of toekomstige situaties worden berekend (bijv. met twee gesloten schuiven bij de stuw, zoals verwacht wordt tijdens de bouw van de nieuwe overlaat). Het is daarom aan te raden om na te gaan of een gedetailleerdere opname van alle stuwen (niet alleen Borgharen) mogelijk is in het model. Op deze manier kan het model beter worden ingezet in crisissituaties of bij onderhoud, wanneer één of meer onderdelen van een stuw buiten bedrijf zijn. Daarnaast zouden ook de consequenties van een nieuw ontwerp van de overlaat op de verdeling van afvoeren over stuw Borgharen, instroomwerk rivierverruiming Bosscherveld en de overlaat Bosscherveld in beeld kunnen worden gebracht, ook als er twee schuiven van stuw Borgharen gesloten zijn. Dat kan mede dienen voor check of instroomwerk rivierverruiming Bosscherveld tegen die belasting bestand is of niet. Dit vraagt echter om een goed uitgelijnd rooster ter plaatse van de inlaat en van de overlaat zelf (inclusief aan en afstroming).

Beide aanpassingen vergen echter een relatief grote inspanning en zullen de conclusies van dit oorzakelijk onderzoek niet wezenlijk veranderen.

Dimensionering bekleding

Voor het bepalen van de minimale dikte van een ondoorlatende bekleding dient er een keuze gemaakt te worden voor de liftcoëfficiënt. Bij een statische overdruk zal een lagere liftcoëfficiënt van toepassing zijn dan bij een dynamische overdruk. Echter is in geval van een constante stroomsnelheid de snelheid hoger dan bij een wisselende stroomsnelheid. Het is wenselijk om hier onderzoek in te doen: welke ontwerpformules zijn voor welke situatie geldig en vaak binnen de ontwerpformule, welke juiste keuze er gemaakt dient te worden voor de kalibratie parameter (bijvoorbeeld een turbulentiecoëfficiënt dan wel liftcoëfficiënt), met daarbij inachtnemend de doorlatendheid van de onderlaag.

Modelmatig onderzoek

Om de faalhypothese verder te onderbouwen is het mogelijk om in een vervolgtraject modelmatig onderzoek uit te voeren. Dit zal echter alleen een beter beeld gaan geven van de waarschijnlijkheid van het optreden van de losse faalmechanismen, maar geen antwoord geven op de vraag hoe de beschadiging precies is ontstaan en welk faalmechanisme daar exact aan heeft bijgedragen.

Overige overlaten in het systeem

Naast de overlaat bij Bosscherveld zijn er nog meer overlaten aanwezig in het Maasdal. De vraag is in hoeverre hier ook risico's bestaan voor schades en falen. Het is aan te bevelen om deze nog een keer beter onder de loep te nemen om de eventuele (toekomstige) risico's te bepalen.

Ontwerp nieuwe overlaat

Intussen is gestart met het ontwerp van de nieuwe overlaat die de bezwijken overlaat moet vervangen. Deltares is betrokken bij de ontwerpfase en heeft hierin de volgende (algemene) aanbevelingen gedaan:

- Houd in het ontwerp ook rekening met toekomstige veranderingen in het systeem. Zowel in het uiteindelijke ontwerp als in de uitvoeringsfase.

- Een ander ontwerp van de overlaat kan op zijn beurt ook invloed hebben op de werking van het systeem en daarmee op de belastingen op andere kunstwerken (bijv. stuw Borgharen, instroomwerk rivierverruiming Bosscherveld). Hierop moet worden geanticipeerd.
- Zorg voor een 'glad' ontwerp van de kruin en het benedenstrooms talud. Abrupte overgangen en andere verstoringen zorgen voor een verhoging van de lokale stroomsnelheid en turbulentieniveau en dus van de hydraulische belastingen op de constructie.
- Aandacht voor waterstand benedenstrooms van de overlaat: hier moet voldoende waterdiepte beschikbaar zijn om voor het vormen van een watersprong te zorgen. De locatie waarop de watersprong plaatsvindt moet in de ontwerpfase worden bekeken om te zorgen dat het overeenkomt met een sterk beschermd deel van de overlaat.
- Niet alleen de stroomsnelheid op het benedenstroomse talud, maar ook de drukfluctuaties bij de watersprong moeten in beschouwing worden genomen. De grootte van deze fluctuaties zal variëren met de afvoer en met de locatie van de watersprong boven de constructie en moet dus voor een range aan situaties worden beschouwd. De bekleding op het talud en de bodem van de woelbak en eventuele overgangsconstructies moeten hiertegen bestand zijn.
- Aandacht voor rechte en symmetrische aan- en afstroom van de overlaat. Doel hiervan is om te zorgen voor symmetrische stroombeelden en dus voorspelbare afvoercapaciteit en hydraulische belastingen op de constructie.
- Beschouw de interactie tussen de geotechniek, geohydrologie en hydraulica in de dimensionering en het functioneren van de overlaat. Eén van de stappen benodigd voor een integraal ontwerp, is het beschouwen van mogelijke faalmechanismen in relatie tot de ontwerpkeuzes en de dimensionering. Voor zowel het ontwerp, de uitvoering als het beheer.
- Specifiek voor het geotechnisch ontwerp geldt dat inzicht in de ondergrond van belang is voor de te maken ontwerpkeuzes. Zorg dus voor voldoende grondonderzoek.
- Houd bij het ontwerp ook rekening met de werking in de toekomst en welk beheer en onderhoud hiervoor nodig is (bijvoorbeeld het dichtgroeien/dichtslibben van ontluchtingsgaten en het wegnemen van begroeiing op de bekleding).

8 Referenties

- [redacted] (2023). Objectbeschrijving stuw Borgharen. Versie januari 2023
- [redacted] (2020): Toddbrook Reservoir Independent Review Report. 10 februari 2020
- IdVerde (2022, 2023): Conditiemetingen 'overlaatsdam afleidingskanaal, 2022, 2023
- Consortium Grensmaas (2019a). Eindplan Locatie Bosscherveld. DO-GM-PLA-0075. Versie 7 dd. 24 oktober 2019
- Consortium Grensmaas (2019b). Beheerplan Locatie Bosscherveld. DO-GM-PLA-0075. Versie 4 dd. 16 november 2019
- Consortium Grensmaas (2022): Grensmaasproject, monitoringsrapportage hydraulica periode juni 2021 - juni 2022. Nummer DO-GU-TGV-0050, versie 1 van 16 september 2022
- Deltares (1999). Analyse stabiliteit van met gietasfalt overgoten en ingezand basalt. Deltares rapport H3272.
- [redacted] & [redacted] (2008): Zomerbedbodemveranderingen van de Maas (1889-2007), Tech. Rep. 10314/4500103893, Meander, Advies en Onderzoek.
- [redacted] (1999). Sedimenttransport in de Grensmaas – Transportcapaciteit en aanbod van sediment. Rijkswaterstaat RIZA, werkdocument 99.158X dd. November 1999
- ENW (2021): Hoogwater 2021, Feiten en Duiding, versie 2, 20 september 2021
- Imtech (2015). Objecten Maastricht ObMa: Technische handleiding Regelalgoritme Stuw / Vispassage Borgharen. LBA2000-41001-00-00-20-005 TH Stuwregeling v6.0.docx
- [redacted] (1999): Analyse stabiliteit van met gietasfalt overgoten en ingezand basalt. WL | Delft Hydraulics rapport H3272.1999
- [redacted] (2018): Onderhoudseisen voor steenbekledingen op dijken - Bijdrage aan risico gestuurde instandhoudingsplannen. Deltares rapport 11201769-000-HYE-0004
- Limburger Koerier (1931). De waterstaatswerken in 't Bosscherveld. Krant van 31 maart 1931.
- Maaswerken, Provincie Limburg (2002): Provinciaal Omgevingsplan Limburg, Aanvulling Zandmaas, februari 2022, Zandmaas/Maasroute, POL Zandmaas, De Maaswerken.
- Mourik Imtech (2014), voorstel tot wijziging, prestatiecontract nat perceel zuid, herstellen zetstenen overlaad Bosscherveld, d.d. 26-11-2014
- Rijkswaterstaat Zuid-Nederland (2014). Legger Rijkswaterstaatswerken waterwet. Versie 2.0 definitief. dd. 13 oktober 2014.
- Rijkswaterstaat (2015). Aanleg nieuwe keersluis Limmel – Ruim baan voor goederentransport over water. dd. februari 2015

Rijkswaterstaat Maaswerken (2010). Voorstel MHW en MWL kanaalpand Limmel-Born t.b.v. beschikbaarheid scheepvaart, hydraulische randvoorwaarden en ontwerpstoetsen (RWS/DMW/2010/1783) (SHM 393). Memo DMW2010-1783 dd. 18 november 2010 Rijkswaterstaat (2021), Inspectierapport Instandhoudingsinspectie, Beheerobjectcode: 61F-120-02, RWS ZN / ZN District Zuid-Oost, RWS Grote Projecten en Onderhoud, d.d. 15-1-2021. Rijkswaterstaat Maaswerken (2021). Naslagwerk Maaswerken – Deel2: Overzicht Projecten Maaswerken & deelprogramma's Grensmaas, Zandmaas, Kaden en Maasroute. RWS-2021/10852Dd versie 1.0 definitief. 1 mei 2021

Rijkswaterstaat (2022). Kennisdocument Grensmaas: Locatie Bosscherveld. RWS-2021/21348

Rijkswaterstaat (2023). Stuw Borgharen beschadigd; effect op waterstanden. Nieuwsbericht, gepubliceerd op 16 november 2023: <https://www.rijkswaterstaat.nl/nieuws/archief/2023/11/stuw-borgharen-beschadigd-effect-op-waterstanden>

Rijkswaterstaat INFORMATIE (2023). Stuwen in de Maas – Systeembeschouwing. Rijkswaterstaat informatie: CON00-1663636127-40. v1.0 dd. 25 januari 2023

Rijkswaterstaat (2024). De 7 Maasstuwen. Online beschikbaar: <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/bescherming-tegen-het-water/waterkeringen/dammen-sluizen-en-stuwen/de-7-maasstuwen>. Laatst geraadpleegd op 16 mei 2024

Rijkswaterstaat Zuid-Nederland (2024a): Mail van [REDACTED] met foto's d.d. 15-04-2015.

Rijkswaterstaat Zuid-Nederland (2024b): Overzicht actieve overlaten Maas 2024-04-24, opgesteld door [REDACTED] en [REDACTED]

[REDACTED]. (2015): Handreiking Dijkbekledingen Deel 4: Breuksteenbekledingen - Aanvulling bij Rock Manual. November 2015

[REDACTED]. (2011). Fluid mechanics, 7th edition. McGraw-Hill Companies

[REDACTED]. (2005) Undular hydraulic jumps. M.Sc Thesis.

ENW (2021): Hoogwater 202, Feiten en Duiding, versie 2, 20 september 2021

A Luchtfoto's



Figuur A.1 Luchtfoto 2014.



Figuur A.2 Luchtfoto 12-02-2015.



Figuur A.3 Luchtfoto 21-04-2016.



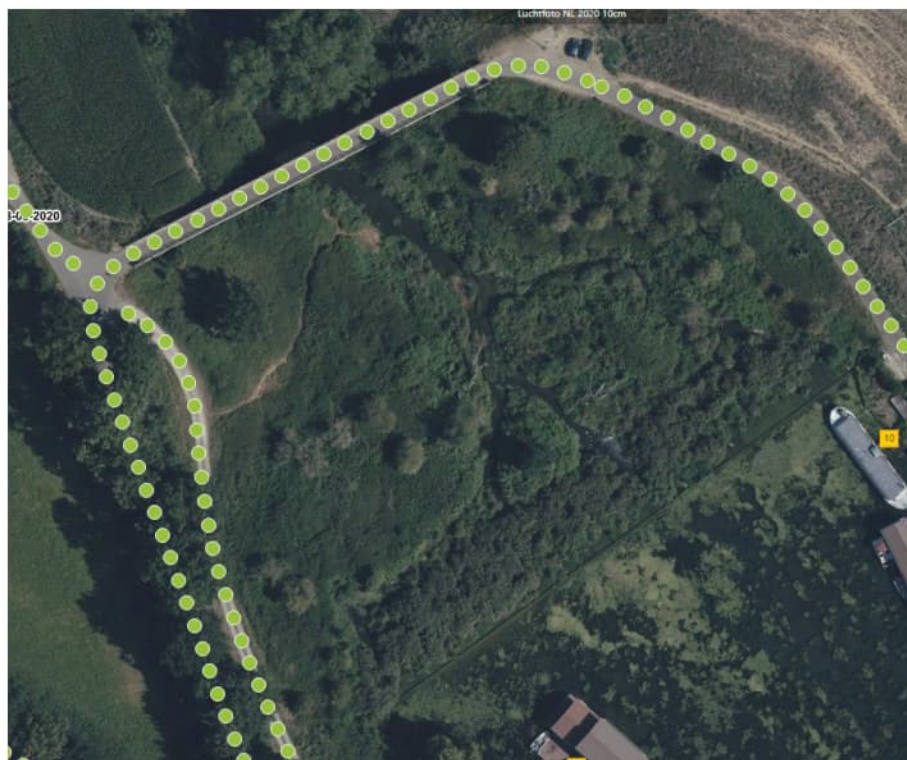
Figuur A.4 Luchtfoto 14-03-2017.



Figuur A.5 Luchtfoto 07-04-2018.



Figuur A.6 Luchtfoto 18-04-2019.



Figuur A.7 Luchtfoto 08-08-2020.



Figuur A.8 Luchtfoto 31-03-2021.



Figuur A.9 Luchtfoto 09-03-2022.



Figuur A.10 Luchtfoto 27-05-2023.

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