

## Een watersysteemanalyse - wat leren we van het hoogwater van juli 2021?

Inzichten in het functioneren van beeksystemen bij grote hoeveelheden neerslag en het effect van verschillende typen maatregelen



**Een watersysteemanalyse - wat leren we van het hoogwater van juli 2021?**  
Inzichten in het functioneren van beeksystemen bij grote hoeveelheden neerslag en het effect van verschillende typen maatregelen

**Auteur(s)**

Nathalie Asselman

Klaas-Jan van Heeringen

*Foto voorzijde: Overstroming in Brommelen met op de achtergrond Bunde (foto: Waterschap Limburg)*

## Een watersysteemanalyse - wat leren we van het hoogwater van juli 2021?

Inzichten in het functioneren van beeksystemen bij grote hoeveelheden neerslag en het effect van verschillende typen maatregelen

<b>Opdrachtgever</b>	Waterschap Limburg
<b>Contactpersoon</b>	de heer drs. A.G.A Janssen
<b>Referenties</b>	-
<b>Trefwoorden</b>	Overstromingen juli 2021, Limburg, Geul, Geleenbeek, Roer

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	0.2
<b>Datum</b>	16-01-2023
<b>Projectnummer</b>	11207700-000
<b>Document ID</b>	11207700-000-ZWS-0035
<b>Pagina's</b>	151
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Nathalie Asselman	
	Klaas-Jan van Heeringen	

# Samenvatting

Het hoogwater van juli 2021 werd veroorzaakt door een grote hoeveelheid neerslag die in twee dagen viel. De herhalingstijd van de bui wordt geschat op ongeveer 500 jaar. Door klimaatverandering kan een bui zoals gevallen in juli 2021 vaker gaan voorkomen. Ongeveer 30% van de gevallen neerslag is door de beken afgevoerd naar de Maas. De rest is vastgehouden in onder andere de bodem. Het is belangrijk om de bestaande sponswerking van de bodem te behouden en uit te breiden. De onderzochte maatregelen die genomen kunnen worden in het watersysteem hebben een waterstandsverlagend effect maar kunnen overstromingen tijdens een gebeurtenis zoals in juli 2021 niet voorkomen. Het is daarom belangrijk om ook in te zetten op gevolgbeperking in de vorm van aanpassingen in de ruimtelijke ordening, vergroten van het waterbewustzijn bij burgers en verbeterde crisisbeheersing.

## **Overstromingen juli 2021 aanleiding voor een watersysteemanalyse**

In juli 2021 zijn grote delen van Limburg getroffen door hevige regenval. Dit leidde op verschillende plaatsen tot overstromingen en daarmee tot schade aan huizen en bedrijven. Het hoogwater riep veel vragen op. Om antwoord te kunnen geven op deze vragen is door Deltares in samenwerking met een aantal adviesbureaus, in opdracht van Waterschap Limburg en Provincie Limburg een zogeheten watersysteemanalyse uitgevoerd. Hierbij is eerst onderzocht hoe het watersysteem in Midden en Zuid-Limburg functioneert. Daarbij zijn vragen beantwoord zoals: Hoe stroomt het regenwater af naar de beken? Waar bevinden zich knelpunten? Daarna zijn mogelijke maatregelen verkend die genomen zouden kunnen worden om de kans op en/of de gevolgen van een overstroming te verkleinen. Deze verkenning richt zich op typen maatregelen waarbij op systeemniveau naar de effecten wordt gekeken.

## **Vier casestudies en een systeembrede analyse**

De eerste fase van de watersysteemanalyse bestond uit vier casestudies, waarbij is ingezoomd op vier locaties die in 2021 zijn overstroomd, maar die een zeer verschillende problematiek kenden. De bevindingen zijn eerder gerapporteerd in Asselman et al. (2022)<sup>1</sup>.

Dit rapport heeft betrekking op de tweede fase, namelijk de watersysteembrede analyse. Voor de stroomgebieden van de Geul, Geleenbeek en de Roer worden steeds drie vragen beantwoord:

1. Wat is er gebeurd in juli 2021?
2. Hoe functioneert het watersysteem als er extreem veel regen valt?
3. Welke typen maatregelen zijn mogelijk effectief voor het verkleinen van de kans op een overstroming of de gevolgen van een overstroming?

Bij de analyse is gekeken naar de afvoer en de waterstanden in en langs de drie beken. Voor twee kleine zijbeken van de Geul is een gedetailleerde analyse uitgevoerd naar het oppervlakkig afstromen van regenwater en de invloed van het landgebruik daarop. Ook is gekeken naar de opgetreden schade en de kans op slachtoffers. En er is een korte evaluatie uitgevoerd voor incidenten die zijn opgetreden aan waterkeringen langs de Maas.

---

<sup>1</sup> <https://www.waterschaplimburg.nl/actueel/nieuws/@7103/resultaten-case-studies-vier/>

## Wat is er gebeurd in juli 2021?

### Een grote hoeveelheid neerslag leidt tot extreme afvoeren en overstromingen

In juli 2021 is een grote hoeveelheid neerslag gevallen in de ruime omgeving van de Ardennen en de Eifel. In het stroomgebied van de Geul viel gemiddeld 128 mm in twee dagen. In het stroomgebied van de Geleenbeek viel 93 mm in twee dagen en in dat van de Roer viel in diezelfde periode een hoeveelheid van 106 mm. Lokaal zijn veel hogere neerslagsommen tot wel 175 mm gemeten, zoals ten zuidwesten van Heerlen. Het meetpunt Brommelen heeft de hoogste afvoer gehaald die ooit is gemeten.

De herhalingstijd van de neerslag die gevallen is in het stroomgebied van de Geul, wordt door het KNMI geschat op ongeveer 500 jaar<sup>2</sup>. De kans op zo'n gebeurtenis zal op den duur toenemen als gevolg van klimaatverandering. Het KNMI (Van Heeringen et al, 2022a) geeft aan dat de kans op een gebeurtenis zoals in juli 2021 drie keer groter kan zijn in 2050 en in 2085 zelfs zes keer groter zou kunnen zijn dan nu.

De grote hoeveelheid neerslag leidde tot recordafvoeren en overstromingen van veel beken en rivieren:

- De piekafvoer op de Geul bij Valkenburg is geschat op 135 m<sup>3</sup>/s, ongeveer 30 keer meer dan de gemiddelde afvoer. Ongeveer twee derde van dit water kwam uit België. Bij Meerssen, nabij de monding in de Maas, was de piekafvoer als gevolg van berging van water in het beekdal, afgenomen tot 110 m<sup>3</sup>/s. De herhalingstijd van deze afvoeren liggen tussen de 100 en 1000 jaar.
- De piekafvoer bij de monding van de Geleenbeek in de Maas was ruim 28 m<sup>3</sup>/s. Deze afvoer heeft een herhalingstijd van 1 jaar. Toch wil dat niet zeggen dat er in het stroomgebied van de Geleenbeek geen overlast is geweest. De grootste problemen deden zich echter voor door regenwater dat oppervlakkig afstroomde en lokale problemen met de afwatering en veel minder doordat de Geleenbeek zelf buiten zijn oevers trad. Overstromingen hebben zich hier met name voorgedaan in het bovenstroomse deel, in de regio Heerlen, in het bovenstrooms gelegen stroomgebied van de Caumerbeek. De afvoeren en waterstanden in dit deel van het stroomgebied waren veel extremer (herhalingstijden van meer dan 100 jaar) dan bij de monding in de Maas.
- De hoogte van de piekafvoer op de Roer bij de Duits-Nederlandse grens is moeilijk te bepalen geweest en daarmee erg onzeker. Een handmeting kwam uit op een afvoer van 260 m<sup>3</sup>/s, maar Duitse modelberekeningen komen uit op grotere afvoeren, tot wel 350 m<sup>3</sup>/s. De herhalingstijd is ruim meer dan 100 jaar. De stuwmeren in het zuidelijk deel van het stroomgebied in Duitsland hebben een aanzienlijk deel van de afvoer geborgen. Zonder deze stuwmeren had de Roer-afvoer in Nederland nog veel hoger kunnen zijn. De overstromingsvlaktes langs de Roer in Nederland bovenstrooms van Roermond hebben diep onder water gestaan. In Roermond waren de waterstanden extreem hoog, vooral als gevolg van het hoogwater op de Maas. Ondanks de hoge waterstanden zijn overstromingen hier beperkt gebleven tot de hockeyvelden van 'Concordia'.

---

<sup>2</sup> Een herhalingstijd van 500 jaar kan onterecht de indruk wekken dat zo'n gebeurtenis om de 500 jaar voorkomt. Bedoeld wordt echter dat de kans 1:500 per jaar is, ieder jaar weer. Zo is de kans om zes te gooien met een dobbelsteen bij iedere worp 1:6, maar kan ook meerdere keren na elkaar 6 worden gegooid.

### **Toch is maar een beperkt deel van de neerslag tot afstroming gekomen**

Voor het hele stroomgebied van de Geul geldt dat tijdens het hoogwater ongeveer 30% van de gevallen neerslag is afgevoerd naar de Maas. Uit berekeningen voor een tweetal zijbeken van de Geul in Nederland bleek dat daar 13% tot 20% van de neerslag direct is afgevoerd. In het Belgische deel van het stroomgebied is ruim 60% van de neerslag tot afstroming gekomen. Dit verschil komt doordat het Belgische deel van het stroomgebied dunnere bodems kent op slecht doorlatende gesteenten. Bovendien is er daar meer neerslag gevallen. De vergelijking die kan worden gemaakt is dat de ondergrond in Nederland kan worden vergeleken met een spons, die in België met een vaatdoek. Daar is bovendien meer water op uitgestort. De neerslag die niet tot afstroming is gekomen is geborgen in de bodem en in het (soms diepe) grondwater en komt pas later tot afstroming (dagen tot weken later). Daarom wordt geconcludeerd dat de sponswerking van het stroomgebied van de Geul aanzienlijk is. Wanneer het landgebruik zou veranderen naar minder natuur en grasland en meer akkerland en verhard (bebouwd, stedelijk) gebied, dan kan deze sponswerking sterk verminderen. De huidige sponswerking in het stroomgebied van de Geleenbeek is minder groot. Dit stroomgebied kent een veel grotere mate van verstedelijking. Het water kan daardoor minder goed in de bodem wegzakken. Dit leidt soms tot forse wateroverlast in stedelijk gebied (ondergelopen huizen en straten) als het heel hard en veel regent.

### **Overstromingen hebben geleid tot gevaarlijke omstandigheden en 433 miljoen euro schade**

Uit een overzicht van uitgekeerde schadevergoedingen blijkt dat de totale, vergoede schade als gevolg van het hoogwater van juli 2021 uitkomt op ongeveer 430 miljoen euro. Relatief veel schade is opgetreden in dorpen en steden langs de Geul (o.a. gemeenten Valkenburg a/d Geul en Meerssen). Ook in Heerlen (stroomgebied van de Geleenbeek) was sprake van veel schade. Tijdens het hoogwater zijn in Nederland gelukkig geen mensen verdrongen. Uit modelberekeningen blijkt dat de opgetreden condities (waterdiepte en stroomsnelheid) zo waren dat er ook in Nederland mensen hadden kunnen verdrinken.

### **Incidenten bij waterkeringen Maas**

Op verschillende locaties langs de Maas in Limburg was sprake van incidenten bij de waterkeringen. Op sommige locaties zijn zandzakken gelegd om te voorkomen dat water over de dijk heen zou stromen. Dit was niet verwacht omdat bij het beoordelen van de waterkeringen altijd wordt uitgegaan van een wintersituatie. In een zomersituatie zijn de uiterwaarden dichter begroeid. Daardoor is de ruwheid hoger en worden de waterstanden ook hoger. Op andere locaties zijn zogeheten 'wellen' waargenomen, waarvan sommige zand mee voerden. Dit kan duiden op *piping*. Een wel ontstaat als er water onder de dijk doorstroomt. Er kan dan zand mee worden gevoerd, waardoor de dijk uiteindelijk kan bezwijken. Op basis van de beoordeling van de waterkeringen zou men meer zandmeevoerende wellen hebben kunnen verwachten. Uit een aantal analyses blijkt dat de kans hierop bij de beoordeling soms wordt overschat, onder andere doordat conservatieve aannamen worden gedaan over doorlopende zandlagen onder de dijk en de stroming daardoor, en over de aanwezige voorlanden (uiterwaarden) tussen de Maas en de dijk.

### **Hoe functioneert het watersysteem als er veel regen valt?**

#### **In de winter had dezelfde hoeveelheid neerslag tot nog hogere afvoeren geleid**

Uit gedetailleerde simulaties van afstroming van regenwater voor twee zijbeken van de Geul is gebleken dat de (groten)deels begroeide akkers in de zomer er voor hebben gezorgd dat meer water in de bodem is weggezakt. Wanneer de neerslag van juli 2021 in de winter zou zijn gevallen, dan had dat tot meer afvoer geleid. Zeker wanneer dat zou gebeuren op een deels bevroren ondergrond, of op smeltende sneeuw.

De relatief dichte begroeiing langs de beken in de zomer heeft ook gezorgd voor meer berging van water in de beekdalen zelf. De afname van de piekafvoer die is berekend voor de Geul tussen Valkenburg en Meerssen zou in de winter minder zijn geweest. De berekeningen voor de Roer lieten eveneens zien dat het afvlakken van de afvoerpiek tussen de Duitse grens en Roermond veel groter is wanneer de overstromingsvlaktes ruwer (dichter begroeid) zijn.

### **Verharde gebieden verminderen de sponswerking**

Tijdens het hoogwater van juli 2021 is een groot deel van de neerslag in de bodem gezakt. Dat heeft een positief effect op de piekafvoeren. Berekeningen voor de Geul laten zien dat indien het hele stroomgebied verstedelijkt zou zijn, dat tot een drie keer hogere piekafvoer bij Valkenburg zou kunnen leiden.

### **De waterstanden bij de beekmondingen worden zeer sterk bepaald door de waterstand op de Maas**

Bij de Geulmonding bij Bunde neemt de afvoer door de sifon onder het Julianakanaal sterk af wanneer sprake is van hoogwater op de Maas. Dit leidt tot hogere waterstanden bovenstrooms van de sifon en kan leiden tot grootschalige overstromingen. Een vergelijkbare situatie doet zich voor bij de monding van de Geleenbeek. Ook daar wordt water via een sifon afgevoerd naar de Maas. Ook bij de Roermonding in Roermond worden de waterstanden vooral bepaald door de waterstanden op de Maas. Zolang er geen sprake is van hoogwater op de Maas kunnen hoge afvoeren op de Roer zonder problemen worden afgevoerd.

### **Schadegevaarkaarten laten zien dat het potentiële schaderisico langs de beken in Limburg vergelijkbaar is met buitendijkse gebieden langs de Maas**

De resultaten van de modelberekeningen zijn gebruikt om zogeheten gevaarkaarten te maken. Gevaarkaarten tonen voor iedere locatie een combinatie van de *kans* op een overstroming en de *intensiteit* van die overstroming (verwachte schade aan bijvoorbeeld woningen of de kans op slachtoffers). Gebieden die vaak en diep onder water lopen zijn het meest gevaarlijk, gebieden die zelden en ondiep overstromen zijn het minst gevaarlijk. Gevaarkaarten kunnen onder andere worden gebruikt om aan te geven in welke gebieden men beter niet kan bouwen.

Uit de schadegevaarkaarten blijkt dat de overstromingsvlakten langs de Roer het meest gevaarlijk zijn: deze gebieden overstromen relatief vaak en kunnen ook diep onder water komen te staan. Dit is ongetwijfeld de reden dat er geen dorpen zijn gebouwd in de overstromingsvlakte, waardoor het werkelijke risico (jaarlijkse schade als gevolg van overstromingen) beperkt is. Het gevaar in de overstromingsvlakten langs de Geul en de Geleenbeek is lager. Echter het gevaar is op veel plekken nog steeds vergelijkbaar met onder meer de buitendijkse gebieden langs de Maas.

### **Welke maatregelen zijn mogelijk effectief om de kans op of de gevolgen van een overstroming te verkleinen?**

#### **Om overstromingen bij dit soort neerslaggebeurtenissen te voorkomen zijn zeer ingrijpende maatregelen nodig in het watersysteem**

In het kader van de watersysteemanalyse zijn vijf typen generieke maatregelen verkend. Uit de modelberekeningen bleek dat veel van deze maatregelen wateroverlast kunnen verminderen, maar onvoldoende om een overstroming zoals in juli 2021 geheel te voorkomen.

- Water vasthouden: Wanneer maatregelen worden getroffen die er voor zorgen dat meer water in de bodem kan infiltreren, dan leidt dit tot minder hoge piekafvoer in de beken. Uit berekeningen voor de Geul blijkt dat wanneer in het hele stroomgebied 10 mm neerslag per dag extra zou kunnen infiltreren, dit in de hele Geul zou kunnen leiden tot 5 à 20 cm lagere waterstanden. Ter indicatie: in Valkenburg zouden waterstanden ongeveer 120 cm lager moeten zijn om overstromingen te voorkomen. Uit gedetailleerde berekeningen voor twee kleine deelstroomgebieden langs de Geul is gebleken dat het omzetten van al het akkerland (ongeveer 40% van het totale oppervlak in het stroomgebied) naar grasland, maximaal ongeveer 5 mm per dag aan extra infiltratie op kan leveren. Dit verschil is relatief klein, omdat akkers in juli relatief goed begroeid zijn, waardoor er meer water in de bodem kan infiltreren. Het verschil in infiltratie tussen kale akkers en grasland is groter. In een wintersituatie zou deze maatregel dus meer effect hebben. Duurzame akkerbouw (waarbij de bodemstructuur verbetert en het organische stof gehalte in de bodem toeneemt) leidt ook tot meer infiltratie. Maar het effect daarvan is minder groot dan bij een overgang naar grasland. Ook in stedelijk gebied kan de infiltratie worden verbeterd door aanleg van bijvoorbeeld wadi's en infiltratiezones, als ook het stimuleren van groene tuinen en het gebruik van regentonnen. Bossen bieden doorgaans de meeste mogelijkheden voor infiltratie.
- Waterberging in beekdalen op natuurlijke wijze: Water kan worden afgeremd en geborgen in de beekdalen. Op natuurlijke wijze kan dit onder andere door overstromingsvlakten te verruwen of door te zorgen dat een groter deel van de afvoer door de overstromingsvlakten stroomt in plaats van door de beek. Dit laatste kan bijvoorbeeld door de beekbodem lokaal te verhogen. Daar waar de overstromingsvlakten ruwer worden of de beekbodem wordt verhoogd, zullen de waterstanden omhoog gaan (afhankelijk van de locatie kan dit één tot enkele decimeters bedragen). Benedenstrooms nemen de waterstanden met enkele centimeters tot maximaal een paar decimeter af. Deze maatregel kan vooral worden overwogen op locaties waar hogere waterstanden niet tot extra schade leiden, in de bovenloop (haarvaten) van de beken, maar ook verder benedenstrooms.
- Waterberging in beekdalen op civieltechnische wijze: Water bergen in het beekdal kan ook op een meer 'civieltechnische' manier, bijvoorbeeld door drempels aan te leggen dwars op de rivier of retentiegebieden in te richten. Drempels houden het water bovenstrooms deels tegen. Afhankelijk van de hoogte van de drempel leidt dit tot een kleine of juist grote toename van de waterstanden direct bovenstrooms van deze drempel. Dit kan alleen op plekken waar ook ruimte daarvoor is. Benedenstrooms nemen de waterstanden echter af. De benedenstroomse waterstandsdeling is meestal kleiner dan de stijging bovenstrooms, maar is wel over een langer traject merkbaar. Ter indicatie: in juli werd ongeveer 5 miljoen m<sup>3</sup> geborgen in het beekdal van de Geul. Om overstromingen in Valkenburg in juli 2021 te voorkomen had ongeveer 10 miljoen m<sup>3</sup> water extra geborgen moeten worden. Dat komt neer op ongeveer 1400 voetbalvelden die 1 m onder water staan. De bergingsgebieden die in deze studie in de Geul zijn onderzocht hadden een gezamenlijk volume van 1 miljoen m<sup>3</sup>.
- Retentiegebieden: Voor de Roer is ook het effect van retentiegebieden onderzocht. Deze stromen pas bij zeer hoge waterstanden in, net voordat de piek wordt bereikt. Uit de analyses bleek dat het effect beperkt was; maximaal een aantal centimeters waterstandsdeling benedenstrooms. Het effect was bovendien erg onzeker: de retentiegebieden hebben alleen effect wanneer ze precies op het juiste moment instromen. Bij een iets hogere of lagere piekafvoer, een andere duur van het hoogwater of wanneer het hoogwater plaatsvindt in een ander seizoen, neemt het effect zeer sterk af.



- Verruimen van bruggen, duikers en overkluizingen<sup>3</sup> die opstuwing veroorzaken: In alle drie de beken bevinden zich bruggen, duikers en overkluizingen die lokaal voor opstuwing zorgen. Onderzocht is of de overstromingen (lokaal) afnemen wanneer de afvoercapaciteit op deze plekken zou worden vergroot. Bij de Geul en de Geleenbeek is uitgegaan van een verdubbeling van het doorstroombaar maken van de landhoofden van de bruggen. In de meeste gevallen leidt deze maatregel tot ongeveer 5 cm lagere waterstanden bovenstrooms van de ingreep. Lokaal kan dit oplopen tot 20 cm (o.a. direct bovenstrooms van de brug bij Vlodrop in de Roer en de overkluizingen in Sittard in de Geleenbeek). Benedenstrooms nemen de waterstanden echter een paar centimeter toe. Deze maatregel kan dus helpen om het overstromingsgevaar lokaal te verminderen. Echter, voordat men tot de uitvoering over gaat moet eerst goed worden onderzocht wat het effect is op benedenstrooms gelegen gebieden; er kan sprake zijn van afwentelen.
- Aanleg van kades: Overstromingen kunnen ook worden voorkomen door kades en dijken aan te leggen. Langs de Geul zouden de kades erg hoog moeten worden om overstroming tijdens een gebeurtenis zoals in juli 2021 te voorkomen (bijvoorbeeld 1,5 m hoge kades bij Wijlre en 3,5 m hoge kades in Valkenburg). Bovendien zorgen deze kades er soms voor dat de afvoercapaciteit ter plekke sterk afneemt. Dit leidt tot opstuwing en vaak wel een meter hogere waterstanden tot een paar kilometer *bovenstrooms*. Langs de Geleenbeek leiden kades in Sittard ook tot iets hogere waterstanden *benedenstrooms*. Doordat het overstromd gebied kleiner wordt, wordt de berging van water minder. Als gevolg hiervan gaan de waterstanden benedenstrooms met ongeveer 5 cm omhoog. Dit effect is merkbaar tot bij de monding in de Maas. Omdat hoge kades landschappelijk zeer ingrijpend zijn, is ook gekeken naar het effect van lagere (1,5 m hoge) kades. Wanneer dergelijke kades aanwezig zouden zijn geweest in Valkenburg tijdens het hoogwater van juli 2021 dan had dat juist geleid tot *grotere* waterdieptes in Valkenburg. Het water was in dat geval aan de bovenstroomse zijde over de kades heen gestroomd en had zich achter de kades verzameld (door de kades kan het water niet terugstromen naar de Geul). Dit probleem zou nog groter zijn wanneer bij de 3,5 m hoge kades sprake zou zijn van een doorbraak bovenstrooms. Kades kunnen het gevaar ook vergroten wanneer wateroverlast voornamelijk het gevolg is van lokaal beperkte drainage en afwatering, zoals bijvoorbeeld in de regio Heerlen op een aantal plaatsen het geval is. Het water dat wordt aangevoerd van de hogere delen kan dan niet weg door de kade. Bekend is ook dat kades bij doorbraak voor snelle stijging van waterstand kunnen leiden door het grote waterstandsverschil tussen de beek en het gebied achter de dijk. Dit vergroot de kans op slachtoffers, omdat er geen tijd is om een veilig heenkomen te vinden. Geconcludeerd wordt dat kades en dijken de kans op een overstroming kunnen verkleinen, maar ook zorgen voor afwenteling op gebieden boven- en benedenstrooms. Ook zijn er situaties waarbij kades het gevaar in het te beschermen gebied juist vergroten. Daarom moeten de effecten van een kade op een specifieke locatie altijd in meer detail worden onderzocht voordat men besluit om tot de aanleg over te gaan.
- Tijdelijke waterkeringen: Omdat overstromingen vanuit de Geleenbeek en de Roer in stedelijk gebied beperkt waren, lijken hier mogelijkheden voor de bescherming van individuele objecten (mogelijk ook met schotten in plaats van kades).

**Onderzochte maatregelen in het watersysteem kunnen overstromingen tijdens een gebeurtenis zoals in juli 2021 niet volledig voorkomen, maar kunnen wel degelijk bijdragen aan het verkleinen van het overstromingsgevaar**

Bij bovenstaande analyses lag de focus erg op de waterstandsdeling die nodig is om overstromingen bij een gebeurtenis zoals in juli 2021 zo veel mogelijk te voorkomen.

---

<sup>3</sup> Bij een overkluizing is een beek onder de grond gelegd en stroomt het water afgevoerd door een buis

Bij een dergelijke gebeurtenis zullen de onderzochte maatregelen de overstromingsdieptes wel verkleinen, maar niet tot nul reduceren. Bij minder extreme gebeurtenissen, met minder neerslag, zullen maatregelen die bijdragen aan het vasthouden van water in de bodem, in regenwaterbuffers of in het beekdal, relatief gezien effectiever zijn. Maatregelen die de infiltratie bevorderen en die de berging in het beekstelsysteem vergroten zijn dus altijd nuttig. Daar komt bij dat het overstromingsgevaar als gevolg van klimaatverandering verder toe zal nemen. Dit soort maatregelen kunnen helpen om de effecten van klimaatverandering (vaker hevige buien) deels te compenseren.

### **Inzetten op gevolgbeperking**

Maatregelen in het watersysteem (de opsomming hierboven) hebben vooral tot doel om de kans op een overstroming of de intensiteit van een overstroming te verkleinen. Met de nu verkende maatregelen kan de kans op een overstroming onder extreem natte omstandigheden zoals in juli 2021, slechts in beperkte mate worden verkleind. Omdat overstromingen sowieso nooit helemaal kunnen worden voorkomen (ook niet wanneer grootschalige maatregelen worden getroffen), zijn aanvullende maatregelen essentieel om de gevolgen van een eventuele overstroming te beperken. Hierbij moet men denken aan:

- Maatregelen in de ruimtelijke ordening (ruimtelijke adaptatie): besluiten om niet te bouwen in gebieden met een groot overstromingsgevaar, zoals de overstromingsvlaktes langs de Roer en de meest lage delen in de overstromingsvlaktes van de Geul en de Geleenbeek. In minder gevaarlijke gebieden die minder vaak en minder diep onder water lopen zou men aangepast moeten bouwen, zodat de schade in geval van overstroming beperkt blijft.
- Verbetering van het water- of risicobewustzijn van burgers: als burgers zich bewust zijn van het overstromingsgevaar en weten hoe zij moeten handelen in geval van een overstroming, dan kan dat de schade en zeker ook de kans op slachtoffers, fors verkleinen.
- Verbetering van de crisisbeheersing: goede hoogwatervoorspellings- en waarschuwingssystemen, evacuatieplannen waarbij rekening is gehouden met gevaarlijke plekken (welke straten als eerste evacueren en/of afzetten voor publiek?), oefeningen, maar ook aan goede informatievoorziening richting burgers tijdens een ramp.
- Inzetten op een snel herstel: gevolgen kunnen worden beperkt wanneer bedrijven snel weer open kunnen. Bij het herstel kan men ook aanpassingen doorvoeren waardoor de kwetsbaarheid afneemt. Dit geldt voor bruggen (zo herbouwen dat ze minder opstuwing geven), maar ook voor woningen, bijvoorbeeld door de begane grond slechts te gebruiken als schuur of parkeerplaats, of door er tegels in plaats van parket te leggen (*building back better*).

### **Vervolgstappen om te komen tot maatregelen die gerealiseerd kunnen worden**

Deze watersysteemanalyse beperkt zich tot een uitgebreide verkenning van het probleem (hoe groot is het overstromingsgevaar langs de beken in Zuid-Limburg nu en in de toekomst bij een veranderend klimaat?) en een eerste verkenning van *typen* maatregelen op *systeemniveau*. De verkenning geeft inzicht in de omvang van de effectiviteit van de diverse type maatregelen. Om te komen tot maatregelen die uitgevoerd kunnen worden is een aantal vervolgstappen nodig. Zo moeten de maatregelen locatiespecifiek worden gemaakt en moet voor die locatiespecifieke maatregelen in meer detail naar de effecten worden gekeken. Dergelijk gedetailleerd onderzoek maakte geen deel uit van deze studie, maar zullen in het vervolgtraject vanuit het programma Waterveiligheid en Ruimte Limburg (WRL) worden opgepakt.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>14</b>
1.1	Hoogwater in juli 2021 aanleiding voor een watersysteemanalyse	14
1.2	Opzet van de systeemanalyse	15
1.3	Dit rapport	16
<b>2</b>	<b>Aanpak op hoofdlijnen</b>	<b>19</b>
2.1	Inleiding	19
2.2	Fact finding: wat is er gebeurd in juli 2021?	19
2.3	Systeembegrip: Hoe functioneert het watersysteem onder extreem natte condities?	20
2.4	Maatregelen: wat voor type maatregelen zouden bij kunnen dragen aan het verkleinen van het overstromingsrisico in Zuid-Limburg?	21
<b>3</b>	<b>Het watersysteem in Midden- en Zuid-Limburg</b>	<b>23</b>
3.1	Het studiegebied	23
3.2	Hydrologische werking	26
<b>4</b>	<b>Extreem veel neerslag</b>	<b>29</b>
4.1	In juli lokaal meer dan 175 mm neerslag in 48 uur	29
4.2	Herhalingstijd gevallen neerslag varieert ruimtelijk van 10 tot meer dan 1000 jaar	31
<b>5</b>	<b>Geul</b>	<b>33</b>
5.1	Inleiding	33
5.2	Het stroomgebied van de Geul	33
5.3	Wat is er gebeurd in juli 2021?	35
5.3.1	Piekafvoer 30 keer hoger dan gemiddeld	35
5.3.2	Herhalingstijd geschat op meer dan 100 jaar	36
5.3.3	Grootschalige overstromingen langs de hele Geul	37
5.4	Hoe functioneert het systeem onder natte omstandigheden?	38
5.5	Maatregelen	39
5.5.1	Vasthouden van water bovenstrooms	39
5.5.2	Bergen van water door verruwing van de overstromingsvlakten	42
5.5.3	Bergen van water door de aanleg van drempels dwars op de beek	43
5.5.4	Afvoeren van water door knelpunten te verruimen	46
5.5.5	Beschermen van bebouwde gebieden met kades	48
5.6	Conclusies	51
<b>6</b>	<b>Geleenbeek</b>	<b>54</b>
6.1	Inleiding	54

6.2	Het stroomgebied van de Geleenbeek	54
6.3	Wat is er gebeurd in juli 2021?	55
6.4	Hoe functioneert het systeem onder natte omstandigheden?	56
6.5	Maatregelen	58
6.5.1	Vasthouden van water bovenstrooms	58
6.5.2	Bergen van water door verruwing van de overstromingsvlakten	61
6.5.3	Bergen van water door inzet van waterbergingsgebieden	62
6.5.4	Afvoeren van water door knelpunten te verruimen	63
6.5.5	Beschermen van bebouwde gebieden met kades	64
6.6	Conclusies	66
<b>7</b>	<b>Roer</b>	<b>68</b>
7.1	Inleiding	68
7.2	Het stroomgebied van de Roer en de monding in de Maas	68
7.3	Wat is er gebeurd in juli 2021?	72
7.4	Hoe functioneert het systeem onder natte omstandigheden?	74
7.5	Maatregelen	75
7.5.1	Vasthouden van water bovenstrooms	75
7.5.2	Bergen van water door verruwing van de overstromingsvlakten in Nederland	75
7.5.3	Bergen van water door inzet van retentiegebieden	77
7.5.4	Bergen van water door andere civieltechnische maatregelen	79
7.5.5	Afvoeren van water door bruggen te verruimen	79
7.5.6	Afvoeren van water via de Roer-overlaat (ook wel Groene Rivier genoemd)	81
7.5.7	Beschermen van bebouwde gebieden met kades	83
7.6	Conclusies	85
<b>8</b>	<b>Oppervlakkige afstroming van regenwater in meer detail</b>	<b>88</b>
8.1	Inleiding	88
8.2	Het stroomgebied Ransdaal en het stroomgebied van de Strabeker Vloedgraaf	88
8.3	Wat is er gebeurd in juli 2021?	90
8.4	Hoe functioneert het systeem onder natte omstandigheden?	91
8.5	Maatregelen	92
8.5.1	Inleiding	92
8.5.2	Strabeker Vloedgraaf	92
8.5.3	Ransdaal	94
8.6	Conclusies	98
<b>9</b>	<b>Bescherming tegen overstromen – waterkeringen langs de Maas</b>	<b>100</b>
9.1	Inleiding	100
9.2	Wat is er gebeurd in juli 2021?	100
9.3	Komen locaties met incidenten overeen met bekende ‘zwakke plekken’ op basis van de beoordeling?	103
9.4	Waarom zijn waargenomen incidenten wel of juist niet in overeenstemming met de beoordeling?	104

9.4.1	Aasterberg (dijktraject 82-1)	104
9.4.2	Ohé & Laak – Stevensweert (dijktraject 81-1)	106
9.4.3	Nattenhoven – Roosteren (dijktraject 83-1)	108
9.4.4	Merem Ool Herten (dijktraject 77-1)	108
9.5	Conclusies	110
<b>10</b>	<b>Overstromingsgevaar en de gevolgen van overstromingen</b>	<b>112</b>
10.1	Inleiding	112
10.2	Wat is er gebeurd in juli 2021?	114
10.2.1	Economische schade	114
10.2.2	Kans op slachtoffers – een detailstudie voor Valkenburg	118
10.3	Hoe functioneert het systeem onder natte omstandigheden: hoe groot is het overstromingsgevaar?	123
10.3.1	Inleiding	123
10.3.2	Schadegevaar (potentieel schaderisico indien gebieden worden bebouwd)	124
10.3.3	Verdrinkingsgevaar	126
10.4	Maatregelen om de gevolgen te beperken	128
10.5	Conclusies	129
<b>11</b>	<b>Synthese: overstromingen voorkomen is lastig – inzetten op het beperken van gevolgen</b>	<b>130</b>
<b>12</b>	<b>Aanbevelingen - Van een 'eerste verkenning van maatregelen op systeemniveau' naar 'de schop in de grond'</b>	<b>134</b>
12.1	Vervolgstappen	134
12.2	Maatregelen om nader te verkennen	134
12.3	Gebruik van data en modellen	137
12.4	Kennisleemtes	138
<b>13</b>	<b>Conclusies</b>	<b>139</b>
13.1	Antwoord op de hoofdvragen	139
13.2	Conclusies per onderdeel	142
<b>14</b>	<b>Referenties</b>	<b>148</b>
14.1	Rapporten die deel uitmaken van de watersysteemanalyse	148
14.1.1	Rapporten casestudies (Fase 1 van de watersysteemanalyse)	148
14.1.2	Rapporten systeembrede analyse (Fase 2 van de watersysteemanalyse)	148
14.2	Overige referenties	149

# 1 Inleiding

## 1.1 Hoogwater in juli 2021 aanleiding voor een watersysteemanalyse

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

Het hoogwater riep, zowel bij bewoners als bij instanties zoals gemeenten, Waterschap Limburg en Provincie Limburg, veel vragen op. Hoe uitzonderlijk of extreem was deze neerslaggebeurtenis? Wat gebeurt er als er zoveel regen valt dat de beken het niet meer kunnen afvoeren? Op welke plekken zorgt dit voor wateroverlast of zelfs grootschalige overstromingen? En wat voor maatregelen zouden er getroffen kunnen worden om de kans op overstromingen en de omvang van de schade in de toekomst te verkleinen?

Om antwoord te kunnen geven op deze vragen, is een watersysteemanalyse uitgevoerd. Hierbij is onderzocht hoe het watersysteem in Zuid-Limburg functioneert. Hoe stroomt het regenwater af naar de beken? Waar bevinden zich knelpunten? Daarna worden mogelijke maatregelen verkend die genomen zouden kunnen worden om de overstromingsrisico's te verkleinen.

Het opdrachtgeverschap lag bij Waterschap Limburg en Provincie Limburg. De uitwerking heeft plaatsgevonden door Deltares, met medewerking van Universiteit Twente en adviesbureaus RHDHV, HKV, Witteveen & Bos en HydroConsult. Daarbij is gebruik gemaakt van waarnemingen van bewoners, beschikbare metingen (gevallen neerslag, afvoeren en waterstanden in beken) en modelberekeningen.

De volgende drie vragen vormen de basis voor de watersysteemanalyse:

- 1 **Wat is er gebeurd in juli 2021?** Hoeveel neerslag is toen gevallen? Hoeveel water werd er afgevoerd door de verschillende beken? Waar leidde dit tot gevaarlijke situaties of overstromingen? En hoeveel schade is er geweest?
- 2 **Hoe functioneert het systeem onder (zeer) natte omstandigheden?** Bijvoorbeeld, hoe groot zouden de problemen zijn geweest wanneer sprake was geweest van een minder extreme bui? Had dit tot vergelijkbare overstromingen geleid? En op dezelfde locaties? Of waren de problemen dan van een heel andere aard?
- 3 **Welke maatregelen zouden bij kunnen dragen aan het verkleinen van de kans op een overstroming of aan het beperken van de schade?** Is het mogelijk om water bovenstrooms beter vast te houden, bijvoorbeeld door er voor te zorgen dat het water beter in de bodem kan wegzakken, of door regenwaterbuffers aan te leggen? Wat kunnen we doen om te zorgen dat de beken deze grote hoeveelheden water beter af kunnen voeren, zonder dat ze overstromen? Of kunnen we gebieden anders inrichten, zodat er minder schade is wanneer de beken buiten hun oevers treden?

Deze centrale vragen zijn beantwoord door middel van een beschrijving van het (zuidelijke) Limburgse watersysteem (hoofdstuk 3), een analyse van de neerslag (hoofdstuk 4), de specifieke condities en gebeurtenissen in de verschillende individuele beken (hoofdstukken 5 t/m 7) en meer gedetailleerde analyses in kleine deelgebieden (hoofdstuk 8), de omstandigheden langs de Maas (hoofdstuk 9) en ten slotte vanuit het oogpunt van overstromingsgevaar en de consequenties van de overstromingen (hoofdstuk 10).

De Maas maakt beperkt deel uit van het hier bestudeerde watersysteem in die zin dat we alleen kijken naar de interactie met de beekmondingen en de waterkeringen die in beheer zijn bij het waterschap. De 'systeemanalyse' van de Maas zelf maakt deel uit van de landelijke beleidstafel wateroverlast en hoogwater (Beleidstafel Wateroverlast en Hoogwater, december 2022).

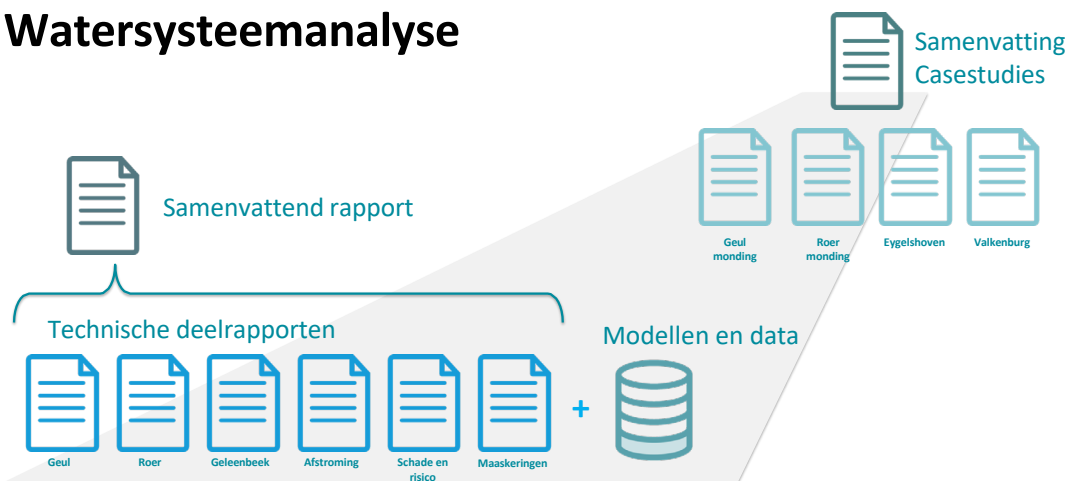
De watersysteemanalyse heeft betrekking op de beeksystemen in het zuiden en midden van Limburg. Het gaat daarbij niet alleen over de beken zelf, maar ook de hele stroomgebieden die bijdragen aan de aanvoer van water naar deze beken, inclusief de delen die in België of Duitsland liggen. We beperken ons tot de beken in het midden en zuiden van Limburg, waar zich in juli 2021 problemen hebben voor gedaan als gevolg van grote hoeveelheden neerslag. Dit zijn stroomgebieden van de Geul, de Geleenbeek en de Roer.

De inventarisatie van mogelijk effectieve maatregelen heeft vooral betrekking op typen maatregelen. We zoomen niet in naar objectniveau en onderzoeken daarmee geen maatregelen om een specifiek object te beschermen of schade in een specifieke straat te voorkomen. Ook worden geen maatregelpakketten doorgerekend met verschillende combinaties van typen maatregelen. Deze eerste verkenning van mogelijke maatregelen op systeemniveau is dus vooral bedoeld om een beeld te krijgen van maatregelen die meer of minder kansrijk zijn. Er is vervolgonderzoek nodig om te komen tot concrete ontwerpen voor locatiespecifieke maatregelen. De resultaten van dit onderzoek zijn de bouwstenen voor deze nadere uitwerking die opgepakt is door de samenwerkende overheden (provincie, waterschap en gemeenten) in het programma Waterveiligheid en Ruimte Limburg (WRL).

## 1.2 Opzet van de systeemanalyse

De watersysteemanalyse is uitgevoerd in twee fasen. In de eerste fase is gestart met vier casestudies. Deze casestudies hadden betrekking op de overstromingen van juli 2021 langs de Geul in Valkenburg en bij de monding van de Geul in de Maas, het hoogwater op de Roer bij Roermond en de extreme neerslag in juni 2021 die tot forse wateroverlast leidde in Eygelshoven (zie producten rechtsboven in Figuur 1.1). De analyses voor de casestudies waren vooral bedoeld om een eerste beeld te krijgen van het functioneren van het watersysteem in Limburg bij hevige neerslag en de verschillende soorten wateroverlast en overstromingen die zich voor kunnen doen. De rapporten over de individuele casestudies zijn in het voorjaar van 2022 opgeleverd. Daarnaast is een overkoepelend (samenvattend) rapport opgesteld. Een overzicht van alle rapporten uit Fase 1 zijn te zien in de referenties (hoofdstuk 14.1).

# Watersysteemanalyse



Figuur 1.1 Opzet van de watersysteemanalyse

Na afronding van de casestudies is gestart met de systeembrede analyse (Fase 2). Deze analyse bestond uit zes deelonderzoeken. De eerste drie deelonderzoeken kijken naar het functioneren van de watersystemen van de Geul, Geleenbeek en de Roer. In een vierde studie is in meer detail gekeken naar de invloed van verschillen in landgebruik op de afvoer van regenwater. Een analyse van de economische schade en kans op slachtoffers was onderwerp van deelstudie vijf. In de zesde deelstudie is gekeken naar de incidenten die zijn waargenomen bij de waterkeringen langs de Maas. De uitgevoerde werkzaamheden zijn per deelstudie gerapporteerd in een technisch deelrapport. Voorliggend rapport is het overkoepelende samenvattende rapport van de gehele watersysteemanalyse.

## 1.3 Dit rapport

Voor ieder deelonderzoek zijn de uitgevoerde werkzaamheden en de resultaten beschreven en uitgewerkt in een afzonderlijke technisch-inhoudelijk rapport (een overzicht van alle rapporten is gegeven in hoofdstuk 14.1). Het voorliggende rapport geeft een overzicht van de belangrijkste bevindingen. Het is meer overkoepelend en daarmee technisch minder gedetailleerd dan de onderliggende rapporten. Conclusies uit de watersysteemanalyse worden in dit document verwoord en zijn daarmee leidend. De onderliggende rapporten hebben vooral als doel deze conclusies te onderbouwen en van feiten te voorzien.

Voordat we ingaan op de belangrijkste bevindingen uit de verschillende deelonderzoeken, geven we aan het eind van dit hoofdstuk een definitie van de belangrijkste begrippen. Hoofdstuk 2 bevat een korte beschrijving van de gevolgde aanpak. Een algemene beschrijving van het watersysteem in Zuid-Limburg is te vinden in hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 geeft een overzicht van de neerslag die gevallen is in juli 2021. We gaan in dat hoofdstuk ook in op de vraag hoe extreem deze neerslag was. De belangrijkste bevindingen van de watersysteemanalyse voor de Geul, de Geleenbeek en de Roer staan beschreven in hoofdstukken 5 t/m 7. De watersysteemanalyses voor de beeksystemen kennen een beperkt detailniveau. Om meer inzicht te krijgen in het proces van oppervlakkige afstroming is een gedetailleerdere analyse uitgevoerd voor twee deelstroomgebieden van de Geul. De resultaten van deze studie zijn te vinden in hoofdstuk 8. Hoofdstuk 9 geeft een overzicht van de belangrijkste bevindingen met betrekking tot het functioneren en de beoordeling van die waterkeringen. De nadruk in hoofdstuk 5 t/m 9 ligt op het functioneren van het watersysteem onder extreem natte omstandigheden en op de maatregelen die in het watersysteem getroffen zouden kunnen worden om het overstromingsrisico te beperken.



Overstromingsrisico's kunnen echter ook worden verkleind door de gevolgen te beperken, ofwel door de kans op schade en/of slachtoffers te verkleinen. Dit kan onder meer door aangepast te bouwen of door 'elders' te bouwen. Informatie over schade en de kans op slachtoffers is te vinden in hoofdstuk 10. Dit hoofdstuk bevat ook gevaarkaarten die gebruikt kunnen worden voor de communicatie met inwoners om zo de zelfredzaamheid te vergroten. Een tussentijdse samenvatting van de bevindingen (synthese) staat in hoofdstuk 11. Hoofdstuk 12 gaat kort in op de vervolgstappen. Een overzicht van de belangrijkste conclusies is te vinden in hoofdstuk 13.

#### Een toelichting op enkele relevante begrippen

Wanneer wordt gesproken over hoogwater en de bijkomende overstromingen, dan worden daarbij vaak begrippen gebruikt zoals overstromingskans of overstromingsrisico. In veel gevallen worden de termen correct gebruikt, maar niet altijd. Zo wordt soms gesproken over 'het risico op een overstroming' waar de kans op een overstroming wordt bedoeld. Omdat deze termen in dit rapport vaak worden gebruikt, geven we hier een definitie van de belangrijkste begrippen.

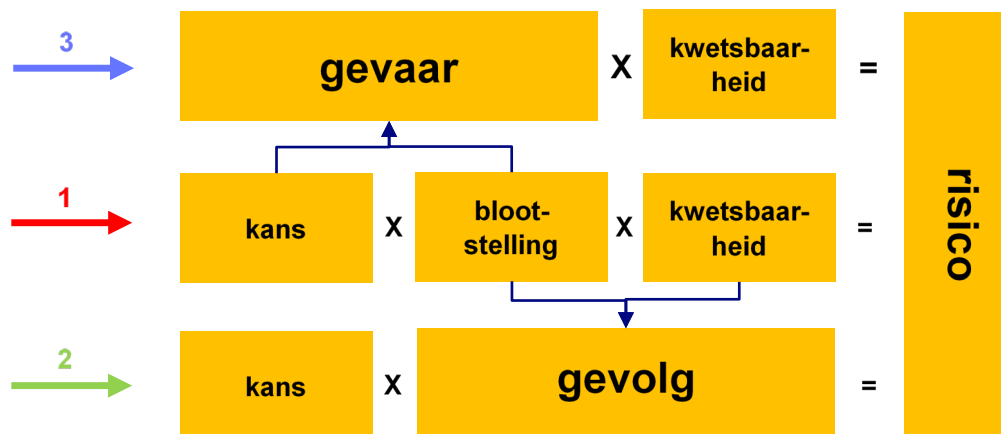
Het doel van de watersysteemanalyse is om te begrijpen hoe het watersysteem in Zuid-Limburg functioneert onder heel natte omstandigheden en om het effect van verschillende typen maatregelen te kwantificeren. Deze maatregelen zijn erop gericht om het overstromingsrisico in Zuid-Limburg te verkleinen. Het **overstromingsrisico** wordt uitgedrukt in termen van schade per jaar (euro's per jaar) óf slachtoffers per jaar (aantallen per jaar).

Het overstromingsrisico is een functie van de kans op een overstroming, de blootstelling en de kwetsbaarheid (zie de middelste regel in Figuur 1.2, aangegeven met de rode pijl en het cijfer 1).

- De **overstromingskans** wordt uitgedrukt als een kans per jaar en is afhankelijk van de kans op een hoogwater of (wanneer het gebied beschermd is door dijken) de kans op een dijkdoorbraak<sup>4</sup>. De overstromingskans kan toenemen als gevolg van klimaatverandering of afnemen o.a. als gevolg van dijkversterking.
- De **blootstelling** is afhankelijk van de kenmerken van een overstroming. Denk hierbij aan het overstroomd gebied, de optredende waterdieptes en stroomsnelheden. De blootstelling kan worden verkleind door maatregelen die het overstroomd oppervlak beperken (denk aan compartimentering) of de waterstanden en overstromingsdieptes verkleinen (denk daarbij onder andere aan rivierversmallingmaatregelen en noodoverloopgebieden).
- De **kwetsbaarheid** is afhankelijk van het landgebruik. Zo is natuur minder kwetsbaar dan gebouwen in een stedelijk gebied. De kwetsbaarheid van een gebied kan worden verkleind of beperkt door het type landgebruik aan te passen, bijvoorbeeld door er niet te bouwen. Echter, de kwetsbaarheid van bebouwd gebied kan ook worden verkleind door aangepast te bouwen. Denk dan aan drijvende woningen of woningen op palen. Het vergroten van de zelfredzaamheid van burgers, zodat zij weten hoe te handelen in geval van overstroming, kan eveneens bijdragen aan het verminderen van de kwetsbaarheid.

---

<sup>4</sup> Soms wordt een overstromingskans vertaald naar een herhalingsjijd. Wanneer de kans op een bepaald hoogwater is ingeschat op 1:100 per jaar wordt in dat geval gesteld dat deze gebeurtenis een herhalingsjijd heeft van 100 jaar. Het begrip herhalingsjijd kan echter onterecht de indruk wekken dat een dergelijke gebeurtenis ook echt om de 100 jaar voorkomt.



Figuur 1.2 Belangrijke begrippen bij het bepalen van het overstromingsrisico

In Nederland wordt het overstromingsrisico meestal bepaald aan de hand van de onderste formulering in Figuur 1.2 (groene pijl met nummer 2). Men probeert dan de kans op hoogwater of een dijkdoorbraak te berekenen en bepaalt met hydraulische modellen (die de blootstelling berekenen) en schademodellen hoe groot de gevolgen zijn. De **gevolgen** van een overstroming kunnen bestaan uit economische schade (uitgedrukt in euro's) of slachtoffers (aantallen). Bij economische schade gaat het om directe schade, zoals schade aan gebouwen en infrastructuur die in contact hebben gestaan met het water, maar ook om indirecte schade, bijvoorbeeld doordat werknemers niet naar het werk kunnen komen. Bij slachtoffers kijkt men meestal naar het aantal personen dat overlijdt als gevolg van een overstroming, maar het is ook mogelijk om naar het aantal getroffen personen te kijken. Dit zijn inwoners die niet zijn overleden, maar bij wie het huis of bedrijf wel onder water heeft gestaan.

Deze formulering wordt vaak gebruikt in gebieden die beschermd zijn door waterkeringen en in gebieden waar de focus van maatregelen ligt op het verkleinen van de kans op een overstroming, bijvoorbeeld middels dijkversterking of het vergroten van de afvoer- of bergingscapaciteit van het watersysteem.

De bovenste formulering (blauwe pijl met nummer 3 in Figuur 1.2) wordt vooral toegepast wanneer de focus ligt op de ruimtelijke ordening. De kans op een overstroming en de 'intensiteit' of kenmerken van die overstroming (blootstelling) worden dan samengenomen in het **overstromingsgevaar**. Het overstromingsgevaar wordt ook wel beschouwd als het potentiële risico. Het overstromingsgevaar kan groot zijn in gebieden die vaak en diep onderwater lopen. Echter, zo lang er geen mensen in dit gebied wonen of aanwezig zijn is het daadwerkelijke risico beperkt. Het overstromingsgevaar wordt gecombineerd met de kwetsbaarheid van het gebied om het risico te berekenen. Maatregelen in de ruimtelijk ordening zijn bij uitstek geschikt voor het beperken van de kwetsbaarheid.

Bij de watersysteemanalyses voor de Geul, Geleenbeek en de Roer wordt vooral gekeken naar het functioneren van het watersysteem. Er worden maatregelen verkend die vooral van invloed zijn op de kans op een overstroming en de kenmerken van overstromingen. In hoofdstuk 10 wordt deze kennis gecombineerd om het overstromingsgevaar te bepalen. In dit hoofdstuk wordt ook aandacht besteed aan maatregelen die er op gericht zijn om de kwetsbaarheid te verminderen.

## 2 Aanpak op hoofdlijnen

### 2.1 Inleiding

De watersysteemanalyse kent drie onderdelen met drie hoofdvragen:

1. **Fact finding**, met als hoofdvraag 'Wat is er gebeurd in juli 2021?'
2. **Vergroten systeembegrip** met als hoofdvraag 'Hoe functioneert het watersysteem onder extreem natte condities?'
3. **Eerste verkenning van mogelijke maatregelen** met als hoofdvraag 'Wat voor type maatregelen zouden bij kunnen dragen aan het verkleinen van het overstromingsrisico in Zuid-Limburg?'

Dit hoofdstuk geeft een korte beschrijving van de werkzaamheden die zijn uitgevoerd om deze drie vragen te kunnen beantwoorden.

### 2.2 Fact finding: wat is er gebeurd in juli 2021?

De vragen voor dit thema waren: Wat is er gebeurd in juli 2021? Hoe heeft het watersysteem toen gefunctioneerd? En wat waren de gevolgen?

#### **Gevallen neerslag**

Om antwoord te kunnen geven op deze vraag is gestart met een analyse van de meteorologische situatie. Vragen die daarbij beantwoord worden zijn:

- Hoe kwam het dat er zo veel neerslag viel in Limburg en in de aangrenzende gebieden in Duitsland en België?
- Hoeveel neerslag is er gevallen?
- Kan een schatting worden gemaakt van de herhalingstijd van deze gebeurtenis?

#### **Afvoeren en waterstanden**

Door Waterschap Limburg (WL) zijn metingen beschikbaar gesteld. Deze metingen bestonden uit waterstanden (gemeten op een beperkt aantal locaties in de beken, als ook markeringen in het veld tot hoe hoog het water was gekomen) en luchtfoto's waarop de overstroomde gebieden te zien waren.

Om een gebiedsdekkend beeld te krijgen van de afvoeren, waterstanden en overstroomde gebieden is gebruik gemaakt van reeds beschikbare hydrologische en hydraulische modellen. Er is geprobeerd om de beschikbare hydraulische modellen zo goed mogelijk af te regelen (te kalibreren) op basis van de metingen van juli 2021, maar het bleek niet mogelijk om de waterstanden op alle locaties volledig overeen te laten komen met de gemeten waterstanden in juli 2021. Ondanks deze beperking, kunnen de modellen waardevolle inzichten geven in het functioneren van het watersysteem onder natte omstandigheden, en in de effecten van mogelijke maatregelen. Echter, wanneer wordt ingezoomd op specifieke locaties, dan is het belangrijk dat men zich realiseert dat modellen altijd een (grote) benadering van de werkelijkheid blijven en dat berekende afvoeren en waterstanden onzekerheden kennen. Daarnaast hebben de gebruikte modellen vooral als doel om overstromingen vanuit de beken te simuleren en in mindere mate lokale wateroverlast als gevolg van lokale afwateringsproblemen.

### **Schade en kans op slachtoffers**

Om een beeld te krijgen van de opgetreden schade is er contact geweest met de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) en Bond van Verzekeraars. Beiden beschikken over gedetailleerde informatie over opgetreden en uitgekeerde schade door het hoogwater in de beken en langs de Maas. Verzekeraars hebben echter vanwege privacy redenen geen toestemming verleend om gedetailleerde informatie over de door hen vergoede schade te gebruiken. Informatie over de schadebedragen die zijn vergoed door RVO, zijn wel in deze studie verwerkt. Ook is gebruik gemaakt van de uitkomsten van enquêtes die zijn ontwikkeld door de Vrije Universiteit en Deltares en die zijn ingevuld door burgers en bedrijven in de getroffen gebieden (Endendijk et al., 2022).

### **Incidenten met waterkeringen**

Tijdens en na afloop van het hoogwater heeft Waterschap Limburg een database opgesteld met daarin een overzicht van locaties waar tijdens het hoogwater sprake was van een incident. Dit zijn locaties waar problemen zijn opgetreden met de waterkeringen, bijvoorbeeld doordat water over de kering heen stroomde naar het achterliggende gebied, maar ook locaties waar uit voorzorg maatregelen waren getroffen (bijvoorbeeld omdat het water bijna tot aan de kruin van de dijk kwam. Voor al deze locaties heeft Waterschap Limburg aan gegeven van wat voor soort probleem sprake was en wat voor maatregelen zijn getroffen om het op te lossen.

Binnen de watersysteemanalyse is de inventarisatie van Waterschap Limburg vergeleken met de eerder uitgevoerde beoordeling van de waterkeringen. Bij de beoordeling van de waterkeringen is voor alle dijkvakken en voor meerdere faalmechanismen gekeken of de waterkering aan de gestelde norm voldoet. Uit de beoordeling blijkt dus welke dijkvakken mogelijk problemen zouden kunnen krijgen de stabiliteit of waar de hoogte mogelijk onvoldoende zou kunnen zijn.

## **2.3      Systeembegrip: Hoe functioneert het watersysteem onder extreem natte condities?**

### **Afvoeren en waterstanden**

Om beter te begrijpen hoe het watersysteem in Zuid-Limburg werkt is een aantal modelberekeningen uitgevoerd. Zo is de werking van de beken in juli 2021 gesimuleerd en zijn ook minder extreme hoogwaters nagebootst, in dit geval met een herhalingstijd van respectievelijk 25 en 100 jaar, zowel voor het huidige klimaat als voor een klimaatscenario voor 2050. Voor al deze omstandigheden is berekend hoe hoog de afvoer van de beken wordt, welke waterstanden optreden en welke gebieden overstromen.

### **Schade en kans op slachtoffers**

Voor zowel juli 2021 als voor de minder extreme gebeurtenissen zijn kaarten gemaakt van de te verwachten (berekende) potentiële schade. De berekende potentiële schades bij verschillende overstromingsgebeurtenissen zijn gecombineerd tot schadegevaarkaarten. Deze kaarten laten zien in welke gebieden de kans op schade groot zou zijn of juist heel klein indien men in die gebieden zou bouwen. Dit is nuttige informatie voor de ruimtelijke ordening. Wanneer een gemeente uit wil breiden, dan kan men op deze kaarten zien op welke locaties men dat (rekening houdend met het overstromingsgevaar) beter niet kan doen. De kaarten zijn ook bruikbaar wanneer men (overheden, inwoners, bedrijven) invulling wil geven aan het begrip 'water en bodem sturend'.

In juli 2021 zijn in Nederland geen mensen verdronken. De vraag is echter of dit kwam doordat het verdrinkingsgevaar beperkt was, of doordat 'we geluk hebben gehad' en het wel degelijk tot de mogelijkheden behoorde. Om hier meer zicht op te krijgen is een gedetailleerd overstromingsmodel gemaakt van het centrum van Valkenburg. Met behulp van dit model is berekend hoe hoog het water kwam, hoe snel het water steeg en hoe hard het stroomde. Deze waarden zijn gebruikt om de kans op slachtoffers te berekenen. Er is ook een kaart gemaakt met het lokaal verdrinkingsgevaar. Deze kaart geeft aan hoe groot de theoretische kans is dat een persoon op die locatie zou overlijden wanneer hij of zij ook tijdens overstromingen op die plek zou blijven staan (en zichzelf dus niet veiligheid zou brengen). Deze kaart kan onder meer gebruikt worden bij het maken van evacuatieplannen en ook de ruimtelijke ordening.

### Incidenten met waterkeringen

Binnen de watersysteemanalyse is de inventarisatie van Waterschap Limburg vergeleken met de eerder uitgevoerde beoordeling van de waterkeringen. Bij de beoordeling van de waterkeringen is voor alle dijkvakken en voor meerdere faalmechanismen gekeken of de waterkering aan de gestelde norm voldoet. Uit de beoordeling blijkt dus welke dijkvakken mogelijk problemen zouden kunnen krijgen met de stabiliteit of waar de hoogte mogelijk onvoldoende zou kunnen zijn. Op basis van deze vergelijking zijn conclusies getrokken over onder meer de rekenmethoden die gebruikt worden bij de beoordeling van waterkeringen. Deze lessen zijn nuttig bij landelijke discussies over de beoordeling van waterkeringen.

## 2.4 Maatregelen: wat voor type maatregelen zouden bij kunnen dragen aan het verkleinen van het overstromingsrisico in Zuid-Limburg?

De deze hoofdvraag gaat het over welke typen maatregelen nu (op de korte-termijn), op de middellange-termijn en in de toekomst (lange-termijn) genomen kunnen worden om de risico's te beperken.

De focus bij dit thema ligt op het identificeren van type maatregelen die op meerdere locaties en onder verschillende omstandigheden (buien met uiteenlopende omvang en intensiteit en daarom met een verschillende kans van voorkomen, namelijk T25 en T100 voor het huidige en toekomstige klimaat in 2050) effectief kunnen zijn. Dit is onderzocht voor de drie beeksystemen. Maatregelen voor specifieke locaties zijn niet onderzocht. Er zijn ook geen maatregelpakketten opgesteld. Opstellen hiervan vraagt een nader en uitgebreid traject met de omgeving.

Voor alle drie de beeksystemen zijn de volgende typen maatregelen verkend (Figuur 2.1):

- Vasthouden: onderzocht is hoe de afvoeren en de waterstanden veranderen wanneer 5 mm of 10 mm neerslag per dag extra kan infiltreren. Dit kan worden gerealiseerd door een combinatie van ander landgebruik (bijvoorbeeld grasland of bos in plaats van akkerland) of door te zorgen dat meer regenwater in stedelijk gebied kan infiltreren.
- Bergen met behulp van *nature based solutions*: met deze maatregel wordt getracht om meer water in het beekdal vast te houden, bijvoorbeeld door de beekbodem omhoog te brengen (er gaat dan meer water door de overstromingsvlakte stromen, waar het water meer wordt afgeremd dan in de beek zelf) of door de overstromingsvlakten te verruwen (de ruwere vegetatie zorgt voor hogere waterstanden en daarmee ook voor meer berging van water in het beekdal).
- Bergen met behulp van civiel technische ingrepen: bij deze maatregel wordt meer water in het beekdal geborgen door drempels aan te leggen. Achter (bovenstreams) van de drempels kan meer water worden vast gehouden, waardoor de waterstanden benedenstreams van de drempels lager worden.

- Afvoeren: soms kan een sifon, brug of overkluizing voor opstuwning zorgen en daarmee zorgen voor extra schade. Bij deze maatregelen vergroten we de afvoercapaciteit van deze objecten, zodat het water makkelijker weg kan stromen en de waterstanden bovenstrooms lager zullen worden
- Beschermen: nagegaan is of bestaande woonkernen beschermd kunnen worden door dijken of kades aan te leggen.

Voor al deze typen maatregelen is op systeemniveau gekeken naar de effecten. Zo is in beeld gebracht hoe de afvoer verandert, waar waterstanden af- of juist toenemen en met hoeveel centimeter.



Figuur 2.1 Overzicht van de typen maatregelen die zijn verkend

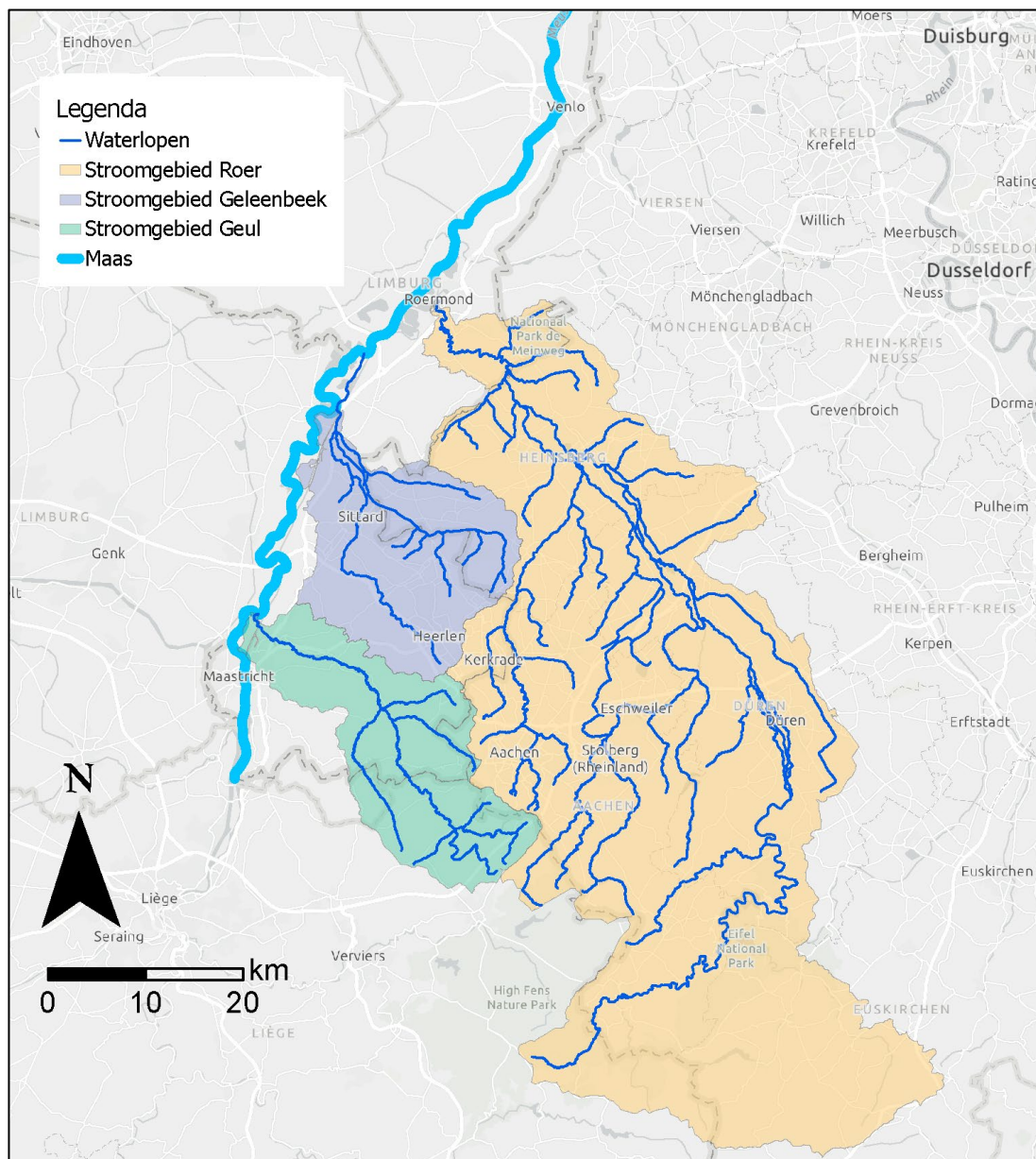
Alle maatregelen betreffen ingrepen in het watersysteem zelf. Ze zijn bedoeld om het overstromingsgevaar te verkleinen. Dat wil zeggen dat ze de kans op een overstroming en/of de ernst van een overstroming verkleinen (beperking van het overstroomd oppervlak, afname van de waterdieptes, etc.).

Er kunnen ook maatregelen worden getroffen om de gevolgen van een overstroming te verkleinen. Hierbij kan men denken aan maatregelen in de sfeer van de ruimtelijke ordening (RO), op gevaarlijke plaatsen niet dan wel aangepast bouwen, maar ook aan het vergroten van de zelfredzaamheid van burgers. Deze studie geeft informatie (waaronder kaarten) die gebruikt kan worden bij de RO, bij het maken van rampenbestrijdingsplannen en voor de communicatie met burgers.

# 3 Het watersysteem in Midden- en Zuid-Limburg

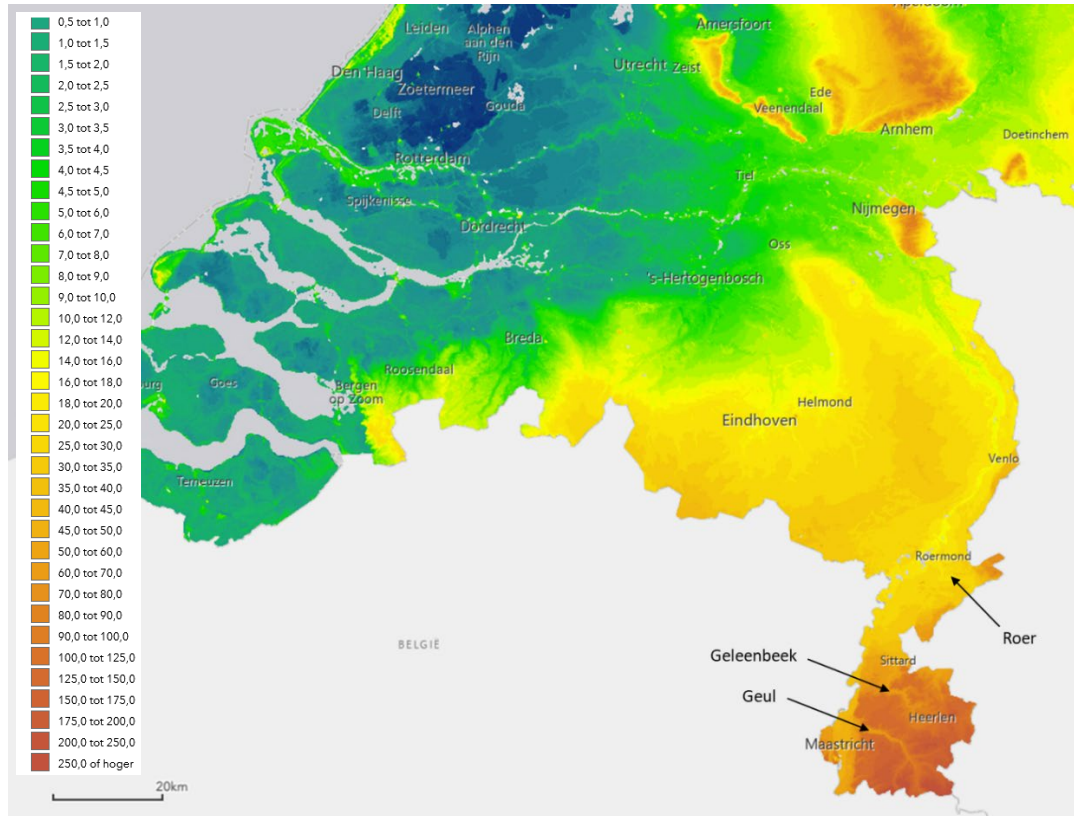
## 3.1 Het studiegebied

De watersysteemanalyse heeft betrekking op de stroomgebieden van de Geul, de Geleenbeek en het Nederlandse deel van de Roer (Figuur 3.1). Het stroomgebied van de Maas maakt geen deel uit van de watersysteemanalyse. De analyse beperkt zich hier tot een analyse van de waargenomen incidenten langs waterkeringen.



Figuur 3.1 Overzichtskaart van het Nederlandse traject van de Maas en de stroomgebieden van de Roer, Geleenbeek en Geul.

De Geul en de Geleenbeek bevinden zich in het Zuid-Limburgse heuvelland. De plateaus kennen een hoogte van NAP +100 m tot meer dan NAP +300 m (Figuur 3.2). De Geul en de Geleenbeek hebben zich diep ingesneden in deze plateaus<sup>5</sup>. Ten zuiden van het Limburgse heuvelland ligt het Belgische Ardennenmassief. De heuvels in dit gebied zijn nog hoger: hoogtes van NAP +500 m vormen geen uitzondering. In noordwestelijke richting neemt de hoogte af (zie Figuur 3.2). Het stroomgebied van de Roer ligt vooral in Duitsland, waar zich ook diverse stuwweren bevinden. De overstromingsvlakten langs het Nederlandse deel van de Roer liggen op en hoogte van NAP +20 m tot NAP +25 m.



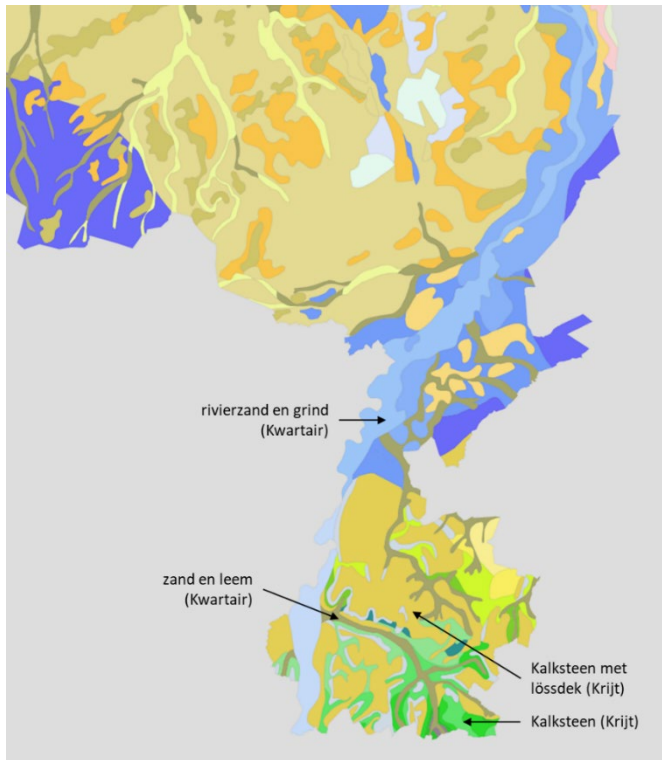
Figuur 3.2 Hoogteligging Limburg (bron: AHN4). Donkerblauw gekleurde gebieden liggen op NAP -6 m of lager. De overgang van groen naar geel duidt op een hoogte van ongeveer NAP +15 m. Donker oranje gekleurde gebieden hebben een hoogteligging van NAP +250 m of meer.

Figuur 3.3 toont de geologie van Limburg. In het zuidelijke heuvelland wordt de ondergrond gedomineerd door kalksteen uit het Krijttijdperk. Op de plateaus zijn deze afzettingen vaak bedekt met een laag löss. De beekdalen worden gekenmerkt door afzettingen van zand en leem. Verder naar het noorden en in het dal van de Maas bestaat de ondergrond vooral uit rivierzand en -grind.

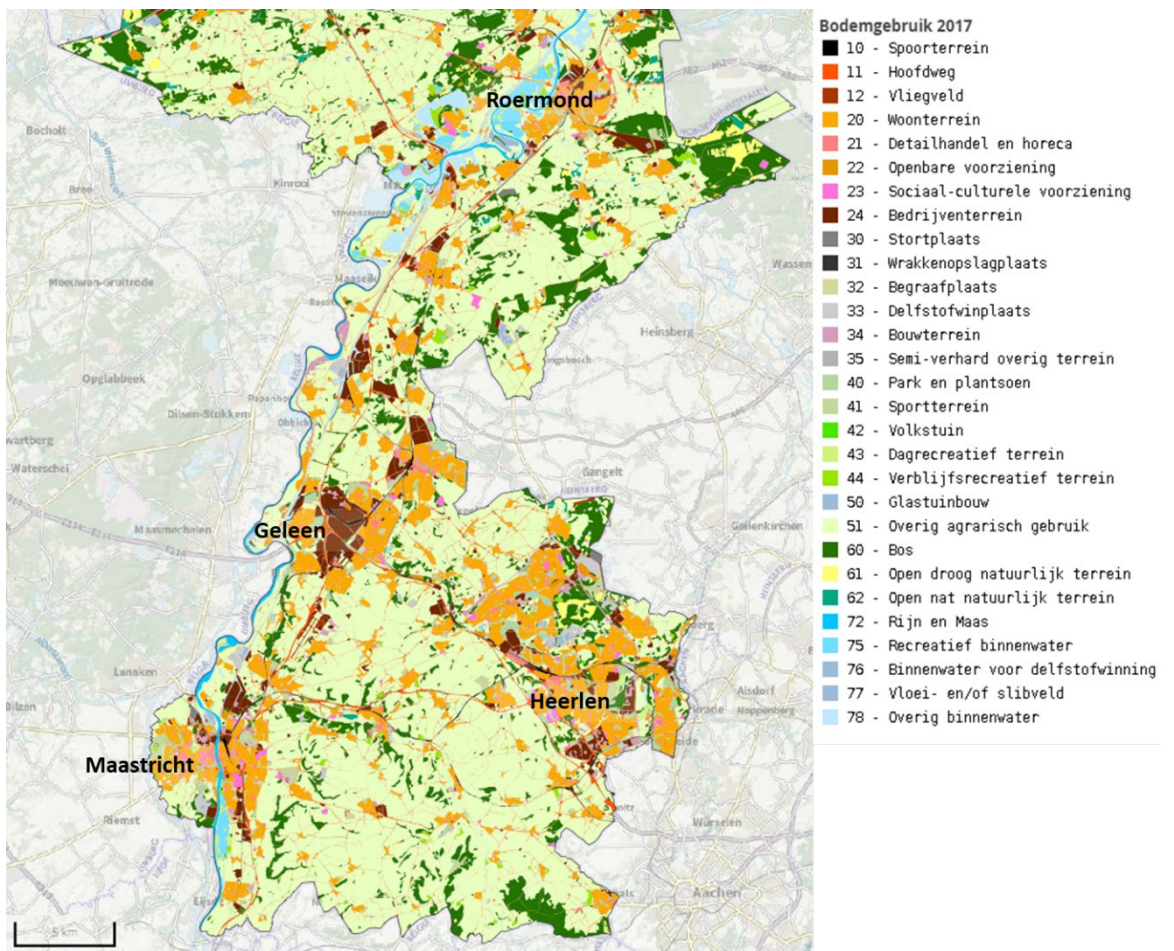
Kenmerkend landgebruik in Zuid-Limburg zijn stedelijke gebieden omringd door landbouwgebieden met lokaal ook bos (zie Figuur 3.4). Bossen liggen vaak op de sterk hellende dalwanden. Grote steden in het meest zuidelijke deel zijn Maastricht, Heerlen, Sittard en Geleen, en verder naar het noorden ligt de stad Roermond (oranje gebieden op de kaart). Met name in het stroomgebied van de Geul zijn grote oppervlakten in gebruik als landbouwgebied. Landbouwgebieden bestaan uit grasland, maar ook uit akkerland. Dit onderscheid wordt niet gemaakt in Figuur 3.4. Figuur 3.5 geeft een indruk van het Limburgse heuvelland.

<sup>5</sup> Gedetailleerdere hoogtekaartjes per beekstelsysteem zijn te vinden in de betreffende hoofdstukken.





Figuur 3.3 Schematische weergave geologie van Limburg (bron: <https://www.geologischekaart.nl/>)



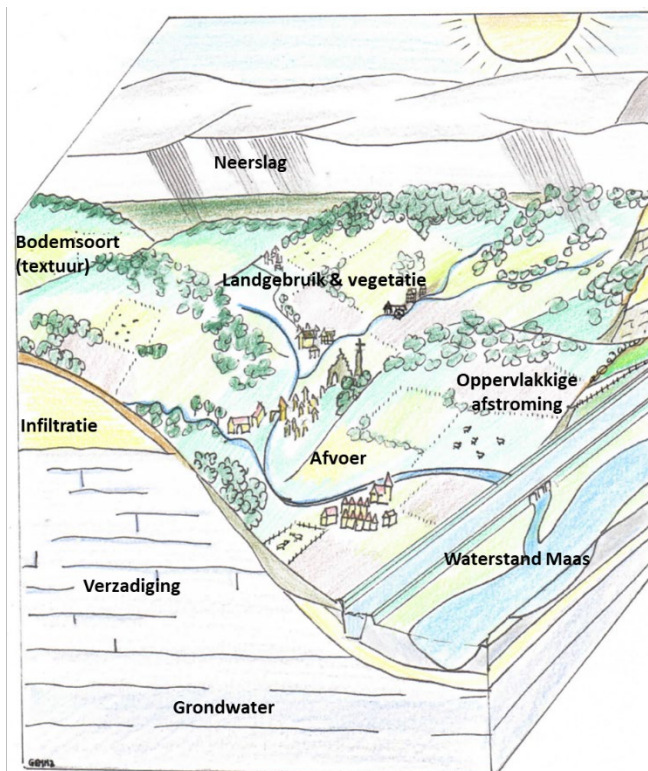
Figuur 3.4 Landgebruik in Midden- en Zuid-Limburg (bron: <https://portal.prvlimburg.nl/viewer/app/default>)



Figuur 3.5 Het Limburgse heuvelland (foto: G. Ramaekers)

### 3.2 Hydrologische werking

Aan de hand van het blokdiagram in Figuur 3.6 beschrijven we de hydrologische werking van de watersystemen in Zuid-Limburg.



Figuur 3.6 Schematische weergave Limburgs heuvelland met belangrijke onderdelen van de hydrologische processen (© Gemma Ramaekers)

### **Een deel van de neerslag zakt weg in de bodem**

Wanneer sprake is van (extreme) neerslag, dan zal een deel van dat water in de bodem zakken. Hoeveel en hoe snel water weg kan zakken is onder meer afhankelijk van de infiltratiecapaciteit en de mate waarin de bodem verzadigd is. De infiltratiecapaciteit is afhankelijk van het bodemtype. De bodem heeft hydrologische eigenschappen die afhangen van de korrelgrootteverdeling (textuur) en de bodemstructuur. Deze bepalen hoe doorlatend de bodem is, ofwel hoe snel het water in de bodem weg kan zakken, en hoeveel water er in de bodem kan worden opgeslagen voordat deze verzadigd is. De doorlatendheid van de bovengrond wordt echter ook beïnvloed door het landgebruik en de manier waarop de grond wordt bewerkt. Zo is de infiltratie groter onder bos dan onder weide of akkerland. Wanneer akkers onbegroeid of slechts gedeeltelijk begroeid zijn, treedt soms 'verkorsting' op. De bovengrond slaat als het ware dicht, waardoor het water veel moeilijker de bodem in kan dringen. Landbouw, waarbij onder meer wordt getracht het organische stofgehalte van de bodem te verhogen, kan de infiltratiecapaciteit verbeteren. Het minste water kan wegzakken in verharde gebieden, waaronder wegen, gebouwen, betegelde tuinen en verharde openbare terreinen. Daar zal het water bij stevige buien direct afstromen naar het riool en de beken.

Wanneer de intensiteit van de neerslag minder is dan de infiltratiecapaciteit van de bodem zal al het water in de bodem verdwijnen. Wanneer de neerslagintensiteit hoger is dan de infiltratiecapaciteit, dan zal een deel van de neerslag oppervlakkig afstromen. Dit kan ook gebeuren wanneer de neerslagintensiteit beperkt is, maar wel lang aanhoudt. De bodem raakt dan uiteindelijk verzadigd, waardoor alsnog sprake zal zijn van oppervlakkige afstroming.

### **Ondergrondse afstroming**

Een deel van het water dat wegzakt in de bodem kan net onder het oppervlak afstromen. Dit wordt ook wel *subsurface flow* genoemd. Waar afzettingen in de ondergrond zijn doorsneden door beken of dieper aangelegde wegen, kan dit water uittreden en alsnog oppervlakkig worden afgevoerd. In sommige gebieden wordt dit proces van ondergrondse afstroming versneld door de aanleg van drainagebuizen.

Een ander deel van het water dat in de bodem zakt wordt geborgen in het grondwater. In de beekdalen bevindt het grondwater zich vaak enkele meters beneden maaiveld, maar op de plateaus kan het grondwater soms wel 40 m diep zitten. In Zuid-Limburg stroomt het grondwater naar het noordwesten af. Deze stroming is echter erg langzaam en zorgt voor wateraanvoer naar de beken en de Maas nog maanden nadat sprake is geweest van hevige neerslag of een overstroming. Deze stroming kan dus voortduren tot in droge periodes.

### **Oppervlakkige afstroming**

Bij hoogwaters zoals in juli 2021 speelt oppervlakkige afstroming een belangrijke rol. Dit proces verloopt heel snel. Wanneer regenwaterbuffers (of andere maatregelen die zorgen voor een tijdelijke berging van het water) vol zijn of ontbreken, kan de neerslag snel over de hellingen afstromen naar de beken. Overstroming door afstromend regenwater wordt in het Engels *pluvial flooding* genoemd: overstromingen door regen. De oppervlakkige afstroming speelt een grote rol in verharde gebieden (woonkernen, wegen, etc.). Maar ook van verkorste of sterk hellende akkers kan bij hevige neerslag veel water afstromen.

### **Afvoer via de beken naar de Maas**

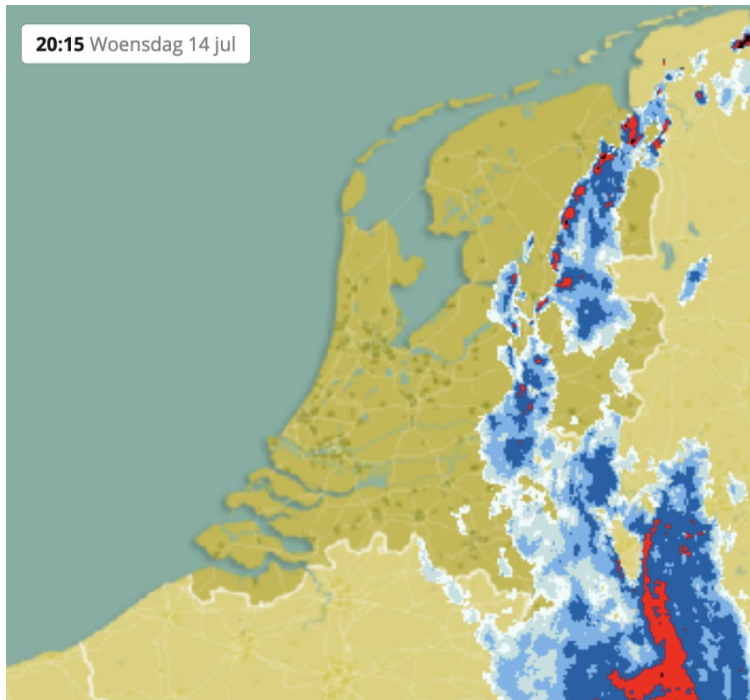
Het water verzamelt zich uiteindelijk in de beken en stroomt af naar de Maas. Aanvankelijk zal dit water in de hoofdgeul van de beek blijven, maar wanneer de afvoer verder toeneemt kunnen de beken buiten hun oevers treden. Dit kan leiden tot (grootschalige) overstromingen van landelijk, maar ook van stedelijk gebied. In het Engels noemen we dit *fluvial flooding*: overstromingen vanuit een beek of rivier.

In de benedenloop van de beken speelt de samenvloeiing met de Maas een belangrijke rol. Wanneer het zo hard regent in Zuid-Limburg dat de beken in dit gebied overstromen, is de kans groot dat het ook in de Ardennen hard heeft geregend. Met andere woorden, wanneer sprake is van een hoogwater in de beken in Zuid-Limburg, dan is de kans aanwezig dat ook sprake is van hoogwater op de Maas. Dit geldt met name bij grootschalige regengebieden zoals die in juli 2021 en minder bij lokale intensieve, zomerse buien. Wanneer ook sprake is van hoogwater op de Maas, ontstaat stremming op de plaatsen waar de beken in de Maas stromen. Waterstanden in de benedenloop van de beken nemen dan toe, wat kan leiden tot (grootschalige) overstromingen.

## 4 Extreem veel neerslag

### 4.1 In juli lokaal meer dan 175 mm neerslag in 48 uur

Tussen 13 en 15 juli 2021 is in het zuiden van Limburg, in de Ardennen en in de Eifel enorm veel neerslag gevallen. Hoeveel neerslag er precies waar valt is bij dergelijke gebeurtenissen moeilijk vast te stellen. Radarbeelden zoals te zien in Figuur 4.1 vormen de belangrijkste bron om te komen tot een gedetailleerd en gebiedsdekkend beeld van de gevallen neerslag.

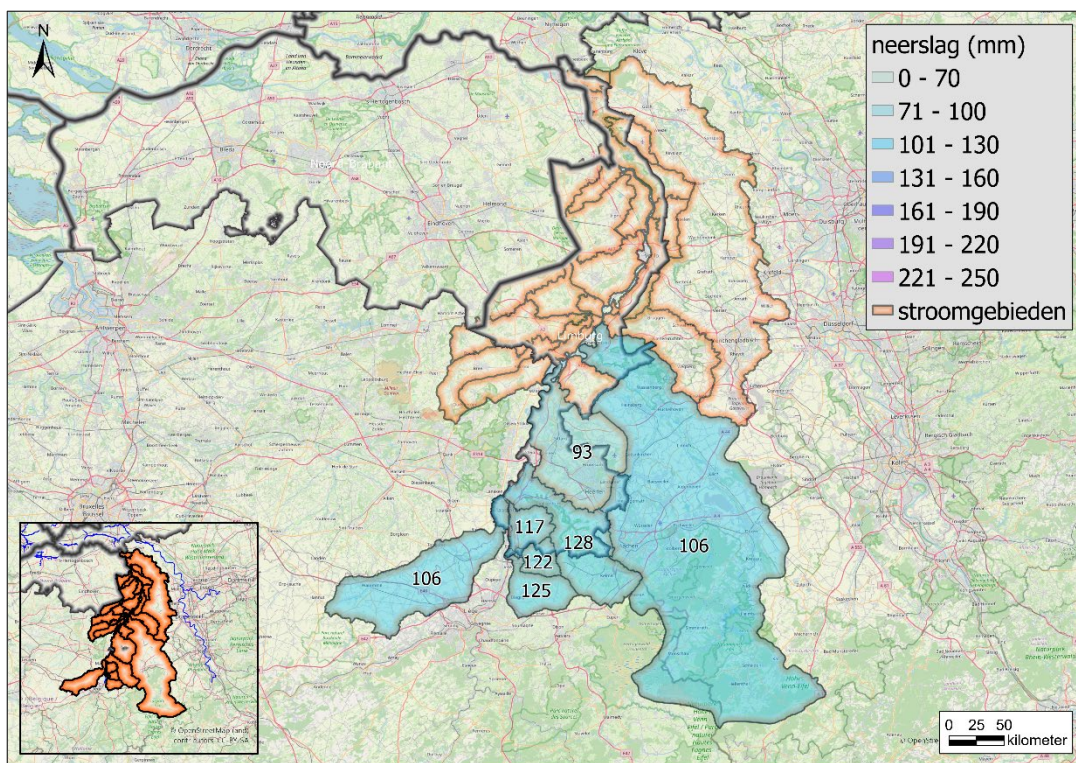
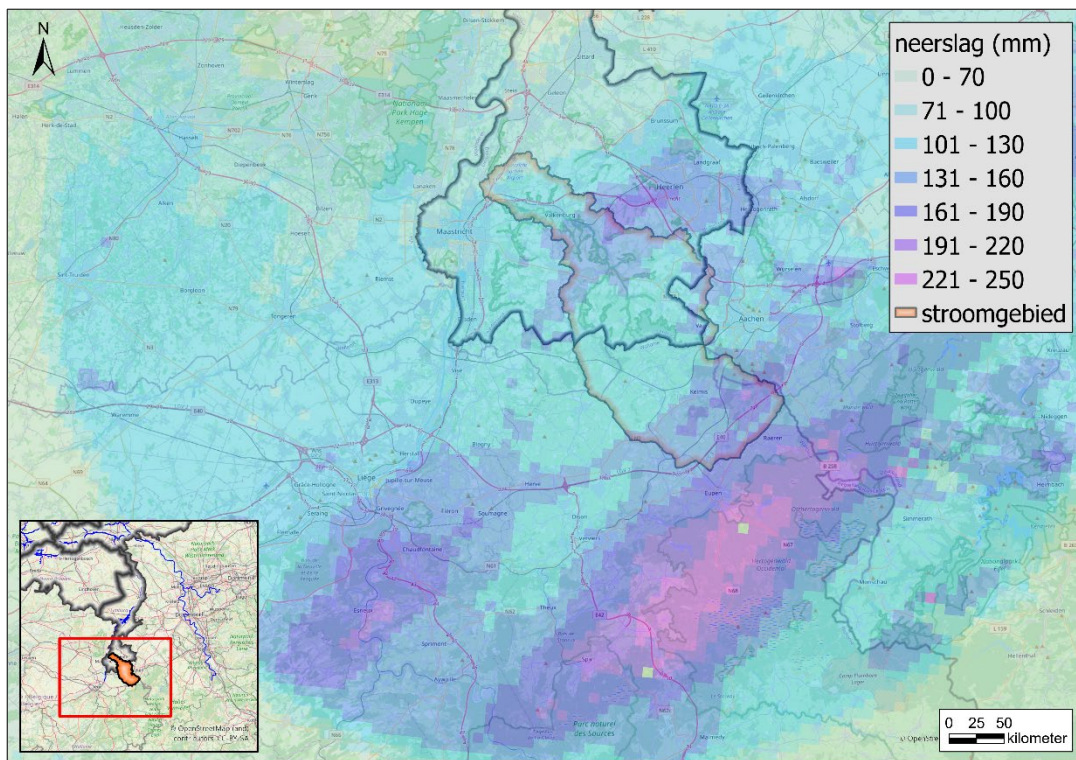


Figuur 4.1 Radarbeeld van woensdag 14 juli 2021, 20:15 uur (bron: Weeronline, 2021)

Omdat radarbeelden de gevallen neerslag meestal onderschatten, heeft het KNMI de radarbeelden gecorrigeerd met behulp van lokale weerstations. Voor juli 2021 is gebruik gemaakt van (op de grond) gemeten neerslaghoeveelheden van verschillende Nederlandse, Belgische en Duitse organisaties.

De gecorrigeerde radarbeelden zijn vervolgens gebruikt om de urneerslag per km<sup>2</sup> te bepalen. De urneerslagen zijn gebruikt om de neerslag per dag te berekenen (de 'dagsommen'). Het merendeel van de regen viel over twee dagen. Daarom is de totale hoeveelheid neerslag bepaald die tussen 13 juli 10:00 uur en 15 juli 10:00 uur is gevallen (de 48-uursom). De 48-uursom is te zien in Figuur 4.2. De bovenste figuur toont de neerslag per km<sup>2</sup>. Daaruit blijkt dat de meeste neerslag is gevallen in de Ardennen, in het stroomgebied van de Vesdre. Ook in het zuidelijk Waalse deel van het stroomgebied van de Geul is veel neerslag gevallen (lokaal meer dan 160 mm). Nog hogere neerslagsommen tot wel 175 mm zijn gemeten ten zuidwesten van Heerlen.

De onderste kaart in Figuur 4.2 toont de gemiddelde neerslag per beekstelsel. In de Geul viel gemiddeld 128 mm neerslag. Er viel gemiddeld 93 mm in het stroomgebied van de Geleenbeek en in het stroomgebied van de Roer viel gemiddeld 106 mm neerslag. Ter vergelijking: gemiddeld valt er in Zuid-Limburg in de *hele* maand juli ongeveer 80 mm neerslag.

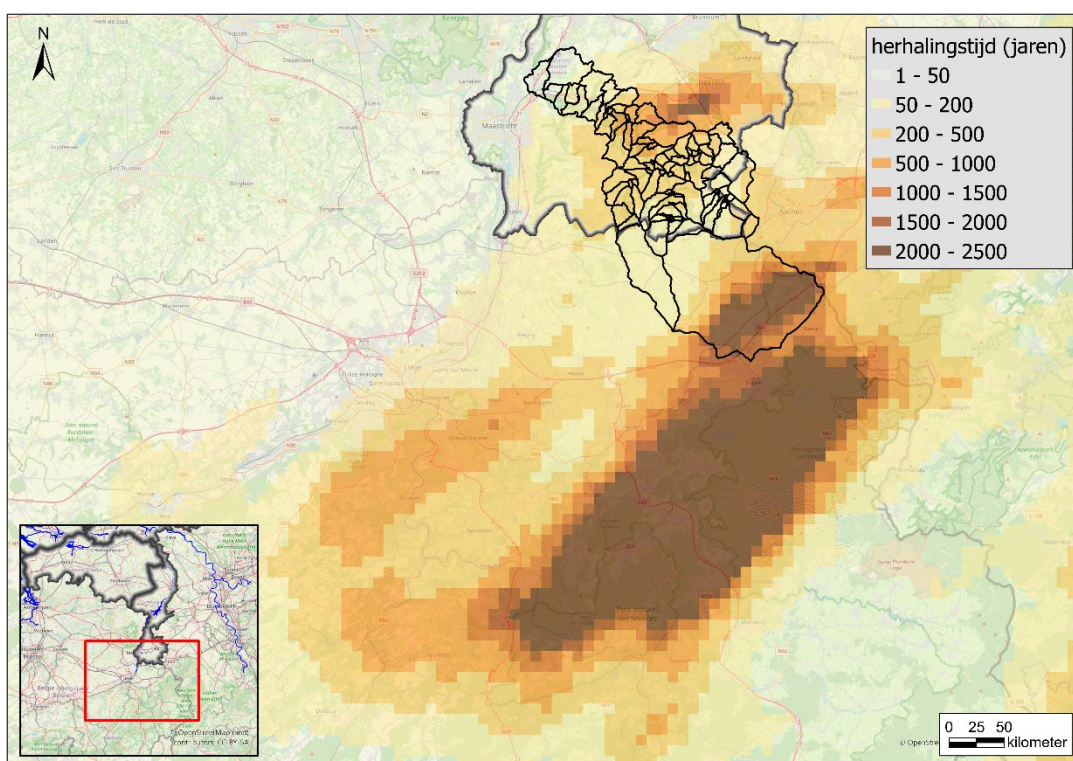


*Figuur 4.2 Ruimtelijke verdeling van de tussen 13 juli 10:00 en 15 juli 10:00 gevallen neerslag (de tweedaagse ofwel 48-uurssom). De bovenste figuur toont de neerslag per km<sup>2</sup> (de Nederlandse grens en de het stroomgebied van de Geul zijn aangegeven ter oriëntatie). De onderste figuur toont de gemiddelde neerslag per beekstelsysteem (128 mm in de Geul, 93 mm in de Geleenbeek en 106 mm in het stroomgebied van de Roer).*

## 4.2 Herhalingstijd gevallen neerslag varieert ruimtelijk van 10 tot meer dan 1000 jaar

Hoe zeldzaam de neerslaggebeurtenis in juli 2021 was kan worden uitgedrukt met de verwachte herhalingstijd (of kans van voorkomen per jaar). Het KNMI heeft kaarten gemaakt met voor ieder km<sup>2</sup> vakje de regen die in 48 uur is gevallen. Voor elk van die hoeveelheden is de herhalingstijd bepaald waarbij gebruik is gemaakt van de gemiddelde neerslagstatistiek voor heel Nederland. Omdat zware neerslag in de heuvels in het stroomgebied van de Geul vaker voorkomt dan in vlakke gebieden in de rest van Nederland, kan de aldus berekende herhalingstijd hier zijn overschat. De kans is dus groter dan op deze manier berekend. Dit geldt ook voor de herhalingstijden die zijn berekend voor de neerslag in de Ardennen en de Eifel. In de hogere delen van Zuid-Limburg kan de overschatting een factor twee bedragen (een herhalingstijd van 1000 jaar wordt dan 500 jaar). In de Ardennen en de Eifel kan de overschatting nog groter zijn. Dat neemt niet weg dat de kaarten wel een eerste indruk geven hoe vaak dergelijke gebeurtenissen te verwachten zijn.

Het kaartje met de geschatte herhalingstijden is te zien in Figuur 4.3. De herhalingstijd voor verschillende km<sup>2</sup> vakjes in de Ardennen wordt geschat op meer dan 2500 jaar, net als in een klein gebied in de regio Heerlen. In de rest van Nederland was de neerslag minder extreem. Bij Valkenburg is de herhalingstijd van de lokaal gevallen neerslag ongeveer 350 jaar, maar er waren ook locaties waar de neerslag nog minder extreem was. Zo wordt de herhalingstijd van de neerslag die in Beek is gemeten (ten zuiden van Geleen) geschat op ongeveer 17 jaar. Wat deze neerslaggebeurtenis zo bijzonder maakte, was dat de neerslag viel in een zeer groot gebied en dat het twee dagen na elkaar hard regende. De neerslaghoeveelheden die per uur vielen waren veel minder uitzonderlijk.

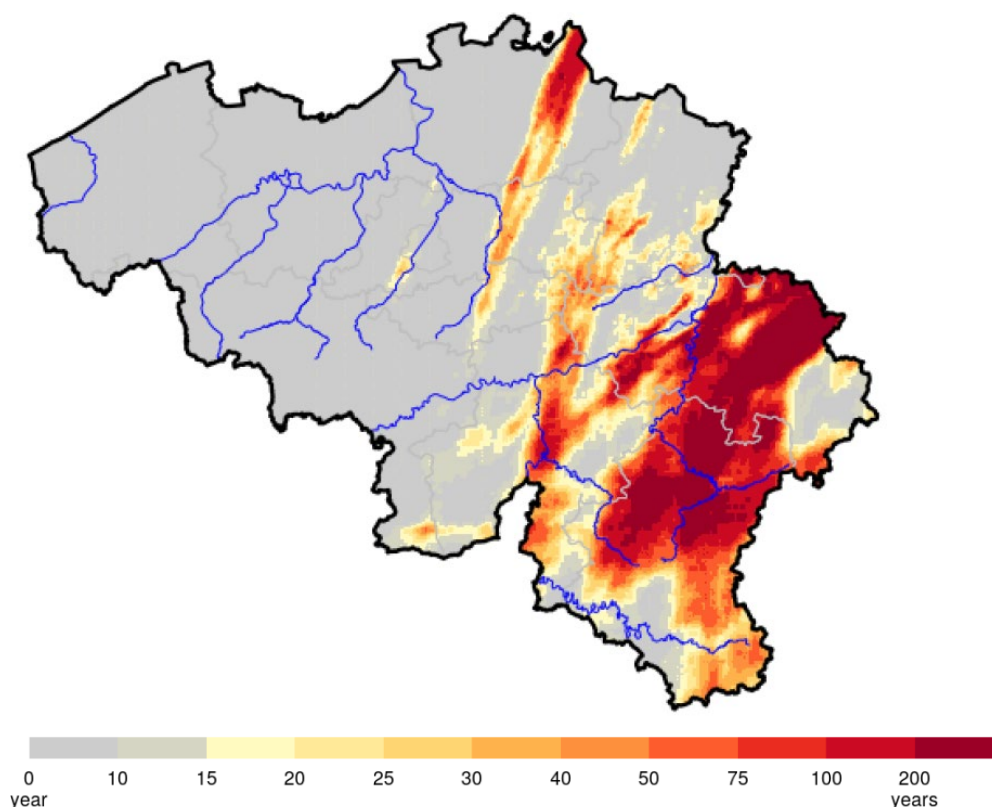


Figuur 4.3 Geschatte herhalingstijd van de tussen 13 juli 10:00 en 15 juli 10:00 gevallen neerslag. De Nederlandse grens en de het stroomgebied van de Geul zijn aangegeven ter oriëntatie

De neerslag die is gevallen in het stroomgebied van de Geul als geheel heeft een geschatte herhalingstijd van 900 jaar. Echter, omdat niet is gecorrigeerd voor orografische effecten (een grotere kans op grote hoeveelheden neerslag in heuvelachtige gebieden), is deze schatting mogelijk tot een factor twee te groot. De herhalingstijd zou in dat geval ongeveer 500 jaar bedragen, of een kans van 1:500 per jaar. Door klimaatverandering kan een bui zoals gevallen in juli 2021 nog vaker (gaan) voorkomen. Volgens de klimaatscenario's kan dat in 2050 drie keer vaker zijn en in 2085 zelfs wel zes keer vaker.

De bepaling van dergelijke herhalingstijden is zeer onzeker. Zo komt het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België (KMI) tot een veel kortere herhalingstijd voor de in juli 2021 gevallen neerslag (Figuur 4.4). Voor de neerslag in het Geulstroomgebied komt het KMI op een herhalingstijd van ongeveer 125 tot 200 jaar.

## 2-day total



*Figuur 4.4 Herhalingstijd van het tweedaagse neerslagvolume dat in juli 2021 in België is gevallen (bron: presentatie van Goudenhoofd et al. 2022, t.b.v. het internationale Maassymposium).*



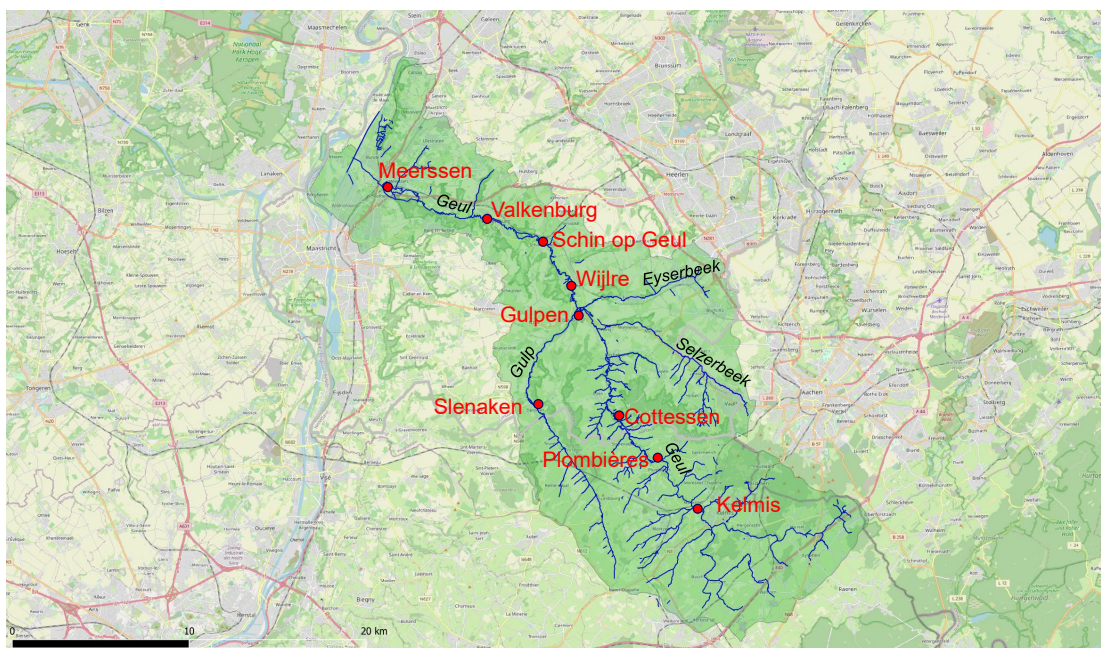
## 5 Geul

### 5.1 Inleiding

De watersysteemanalyse voor de Geul heeft vooral betrekking op het Nederlandse deel van het stroomgebied. Met behulp van een simulatiemodel<sup>6</sup> is geprobeerd het gedrag van het watersysteem tijdens het hoogwater van juli 2021 zo goed mogelijk na te bootsen. Dit model is vervolgens gebruikt om te analyseren hoe de Geul functioneert onder andere natte omstandigheden en om idee te krijgen van de effectiviteit van verschillende typen maatregelen om gevolgen van extreme neerslag te beperken. Dit hoofdstuk vat de belangrijkste bevindingen samen. Voor een uitgebreidere beschrijving van het model, de uitgevoerde modelverbeteringen om het model goed genoeg te maken voor de analyse en de uitgevoerde simulaties wordt verwezen naar het technische achtergrondrapport van Weijers et al, (2022).

### 5.2 Het stroomgebied van de Geul

De Geul ontspringt in België op ongeveer NAP +350 m en stroomt via plaatsen als Kelmis, Plombières en Sippenaeken bij Cottessen Nederland binnen. Bij Gulpen komen de grotere zijbeken zoals de Gulp, Eyserbeek en Selzerbeek samen, waarna de Geul via plaatsen als Wijlre, Schin op Geul, Valkenburg en Meerssen bij Bunde in de Maas uitmondt. De totale lengte van de Geul is circa 60 km en de omvang van het stroomgebied is circa 340 km<sup>2</sup>, waarvan circa 60% in Nederland.



Figuur 5.1 Het stroomgebied van de Geul

<sup>6</sup> Het model van de Geul betreft een combinatie van een HBV-neerslagafvoermodel en een SOBEK 1D2D-model van het Nederlandse deel van de Geul. Het Belgische en Duitse deel van het stroomgebied zijn alleen gemodelleerd in het neerslagafvoermodel.

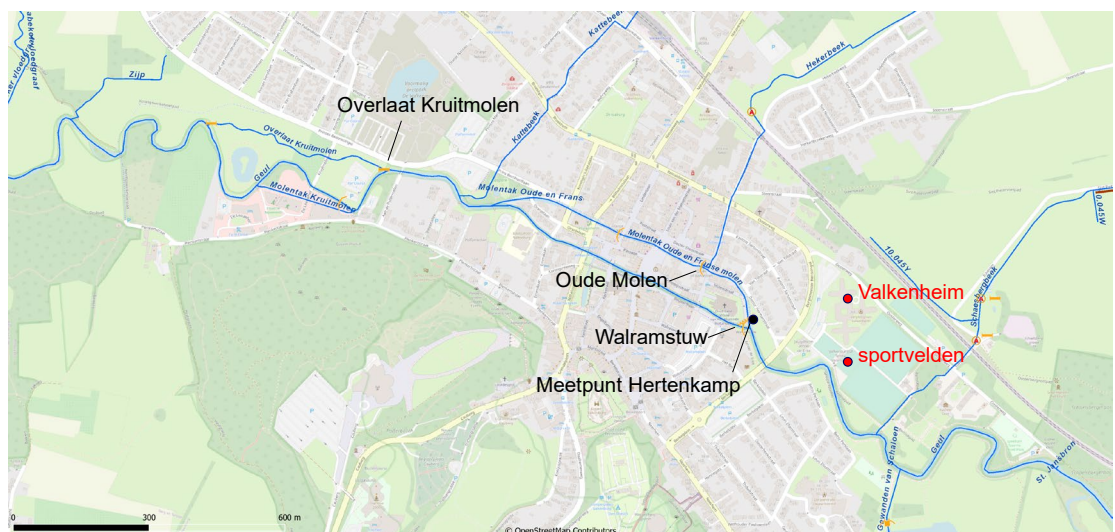
Het Belgische deel van het stroomgebied van de Geul kenmerkt zich door een relatief snelle respons op neerslag, vergeleken met het Nederlandse deel van het stroomgebied. Dit wordt veroorzaakt doordat in dit deel de bodem dun is en op slecht doorlatende gesteenten ligt. De natuurlijke sponswerking van dit deel wordt daarom ook wel vergeleken met een vaatdoek in plaats van een spons, zoals in de rest van het stroomgebied.

Het stroomgebied heeft veel grasland (46%), akkerbouw (19%) en bos (20%), naast gebouwen (2%), wegen (5%). De resterende verharding in bebouwd gebied beslaat nog eens 7%. Het landschap omvat dus veel landelijk gebied en tamelijk weinig bebouwing (Slager et al., 2022). De verharde oppervlakken zoals bebouwing en wegen, zorgen zeker op steile hellingen voor snelle afvoer van regenwater.

Veel steden en dorpen liggen in het beekdal, waarbij het water regelmatig door een nauwe dorpskern moeten stromen. Deze kernen zijn daardoor gevoelig voor wateroverlast. Om de kans op een overstromingen te verkleinen zijn in het hele stroomgebied – vooral in de zijbeken – vele regenwaterbuffers aangelegd. Hiermee worden afvoerpieken gereduceerd. Deze regenwaterbuffers zijn vooral bedoeld om lokaal heftige buien op te vangen (voor herhalingscycli van circa 10 tot 25 jaar).

In het verleden is regelmatig wateroverlast ervaren als gevolg van veel neerslag, zowel van lokale buien als grote regionale weersystemen. Grofweg geldt dat wateroverlast in de zijbeken en in de bovenstroomse delen van het stroomgebied vooral worden veroorzaakt door korte en heftige buien, terwijl meer benedenstrooms de grote weersystemen met langdurige neerslagperiodes de grootste problemen geven. Welk deel van de neerslag tot afstroming komt, varieert sterk door het jaar heen, onder meer als gevolg van variatie in bodembedekking door vegetatie en begroeiing in de beken, naast de bovengenoemde variatie in sponswerking.

Een van de locaties waar de beek door een stadskern stroomt is Valkenburg. De stad ligt in de overstromingsvlakten van de Geul, ongeveer 10 km bovenstrooms van de monding in de Maas. Valkenburg is één van de bekende knelpunten waar wateroverlast optreedt als grootschalige extreme neerslag optreedt in het gehele Geulstroomgebied. Vanuit het oogpunt van de Geul staat de bebouwing van Valkenburg 'in de weg', er is sprake van een vernauwing, een flessenhals. Dit is in (veel) mindere mate het geval bij de andere dorpen die langs de Geul liggen. De Geul komt aan de oostkant Valkenburg binnen (zie Figuur 5.2). Na het passeren van de sportvelden en verpleeghuis Valkenheim splitst de Geul zich bij de Walramstuw in twee takken: links naar de Geul en rechts naar de Molentak.



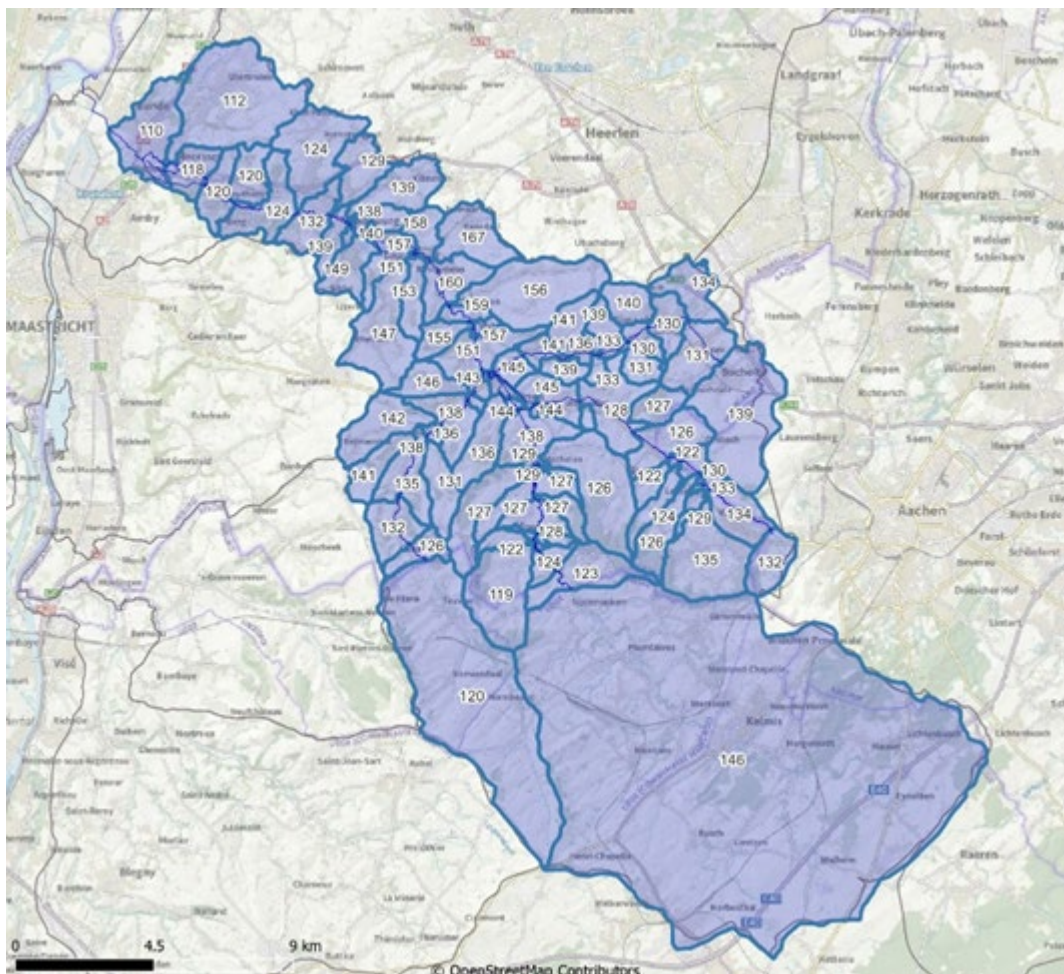
Figuur 5.2 De Geul in en rond Valkenburg

Het doorstroomprofiel van zowel de Geul als de Molentak is krap en wordt begrensd door kademuren en bebouwing. De kademuren en de huizen zijn niet ontworpen om water tegen te houden. Benedenstreams (ten westen) van Valkenburg is recent Overlaat Kruitmolen aangelegd (zie Figuur 5.2). Deze overlaat stroomt alleen bij hoge afvoeren mee en zorgt ervoor dat de waterstanden minder snel stijgen.

Voor Valkenburg geldt, net als voor alle bebouwd gebied in het stroomgebied, een beschermingsnorm tegen wateroverlast van 1:25 per jaar. Dat betekent dat het watersysteem zo moet zijn ingericht dat het een hoogwater met een herhalingsjijd van 25 jaar zonder schade of overlast te veroorzaken af kan voeren. Onder extremere omstandigheden, zoals in juli 2021, kunnen delen van de stad onder water lopen.

## 5.3 Wat is er gebeurd in juli 2021?

### 5.3.1 Piekafvoer 30 keer hoger dan gemiddeld

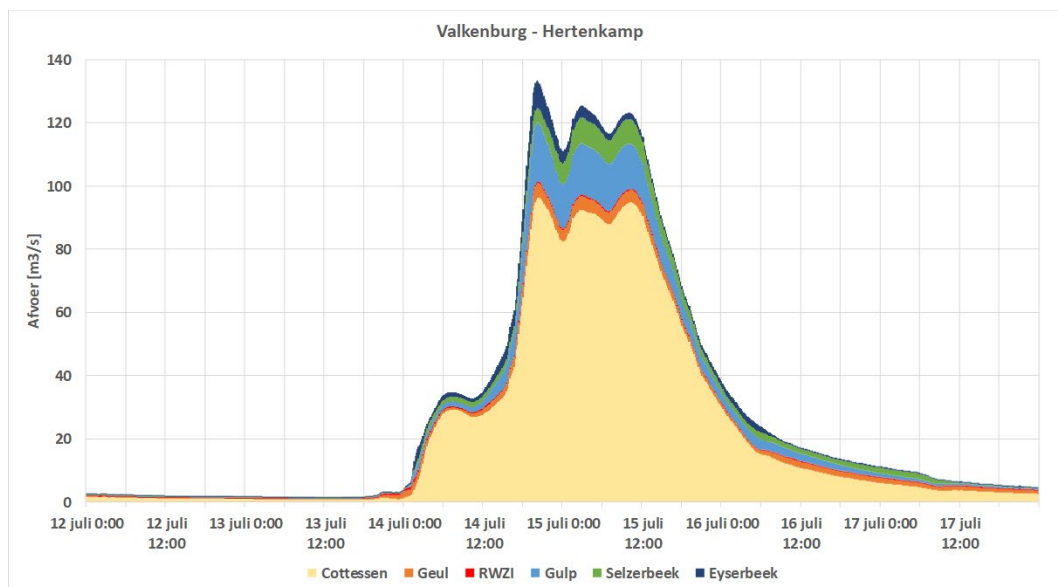


Figuur 5.3 Neerslagtotalen in mm, gemiddeld per deelstroomgebied van de Geul tussen 12 t/m 16 juli 10 uur

In het stroomgebied van de Geul viel tussen 13 en 15 juli 2021 gemiddeld 128 mm neerslag. Figuur 5.2 toont de 4-daagse neerslagtotalen voor de deelstroomgebieden van de Geul. De kaart toont dat de meeste neerslag in België viel, alhoewel ook lokaal rond Valkenburg veel neerslag is gevallen. Dit had tot gevolg dat grote hoeveelheden water uit België via de Geul naar Nederland werden afgevoerd. In Nederland nam de afvoer nog verder toe. Dit leidde in meerdere steden en dorpen langs de Geul tot overstromingen.

Met een simulatiemodel zijn de gebeurtenissen van juli 2021 nagebootst. Op basis van de gecorrigeerde radarbeelden van het KNMI is bepaald hoeveel neerslag er is gevallen. Het simulatiemodel berekent hieruit hoeveel water er in de bodem is weg gezakt en hoeveel water is afgestroomd en door de Geul is afgevoerd. Bij Valkenburg werd het afvoerverloop berekend (Figuur 5.4). De bovenste lijn toont de berekende afvoer net bovenstrooms van het centrum van Valkenburg. De berekende piekafvoer bedroeg daar ongeveer 135 m<sup>3</sup>/s. Ter vergelijking, de gemiddelde jaarafvoer van de Geul is daar ongeveer 4 m<sup>3</sup>/s. In juli was de afvoer dus ruim 30 keer groter dan gemiddeld.

De kleuren in Figuur 5.4 geven aan waar het water vandaan kwam. Het meeste water, bijna 90 m<sup>3</sup>/s van de 135 m<sup>3</sup>/s kwam uit België, bovenstrooms van Cottessen (gele kleur). Vanuit de Gulp werd ongeveer 20 m<sup>3</sup>/s aangevoerd (blauwe vlak). De Selzerbeek en de Eyserbeek leverden tijdens de piekafvoer samen iets minder dan 20 m<sup>3</sup>/s.



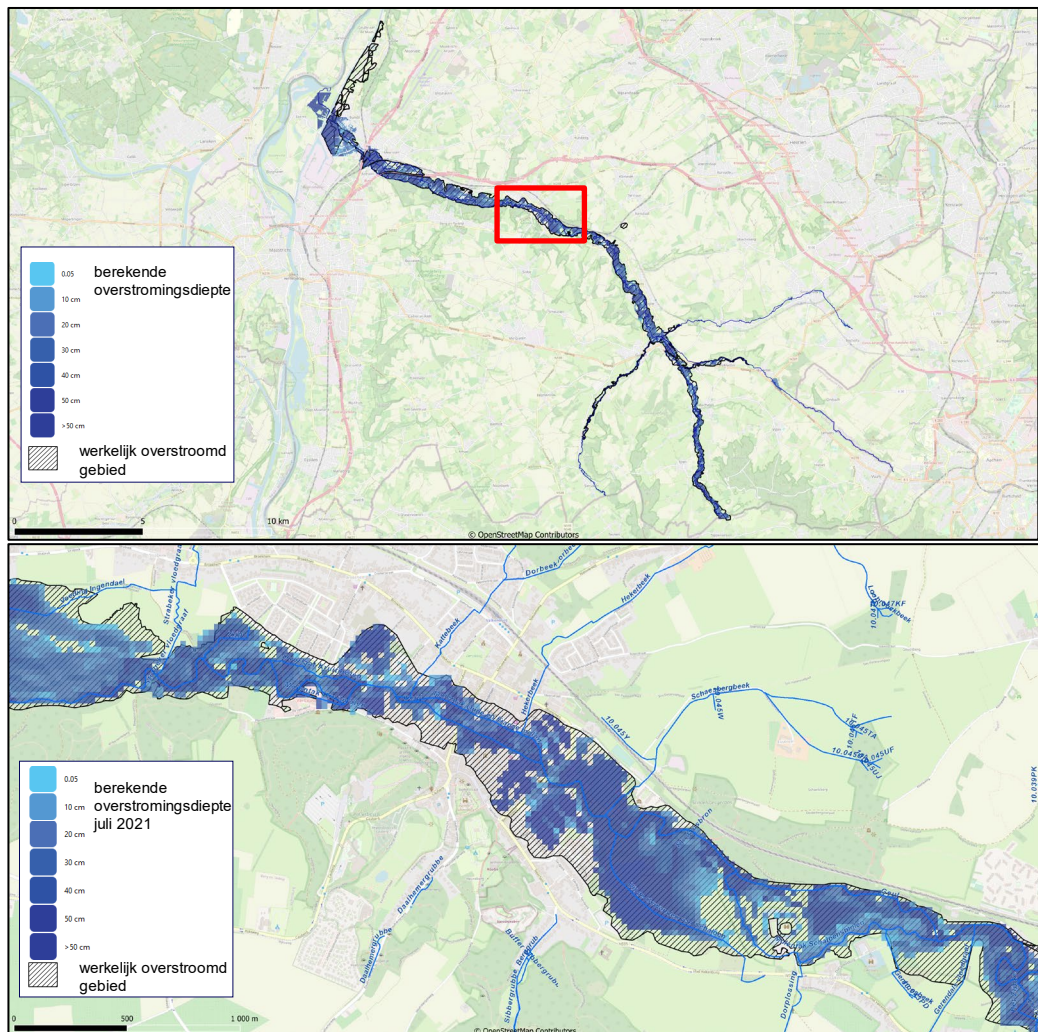
Figuur 5.4 Berekende afvoer aan de oostkant van het centrum van Valkenburg. De herkomst van het water uit de verschillende deelstroomgebieden is met kleur aan gegeven

De modelberekeningen laten zien dat tijdens het hoogwater van juli 2021 ongeveer één derde deel van de neerslag die gedurende de vier dagen van het hoogwater gevallen is in het stroomgebied van de Geul, is afgestroomd naar de monding van de Geul. Voor het Belgische deel van het stroomgebied lag dit aandeel veel hoger. Daar is ongeveer 60% van de gevallen neerslag via de Geul afgevoerd. Dit verschil komt deels door de grotere hoeveelheid neerslag, maar waarschijnlijk ook doordat de bodems in België dun zijn en liggen op slecht doorlatend gesteente. Het Nederlandse deel van het stroomgebied heeft dikkere bodems, waarin meer water kan infiltreren. Daarnaast zijn de dalen en overstromingsvlaktes in Nederland breder dan in België dus kan daar ook meer water worden geborgen.

### 5.3.2 Herhalingstijd geschat op meer dan 100 jaar

Op basis van de afvoerstatistiek van Waterschap Limburg wordt de herhalingstijd van de afvoer bij Valkenburg geschat op minstens 100 jaar. Gezien de geschatte herhalingstijd van de neerslaggebeurtenis (ongeveer 500 jaar), lijkt dit weinig. Een ~500 jaar bui, hoeft echter niet altijd te resulteren in een afvoer die eens in de 500 jaar voorkomt. Zo maakt het veel uit hoe het stroomgebied er bij ligt voordat de neerslag valt. Wanneer er veel neerslag valt, maar het de dagen daarvoor droog is geweest, kan er meer water geborgen worden in de bodem. Ook zullen de regenwaterbuffers leeg zijn. Er stroomt dan minder regenwater af naar de beken.

Omgekeerd kan een minder extreme bui die valt op een natte ondergrond (of smeltende sneeuw) tot relatief veel meer afvoer leiden. Een zeer droge bodem is juist weer erg hard en kan beperkt water opnemen.



Figuur 5.5 Berekende overstromingen vanuit de Geul voor het hele Nederlandse deel van het stroomgebied (boven) en nabij Valkenburg (onder). De gearceerde vlakken tonen het werkelijk overstromde gebied (ENW, 2021), de blauwe kleuren zijn waterdieptes berekend met een model

### 5.3.3 Grootschalige overstromingen langs de hele Geul

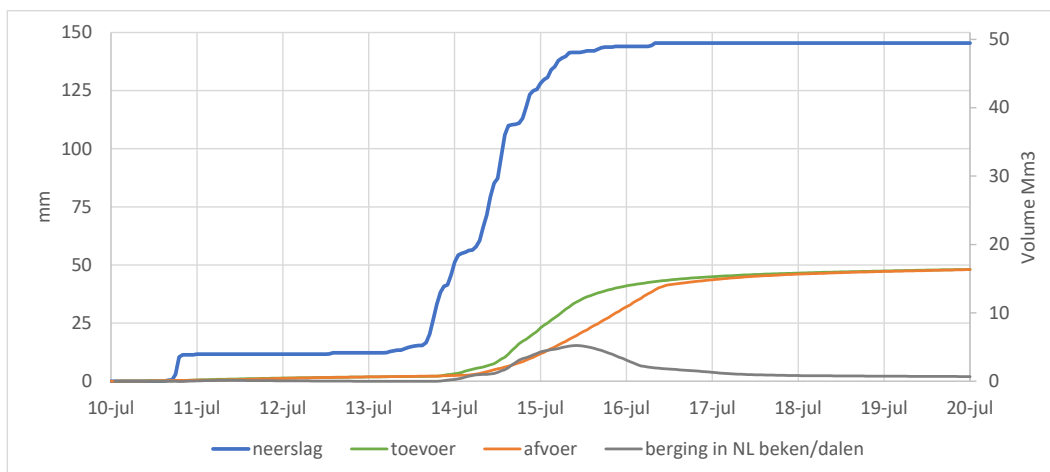
De hoge afvoer leidde op veel plaatsen langs de Geul tot overstromingen. Figuur 5.5 toont de berekende overstromingen langs de hele Geul en in meer detail voor de omgeving van Valkenburg. De bovenste kaart laat duidelijk zien dat de overstromingen niet beperkt waren tot Valkenburg, maar dat ook andere steden en dorpen langs de Geul te kampen hadden met overstromingen en wateroverlast, zoals Mechelen, Schin op Geul, Wijlre maar ook bij Meerssen en Bunde. De sifon onder het Julianakanaal stroomde niet optimaal mee wat de overstromingen aldaar heeft verergerd (De Jong en Asselman, 2022).

Rond Valkenburg onderschatten de modelberekeningen de omvang van het overstromde gebied. De gearceerde vlakken in de onderste kaart tonen het werkelijk overstromde gebied (bron: ENW, 2021). In het centrum van Valkenburg zijn waterdieptes gemeten van circa 1,25 m. In veel straten gingen de overstromingen bovendien gepaard met hoge stroomsnelheden. Ook de bruggen over de Geul hadden het zwaar te verduren: in Valkenburg is bij de Emmalaan de brug over de Geul ingestort.

## 5.4 Hoe functioneert het systeem onder natte omstandigheden?

In een parallel uitgevoerde studie onder de regie van het Ministerie van IenW (Slager et al., 2022) is het neerslagafvoerproces nader onderzocht.

Allereerst is bepaald hoeveel van de gevallen neerslag tot afstroming is gekomen, ofwel wat de neerslagafvoercoëfficiënt is geweest. Deze is met behulp van het simulatiemodel<sup>7</sup> bepaald voor het stroomgebied als geheel, maar ook voor de afzonderlijke zijbeken voor de periode van 10 t/m 19 juli 2021. In deze periode van 9 dagen is gemiddeld over het stroomgebied 145 mm neerslag gevallen, waarvan 48 mm tot afstroming is gekomen, wat overeenkomt met ruim 16 miljoen m<sup>3</sup>. Figuur 5.6 toont het verloop van de cumulatieve neerslag, watertoevoer naar de beken (neerslag-afvoer), de afvoer naar de Maas en de (tijdelijke) berging in de beekdalen.



Figuur 5.6 Berekende cumulatieve toevoer (oranje) naar de Geul en afvoer naar de Maas (groen), samen met het verloop van het volume aan berging in het beekdal (grijze lijn) en neerslag (blauwe lijn), zowel uitgedrukt in mm (linker-as) als volume (miljoen m<sup>3</sup>, rechter-as) tijdens het hoogwater van juli 2021

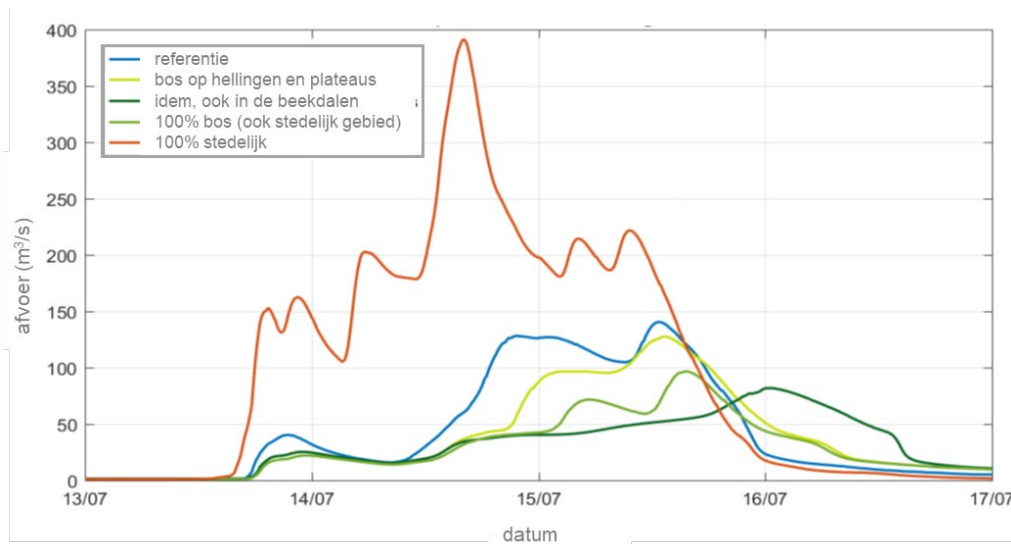
Hieruit blijkt dat – gemiddeld over het gehele stroomgebied - slechts een derde deel van de neerslag binnen enkele dagen tot afvoer is gekomen. Twee derde van de neerslag verdwijnt in de bodem en komt later tot afstroming of verdampt. Tijdens de piek van de afvoergolf werd in de beken en overstromingsvlaktes een totaal van ruim 5 miljoen m<sup>3</sup> water geborgen, een substantiële sponswerking dus. Illustratief voor de ‘vaatdoek’ versus de ‘spons’ is dat de afvoercoëfficiënt van het Belgische deel van de Geul (dus bovenstrooms Cottessen) met circa 60% ruim dubbel zo groot is dan de gemiddelde afvoercoëfficiënt over het hele stroomgebied.

In het stroomgebied van de Geul is dus maar 1/3 deel van de gevallen neerslag afgevoerd naar de Maas. Met name in het Nederlandse deel van het stroomgebied is veel water geborgen; in de bodem, maar ook in het grondwater. Zo bleek uit onderzoek van Klein (2022) dat het zowel het ondiepe als diepe grondwater snel reageerde op de gevallen neerslag. Zelfs op de plateaus waar het grondwater vaak wel 40 m diep zit, blijkt dat het grondwater in een paar dagen wel 2 m was gestegen.

Analyses uit de IenW-studie (Slager et al., 2022) illustreren verder dat de gevoeligheid voor het type landgebruik fors is, zie Figuur 5.7. De afvoerpiek in Valkenburg is geschat op circa 135 m<sup>3</sup>/s.

<sup>7</sup> De hier beschreven resultaten van het simulatiemodel zijn indicatief. In het algemeen berekent het model iets te lage waterstanden, terwijl de afvoeren juist aan de hoge kant zijn. Helaas ontbreken goede metingen van de afvoer en de metingen die er zijn, zijn niet altijd consistent.

Wanneer wordt verondersteld dat heel het stroomgebied (dus inclusief het Belgische deel) wordt verhard zodat geen infiltratie meer mogelijk is, zou een afvoerpiek zijn ontstaan van meer dan 400 m<sup>3</sup>/s. Andersom, wanneer wordt aangenomen dat het grootste deel van het landgebruik in het stroomgebied en de beekdalen zou zijn omgezet naar bos, zou de afwegolf aanzienlijk vertraagd worden (circa 24 uur) en was de piek gedaald tot circa 80 m<sup>3</sup>/s. Deze uitkomsten illustreren het belang van de inrichting van het gebied en tonen ook aan dat eventuele verdere verstedelijking zonder compenserende maatregelen sowieso een negatief effect zal hebben op de afvoer en de kans op wateroverlast.



Figuur 5.7 Berekende afvoer bij Valkenburg voor de neerslaggebeurtenis van juli 2021 bij verschillend landgebruik in het stroomgebied van de Geul (naar Slager et al., 2022)

## 5.5 Maatregelen

Het effect van maatregelen is bepaald met behulp van de bestaande modellen. In het kader van dit project zijn enkele verbeteringen in het model doorgevoerd. Desondanks wordt de wateroverlast door het gebruikte model onderschat. Daarnaast wordt opgemerkt dat de verkenning vooral is gedaan op het niveau van het watersysteem als geheel. De maatregelen (behalve de eerste) zijn doorgerekend voor een T25 en T100 situatie voor zowel huidig als toekomstig klimaat in 2050.

### 5.5.1 Vasthouden van water bovenstrooms

Bij deze maatregel wordt het effect bepaald van het vasthouden van water daar waar het valt (de plateaus, hellingen en stedelijk gebieden, voordat het in de beek terecht komt). Water kan worden vastgehouden door een groter deel van de neerslag te laten infiltreren of door het vast te houden in een regenwaterbuffer. Onderzocht is hoe groot het effect zou zijn in het geval 5 mm neerslag per dag of 10 mm neerslag per dag extra in de bodem zou kunnen infiltreren, gemiddeld voor het gehele stroomgebied. Deze maatregel is alleen voor de neerslagsituatie juli 2021 berekend, aangevuld met een expert-oordeel voor de T25 en T100 situaties. Een beschrijving van welke ingrepen nodig zijn om deze 5 of 10 mm extra infiltratie te bereiken is gegeven in hoofdstuk 8.

Door water in het stroomgebied van de Geul bij de bron en de haarvaten vast te houden neemt de afvoer en daarmee de waterdiepte af. Het grootste effect is merkbaar in de Geul zelf. De exacte afname verschilt per locatie. Veronderstellend dat de bodem respectievelijk 5 en 10 mm per dag meer zou kunnen vasthouden, zou bij Cottessen de waterstand bijvoorbeeld 4 tot 6 cm verlagen, bij Wijlre maar 1 tot 2 cm, in Schin op Geul 17 tot 28 cm, Valkenburg (Walramstuw) 7 tot 12 cm en bij Meerssen 8 tot 21 cm, zie Tabel 5.1. De afvoer neemt bijna overal met 20% af.

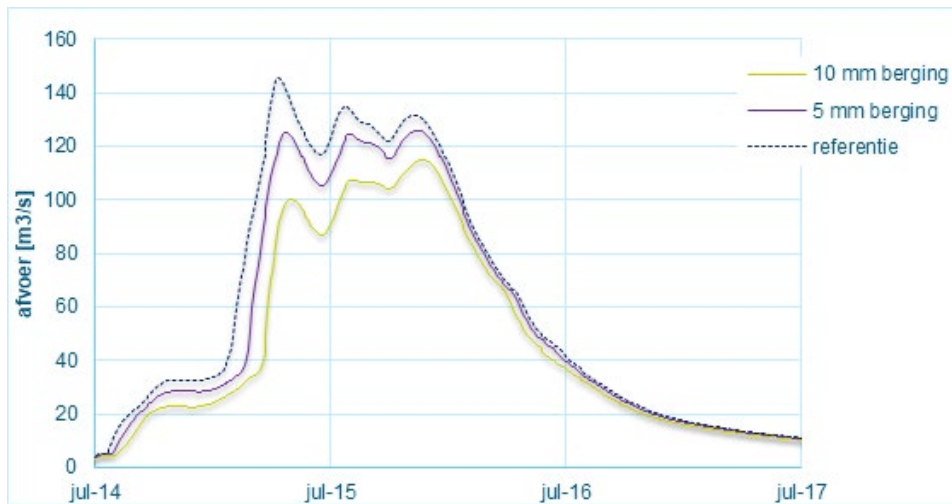
Tabel 5.1 Waterstandsdaling op locaties langs de Geul wanneer 5 of 10 mm neerslag per dag extra kan infiltreren, uitgaande van de situatie in juli 2021

Locatie	Waterstandsdaling bij 5 mm/dag vasthouden [cm]	Waterstandsdaling bij 10 mm/dag vasthouden [cm]
Cottessen	4	6
Wijlre	1	2
Schin op Geul	17	28
Valkenburg (Walramstuw)	7	12
Meerssen	8	21
Simpelveld (Eyserbeek)	11	22
Nijswiller (Selzerbeek)	13	28

De vermindering van de afvoer heeft uiteenlopende effecten op de overstromingen. De maatregel heeft in de Gulp een groot effect op de overstromingen; waterdieptes nemen lokaal tot meer dan 30 cm af. In de Eyserbeek waren niet veel overstromingen, maar daalt de waterstand wel aanzienlijk, bijvoorbeeld 11 tot 22 cm in Simpelveld. De Selzerbeek lijkt redelijk op de Eyserbeek, met in Nijswiller de grootste afnames in waterdiepte: 13 tot 28 cm. De grote afname in diepte komt voornamelijk doordat in de Selzerbeek en Eyserbeek weinig overstromingen plaatsvinden en in het model ook minder riolen overstorten. De afname van afvoer uit zich daardoor in een relatief grote afname van de waterdiepte. Langs de Geul vinden veel meer overstromingen plaats, de afname in afvoer werkt daardoor minder door in de waterdiepte. Het effect op het overstromingspatroon wanneer 10 mm neerslag per dag extra kan infiltreren is weergegeven in Figuur 5.9.

In Figuur 5.8 is de afvoergolf bij Schin op Geul weergegeven voor de referentiesituatie en de twee bronmaatregelen (5 en 10 mm/dag extra bergen). Hier valt op dat vooral de eerste piek sterk is verlaagd (40 m<sup>3</sup>/s minder afvoer tijdens de eerste piek). Bij de laatste piek is het effect kleiner (10 m<sup>3</sup>/s minder). Dit is logisch omdat bronmaatregelen op een gegeven moment uitgenut zijn. Als de neerslag langer duurt, wordt het effect minder. Ook is te zien dat de afvoergolf iets wordt vertraagd.





Figuur 5.8 Berekend effect van extra infiltratie en berging op de afvoergolf bij Schin op Geul



Figuur 5.9 Berekend effect wanneer 10 mm neerslag per dag extra wordt vast gehouden juli 2021

Het totaalbeeld van deze maatregel is positief: het berekende effect is redelijk groot en merkbaar langs de hele beek. Het is weliswaar niet voldoende om overstromingen tijdens een gebeurtenis zoals in juli 2021 te voorkomen, maar het extreme van de golf wordt wel verminderd, waardoor gerichte aanvullende maatregelen makkelijker worden. Deze maatregel functioneert ook bij minder extreme omstandigheden. Bij buien met een herhalingstijd van 10 of 25 jaar zal deze maatregel ook bijdragen aan een verlaging van de maximale waterstanden.

Een nuance bij de berekening is dat die heel indicatief is gedaan en mogelijk het effect overschat. Het realiseren van bronmaatregelen vereist ook een forse inspanning waarbij veel partijen belanghebbend zijn.

De maatregelen betekenen ook aanzienlijke ingrepen in de ruimtelijke inrichting van het gehele stroomgebied (verandering in landgebruik, aankopen grond etc.).

### 5.5.2 Bergen van water door verruwing van de overstromingsvlakten

Het idee achter de maatregel 'Natuurlijke berging in het beekdal' is dat wanneer de beek juist vroeg buiten haar oevers treedt in gebieden zonder bebouwing en landbouw, de afvoergolf afremt en extra water geborgen wordt in bijvoorbeeld bosrijke zones. Het is een uiting van het adagium *bergen waar mogelijk, afvoeren waar nodig*, en kan worden gerealiseerd door overstromingsvlakten te verruwen en de beekbodem te verhogen.

Dit concept wordt in het model op een deelgebied getest, om zowel het lokale effect te zien als het benedenstroomse effect. Er is gekozen voor de Gulp. Hier is het huidige overstromingsoppervlak beperkt en deze test kan laten zien of een combinatie van overstromingsvlakten verruwen en de beekbodem verhogen, leidt tot een vergroting van het overstromde oppervlak en daarmee tot een verlaging van de piekwaterstand.

In de Gulp wordt buiten de kernen Slenaken, Beutenaken en Gulpen de beekbodem met 25 cm verhoogd om te zorgen dat de beek eerder buiten zijn oevers treedt en daarmee al bij lagere afvoeren een groter gebied voor berging wordt benut. Het maaiveld is verruwd, zodat afstroming door de overstromingsvlakten vertraagd wordt. De ruwheid is verdubbeld ten opzichte van de huidige situatie. Dit representeert een dichtere en hogere begroeiing zoals bos.

Voor de situatie van het hoogwater van juli 2021, neemt de berekende piekafvoer in Gulpen (meetpunt Azijnfabriek) de afvoerpiek af van 14,0 m<sup>3</sup>/s naar 13,7 m<sup>3</sup>/s (de blauwe lijn ligt net iets hoger dan de groene lijn in Figuur 5.10).



Figuur 5.10 Links: verloop afvoeren meetpunt Azijnfabriek (Gulp), met in blauw het referentiemodel en in groen met de maatregel voor juli 2021 berekening en rechts het verschil in maximale waterhoogte tussen referentie en maatregel (in meter).

Deze verkennende berekening laat zien dat het mogelijk is om door middel van bodemverhoging en maaiveldverruwing de overstromingen benedenstrooms te verminderen. Wel heeft dit verhoging van de waterstanden en een langere duur van overstromingen bovenstrooms tot gevolg.

Dit concept kan vooral worden toegepast in delen van het stroomgebied waar hogere waterstanden niet leiden tot meer schade. Dit komt overeen met het advies van Bureau Strooming aan Natuurmonumenten (Stroming, 2022).

Bij minder extreme hoogwaters (met een herhalingstijd van 25 of 100 jaar) is het effect vergelijkbaar met het effect dat is berekend voor de neerslaggebeurtenis van juli 2021. Een mogelijke keerzijde van het vertragen van de afvoergolf is dat er een grotere kans ontstaat dat de afvoerpiek van de Geul samenvalt met de afvoerpiek op de Maas, omdat deze vaak later plaatsvindt.

### **5.5.3 Bergen van water door de aanleg van drempels dwars op de beek**

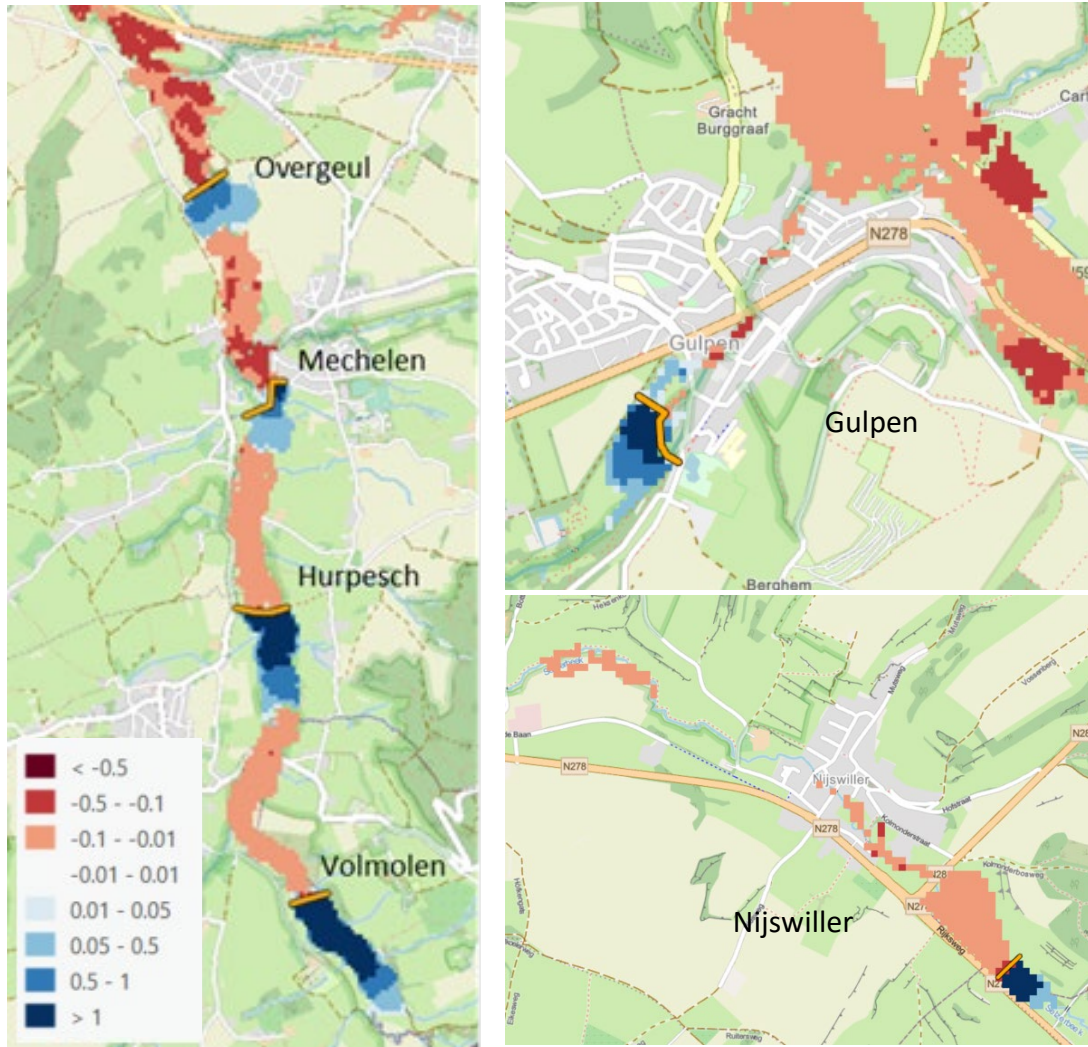
Extra berging van water in het beekdal kan ook op civieltechnische wijze worden gerealiseerd, bijvoorbeeld door het aanleggen van drempels met een doorlaatconstructie. Deze drempels worden dwars op de beek geplaatst en beperken de doorlaat bij hogere afvoer. Wanneer de afvoer in de beek groter wordt dan er door de doorlaat kan worden afgevoerd, blijft er water achter de drempel staan, totdat de waterstand achter de drempel hoger wordt dan de hoogte van de drempel. Zo'n drempel veroorzaakt een bepaalde opstuwung en daarmee bergingscapaciteit in de overstromingsvlakte. Als deze berging ingezet wordt tijdens de piek van de afvoergolf, dan wordt de maximale afvoer verlaagd. Als de berging te vroeg wordt ingezet dan is de maatregel veel minder effectief. De maximale effectiviteit halen van een waterberging is echter erg lastig. Dit komt omdat het vooraf moeilijk te voorspellen is hoe hoog een afvoerpiek zal worden, en wanneer de piek bereikt is. Wanneer de berging is ontworpen met een vaste doorvoercapaciteit en tijdens een hoogwater niet kan worden bij gestuurd, dan is de kans dat de berging optimaal kan worden benut nog kleiner.

In het stroomgebied van de Geul is een aantal locaties voorgesteld (zowel door Waterschap Limburg, als in de ideeënsessie van maart 2022) die mogelijk geschikt zouden zijn om extra berging te creëren (Figuur 5.11). Nadere analyse toont aan dat nog meer locaties potentieel geschikt zouden zijn (bijvoorbeeld ten noorden van Gulpen), maar die zijn niet meegenomen in de verkenning.

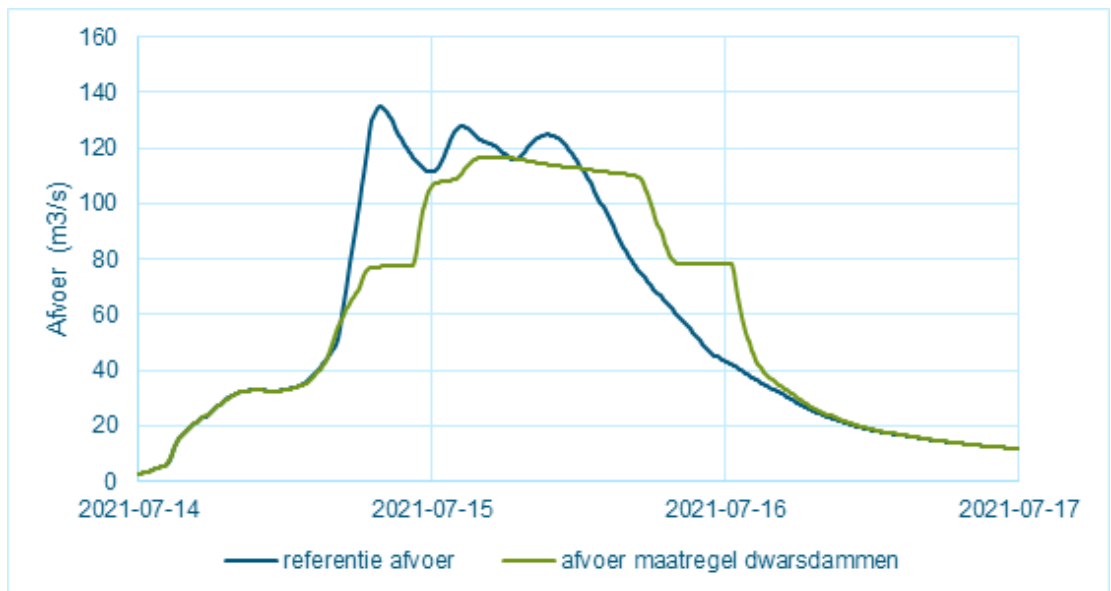
Figuur 5.12 toont het effect van de extra waterberging voor de situatie van juli 2021. Duidelijk is te zien dat bovenstrooms van de drempels de waterstanden met soms meer dan een meter toenemen (wat juist de bedoeling is) en benedenstrooms tot 50 cm afnemen.



Figuur 5.11 Locaties waarvoor het effect van waterberging door middel van drempels dwars op de beek is berekend



Figuur 5.12 Effect van extra berging op de maximale waterstanden (in meters)



Figuur 5.13 Effect van extra waterberging op de berekende afvoer bij Valkenburg voor juli 2021

Figuur 5.13 toont het verloop van de berekende afvoer bij Valkenburg. Door de extra berging wordt de afvoerpiek vertraagd en verlaagd. De piekafvoer neemt af van circa 135 naar 105 m<sup>3</sup>/s. Dit kan resulteren in een waterstandsval van circa 50 cm.

In totaal wordt in de meegenomen bergingsgebieden circa 1 miljoen m<sup>3</sup> water extra geborgen. Op een totale afvoergolf van circa 16 miljoen m<sup>3</sup> lijkt dit beperkt, maar vergeleken met het totaal van de huidige buffercapaciteit van het watersysteem in de beekdalen (ruim 5 miljoen m<sup>3</sup>) is dit een substantiële toename van de buffercapaciteit. Het is echter niet genoeg om bijvoorbeeld Valkenburg droog te houden tijdens een neerslaggebeurtenis als die van juli 2021. In de casestudie voor Valkenburg (Van Heeringen et al., 2022a) werd al berekend dat dan een volume van circa 10 miljoen m<sup>3</sup> nodig zou zijn. Bij minder extreme buien, waarbij de Geul net overstroomt, zou deze maatregel effectiever kunnen zijn, maar dan moet de doorlaatcapaciteit actief kunnen worden verkleind door een bedienbaar doorlaatwerk.

#### 5.5.4 Afvoeren van water door knelpunten te verruimen

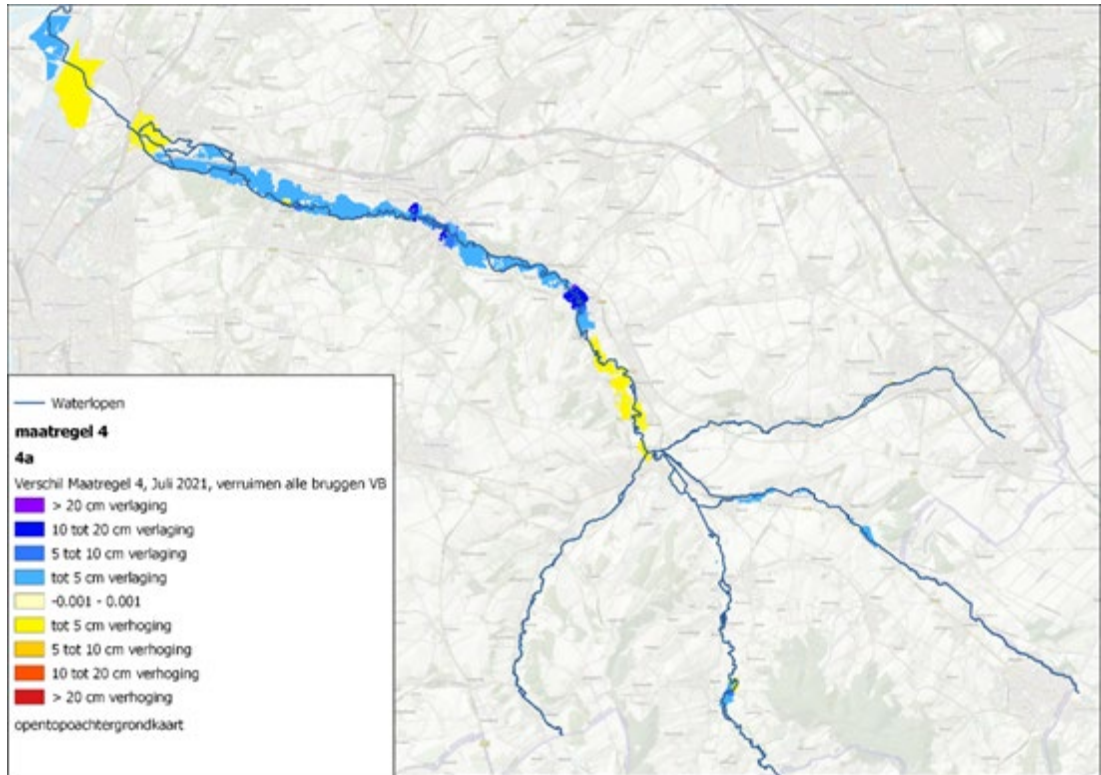
Bij deze vierde maatregel zijn infrastructurele kunstwerken die voor opstuwing zorgen verbreed om zo de afvoercapaciteit te vergroten.

Er zijn drie verschillende benaderingen van deze maatregel vergeleken:

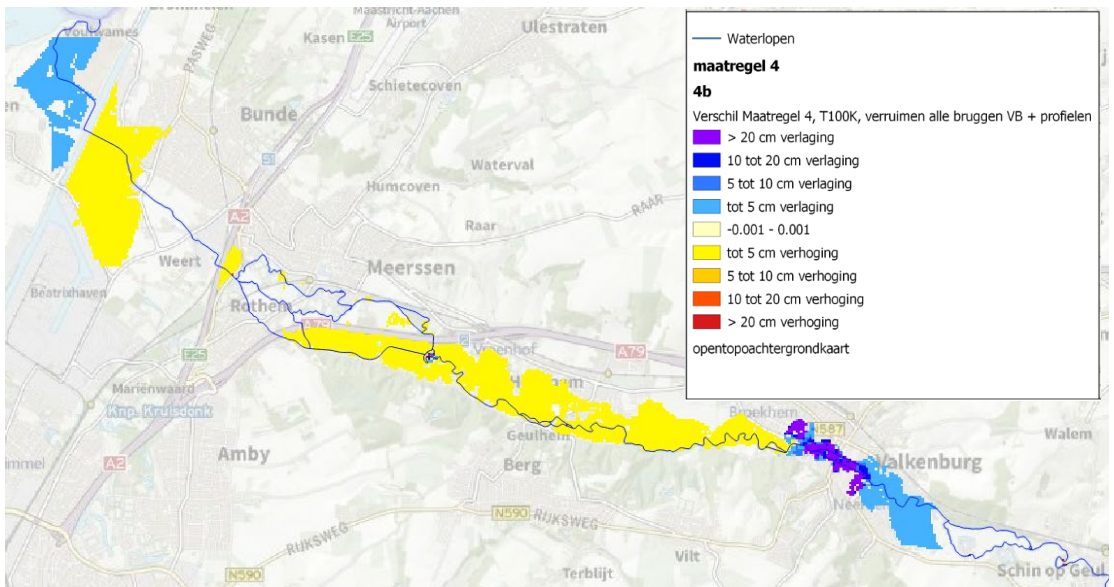
- 4a. Het verruimen van alle bruggen en duikers die bij een T100 bui meer dan 25 cm opstuwing veroorzaken. Voor Valkenburg zijn alle bruggen in het centrum (tussen Walramstuw en Odapark) verruimd, zowel voor de Geul als de Molentak.
- 4b. Het aanvullend vergroten van de afvoercapaciteit van Valkenburg door de Geul en de Molentak een dubbele breedte te geven (dit is heel nadrukkelijk een extreem experiment dat in deze vorm nauwelijks uitvoerbaar is maar wel een goede indicatie geeft voor alternatieven die de doorstroming verbeteren zoals een tunnel of omleiding).
- 4c. Het inrichten van een aflatconstructie bij Bunde om water af te voeren naar het Julianakanaal om wateroverlast bij Bunde en Meerssen te verminderen.

Maatregel 4a blijkt volgens de modelberekeningen vooral een lokaal effect te geven (zie Figuur 5.14). Lokaal zoals bij Schin op Geul, Valkenburg, maar ook bovenstrooms van Gulpen is een verlaging te zien van de maximale waterdieptes van maximaal 20 cm. Benedenstrooms van de verruimde kunstwerken wordt lokaal een toename van de waterstand berekend, maar die blijft beperkt tot ongeveer 1 cm bij Gulpen, Meerssen en Bunde. Deze maatregel leidt – in ieder geval voor de doorgerekende situaties - dus maar tot een beperkte afwenteling naar gebieden benedenstrooms. We bevelen aan om te onderzoeken wat de effecten zijn bij minder extreme buien.

Wanneer aanvullend op maatregel 4a (verruiming van alle bruggen die meer dan 25 cm opstuwing veroorzaken), ook de nauwe waterlopen in Valkenburg worden verdubbeld qua doorstroomprofiel (maatregel 4b), daalt de maximale waterstand in Valkenburg nog meer. In het centrum van Valkenburg is dan de overlast voor het juli 2021 hoogwater een groot deel van de overstrooming opgelost. De keerzijde is dat iets meer naar benedenstrooms wordt afgewenteld. Het leidt daar tot 1 à 2 cm waterstandsverhoging.



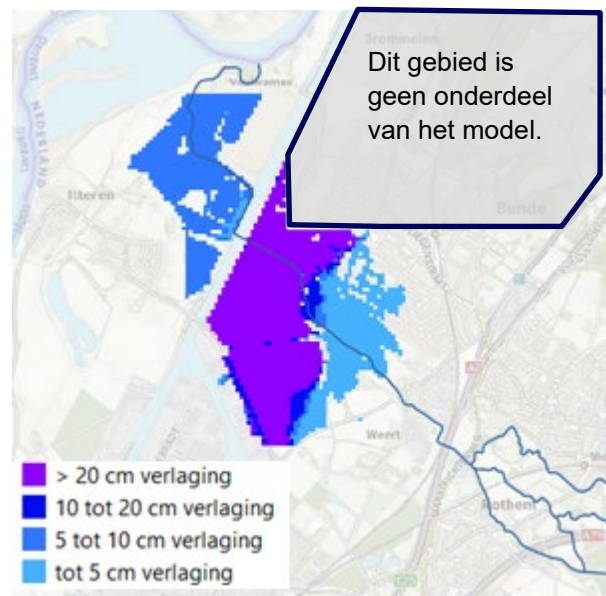
Figuur 5.14 Waterstandsverandering door het verruimen van duikers en bruggen voor juli 2021



Figuur 5.15 Waterstandsverandering als gevolg van het verruimen van bruggen en duikers en het verdubbelen van de afvoercapaciteit bij Valkenburg voor juli 2021 (verschil max. waterdiepte tussen referentie en maatregel, ingezoomd op de regio tussen Bunde en Valkenburg)

Als afzonderlijke maatregel, dus niet in combinatie met maatregel 4a en/of 4b, is onderzocht wat het effect is van een constructie om water af te laten naar het Julianakanaal. Dit kanaal heeft een vaste waterstand van NAP+44,10 m. Tijdens het hoogwater van juli 2021 werd de waterstand op de Geul veel hoger, waardoor water onder vrij verval zou kunnen worden afgevoerd naar het kanaal. In de casestudie van fase 1 is berekend dat het kanaal in ieder geval 20 m<sup>3</sup>/s af zou moeten kunnen voeren. De afvoercapaciteit is beperkt vanwege de erosiegevoeligheid van de kanaalbodem die niet is ingericht op snel stromend water.

In de simulatie is een verbinding gemaakt richting de Beatrixhaven aan de zuidkant van het gebied, maar dat zou ook op een andere manier kunnen worden gerealiseerd. In de casestudie voor de Geulmonding ( De Jong en Asselman, 2022) zijn verschillende alternatieven voorgesteld, waaronder een hevel. Daarnaast is het ook mogelijk om de duiker van de Geul onder het Julianakanaal te vergroten om eenzelfde effect te krijgen, maar dan is er nog steeds de afhankelijkheid van een eventueel hoge waterstand op de Maas.



Figuur 5.16 Effect van maatregel 4c voor juli 2021 bij Bunde

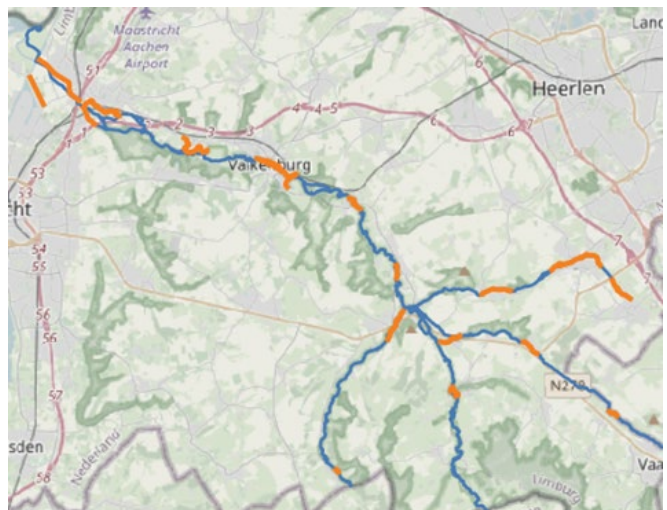
Uit de modelberekeningen volgt dat voor het juli 2021 hoogwater bij Bunde een waterstandsval van circa 25 cm zou optreden (zie Figuur 5.16), waarbij maximaal 12 m<sup>3</sup>/s naar het Julianakanaal zou zijn gestroomd. Het effect zal in het overstromde gebied direct ten oosten van het Julianakanaal merkbaar zijn.

### 5.5.5 Beschermen van bebouwde gebieden met kades

Deze maatregel beschermt dorpen en steden tegen overstromingen vanuit de Geul.

Er zijn twee varianten van kades doorgerekend:

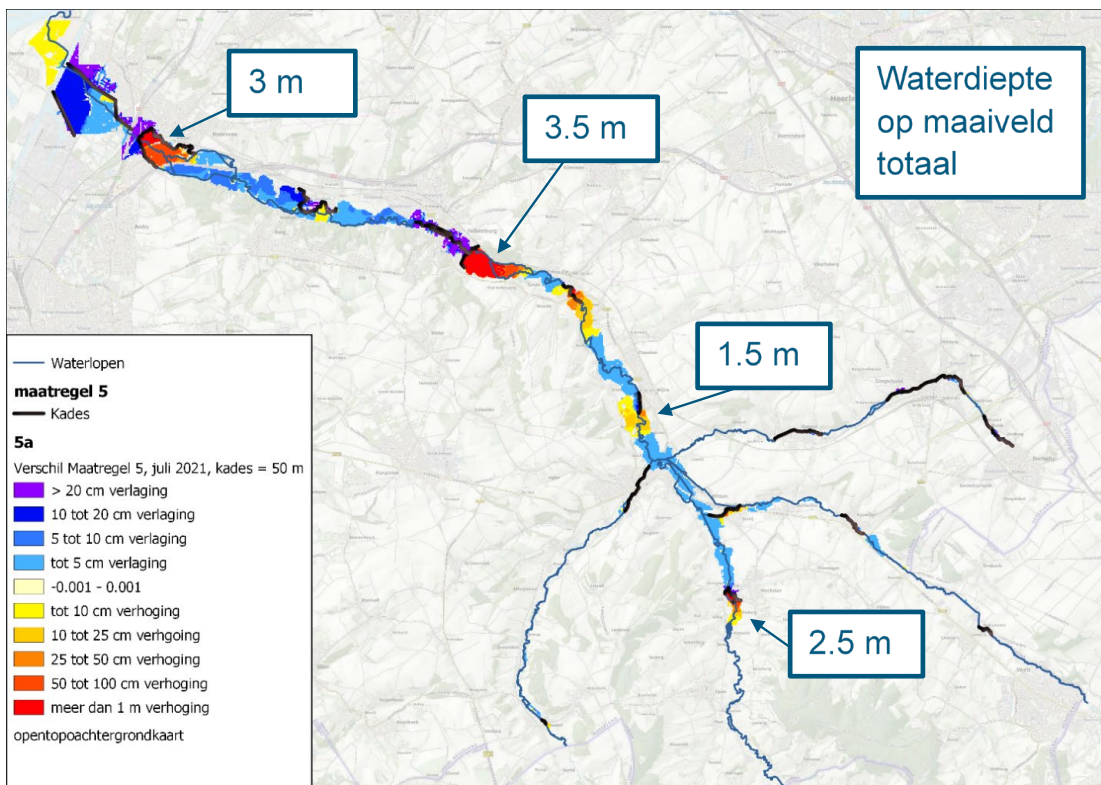
- 5a. Een variant met oneindig hoge kades, zodat duidelijk wordt tot hoe hoog de kades moeten worden om ook in juli 2021 het water te keren
- 5b. Een variant met kades van 1,5 meter hoog, zodat de kades landschappelijk beter inpasbaar zijn.



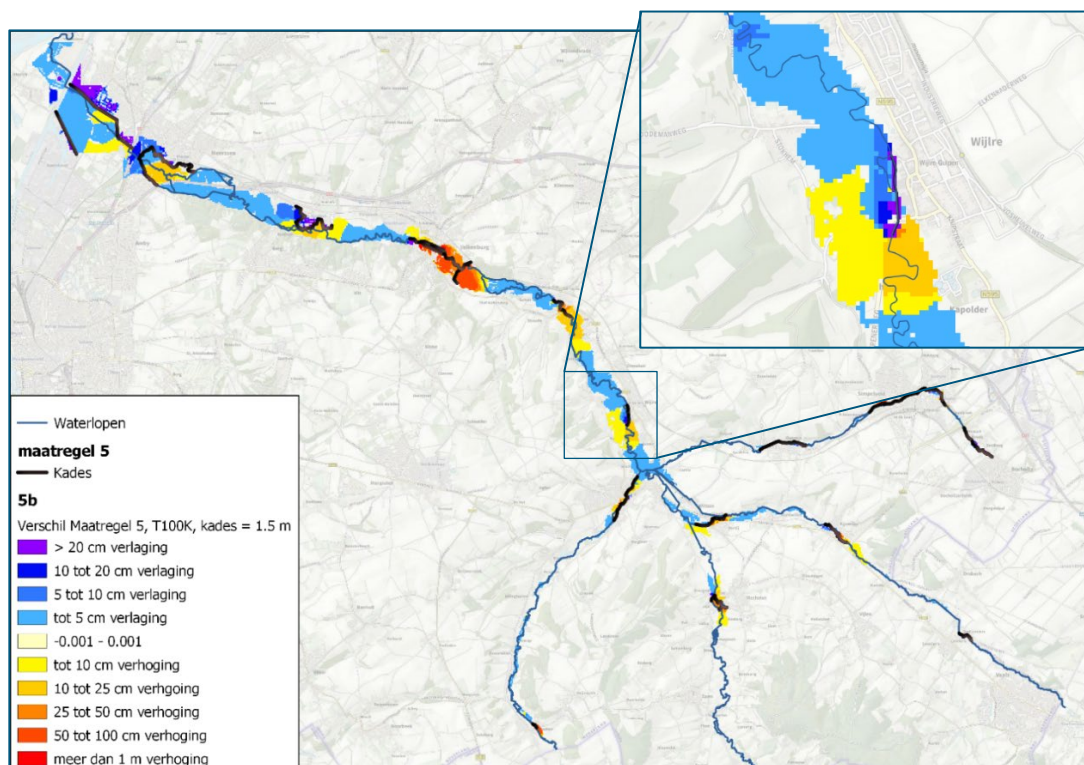
Figuur 5.17 Locaties van gemodelleerde extra kades (oranje lijnen)

Figuur 5.18 toont het effect op de waterstanden van kades die hoog genoeg zijn om het water in juli 2021 te keren.





Figuur 5.18 Effect van kades bij dorpen en steden op de maximale waterstanden in juli 2021 (verschil max. waterdiepte tussen referentie en maatregel 5a) De benodigde hoogte van de kades is voor een aantal plaatsen gegeven, omdat de waterstanden zo hoog komen in de berekening met oneindig hoge kades.



Figuur 5.19 Waterstandsverschil door de aanleg van 1,5 m hoge kades voor T100 klimaat 2050 (gele en rode kleuren duiden op een hogere waterstand na aanleg van de kades)

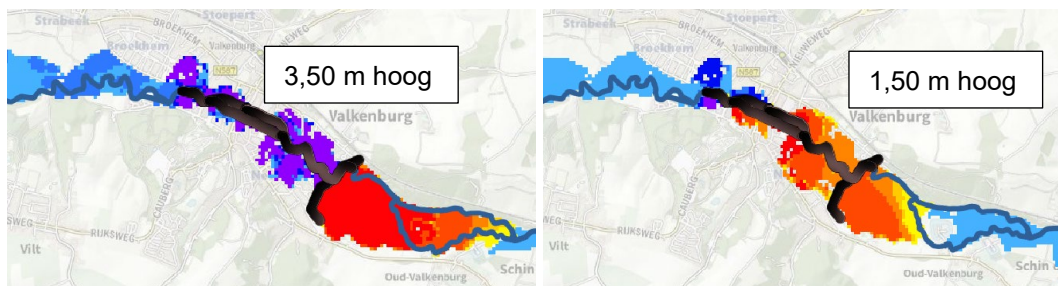
De aanleg van kades zorgt op veel plaatsen voor een grote afname van de afvoercapaciteit. Dit leidt tot opstuwing en hogere waterstanden bovenstrooms (soms meerdere meters hoger). Deze opstuwing zorgt wel voor extra berging. Daardoor zien we benedenstrooms van deze flessenhalzen juist lagere waterstanden.



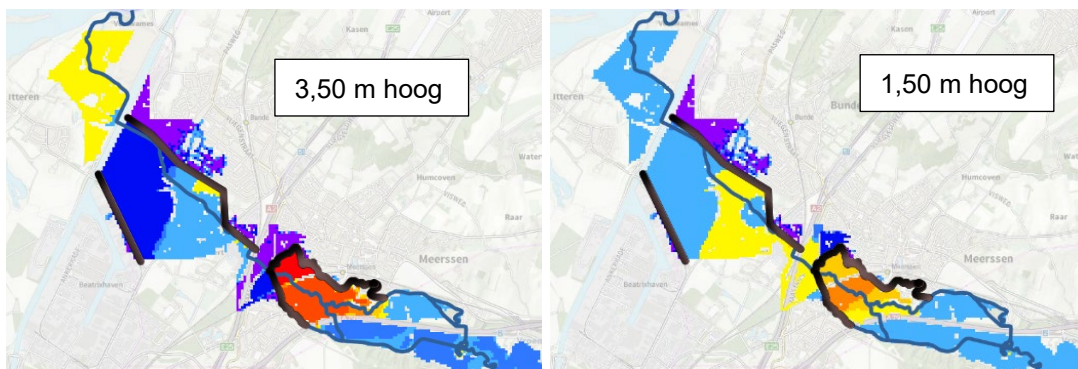
*Figuur 5.20 Impressie van de verandering in het centrum van Valkenburg (boven) en bovenstrooms van het centrum (onder) door de aanleg van 3 m hoge kademuren (bron: Provincie Limburg)*

Omdat kades tot 3,5 m hoog landschappelijk moeilijk inpasbaar zijn, is ook het effect van kades met een hoogte van 1,5 m onderzocht (Figuur 5.19). Ook nu ontstaat door de kades op verschillende locaties een flessenhals, die bovenstrooms leidt tot een verhoging en benedenstrooms tot een verlaging van de waterstand. Bij Wijlre is de toe- en afname circa 20 cm (zie Figuur 5.19).

Een gevaar bij het toepassen van kades is dat ze bescherming bieden tot de hoogte van de kade zelf maar bij hogere waterstanden alsnog overstromen en vervolgens tot extra gevaarlijke situaties kunnen leiden. Het water zit dan als het ware gevangen achter de kades en kan niet terugstromen naar de Geul. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 5.21 voor Valkenburg. Bij de 1,5 m hoge kades (rechts) komt er nog steeds water achter de (te lage) kades en vervolgens kan het water daar niet meer weg. De waterstanden in Valkenburg worden daardoor hoger dan in de huidige situatie zonder kades. Wanneer 3,5 m hoge kades worden aangelegd en er is sprake van een doorbraak aan de bovenstroomse zijde, dan zal dit effect nog groter worden: het centrum van Valkenburg zal dan 3,5 m diep onder water komen te staan. Een ander aandachtspunt bij het toepassen van kades is dat de lokale afwatering van regenwater naar de beek nog mogelijk moet zijn.



Figuur 5.21 Waterstandsverschil bij de aanleg van 3,5 m hoge kades (links) en 1,5 m hoge kades (rechts) in Valkenburg voor juli 2021 (voor legenda, zie Figuur 5.19)



Figuur 5.22 Waterstandsverschil bij de aanleg van 3,5 m hoge kades (links) en 1,5 m hoge kades (rechts) bij Bunde en Meerssen voor juli 2021 (voor legenda, zie Figuur 5.19)

Bij Bunde leidt een te lage kade of een doorbraak in een hoge kade niet tot een toename van de waterdiepte in de gebieden ten oosten van het Julianakanaal (geen toename ten opzichte van een situatie zonder kade). Het water stroomt daar namelijk naar het noorden weg. Een kade of dijk lijkt hier ruimtelijk ook makkelijker inpasbaar en is daarmee kansrijk juist ook omdat het de wateroverlast ten noorden van de Geul vermindert.

## 5.6 Conclusies

In het stroomgebied van de Geul viel extreem veel neerslag waardoor forse overstromingen plaatsvonden. In de toekomst kan dit door klimaatverandering vaker optreden. Er is geen makkelijke oplossing beschikbaar; geen enkele van de verkende maatregelen kan overstromingen tijdens een gebeurtenis zoals in juli 2021 voorkomen. De maatregelen leiden wel tot kleinere waterdieptes, waardoor het overstromingsgevaar af neemt. Op het niveau van het hele stroomgebied zijn maatregelen waarbij water bovenstrooms wordt vastgehouden (ook in België) het meest effectief.

Over het gehele stroomgebied van de Geul viel gemiddeld 128 mm neerslag in twee dagen tijd. Op basis van statistieken uit het verleden wordt de herhalingstijd ingeschat op circa 500 jaar. Ongeveer 1/3 deel van de neerslag is tot afstroming gekomen en afgevoerd naar de Maas. De rest is tijdelijk vastgehouden in de bodem en het (soms diepe) grondwater en komt later tot afstroming.

De afstromende neerslag leidde tot een (berekende) piekafvoer bij Cottessen van circa 100 m<sup>3</sup>/s, bij Valkenburg van ongeveer 135 m<sup>3</sup>/s en bij Meerssen (door topvervlakking) weer circa 110 m<sup>3</sup>/s.

Benedenstrooms van Gulpen, na de instroom van Gulp, Eyserbeek en Selzerbeek kwam ongeveer 70% van het passerende water uit België. De hoge afvoeren hebben langs de hele Geul geleid tot grootschalige overstromingen, met veel schade als gevolg. Op een aantal locaties zijn de gevolgen van de overstromingen verergerd doordat de Geul (of de zijbeken) daar te weinig ruimte hebben. Met name in Valkenburg zijn de waterlopen smal, is er een veelheid aan bruggen en is er simpelweg een te klein doorstroomprofiel om dergelijke grote afvoeren te verwerken. Vanuit het oogpunt van het stromende water in de Geul staat de bebouwing 'in de weg', wat leidt tot een flessenhals en opstuwung.

Voor het stroomgebied van de Geul concluderen we dat met geen van de verkende maatregelen het mogelijk is om overstromingen tijdens een hoogwater als van juli 2021 volledig te voorkomen. Wel verlagen ze de maximale waterstanden, ook bij minder extreme neerslag.

1. Bronmaatregelen (maatregelen op landbouw-, natuurgronden en in stedelijk gebied waardoor meer water infiltreert) kunnen leiden tot lagere afvoeren en waterstanden. Wanneer 10 mm extra neerslag per dag zou kunnen infiltreren, dan leidt dat volgens de berekening tot maximaal 20 cm lagere waterstanden in de Geul. Het effect op de waterstanden wordt relatief minder voor de meer extreme gebeurtenissen.
2. Het vergroten van de berging bovenstrooms in de beekdalen om daarmee de afvoergolf te remmen leidt tot lagere waterstanden benedenstrooms. Bij de uitgevoerde berekeningen waarbij de beekbodem wordt verhoogd om meer afvoer door de overstromingsvlakte te leiden, werden de waterstanden bovenstrooms van de ingreep tot lokaal 20 cm hoger en duurde de afvoergolf langer. De benedenstroomse verlaging bedroeg veelal 5 à 10 cm. Het is bij deze maatregel belangrijk om het water op de juiste plaats op te stuwen (waar het niet leidt tot extra schade) ten gunste van gebieden waar men overlast wil voorkomen. Een aandachtspunt is dat door het vertragen van de afvoergolf de afvoerpiek van de Geul vaker zou kunnen gaan samenvallen met de afvoerpiek op de Maas.
3. Het vergroten van de berging in de beekdalen door middel van drempels (civieltechnische constructies) leidt ook tot lagere waterstanden benedenstrooms (in dit geval maximaal 20 tot 50 cm). De waterstandstoename bovenstrooms van de drempels is afhankelijk van de hoogte van de drempel en bedroeg in de doorgerekende varianten meer dan 100 cm. Aandachtspunten bij de aanleg van drempels zijn de inpassing in het landschap. Hun effectiviteit hangt sterk af van het ontwerp van de doorlaatcapaciteit en daarmee de vraag vanaf welke afvoer water geborgen moet worden.
4. Het verhelpen van lokale hydraulische knelpunten zoals bruggen, leidt lokaal tot 20 cm lagere waterstanden. De mate van afwenteling is een risico, maar dat lijkt beperkt te blijven: waterstanden benedenstrooms nemen vaak maar enkele cm toe.
5. De afvoercapaciteit bij Bunde kan worden vergroot door vergroting van de capaciteit van de sifon onder het Julianakanaal, maar ook door water af te laten naar het Julianakanaal.
6. Op sommige locaties kan wateroverlast worden voorkomen door kades aan te leggen, zoals aan de noordkant van de Geul bij Bunde. Op andere plekken, zoals bij Valkenburg, is de aanleg van kades erg ingrijpend: ze zouden erg hoog moeten worden. Wanneer de kades te laag worden aangelegd, of wanneer een kade aan bovenstroomse zijde doorbreekt, dan kan het overstromingsgevaar zelfs toenemen. In het geval van Valkenburg loopt het water dan door het centrum en kan benedenstrooms niet terug stromen naar de Geul. De waterdieptes nemen daar dan zelfs toe.

De effectiviteit van de verschillende maatregelen is samengevat in de Tabel 5.2. Aan de hand van plussen en minnen, gebaseerd op bovenstaande toelichting, toont de tabel het effect voor respectievelijk een T25 en T100 voor zowel het huidige als het toekomstige klimaat in 2050.

Tabel 5.2 Samenvattend overzicht van de effectiviteit van verschillende typen maatregelen in het watersysteem van de Geul (effecten in cm hebben betrekking op positieve effecten).

Stroomgebied Geul	Neerslagsituatie			opmerking
	T25	T100 (T25 klimaat)	juli 2021 (T100 klimaat)	
<b>water vasthouden</b>	+++*	++*	++ (≤ 20cm)	Potentieel veel effect, mits grootschalig aangepakt. Relatief minder effect bij meer extreme gebeurtenissen. Voor juli 2021 maximaal 20 cm lagere waterstanden.
<b>water bergen: verruwing overstromingsvlakte Gulp</b>	+ (≤ 2cm)	+ (≤ 2cm)	+ en – (1 cm)	Veel groter effect te verwachten indien grootschalig toegepast. Benedenstrooms nemen waterstanden max paar cm af. In het verruwde deel nemen waterstanden met meerdere dm toe.
<b>water bergen: drempels</b>	++ (≤ 20cm)	++ (≤ 20cm)	++ en – (≤ 50 cm)	Bovenstrooms opstuwning, benedenstrooms waterstandsverlaging. Effecten orde enkele tot tientallen centimeters. Maatregel effectief wanneer hogere waterstand bovenstrooms van drempel niet leidt tot meer schade. Effect het grootst bij juli 2021 gebeurtenis omdat doorlaatcapaciteit daarop is ontworpen.
<b>verbeteren afvoercapaciteit bruggen</b>	++ (lokaal >20cm)	++ en – (max 10 tot 20 cm)	++ en – (≤ 20 cm)	bovenstrooms paar cm tot dm verlaging, benedenstrooms paar cm verhoging.
<b>verbeteren afvoercapaciteit Valkenburg</b>	+ (20 cm)	++ en – (≤ 1 m)	+++ en – (≤ 1 m)	heel effectief voor Valkenburg zelf, met slechts beperkt afwenteleffect benedenstrooms
<b>verbeteren afvoercapaciteit bij sifon Geulmonding</b>	0	+ (≤ 10 cm)	++ (≤ 20 cm)	probleem is er pas vanaf circa een T100, maar dan heel effectief
<b>aanleg kades</b>	++	+ en -	+ en -	kan schade aan woningen verminderen. Leidt tot afwentelen boven- en/of benedenstrooms. Meest kansrijk bij Bunde.

\* niet doorgerekend, maar beoordeeld op basis van expertkennis

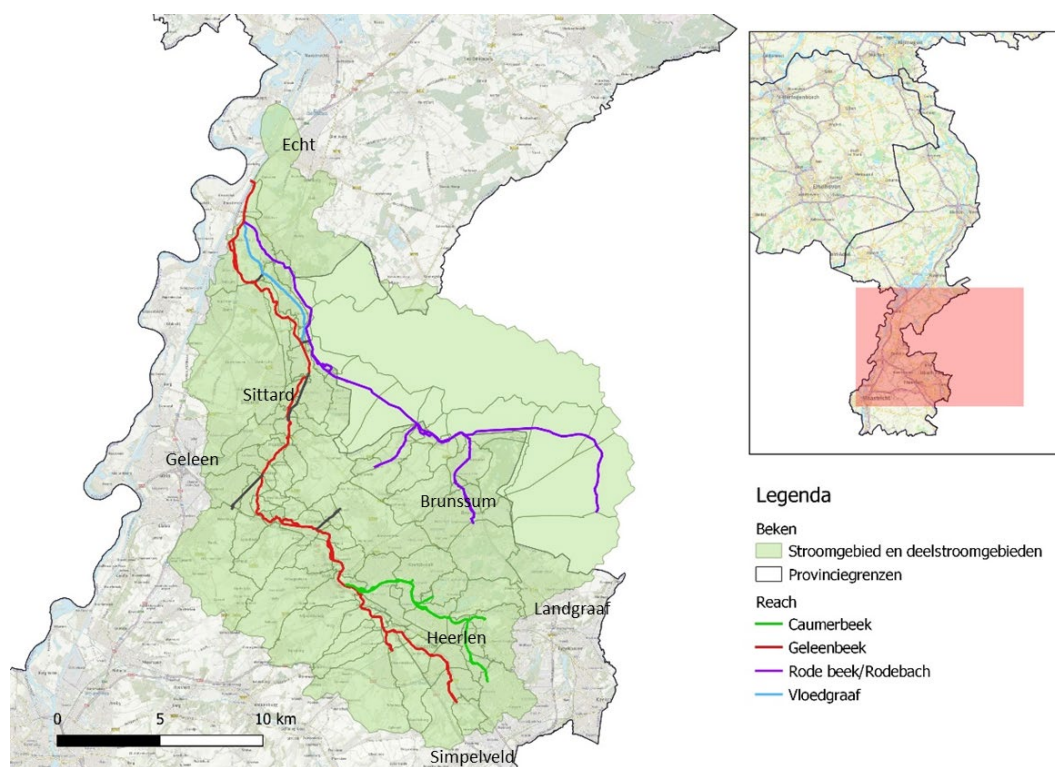
## 6 Geleenbeek

### 6.1 Inleiding

De watersysteemanalyse voor de Geleenbeek concentreert zich – net als die van de Geul – op het Nederlandse deel van het stroomgebied. Ook hier is met een simulatiemodel<sup>8</sup> geprobeerd het gedrag van het watersysteem tijdens het hoogwater van juli 2021 zo goed mogelijk na te bootsen. Dat is beperkt gelukt. Desondanks is het model vervolgens met de nodige aanpassingen en aannames gebruikt om te analyseren hoe het watersysteem functioneert onder andere natte omstandigheden en om gevoel te krijgen voor de effectiviteit van verschillende typen maatregelen. Dit hoofdstuk vat de belangrijkste bevindingen samen. Voor een uitgebreidere beschrijving van het model, de uitgevoerde modelverbeteringen en de uitgevoerde simulaties wordt verwezen naar het technische achtergrondrapport van Bosch (2022).

### 6.2 Het stroomgebied van de Geleenbeek

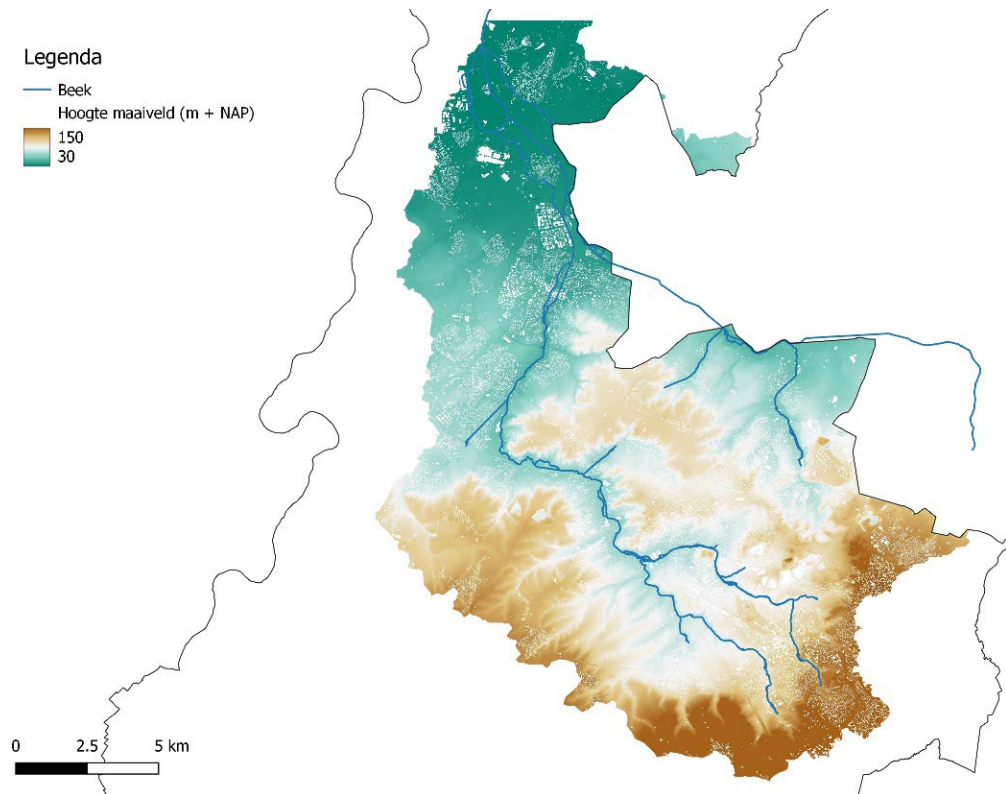
Het stroomgebied van de Geleenbeek bevindt zich in het zuiden van Limburg. Het gebied voert globaal vanuit zuidoostelijke naar noordwestelijke richting af. Het meest bovenstrooms gelegen, zuidoostelijke deel van het stroomgebied ligt nabij Simpelveld en Landgraaf. Vandaar stroomt de beek, onderweg deels gevoed vanuit de Caumerbeek (regio Heerlen) en ook vanuit de Rode beek, in noordwestelijke richting. Uiteindelijk stroomt het water via een sifon onder het Julianakanaal door en mondt de beek ten westen van Echt uit in de Maas.



Figuur 6.1 Ligging van het stroomgebied van de Geleenbeek met daarin de belangrijkste beken.

<sup>8</sup> Het model van de Geleenbeek is vergelijkbaar met dat van de Geul. Het betreft een combinatie van een HBV neerslagafvoermodel en een SOBEK 1D2D waterbewegingsmodel. Het Duitse deel van het stroomgebied is alleen gemodelleerd in het neerslagafvoermodel.

De hoogte van het stroomgebied ligt tussen NAP +30 m en NAP +200 m. Figuur 6.2 toont het hoogtekaartje voor het Nederlandse deel van het stroomgebied.



Figuur 6.2 Hoogteligging (m + NAP) in het Nederlandse deel van het stroomgebied van de Geleenbeek.

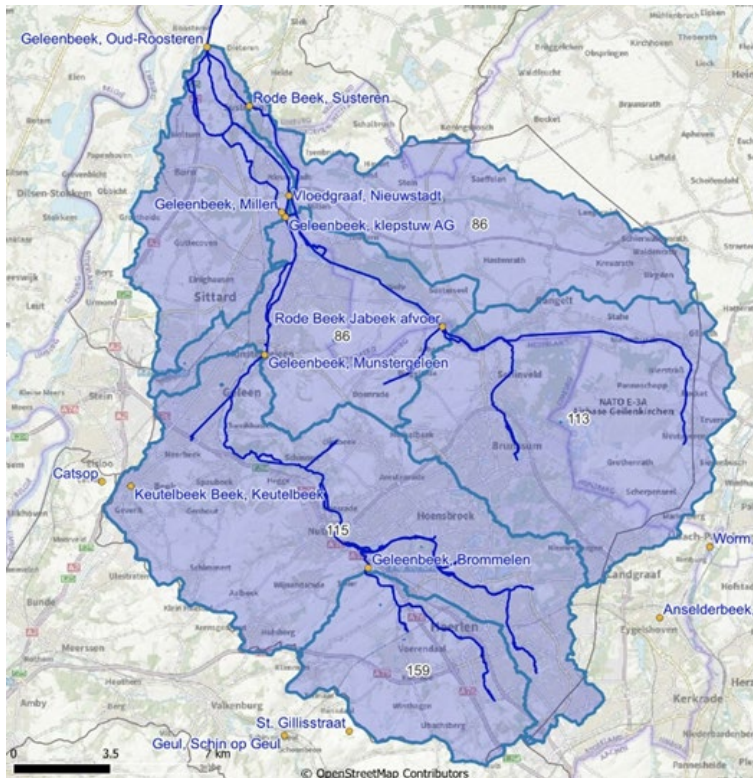
In tegenstelling tot de Geul, is het stroomgebied van de Geleenbeek erg verstedelijkt (zie Figuur 3.4). In de vorige eeuwen werden de beken veel gebruikt als open riool. Daarom zijn grote delen van de beek overkluisd (o.a. in Sittard). De laatste jaren wordt in diverse beekherstelprojecten hard gewerkt om de natuurlijke staat van de beken weer terug te brengen (bijvoorbeeld in het project Corio Glana). Ten opzichte van het stroomgebied van de Geul reageert het stroomgebied van de Geleenbeek sneller en heviger op korte neerslagperiodes. Dit komt vooral door het grotere verharde oppervlak.

### 6.3 Wat is er gebeurd in juli 2021?

In het stroomgebied van de Geleenbeek is tussen 13 en 15 juli 2021 gemiddeld veel minder neerslag gevallen dan in de Geul: 93 mm tegenover 128 mm. De herhalingstijd van deze totale neerslaghoeveelheid voor de Geleenbeek is circa 20 tot 50 jaar.

Figuur 6.3 toont de 4-daagse neerslagtotalen voor de deelstroomgebieden van de Geleenbeek. De kaart toont dat in het zuidoostelijke deel van de Geleenbeek en de Caumerbeek veel meer neerslag viel dan in de rest van het stroomgebied. Dit heeft in de regio Heerlen geleid tot forse wateroverlast. In het gebied tussen Ransdaal en Heerlen zijn tweedaagse neerslagsommen tot 175 mm opgetreden. Hierbij traden neerslagintensiteiten op van 35-40 mm per uur en zelfs een keer 19 mm in één kwartier!

De herhalingsjijd van deze lokale neerslagsommen is meer dan 2000 jaar<sup>9</sup> (zie Figuur 4.3). Elders in het stroomgebied was de neerslag veel minder.



Figuur 6.3 Neerslagtotalen in mm, gemiddeld per deelstroomgebied van de Geleenbeek tussen 12 t/m 16 juli 10 uur, samen met de locaties van de afvoermeeptpunten.

Bij Brommelen werd een piekafvoer gemeten van circa 17,2 m<sup>3</sup>/s, bij Munstergeleen 27,5 m<sup>3</sup>/s, bij Vloedgraaf Nieuwstadt 25,9 m<sup>3</sup>/s en bij Roosteren 28,3 m<sup>3</sup>/s.

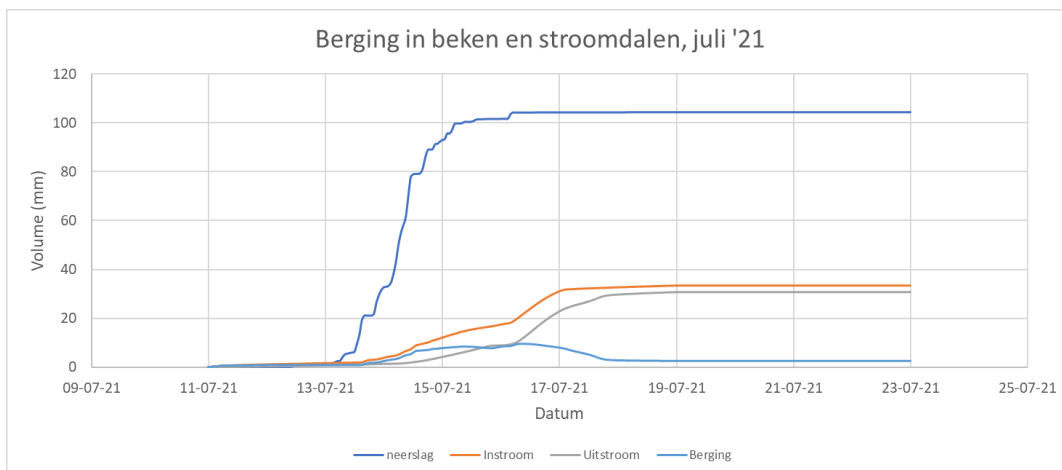
Wanneer we kijken naar de bijbehorende herhalingsjijd, dan is de piekafvoer in de bovenstroomse delen veel extremer dan verder benedenstrooms. Bovenstrooms in de Geleenbeek (bij Brommelen) heeft de piekafvoer een herhalingsjijd van meer dan 100 jaar. Bij Munstergeleen (iets verder benedenstrooms) is de herhalingsjijd van de piekafvoer iets meer dan 10 jaar. En bij de monding van de Geleenbeek (meetpunt Roosteren) was de piekafvoer niet veel hoger dan de afvoer die daar jaarlijks wordt overschreden. Hoe dat komt wordt toegelicht in de volgende paragraaf.

## 6.4 Hoe functioneert het systeem onder natte omstandigheden?

Voor de periode van juli 2021 is op basis van de resultaten van het simulatiemodel een waterbalans opgesteld (Figuur 6.4) waaruit blijkt dat van de neerslag slechts 30% afstroomt naar de Maas. De overige 70% is (tijdelijk) geborgen in de bodem en op het land. Dit is vergelijkbaar met het percentage voor het hele stroomgebied van de Geul (inclusief België), maar ongeveer twee keer meer afstroming dan in het Nederlandse deel van het Geulstroomgebied. Dit kan komen door het veel grotere aandeel verhard gebied. In dergelijke gebieden infiltreert minder water in de bodem.

<sup>9</sup> Dit is op basis van de gemiddelde neerslagstatistiek voor Nederland. Voor het heuvelland zou dit uit kunnen komen op een herhalingsjijd van ongeveer 1000 jaar.





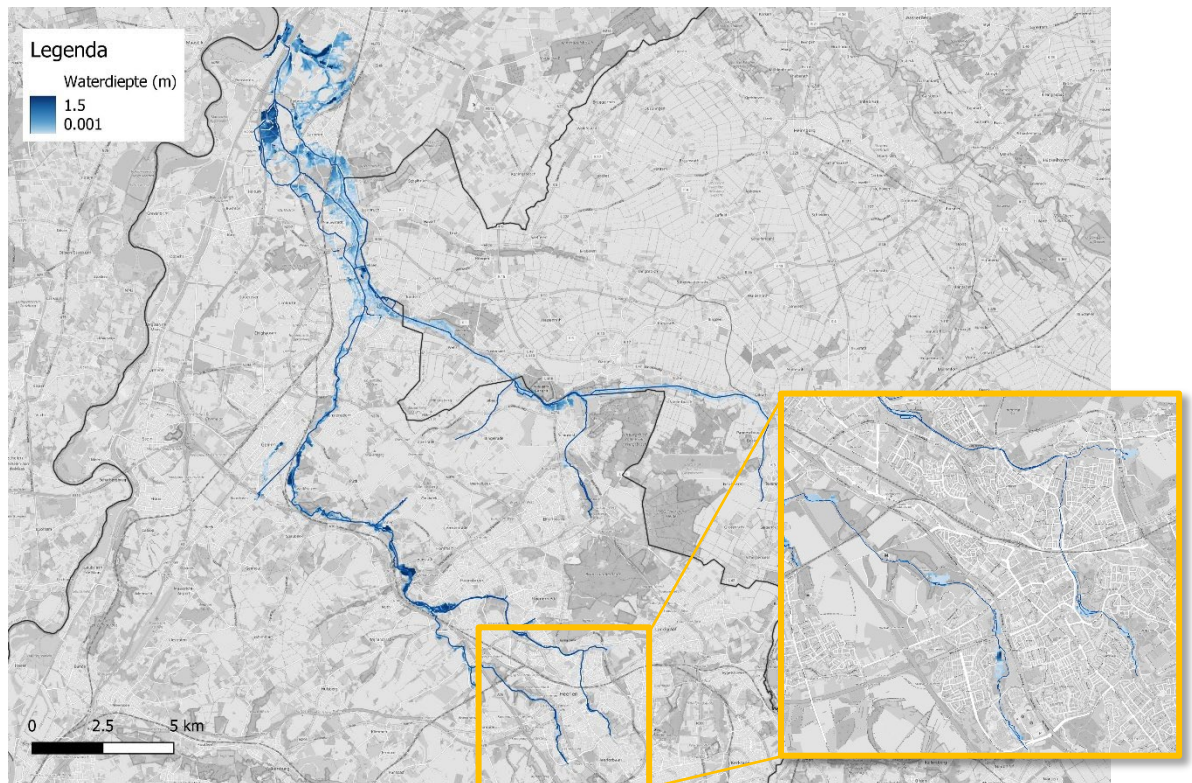
Figuur 6.4 Berekende cumulatieve toevoer (oranje) naar de Geleenbeek en afvoer naar de Maas (grijs), samen met het verloop van het volume aan berging in het beekdal (lichtblauwe lijn) en neerslag (donkerblauwe lijn) tijdens het hoogwater van juli 2021

De verklaring voor de relatief grote berging is dat de neerslag gemiddeld over het hele stroomgebied weliswaar groot was, maar dat dit gemiddelde minder intens was dan in het Geulgebied. Op het niveau van deelstroomgebieden, zoals de Caumerbeek bij Heerlen is forse wateroverlast opgetreden. Dit is echter mede veroorzaakt door de beperkte capaciteit van de lokale afwatering van regenwater (*pluvial flooding*) en niet alleen als gevolg van overstroming van de Caumerbeek zelf. Zie ook het voorbeeld in Figuur 6.5 van de A79 bij Heerlen, die op 14 juli 2021 overstroomde als gevolg van beperkte lokale afwatering, mogelijk in combinatie met hoogwater op de Geleenbeek.



Figuur 6.5 Wateroverlast op de A79 ter hoogte van Heerlen op 14 juli 2021 (links, foto Orange media) en de T10 kaart voor kortdurende hevige regenval uit Landelijk Informatiesysteem Water en Overstromingen (LIWO, 2022)

Figuur 6.6 toont de maximale waterdieptes voor een T100 situatie, zoals berekend met het model.



Figuur 6.6 Berekende overstromingen vanuit de Geleenbeek voor het hele Nederlandse deel van het stroomgebied voor de T100 situatie, de blauwe kleuren zijn waterdieptes berekend met een model

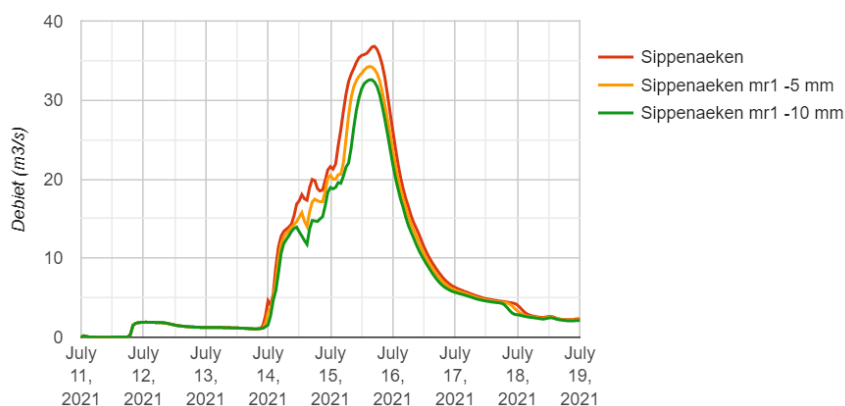
## 6.5 Maatregelen

Het effect van maatregelen is bepaald met behulp van de bestaande modellen. In het kader van dit project zijn enkele verbeteringen in het model doorgevoerd. Desondanks wordt de wateroverlast door het model flink onderschat, vooral wateroverlast die wordt veroorzaakt door problemen met de lokale afwatering. Het model is nooit bedoeld geweest en dus niet geschikt voor het modelleren van de stedelijke afwatering zelf en eventuele knelpunten daarin zoals in Heerlen. Het gebruikte model berekent overstromingen vanuit de beek (*fluvial flooding*) en geen overstromingen van als gevolg van afstromend regenwater (*pluvial flooding*). Hierdoor komen vooral benedenstroomse locaties zoals Sittard naar voren als potentieel probleem en minder de bovenstroomse locaties zoals rond de Caumerbeek in Heerlen. De verkenning van mogelijke maatregelen is dus vooral gedaan op het niveau van het watersysteem als geheel en als zodanig niet representatief voor wateroverlast zoals die is ervaren in de regio Heerlen tijdens het hoogwater van juli 2021. De maatregelen (behalve de eerste) zijn doorgerekend met voor een T25 en T100 situatie voor zowel huidig als toekomstig klimaat in 2050.

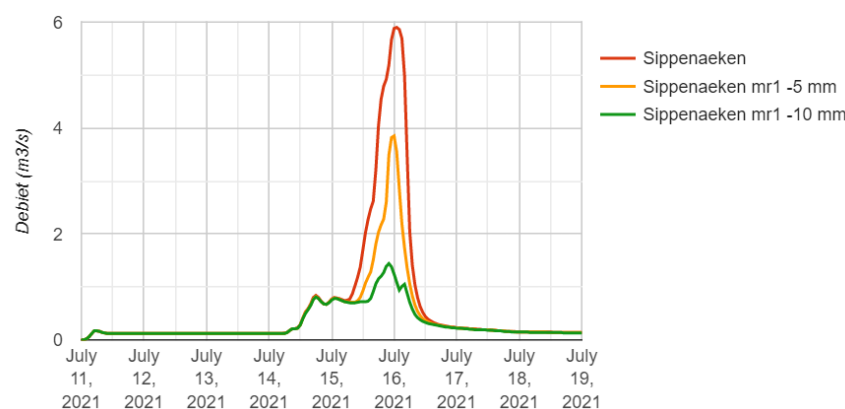
### 6.5.1 Vasthouden van water bovenstrooms

Het effect van bronmaatregelen in de vorm van tijdelijk 'vasthouden' en laten infiltreren van regenwater (in stedelijk gebied bijvoorbeeld via wadi's) is gesimuleerd met twee varianten. Beide zijn vergeleken met een simulatie van een referentiesituatie waarin geen veranderingen zijn aangenomen.

In alle gevallen is de neerslag die gevallen is in het Belgische deel van de Geul (hier "Sippenaeken" genoemd) gebruikt als invoer in het hydrologische model (voor het stroomgebied als geheel is dit een extremere neerslaggebeurtenis dan juli 2021). De bronmaatregelen zijn nagebootst door de neerslag op de twee dagen met de grootste intensiteit met respectievelijk 5 en 10 mm te reduceren. Figuur 6.7 toont de berekende afvoeren voor Munstergeleen. De berekende piekafvoer in de referentiesituatie van ongeveer 37 m<sup>3</sup>/s daalt met respectievelijk 1,7 m<sup>3</sup>/s en 4,3 m<sup>3</sup>/s.



*Figuur 6.7 Berekende afvoeren te Munstergeleen bij de huidige inrichting van het stroomgebied (referentie) en na het nemen van bronmaatregelen waarbij 5 of 10 mm neerslag extra wordt vastgehouden*

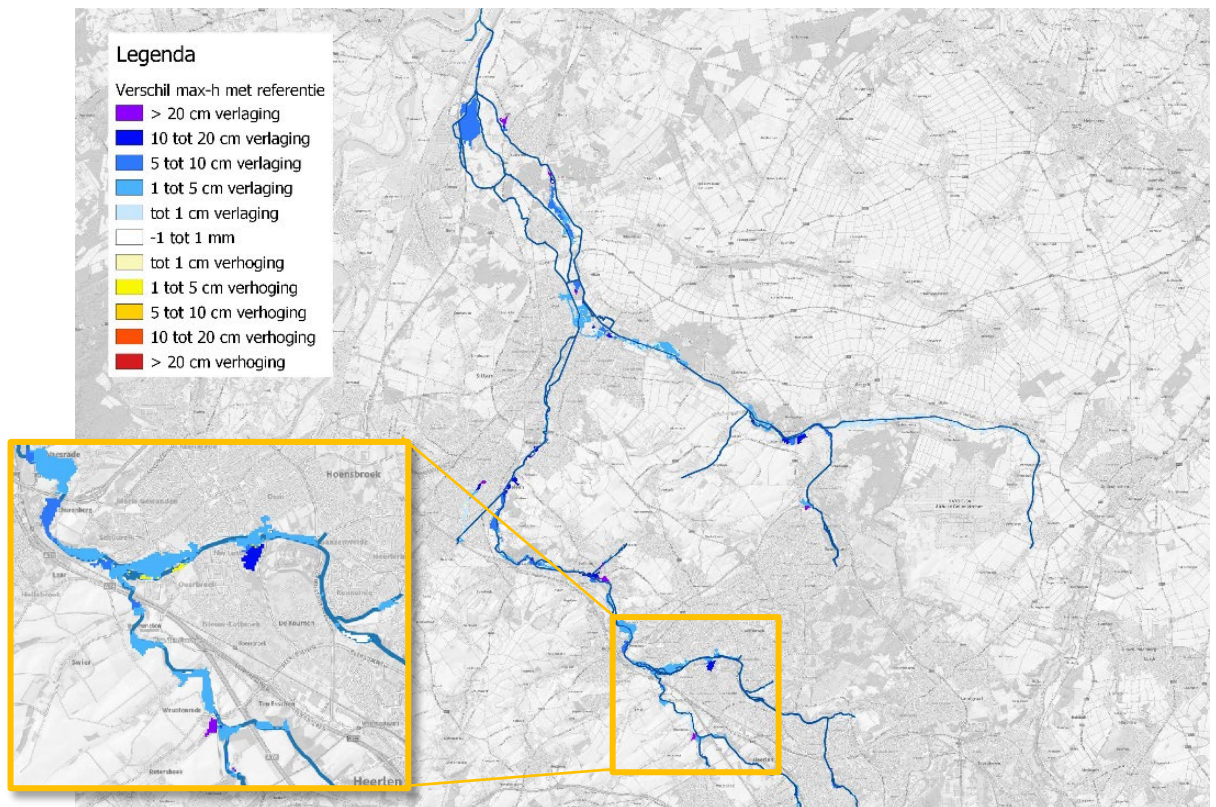


*Figuur 6.8 Berekende afvoeren te Susteren bij de huidige inrichting van het stroomgebied (in de referentie) en na het nemen van bronmaatregelen waarbij 5 of 10 mm neerslag extra wordt vastgehouden*

Bij Susteren (Rode Beek) is het effect het grootst (zie Figuur 6.8). Dit komt doordat in de referentiesituatie water vanuit de westelijk gelegen vloedgraaf over het land naar de Rode Beek te stroomt, iets wat na implementatie van de bronmaatregel niet meer gebeurt.

Wanneer 5 mm neerslag per dag extra kan worden geborgen, leidt dit meestal tot een waterstandsdaling van 1 tot 5 cm (Figuur 6.9). Benedenstrooms bij Baakhoven is de verlaging 10 cm. In de Rode Beek is het effect beperkt tot minder dan 1 cm. Bij Schinnen zien we een lokale verlaging met meer dan 20 cm waterstandsdaling. Dit is een bestaand waterbergingsgebied dat volstroomt wanneer het fietspad overstroomt. Na implementatie van de maatregel stroomt er minder water in. Bij Sittard zien we geen effect, omdat volgens de simulatie de Sippenaeken-bui daar überhaupt niet tot overstromingen zou leiden. Het traject van de beek langs de Parklaan en de overkluizing kunnen het debiet van 36,4 m<sup>3</sup>/s net aan. Over een klein traject bij Susteren is de verbetering meer dan 20 cm omdat daar een kade net niet meer overstroomt na doorvoeren van de maatregel.

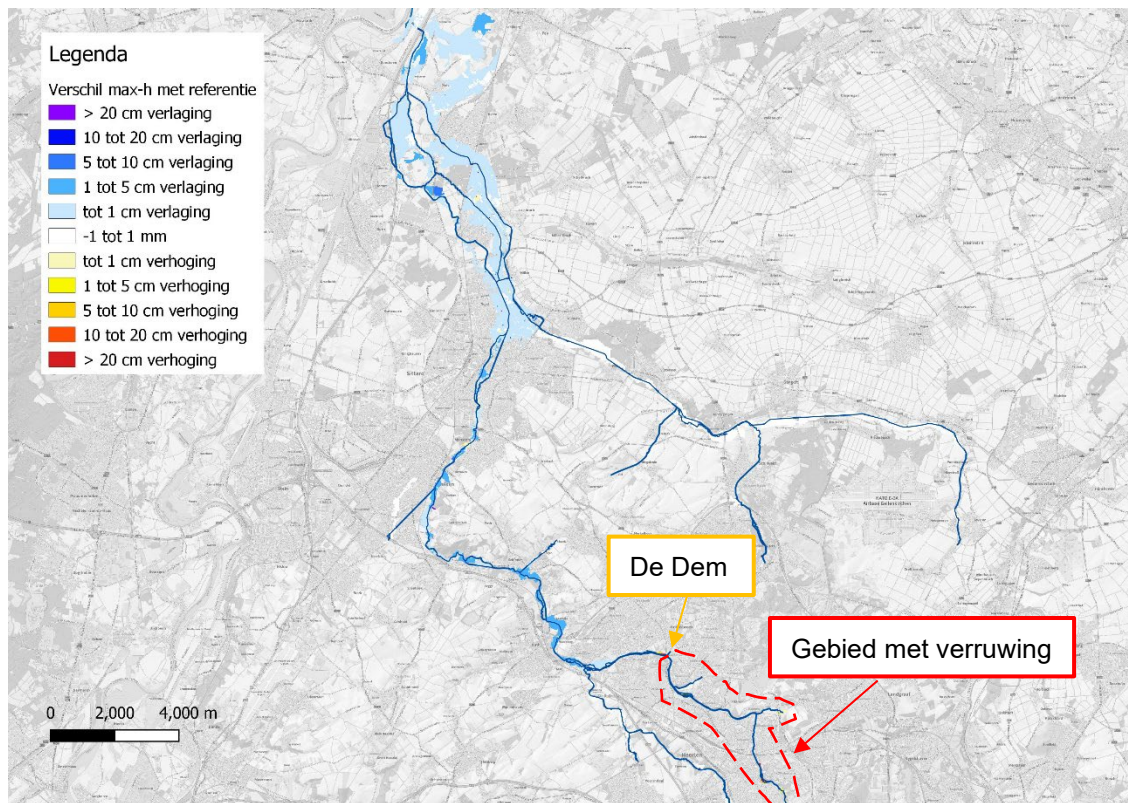
Wanneer 10 mm neerslag per dag extra kan worden vast gehouden levert dat een vergelijkbaar beeld op, maar met iets grotere verschillen. Het effect bedraagt dan op veel plaatsen 10 tot 20 cm, met lokaal verlagingen tot meer dan 20 cm.



*Figuur 6.9 Het effect van 5 mm neerslag per dag extra vasthouden gedurende de piek van de 'Sippenaekenbui' op de maximale waterstanden in het stroomgebied van de Geleenbeek.*

### 6.5.2 Bergen van water door verruwing van de overstromingsvlakten

Het doel van deze maatregel – het verruwen van de overstromingsvlakten - is om op natuurlijke wijze water in het beekdal te bergen bij gebeurtenissen met hevige neerslag. Dit kan bijvoorbeeld door het beekdal te laten verruigen. De hogere ruwheid zorgt lokaal voor opstuwung en grotere waterdieptes en daarmee tot meer berging. Dit is met het rekenmodel als concept getest in de Caumerbeek.

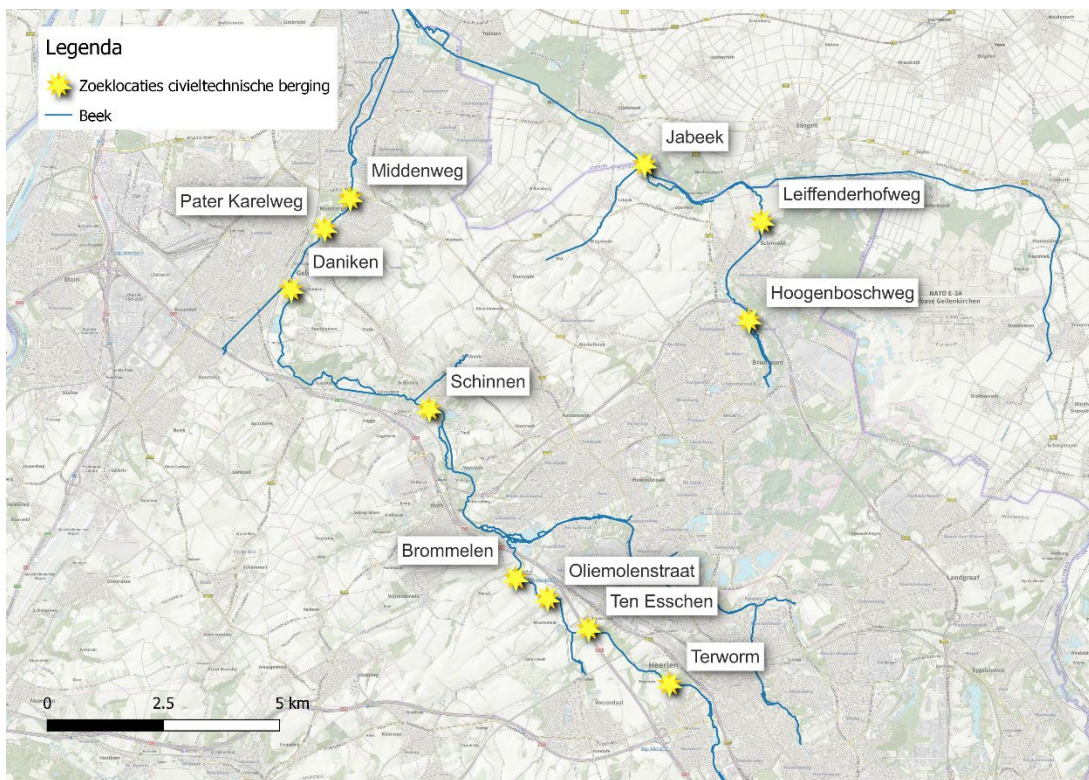


Figuur 6.10 Het effect van verruwing overstromingsvlakten Caumerbeek op maximale waterstanden bij een T100 situatie

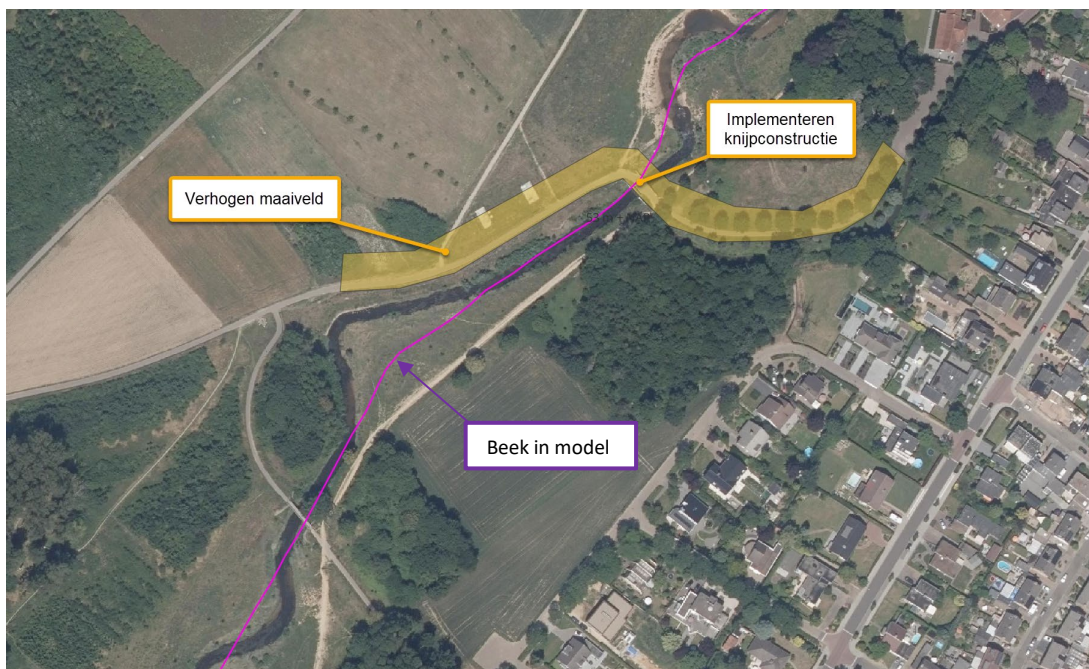
Verruwing van de overstromingsvlakten leidt tot hogere waterstanden bovenstrooms, maar tot lagere afvoeren en waterstanden benedenstrooms (zie Figuur 6.10). De uitstroom van de Caumerbeek loopt via buffer De Dem. Bij een bui met een herhalingsstijd van 100 jaar neemt de berekende piekafvoer daar af van bijna 3,3 naar 2,0 m<sup>3</sup>/s, wat een forse verbetering is. Als concept werkt deze maatregel dus zeker maar kan alleen daar worden toegepast waar er ruimte is; dat is zeker niet in het verstedelijkte gebied (Heerlen) van de Caumerbeek.

### 6.5.3 Bergen van water door inzet van waterbergingsgebieden

Locaties om water in periodes met hevige neerslag tijdelijk te bergen zoeken we vooral bovenstrooms van de grote stedelijke gebieden. In overleg met Waterschap Limburg en de Provincie Limburg zijn de locaties voor berging gekozen zoals getoond in Figuur 6.11.

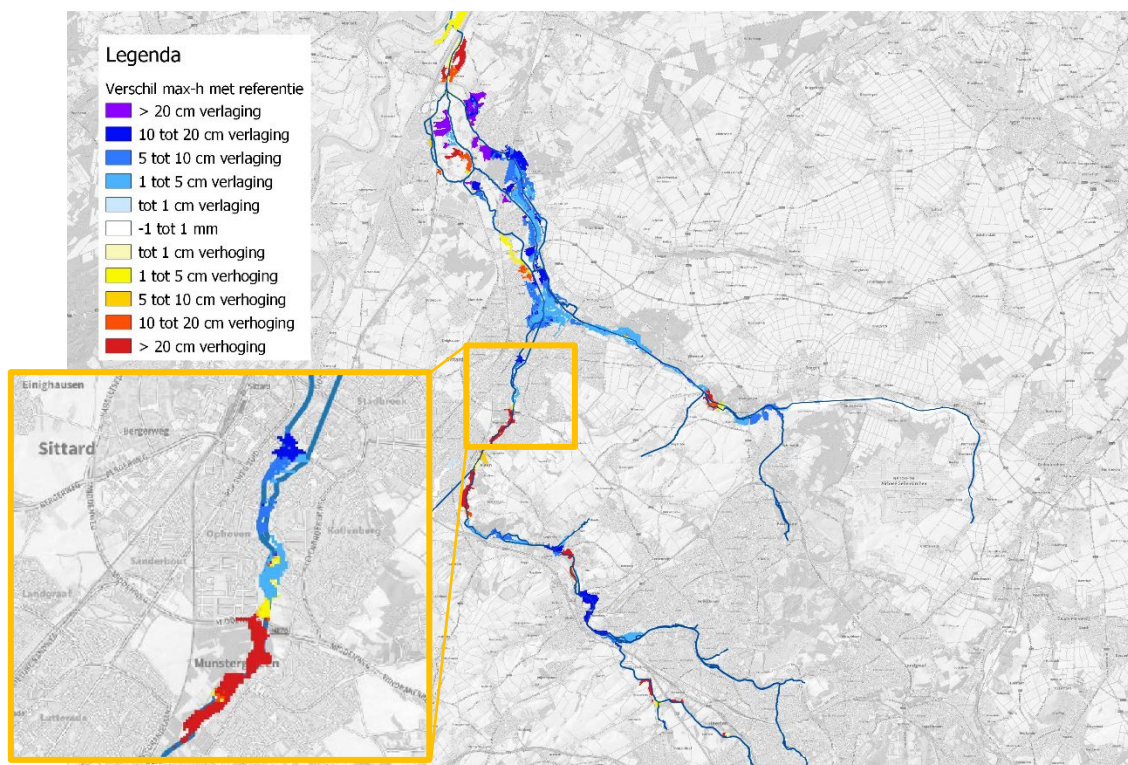


Figuur 6.11 Mogelijke locaties voor extra waterberging.



Figuur 6.12 Illustratie van de werkwijze bij het aanleggen van extra berging in de beek (paarse lijn is de beek in het model).

In de meeste gevallen komt het implementeren van berging neer op het realiseren van een drempel dwars op de beek met daarin een constructie die vanaf een bepaald moment de afvoer afknijpt, waardoor opstuwung ontstaat en water wordt geborgen. Ter bescherming van bebouwing kan het nodig zijn om aanvullend een kade (verhoging in het maaiveld) te plaatsen, zoals geïllustreerd in Figuur 6.12.



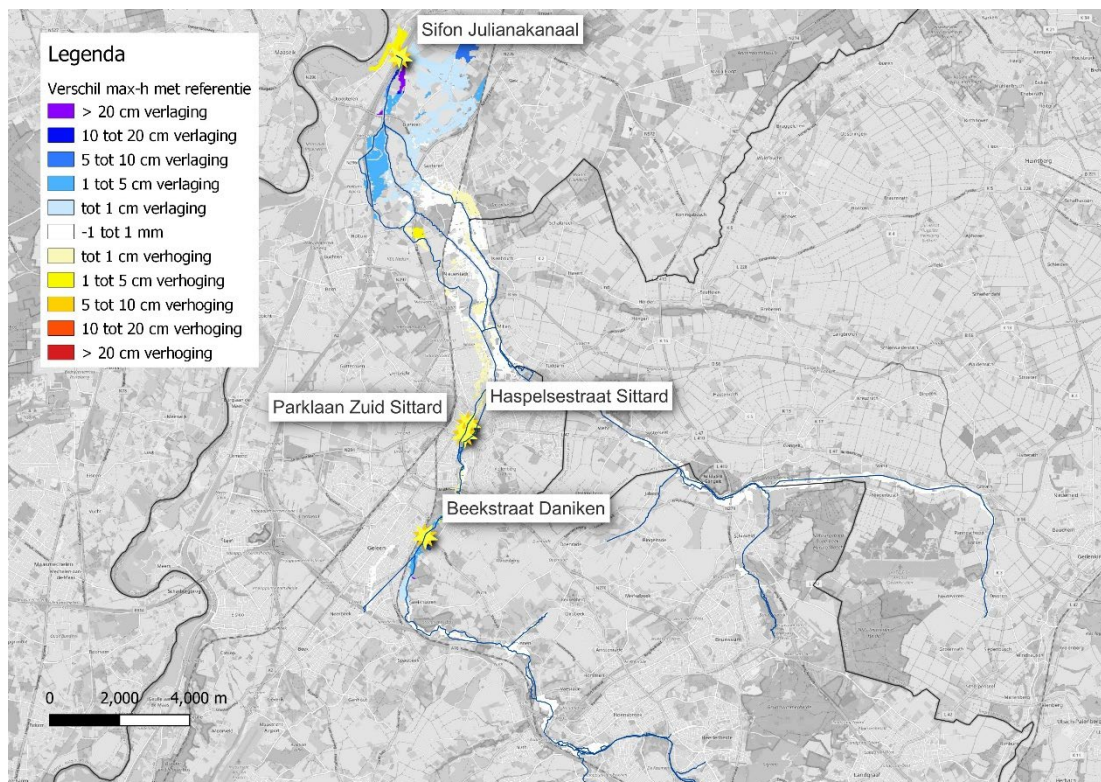
*Figuur 6.13 Het maximaal te verwachten effect van waterberging in het beekdal door de aanleg van drempels dwars op de beken bij een bui met een herhalingstijd van 100 jaar (maximaal effect omdat de berging is geoptimaliseerd voor een dergelijke bui).*

Figuur 6.13 toont het effect van alle bergingsgebieden samen, voor een bui met een herhalingstijd van 100 jaar en waarbij de afmetingen van de doorlaatconstructies zijn geoptimaliseerd om juist voor deze situatie maximaal te bergen. Bij een andere bui zal het effect naar verwachting veel kleiner zijn. De kaart laat zien dat de waterstanden in de bergingsgebieden toenemen (rode kleuren, tot soms wel een meter) en dat ze benedenstrooms van een bergingsgebied afnemen (in dit geval veelal met 5 tot 20 cm).

#### 6.5.4 Afvoeren van water door knelpunten te verruimen

De vierde maatregel betreft het verruimen van bruggen, duikers en overkluizingen die opstuwung in de beek en daarmee hogere waterstanden veroorzaken. In overleg met Waterschap Limburg is de combinatie van de volgende verruiming met het model doorgerekend:

- Ontkluizen binnenstad Sittard Parklaan-Noord en Haspelsestraat;
- Verwijderen bruggen Parklaan-Zuid (Sittard);
- Verruimen brug Bergstraat bij Daniken (verdubbelen van het lokale doorstroomprofiel);
- Verruimen sifon onder het Julianakanaal (van 4 naar 5 kokers).



*Figuur 6.14 Het effect van het verruimen van duikers, bruggen en overkluizingen op de waterstanden bij een bui met een herhalingstijd van 100 jaar.*

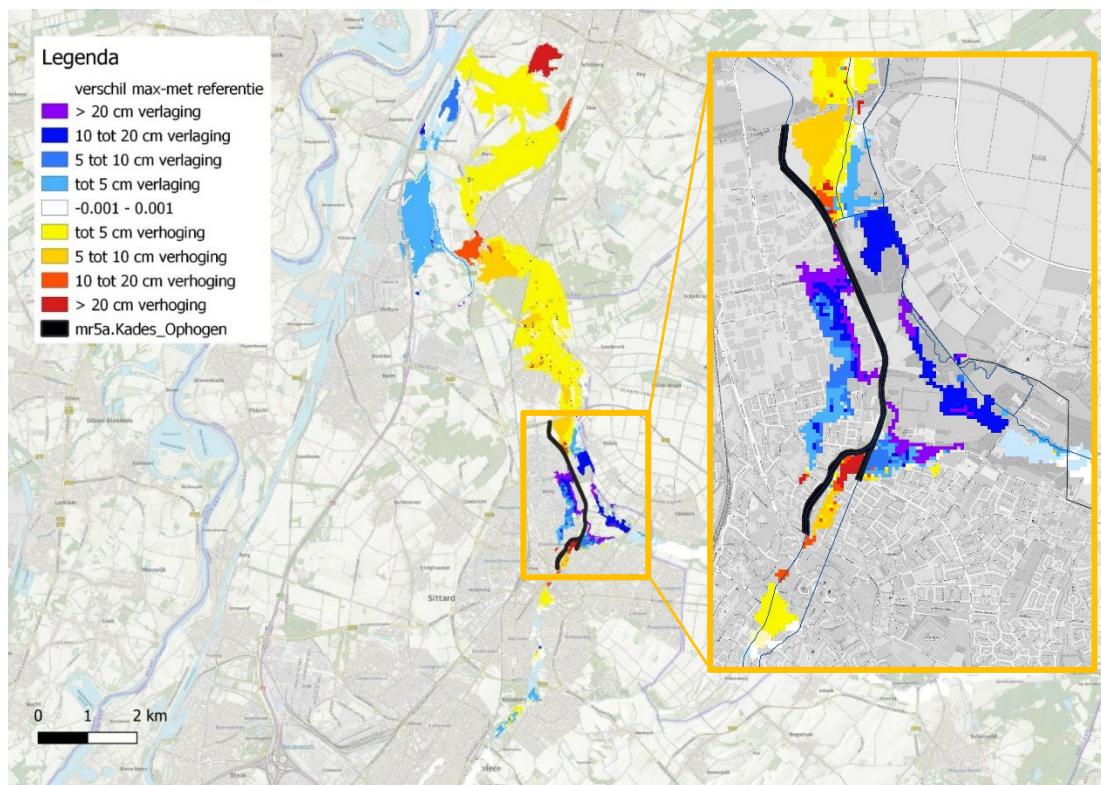
Uit Figuur 6.14 wordt duidelijk dat het verruimen van hydraulische knelpunten op veel plaatsen leidt tot lagere waterstanden, maar dat lokaal ook iets hogere waterstanden voor kunnen komen. Er is dus sprake van enig afwentelen, maar dit is beperkt tot enkele centimeters verhoging en het gebied waar de waterstanden worden verlaagd is veel groter. Het verruimen van de knelpunten kan er ook voor zorgen dat de afvoeren uit de verschillende beken op een andere manier samenvallen. De conclusie van deze verkenning is dat het 'sleutelen' aan de knelpunten effect kan hebben op het al dan niet samenvallen van piekafvoeren uit de verschillende deelstroomgebieden. Wanneer wordt overwogen om deze maatregel uit te voeren, dan moet dit effect nog beter worden onderzocht. Eventueel kan de maatregel gecombineerd worden met aanvullende maatregelen die de negatieve effecten van lokale waterstandsverhoging minimaliseren.

In het huidige onderzoek is het effect van verruiming van vier knelpunten relatief ver benedenstrooms onderzocht. Het heeft ook zeker zin om te onderzoeken of zich meer bovenstrooms in het stroomgebied zich vergelijkbare knelpunten voordoen, waarbij verruiming (en daarmee verbetering van de afvoer) nuttig zou kunnen zijn.

### 6.5.5 Beschermen van bebouwde gebieden met kades

Deze maatregel is getest voor de wijk Overhoven in Sittard, waar volgens de berekeningen relatief veel schade kan optreden bij een afvoer met een herhalingstijd van 100 jaar. In andere gebieden (zoals Heerlen) kan dit mogelijk ook worden toegepast, zolang de wateroverlast het gevolg is van overstroming vanuit de beek en niet het gevolg van beperkingen in de lokale afwatering en drainage.





Figuur 6.15 Het effect van bedijking in Sittard op de waterstanden bij een afvoer in de Geleenbeek met een herhalingsjijd van 100 jaar.

Figuur 6.15 laat duidelijk zien dat deze maatregel zowel afnames als toenames van de waterdiepte veroorzaakt. Het gebied met een (lichte) verhoging van de waterstanden is weliswaar groter dan het gebied waar een positief effect is. Het positieve effect is echter veel groter dan het negatieve effect. Het gebied achter de nieuw aangelegde kade profiteert van de maatregel, maar de gebieden direct boven- en benedenstrooms ervan ondervinden juist een nadelig effect. De hogere waterstanden bovenstrooms worden veroorzaakt doordat het water als gevolg van de bedijking minder makkelijk door Sittard kan stromen. Dit geeft opstuwning. De hogere waterstanden aan benedenstroomse zijde worden verklaard doordat er minder water over het land weg kan stromen. De afvoer in de beek blijft daardoor hoger. Bij een lagere afvoer zijn de negatieve effecten kleiner.

Op basis van berekeningen met de WaterSchadeSchatter (bron STOWA, 2019) is bepaald waar nog meer relatief veel schade is te verwachten die mogelijk relatief makkelijk kan worden beperkt door middel van (flexibele of tijdelijke) kades. Hieruit volgen locaties als het industrieterrein langs de Doctor Nolenslaan, de dorpskern van Baakhoven en langs de Industrieweg in Baakhoven.

In het stroomgebied van de Geleenbeek is gemiddeld 93 mm neerslag gevallen. De ruimtelijke variatie was echter groot. Zo viel in de regio Heerlen tot wel 175 mm neerslag. Dit leidde in deze regio tot omvangrijke overstromingen. Het stroomgebied is vooral gevoelig voor buien met een hoge intensiteit. De kans op dit soort buien zal in de toekomst door klimaatverandering toenemen. De verkenning van maatregelen heeft zich gericht op het watersysteem al geheel. Verschillende maatregelen leiden tot lagere waterstanden in de beek. Voor maatregelen tegen lokale wateroverlast als gevolg van problemen met de lokale afwatering (*pluvial flooding*) is nader onderzoek nodig.

In de Geleenbeek is gemiddeld 93 mm neerslag gevallen in twee dagen, maar in de Caumerbeek (het gebied rond Heerlen) en het zuiden van de Geleenbeek is veel meer neerslag gevallen (tot lokaal 175 mm). Dit heeft daar overstromingen veroorzaakt. In het bovenstroomse deel van de Geleenbeek (Brommelen) is de hoogste afvoer ooit gemeten. Omdat in de rest van het stroomgebied veel minder neerslag is gevallen is de afvoer bij de monding in de Maas niet veel hoger dan een afvoer die jaarlijks wordt overschreden.

Het watersysteem van de Geleenbeek kent veel locaties die (als gevolg van de relatief grote mate van verharding) tijdens heftige buien gevoelig zijn voor wateroverlast. Het gaat dan vooral om regenwater dat oppervlakkig afstroomt (*pluvial flooding*) en minder om overstromingen vanuit de Geleenbeek zelf. Daarmee is het ook noodzakelijk om al op lokaal niveau voor voldoende infiltratie- en buffercapaciteit te zorgen en bescherming tegen wateroverlast mogelijk te maken. Verhard gebied heeft 'van nature' weinig tot geen sponswerking en die zal dus op andere wijze moeten worden gerealiseerd, bijvoorbeeld met de aanleg van nog meer regenwaterbuffers of wadi's.

Er is een verkennende analyse van mogelijke maatregelen uitgevoerd om overstromingen vanuit de Geleenbeek zelf te beperken. Daarbij is gerekend met twee buien met een herhalingsperiode van 25 en 100 jaar, zowel voor het huidige als toekomstige klimaat in 2050. Deze buien leiden vooral op de schaalgrootte van het totale stroomgebied tot wateroverlast, zoals benedenstrooms rond Sittard en minder bovenstrooms, waar wateroverlast kan ontstaan als gevolg van beperkingen in de lokale afwatering, zoals in de Caumerbeek.

Het vergroten van de buffercapaciteit in het watersysteem door middel van bronmaatregelen en berging in het beekdal geeft een duidelijke verlaging van de afvoerpieken en wateroverlast. Daarentegen is het effect van maatregelen als het verruimen van knelpunten en het plaatsen van kades om woonkernen te beschermen minder eenduidig, in die zin dat ze voor dit stroomgebied al snel leiden tot afwentelen naar elders. Dat soort maatregelen verminderen dus niet per definitie de gevolgen van het hoogwater. Hun effecten kunnen alleen na detailuitwerking worden vastgesteld.

De effectiviteit van de verschillende maatregelen is samengevat in de onderstaande tabel. Aan de hand van plussen en minnen, gebaseerd op bovenstaande toelichting, toont de tabel het effect voor respectievelijk een T25 en T100 voor zowel het huidige als het toekomstige klimaat in 2050.

Tabel 6.1 Samenvattend overzicht van de effectiviteit van verschillende typen maatregelen in het watersysteem van de Geleenbeek (effecten tussen haakjes hebben betrekking op positieve effecten)

Stroomgebied Geleenbeek	Neerslagsituatie			opmerking
	T25	T100 (T25 klimaat)	T300 (T100 klimaat)	
<b>water vasthouden</b>	++*	+*	++ (≤ 20cm)	potentieel veel effect, mits grootschalig aangepakt. Relatief minder effect bij meer extreme gebeurtenissen. Daarnaast is er al veel lokale wateroverlast.
<b>water bergen: verruwing overstromings- vlakte</b>	+ (≤ 5 cm)	+ (1-5 cm)	+ en – (1-5 cm)	in het verruwde deel nemen waterstanden met meerdere dm toe. Benedenstrooms nemen waterstanden max paar cm af. Potentieel beperkt mogelijk vanwege veel stedelijk en weinig natuurlijk gebied.
<b>water bergen: drempels</b>	+ en – (≤ 5 cm)	++ en – (≤ 20 cm)	++ en – (≥ 20 cm)	bovenstrooms opstuwung, benedenstrooms waterstandsverlaging. Effecten orde enkele tot tientallen centimeters. Maatregel effectief wanneer hogere waterstand bovenstrooms van drempel niet leidt tot meer schade. Effect het grootst bij T100 gebeurtenis omdat doorlaatcapaciteit daarop is ontworpen.
<b>verbeteren afvoercapaciteit bruggen</b>	+ (≤ 5 cm)	++ en – (≤ 20 cm)	+ en – (≤ 20 cm)	bovenstrooms paar cm tot dm verlaging, benedenstrooms paar cm verhoging. Complex samenspel van wel/niet samenvallen van afvoerpieken uit deelstroomgebieden
<b>aanleg kades</b>	++	+ en -	+ en -	kan schade aan woningen verminderen. Leidt tot afwentelen boven- en/of benedenstrooms. Kansrijk bij specifieke objecten (bedrijventerrein Sittard en Baakhoven)

\* niet doorgerekend, maar beoordeeld op basis van expertkennis

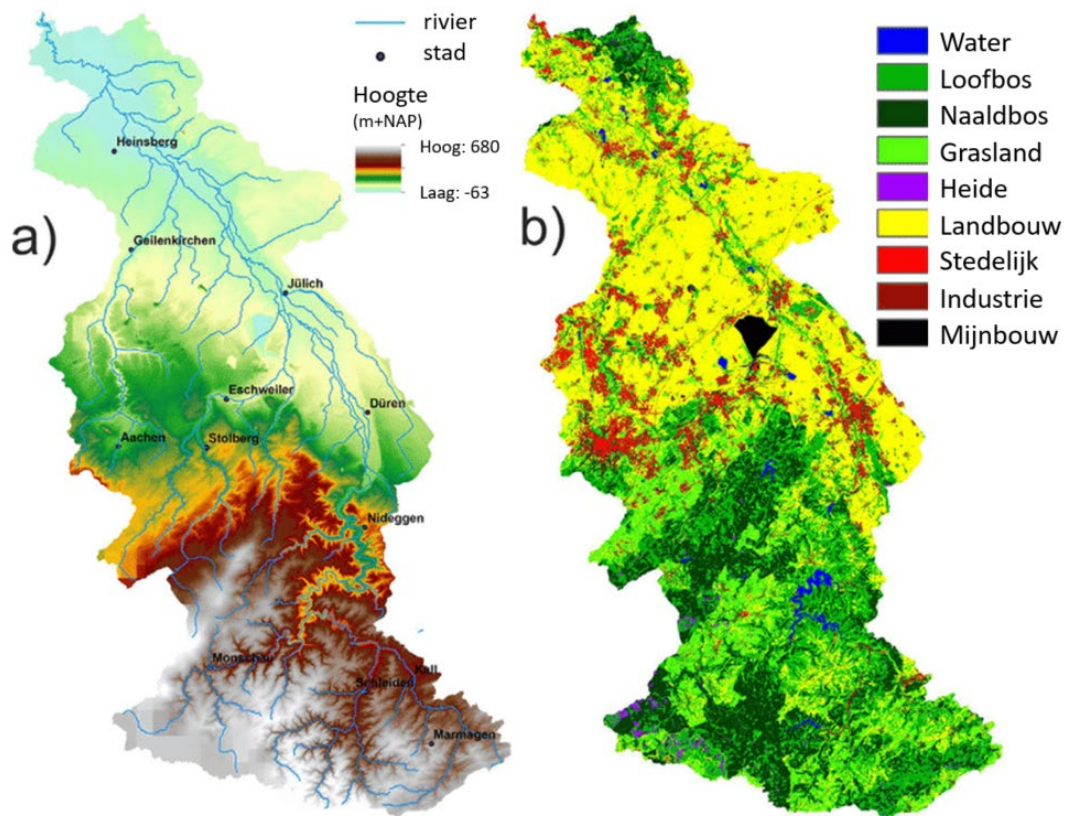
# 7 Roer

## 7.1 Inleiding

De watersysteemanalyse voor de Roer heeft betrekking op het Nederlandse deel van de Roer, ofwel de laatste 22 km voor de monding in de Maas te Roermond. Net als voor de Geul en de Geleenbeek is geprobeerd om het hoogwater van juli 2021 zo goed mogelijk na te bootsen met een model<sup>10</sup>. Dit model is vervolgens gebruikt om te analyseren hoe de Roer functioneert onder andere (extrem) natte omstandigheden en om gevoel te krijgen voor de effectiviteit van verschillende typen maatregelen. Dit hoofdstuk vat de belangrijkste bevindingen samen. Voor een uitgebreidere beschrijving van het model en de uitgevoerde simulaties wordt verwezen naar het technische achtergrondrapport van Horn en Hurkmans (2022).

## 7.2 Het stroomgebied van de Roer en de monding in de Maas

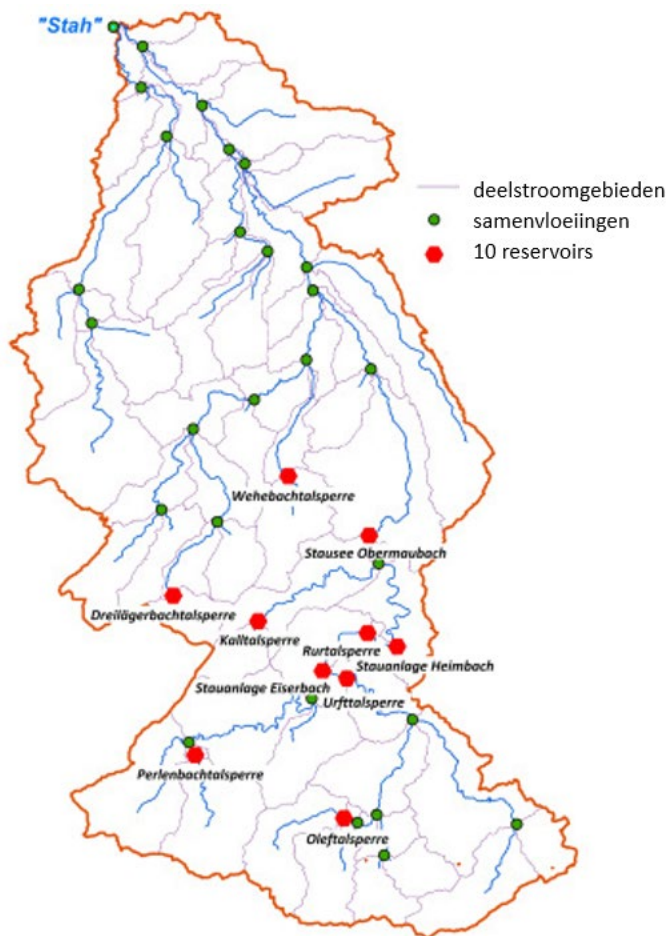
De Roer ontspringt in de Hoge Venen in België op ongeveer NAP +660 m. Via Duitsland stroomt het water in noordelijke richting. Nabij Vlodrop komt de Roer Nederland binnen. Bij Roermond mondt de rivier uit in de Maas. De Roer is ongeveer 165 kilometer lang en heeft een stroomgebied van 2340 km<sup>2</sup>. De Roer ligt voor het overgrote deel in Duitsland en enkel de laatste 22 km van de Roer bevindt zich in Nederland. De gemiddelde afvoer van de Roer in het Nederlandse deel bedraagt ongeveer 23 m<sup>3</sup>/s.



Figuur 7.1 Hoogteligging en landgebruik in het stroomgebied van de Roer (bron: naar Boogena et al., 2018)

<sup>10</sup> Een 2D hydraulisch D-HYDRO-model van het Nederlandse deel van de Roer. Het Belgische en Duitse deel van het stroomgebied zijn niet gemodelleerd.

Het stroomgebied van de Roer kent een sterke tweedeling. Het zuidelijke deel is hoog gelegen in de Ardennen en de Eifel, Het landgebruik bestaat hier vooral uit bossen en grasland. Het noordelijke deel ligt minder hoog en kent minder steile hellingen. Het landgebruik in dit deel wordt gedomineerd door landbouw en stedelijk gebied (zie Figuur 7.1). Deze tweedeling in het stroomgebied zien we ook terug in de hydrologische werking. Het zuidelijke deel kent slecht doorlatende bodems en gesteenten, waarin weinig water geborgen kan worden. Om water vast te houden zijn hier in het verleden veel stuwmeren (reservoirs) aangelegd (Figuur 7.2). Zeven stuwmeren, allen in beheer door Wasserverband Eifel-Rur, hebben naast drinkwatervoorziening nadrukkelijk tot doel om het overstromingsrisico te verkleinen. Deze stuwmeren kunnen in geval van hoogwater maximaal 70 miljoen m<sup>3</sup> water bergen. Hierdoor kan een hoogwater met een herhalingstijd van 100 jaar worden afgetopt van ongeveer 300 m<sup>3</sup>/s naar 60 m<sup>3</sup>/s (Homann, 2022). In het noordelijke deel van het stroomgebied zijn de bodems veel meer doorlatend en wordt meer neerslag geborgen in het grondwater.



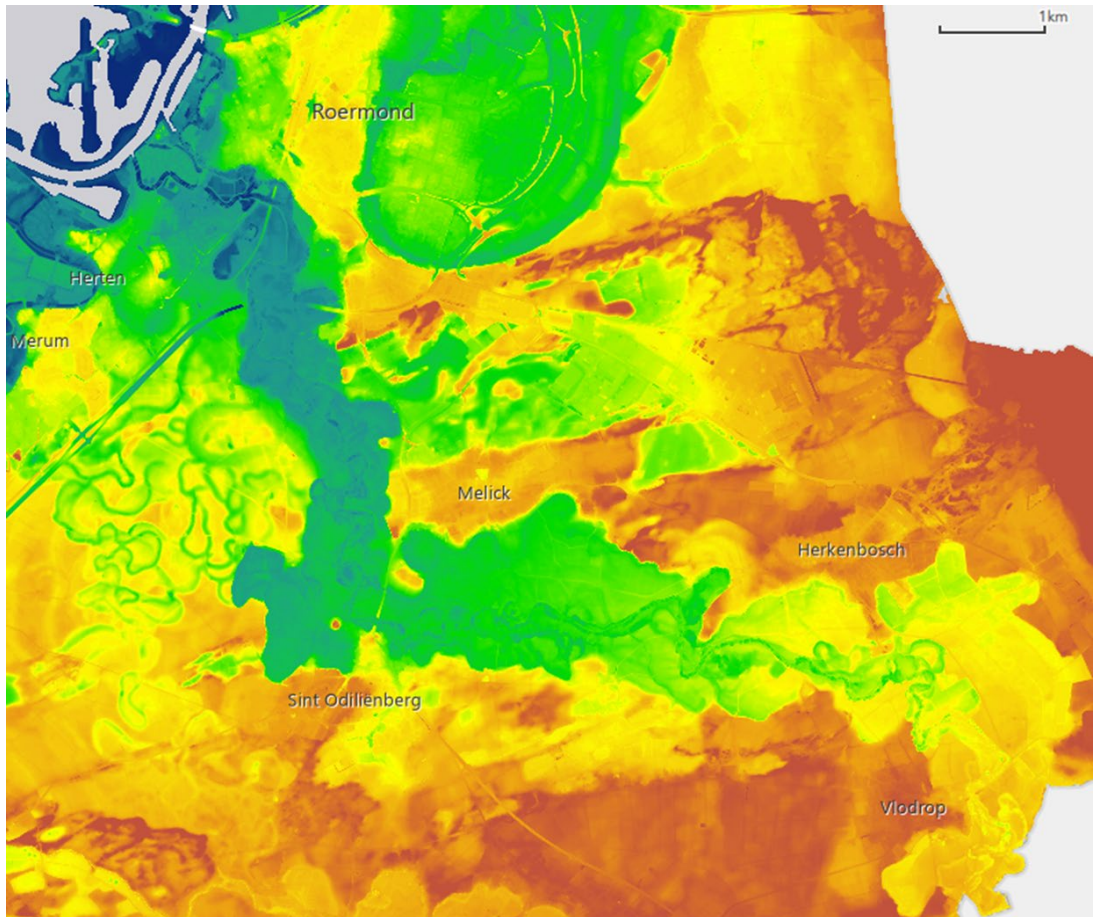
Figuur 7.2 Overzicht van reservoirs in het stroomgebied van de Roer, bovenstrooms van de Nederlandse grens (bron: Eingrüber en Korres, 2022).

Bij Stah, een meetpunt in de Roer bovenstrooms van Vlodrop, stroomt de Roer Nederland binnen. Via de dorpen Herkenbosch, Sint Odiliënberg en Melick stroomt de Roer naar Roermond (Figuur 7.3).



Figuur 7.3 De Roer in Nederland bovenstrooms van Roermond

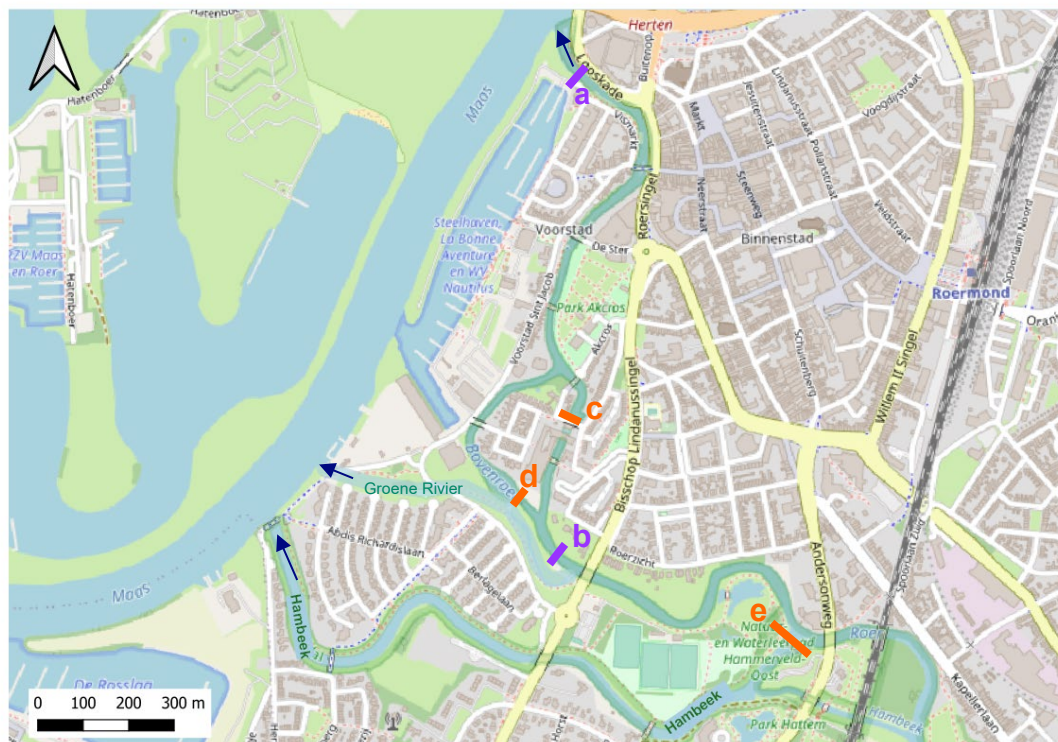
Figuur 7.4 toont de hoogteligging van het Nederlandse deel van de Roer. Wat opvalt is dat de dorpen langs de Roer relatief hoog liggen. Zo ligt het centrum van Melick op een hoogte van meer dan NAP +28 m, terwijl de overstromingsvlakte van de Roer aan de zuidkant van Melick op ongeveer NAP +23,5 m ligt.



*Figuur 7.4 Hoogteligging van het Nederlandse deel van de Roer. Roodbruine kleuren zijn hoger dan NAP+30 m, de donkerblauwe gebieden in het noordwesten hebben een hoogte van minder dan NAP+18 m.*

Ten zuiden van het centrum van Roermond splitst de Roer zich in de Roer, die verder gaat in noordwestelijke richting, en de Hambeek die via een iets zuidelijkere loop naar de Maas stroomt (zie Figuur 7.5). Om te voorkomen dat de voorstad van Roermond bij hoge waterstanden op de Maas onder water loopt, zijn op twee plaatsen keersluizen gebouwd (locatie a en b in Figuur 7.5).

Als de deuren in de keersluizen gesloten worden, moet al het water uit de Roer worden afgevoerd via de Hambeek. Omdat dit tot hoge waterstanden kan leiden op de Hambeek en op de Roer bovenstrooms van de zuidelijke keersluis, is in het verleden een bypass aangelegd. Deze bypass is beter bekend als de Roer-overlaat, soms ook Groene Rivier genoemd. Onder normale omstandigheden stroomt er geen water door de Roer-overlaat, maar bij hoge waterstanden op de Maas in combinatie met een hoge afvoer op de Roer kan de overlaat worden ingezet door de inlaatdrempel af te graven. Een deel van de Roerafvoer kan dan via de overlaat naar de Maas stromen. De overlaat is nog nooit ingezet.



Figuur 7.5 Kaart van de monding van de Roer in de Maas. De paarse lijnen tonen de locaties van de sluisdeuren, waarbij de noordelijke keersluis is weergegeven met a en de zuidelijke keersluis met b. De oranje lijnen tonen de locaties van de stuwen, waarbij de ECI stuw is weergegeven met een c, Groot Hellegat met een d en balgstuw Hoge Bat met een e.

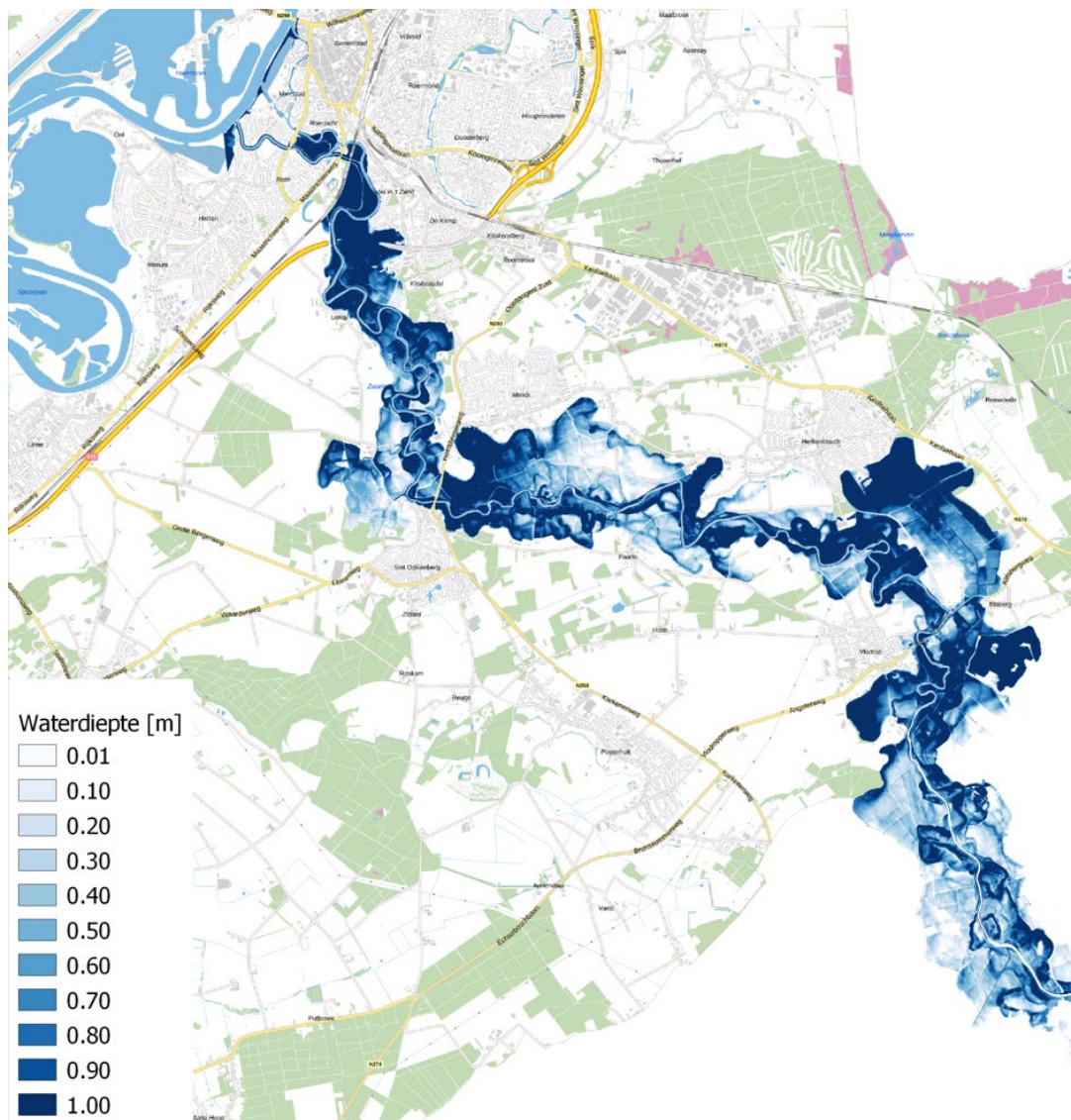
### 7.3 Wat is er gebeurd in juli 2021?

In juli 2021 is vooral in het zuidelijke deel van het Roerstroombgebied enorm veel regen gevallen. Een groot deel van die regen is tot afstroming gekomen. De stuwmeren hebben een groot deel van deze afvoer kunnen bergen. Zo blijkt uit berekeningen van het Wasserverband Eifel-Rur dat de totale piekafvoer naar de stuwmeren ruim 750 m<sup>3</sup>/s bedroeg. Door berging in de stuwmeren was de afvoer uit de stuwmeren beperkt tot maximaal 100 m<sup>3</sup>/s. In het totaal is er ongeveer 40 miljoen m<sup>3</sup> aan water geborgen. Mede daardoor was verder benedenstrooms in het Nederlandse deel van het stroomgebied wel sprake van overstromingen, maar is een echte ramp uitgebleven.

Helaas is niet goed bekend hoeveel water via de Roer naar Nederland is aangevoerd. Schattingen variëren van 195 m<sup>3</sup>/s op basis van waterstandsmetingen op een vaste meetlocatie<sup>11</sup> van Waterschap Limburg, tot 354 m<sup>3</sup>/s op basis van Duitse modelberekeningen. Handmetingen die tijdens het hoogwater zijn uitgevoerd kwamen uit op een afvoer van ongeveer 260 m<sup>3</sup>/s. De hoge Roerafvoer heeft geleid tot grootschalige overstromingen langs het Nederlandse deel van de Roer (Figuur 7.6).

<sup>11</sup> Op het vaste meetpunt wordt gebruik gemaakt van een eerder bepaalde relatie tussen de waterstand en de afvoer (een QH-relatie). Deze relatie wordt gebruikt om op basis van waterstandsmetingen een schatting te geven van de afvoer. Deze relatie is echter niet geschikt voor deze extreme afvoeren, onder andere omdat er water door de overstromingsvlakte stroomt. De afvoer door de overstromingsvlakte is ook met de handmeting moeilijk te meten.



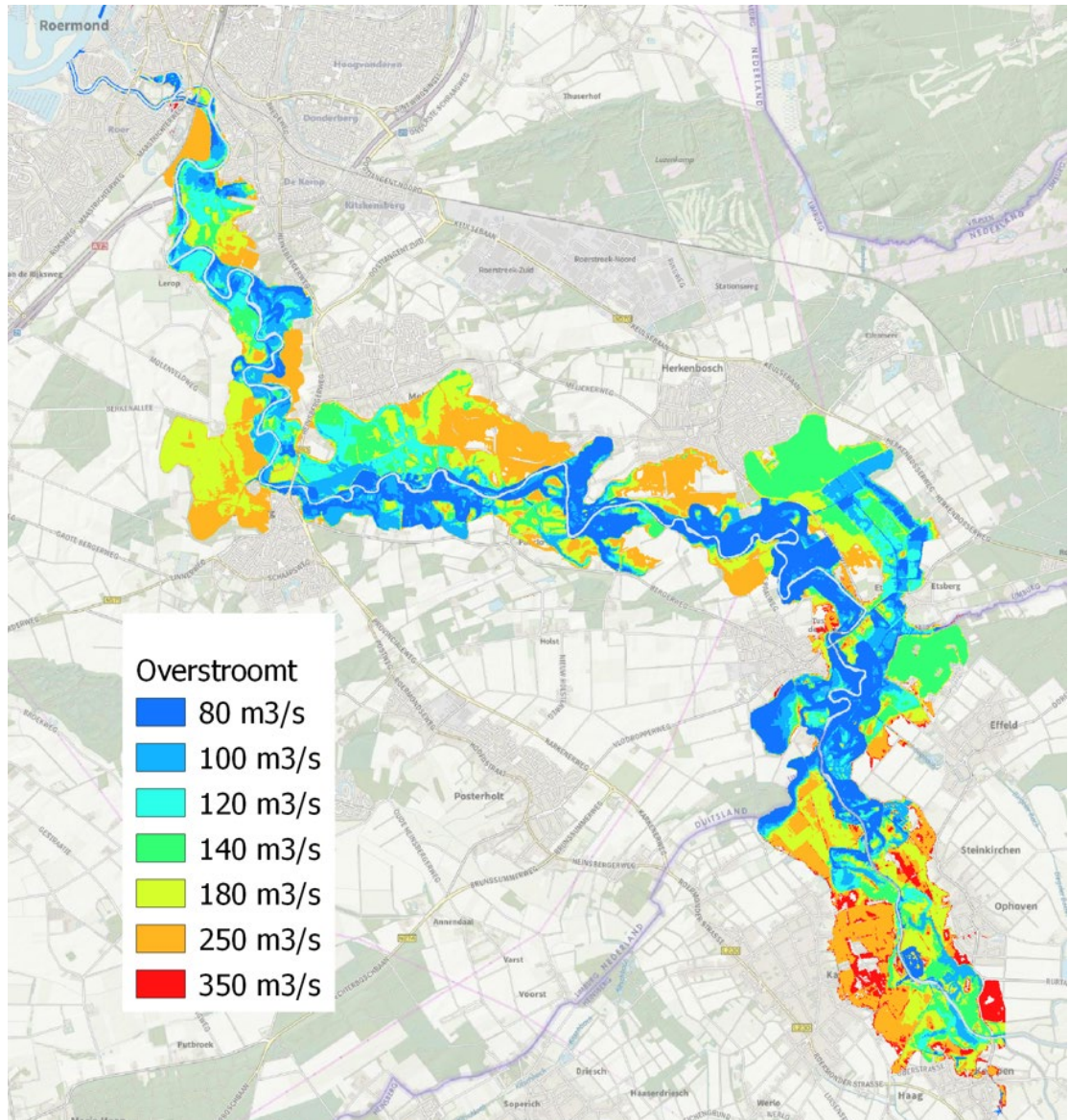


Figuur 7.6 Overstromde gebieden tijdens het hoogwater van juli 2021, berekend met het D-HYDRO-model van de Roer.

In Roermond waren de hoge waterstanden niet alleen het gevolg van het hoogwater op de Roer. De hoge waterstanden waren het gevolg van het samenvallen van het hoogwater op de Roer met het hoogwater op de Maas. Ondanks de extreem hoge waterstanden bleven de overstromingen in Roermond beperkt tot de hockeyvelden van Concordia (zie Figuur 7.5). Een mogelijke beheersmaatregel was het inzetten van de Roer-overlaat geweest. Waterschap Limburg heeft de Roer-overlaat niet ingezet tijdens het hoogwater van juli 2021, omdat de dijken rond de Roer-overlaat zijn afgekeurd en er daarom een kans bestond dat de dijken rond de Roer-overlaat zouden doorbreken. Uit de modelberekeningen die zijn uitgevoerd tijdens de casestudies (fase 1 van de watersysteemanalyse) bleek dat in geval van een doorbraak een groot deel van de voorstad en de binnenstad van Roermond had kunnen overstromen. Uit dezelfde berekeningen bleek daarnaast dat de waterstandsval door inzet van de Roer-overlaat onvoldoende zou zijn geweest om overstroming van de hockeyvelden te voorkomen (Geertsema en Asselman, 2022).

## 7.4 Hoe functioneert het systeem onder natte omstandigheden?

Om na te gaan welke gebieden kunnen overstromen onder (andere) natte omstandigheden, is een aantal afvoeren doorgerekend. De doorgerekende afvoeren variëren van 80 m<sup>3</sup>/s tot 350 m<sup>3</sup>/s. Bij alle berekeningen is uitgegaan van een zomersituatie met relatief ruwe vegetatie in de overstromingsvlaktes van de Roer. Omdat ook is uitgegaan van een stationaire (constante) afvoer leidt dit tot relatief hoge waterstanden en overstromde oppervlaktes<sup>12</sup>. Voor de Maas is uitgegaan van een gemiddelde waterstand. De waterstanden in Roermond worden daardoor niet extreem hoog.



Figuur 7.7 Berekend overstroomd oppervlak bij verschillende afvoeren van de Roer te Stah. Een afvoer van 140 m<sup>3</sup>/s heeft een herhalingsijd van ongeveer 25 jaar. Een afvoer van 180 m<sup>3</sup>/s heeft een herhalingsijd van ongeveer 100 jaar.

Figuur 7.7 laat zien welke gebieden bij de verschillende afvoeren overstromen. Bij een afvoer van 80 m<sup>3</sup>/s overstromen de donkerblauwe gebieden.

<sup>12</sup> Wanneer gerekend wordt met een afvoergolf zal sprake zijn van topvervlakking. Daardoor neemt de afvoer benedenstrooms af en blijven waterstanden daar lager.

Bij een afvoer van 100 m<sup>3</sup>/s of 120 m<sup>3</sup>/s lopen ook de lichtblauwe en turquoise gebieden onder water. Duidelijk is te zien dat het overstromd gebied steeds groter wordt naarmate de afvoer hoger wordt. Bij een afvoer van 140 m<sup>3</sup>/s overstromen grote gebieden ten zuidoosten van Herkenbosch. Bij een afvoer van 250 m<sup>3</sup>/s breidt het overstromd gebied zich uit nabij Vlodrop, ten zuiden van Herkenbosch, maar ook ten zuidoosten van Melick en ten westen van St Odiliënberg. De verdere toename van het overstromd oppervlak bij een afvoer van 350 m<sup>3</sup>/s is beperkt (zie de rode gebieden in Figuur 7.7). Dit komt doordat de rand van de overstromingsvlakte relatief steil is en aangrenzende gebieden hoger liggen.

Een piekafvoer van 140 m<sup>3</sup>/s heeft een kans van voorkomen van ongeveer 1:25 per jaar. Voor de piekafvoer van 180 m<sup>3</sup>/s geldt een kans van ongeveer 1:100 per jaar. Deze piekafvoeren zijn (in combinatie met een standaardgolfvorm) gebruikt om de effecten van maatregelen te bepalen (vanaf nu aangeduid als T25 en T100 afvoergolven).

## 7.5 Maatregelen

### 7.5.1 Vasthouden van water bovenstrooms

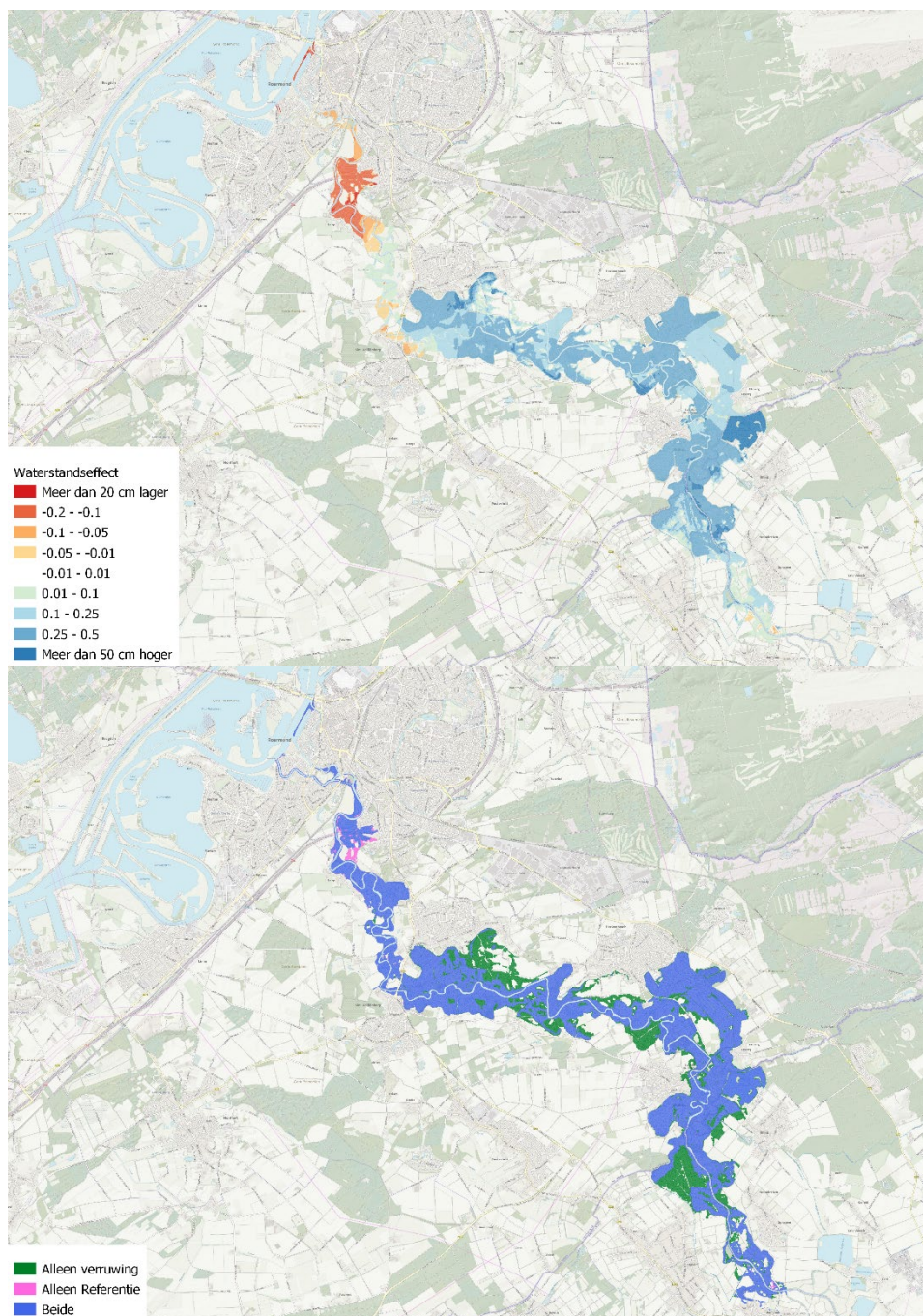
Omdat de focus van de watersysteemanalyse van de Roer op het Nederlandse deel lag, is de maatregel om meer water vast te houden in de bodem in de bovenstroomse delen van het stroomgebied, niet nader onderzocht. Gezien de slecht doorlatende bodems en gesteenten in het zuidelijke deel van het stroomgebied en het feit dat het landgebruik in dit gebied nu al vooral bestaat uit bos en grasland, lijkt het niet realistisch om aan te nemen dat in dit deel van het stroomgebied heel veel extra water kan worden vastgehouden in de bodem. Er is geen onderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheden om in het noordelijke deel van het stroomgebied extra water vast te houden door de infiltratiecapaciteit te vergroten. Voor het hoogwater van juli 2021 had dit waarschijnlijk ook weinig effect gehad omdat vrijwel alle neerslag in het zuidelijke deel van het stroomgebied is gevallen.

Wel is het belangrijk om op te merken dat de reeds aanwezige reservoirs in het zuiden van het stroomgebied voor een enorme aftopping hebben gezorgd van het hoogwater op de Roer. Deze reservoirs zijn ook in droge perioden van groot belang. Met name in perioden met lage Maasafvoeren speelt de Roer een belangrijke rol in de zoetwatervoorziening in Nederland. Uitbreiding van het aantal reservoirs en/of verbetering van het beheer van de reservoirs kan een positief effect hebben voor zowel de hoog- als laagwaterproblematiek. Het behoud van de werking van de reservoirs is voor het waterbeheer in Nederland van essentieel belang. De inrichting van met name Roermond is dusdanig dat de natuurlijke afvoer van de Roer (zonder stuwmeren) tot enorme problemen zou leiden. Internationale afstemming en samenwerking met de Duitse beheerder is daarom van groot belang.

### 7.5.2 Bergen van water door verruwing van de overstromingsvlakten in Nederland

Ruwe vegetatie zorgt voor hogere waterstanden en daardoor meer berging in het beekdal. Hierdoor zal sprake zijn van meer topvervlakking, waardoor afvoeren en waterstanden benedenstrooms juist lager uit zullen vallen. Bij het doorrekenen van deze maatregel is aangenomen dat de hele overstromingsvlakte van de Roer in Nederland onder bos komt te staan. De berekende waterstandseffecten kunnen daarmee worden gezien als een bovengrens.

Door de verruwing nemen waterstanden bovenstrooms met 10 tot 50 cm toe. Benedenstrooms in de richting van Roermond nemen de waterstanden juist met 5 tot 20 cm af. In Roermond zelf is het effect beperkt tot 5 cm bij een T25 afvoergolf op de Roer en 10 cm bij een T100 afvoergolf. De waterstandsverschillen die berekend zijn bij de T25 afvoergolf zijn te zien in Figuur 7.8. Tijdens een T100 situatie en het hoogwater van juli 2021 zou deze maatregel een vergelijkbaar effect hebben gehad.



*Figuur 7.8* Verschil in waterdiepte (boven) en overstroomd oppervlak (onder) wanneer het landgebruik in de overstroomingsvlakte langs de Roer wordt omgezet naar bos. De figuren hebben betrekking op een T25 afvoergolf op de Roer.

De berekeningen laten zien dat verruwing van de overstroomingsvlakte van de Roer in het algemeen leidt tot hogere waterstanden en een toename van het overstroomd oppervlak. Van lagere waterstanden is alleen sprake in het gebied nabij Roermond. Hierbij zijn een paar kanttekeningen te plaatsen:

- Verruwing van de overstroomingsvlaktes leidt tot meer topvervlakking, ook in het middentraject van de Roer. De waterstandsdaling door topvervlakking is daar echter kleiner dan de waterstandsstijging door de hogere ruwheid.

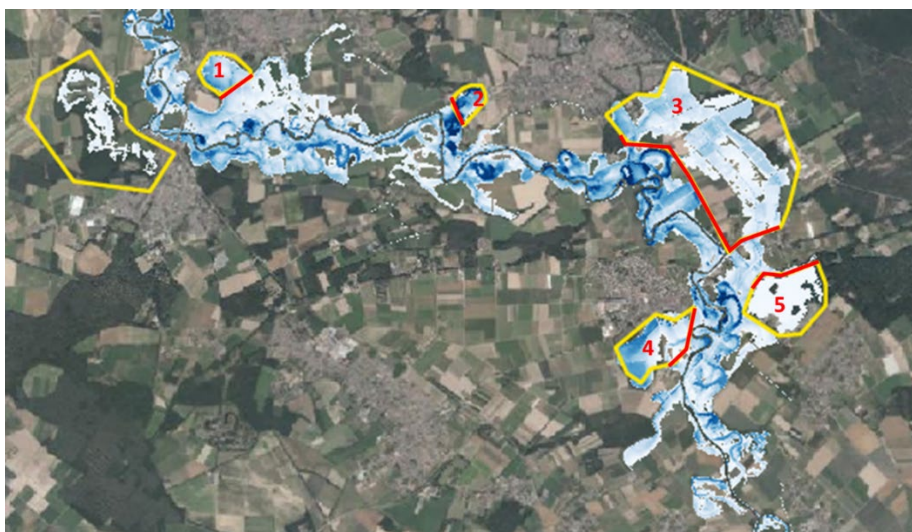
- De hogere waterstanden als gevolg van de ruwere vegetatie leiden tot een toename van het overstroomde gebied. Dit kan gunstig zijn omdat de extra berging resulteert in lagere waterstanden benedenstrooms, maar mogelijk niet overal. Door alleen gebieden te verruwen waar hogere waterstanden en een toename van het overstroomd oppervlak niet tot extra schade leidt kan dit probleem worden voorkomen. Op de locaties waar de vegetatie niet verandert zullen waterstanden gelijk blijven of afnemen.
- Bij de uitgevoerde analyses is in de referentieberekeningen uitgegaan van een zomersituatie. De vegetatieruwheid is dan (veel) hoger dan in een wintersituatie (vegetatie staat in het blad, akkers zijn begroeid). Wanneer het hoogwater van juli 2021 in de winter had plaats gevonden, dan had dat geleid tot minder topvervlakking en daarmee hogere waterstanden, in ieder geval in Roermond, maar mogelijk ook bovenstrooms wanneer ook in Duitsland de topvervlakking minder zou zijn geweest. De maatregel om de overstromingsvlakte te verruwen heeft dan mogelijk relatief nog meer effect.

Geconcludeerd kan worden dat verruwing van de overstromingsvlaktes, bijvoorbeeld door het landgebruik om te zetten naar bos, leidt tot meer topvervlakking. Dit is gunstig voor met name Roermond en omgeving. Omdat verruwing lokaal tot hogere waterstanden leidt, wordt aangeraden om de overstromingsvlaktes alleen te verruwen op trajecten waar hogere waterstanden niet leiden tot extra schade.

### 7.5.3 Bergen van water door inzet van retentiegebieden

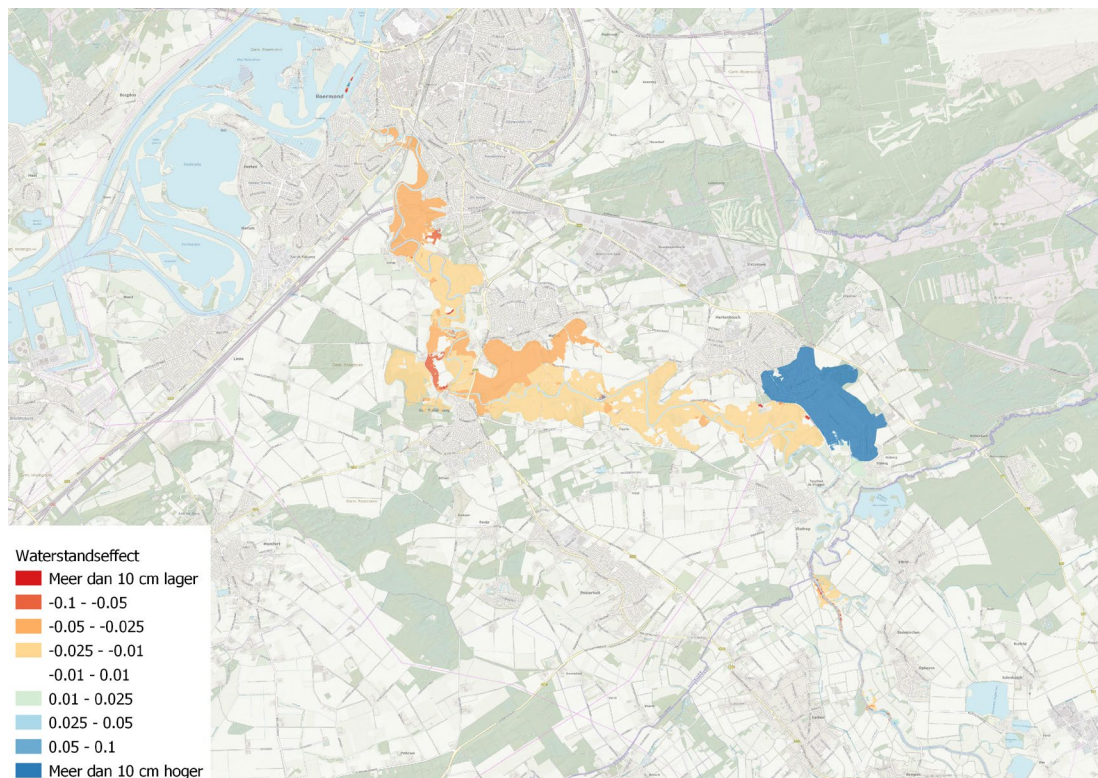
Bij deze maatregel is geprobeerd om de berging van water in de overstromingsvlakte van de Roer zo optimaal mogelijk te benutten. Deze gebieden kunnen in de huidige situatie al overstroomd, maar door een inlaatdrempel te maken wordt het moment van instroming uitgesteld tot net voor het passeren van de afvoerpiek. Dit zorgt voor aftopping van de afvoergolf en lagere waterstanden benedenstrooms.

Aanvankelijk waren zes mogelijke locaties geïdentificeerd (Figuur 7.9). Waterschap Limburg gaf aan dat de meest westelijke locatie in deze figuur (zonder nummer) al snel onder water staat door kwel vanuit de Roer. Deze locatie is daardoor niet nader onderzocht. Voor de andere locaties is met modelberekeningen na gegaan wat het effect zou kunnen zijn op de afvoer en de waterstanden benedenstrooms. Hierbij is gerekend met verschillende hoogtes van de inlaatdrempels (de rode lijnen in Figuur 7.9).



Figuur 7.9 Ligging van de onderzochte retentiegebieden. De overlaten die aangelegd moeten worden om instroming van de gebieden uit te kunnen stellen zijn aan gegeven in rood.

Retentiegebieden leiden voor de Roer slechts in een beperkt aantal gevallen tot waterstandsdaling benedenstrooms. Zo is alleen sprake van een effect wanneer de hoogte van de inlaatdempel maximaal 10 cm lager is dan de maximale waterstand die zou worden bereikt zonder retentiegebieden. In dat geval leiden retentiegebieden 1, 2, 4 en 5 tot een waterstandsdaling van maximaal 1 cm bij zowel de T25 als de T100 situatie. Inzet van retentiegebied 3 leidt bij een T25 afvoergolf tot 1 cm lagere waterstanden benedenstrooms. Bij een T100 hoogwater kan dat toenemen tot 4 cm. Deze laatste situatie is weergegeven in Figuur 7.10.



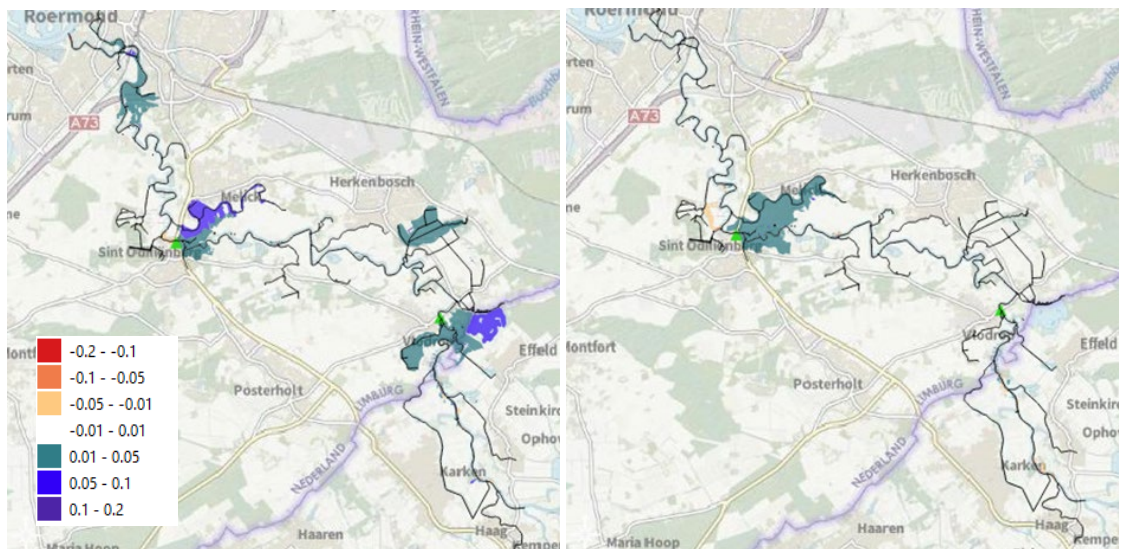
*Figuur 7.10 Waterstandsverschil als gevolg van inzet van retentiegebied 3 bij een T100 afvoergolf waarbij de hoogte van de inlaatdempel 10 cm lager is dan de piekwaterstand zonder inzet van retentiegebieden. (rode kleuren duiden op lagere waterstanden).*

Wanneer de drempel lager wordt aangelegd is in de meeste gevallen geen effect zichtbaar omdat het gebied te vroeg instroomt en te snel vol is. De piekwaterstand behorend bij een hoogwater is echter moeilijk te voorspellen. Wanneer het hoogwater in de winter plaatsvindt zal er minder (ruwe) vegetatie in de overstromingsvlakten staan, waardoor de waterstand lager zal zijn dan in de zomer. Een andere golfvorm (duur van het hoogwater) zal ook tot andere waterstanden leiden, waardoor de effectiviteit van de retentiegebieden sterk afneemt. Dit maakt dat het effect van de inzet van retentiegebieden klein is, maar ook onzeker. Daarnaast wordt, als de drempelhoogte wordt aangelegd voor een T100 situatie, het bergingsgebied juist kleiner bij een minder extreme bui, zoals een T90 bui. De waterstanden kunnen daardoor bij minder extreme hoogwaters hoger worden.

Geconcludeerd wordt dat de onderzochte retentiegebieden een beperkt effect hebben (maximaal 1 tot 4 cm) en dat het effect sterk afneemt wanneer sprake is van een extremer of minder extreem hoogwater dan dat waarop de inlaatdempel is afgeregeld. Maar ook wanneer het hoogwater in een ander seizoen plaatsvindt of een andere duur kent dan het hoogwater dat gebruikt is voor het ontwerp zal nauwelijks een effect te verwachten zijn. Het effect is dus beperkt en erg onzeker.

#### 7.5.4 Bergen van water door andere civieltechnische maatregelen

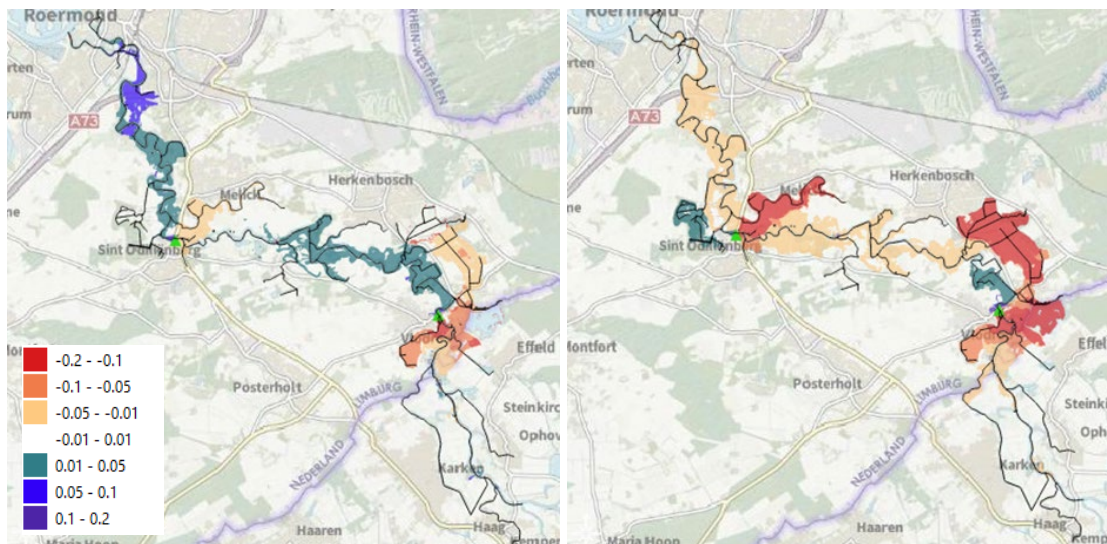
De berging kan ook worden vergroot door de afvoercapaciteit bij de bruggen te beperken. Wanneer het doorstroomprofiel bij de bruggen bij Vlodrop en St. Odiliënberg wordt gehalveerd dan leidt dit bovenstrooms van de bruggen tot maximaal 4 cm hogere waterstanden (Figuur 7.11). Bij de T25 afvoergolf is ook een beperkte toename van de waterstand te zien ten oosten van Herkenbosch. Dit komt doordat dit gebied niet lokaal vanuit de Roer overstroomt, maar doordat water bovenstrooms van de brug bij Vlodrop in noordelijke richting stroomt. De opstuwung bovenstrooms van de brug is daardoor ook ten oosten van Herkenbosch merkbaar. Benedenstrooms van de bruggen daalt de waterstand met maximaal 2 cm. Dit positieve effect is klein en bovendien maar over een zeer kort traject merkbaar. Bij de T100 afvoergolf (rechts in Figuur 7.11) is bij Vlodrop geen effect merkbaar. Dit komt doordat het water over de brug (en de wegen daar naartoe) stroomt. Het verkleinen van het doorstroomprofiel van de brug leidt dan nauwelijks tot een verandering in waterstanden. Alleen stroomt er meer water over de brug dan er onderdoor.



Figuur 7.11 Waterstandsverschil als gevolg van het beperken van de afvoercapaciteit bij de bruggen bij Vlodrop (bovenstrooms) en St. Odiliënberg (ongeveer halverwege). Links bij een T25 afvoergolf, rechts bij de T100 afvoergolf.

#### 7.5.5 Afvoeren van water door bruggen te verruimen

Twee bruggen over de Roer zorgen voor opstuwung bovenstrooms. Dit zijn de bruggen bij Vlodrop en St. Odiliënberg. Dit komt vooral door de landhoofden in de overstromingsvlakten die het water tegenhouden. Bij deze maatregel is de afvoercapaciteit bij de bruggen vergroot door de landhoofden doorstroombaar te maken (de brug komt hier op palen te staan). Het effect van deze maatregel is onderzocht voor twee hoogwatersituaties met een kans van voorkomen van 1:25 en 1:100 per jaar).



Figuur 7.12 Waterstandsverschil als gevolg van het doorstroombaar maken van de landhoofden van de bruggen bij Vloderp (bovenstrooms) en St. Odiliënberg (ongeveer halverwege). Links bij een T25 afvoergolf, rechts bij de T100 afvoergolf.

Het doorstroombaar maken van de landhoofden zorgt voor lagere waterstanden bovenstrooms van de brug (zie de rode kleuren in Figuur 7.12). Bij Vloderp bedraagt deze afname 10 tot 15 cm (respectievelijk bij de T25 en de T100 afvoergolf). Bij St. Odiliënberg is het effect iets kleiner: 3 tot 10 cm waterstandsvaling.

Benedenstrooms van de bruggen neemt de waterstand over het algemeen toe. Bij Vloderp stijgt de waterstand direct benedenstrooms van de brug met 11 tot 17 cm. Bij St. Odiliënberg bedraagt de toename 10 cm bij de T25 afvoergolf en 6 cm bij de T100 afvoergolf. Dit effect is tot ver benedenstrooms merkbaar.

Wanneer we naar de T100 afvoergolf kijken, dan zien we dat het doorstroombaar maken van de landhoofden leidt tot een *afname* van de waterstand verder benedenstrooms van de brug bij St. Odiliënberg met ongeveer 1 cm (zie de rode kleuren in het rechterkaartje in Figuur 7.12). Dat is tegengesteld aan wat men zou verwachten. Dit 'afwijkende' effect komt doordat direct benedenstrooms van de brug een gebied ligt dat normaal bij een T100 afvoergolf nauwelijks overstroomt. Het doorlaatbaar maken van de landhoofden zorgt voor een hogere waterstand direct benedenstrooms van de brug, waardoor dit gebied beter in stroomt. Daardoor wordt er meer water geborgen en dat resulteert in iets lagere afvoeren en iets lagere waterstanden benedenstrooms. Opgemerkt wordt dat dit effect bij een andere golfvorm anders had kunnen zijn. In het algemeen leidt het vergroten van de afvoercapaciteit tot hogere waterstanden benedenstrooms; alleen in deze specifieke situatie (piekafvoer en golfvorm) zien we een net iets ander effect doordat een deel van de overstromingsvlakte effectiever wordt benut en er meer berging wordt gecreëerd.

De veranderingen in waterstanden hebben nauwelijks effect op het oppervlak dat overstroomt, alleen de waterdieptes veranderen. Dit komt overeen met de bevindingen in Figuur 7.7: een verschil in afvoer leidt bij zeer hoge afvoeren tot relatief kleine veranderingen in het overstroomd oppervlak, door de steile randen van de overstromingsvlakte.



### 7.5.6 Afvoeren van water via de Roer-overlaat (ook wel Groene Rivier genoemd)

Wanneer sprake is van hoogwater op de Maas en op de Roer kan een deel van de Roerafvoer worden afgevoerd via de Roer-overlaat. Onder normale omstandigheden stroomt er geen water door de Roer-overlaat, maar bij hoge waterstanden op de Maas in combinatie met een hoge afvoer op de Roer kan de overlaat worden ingezet door de inlaatdrempel af te graven. Ook de drempel halverwege de overlaat (Burgemeester Hoppenerlaan) en bij het uitstroompunt in de Maas (Voorstad Sint Jacob) moeten worden afgegraven. De locaties waar gegraven moet worden zijn te zien in Figuur 7.13. Een deel van de Roerafvoer kan dan via de overlaat naar de Maas stromen.

Tijdens het hoogwater van juli 2021 is de Roer-overlaat niet ingezet, omdat de waterkeringen langs de overlaat mogelijk niet sterk genoeg zouden zijn om het water te keren<sup>13</sup>. Wanneer de waterkering aan de noordoostkant van de Roer-overlaat zou bezwijken zouden delen van de voorstad en de binnenstad van Roermond kunnen overstromen.



Figuur 7.13 Detailweergave van de Roer-overlaat en locaties waar graafwerk uitgevoerd moet worden (groene stippellijnen) bij inzet van de Roer-overlaat. Verder illustreert b de zuidelijke keersluis en d de stuw Groot Hellegat

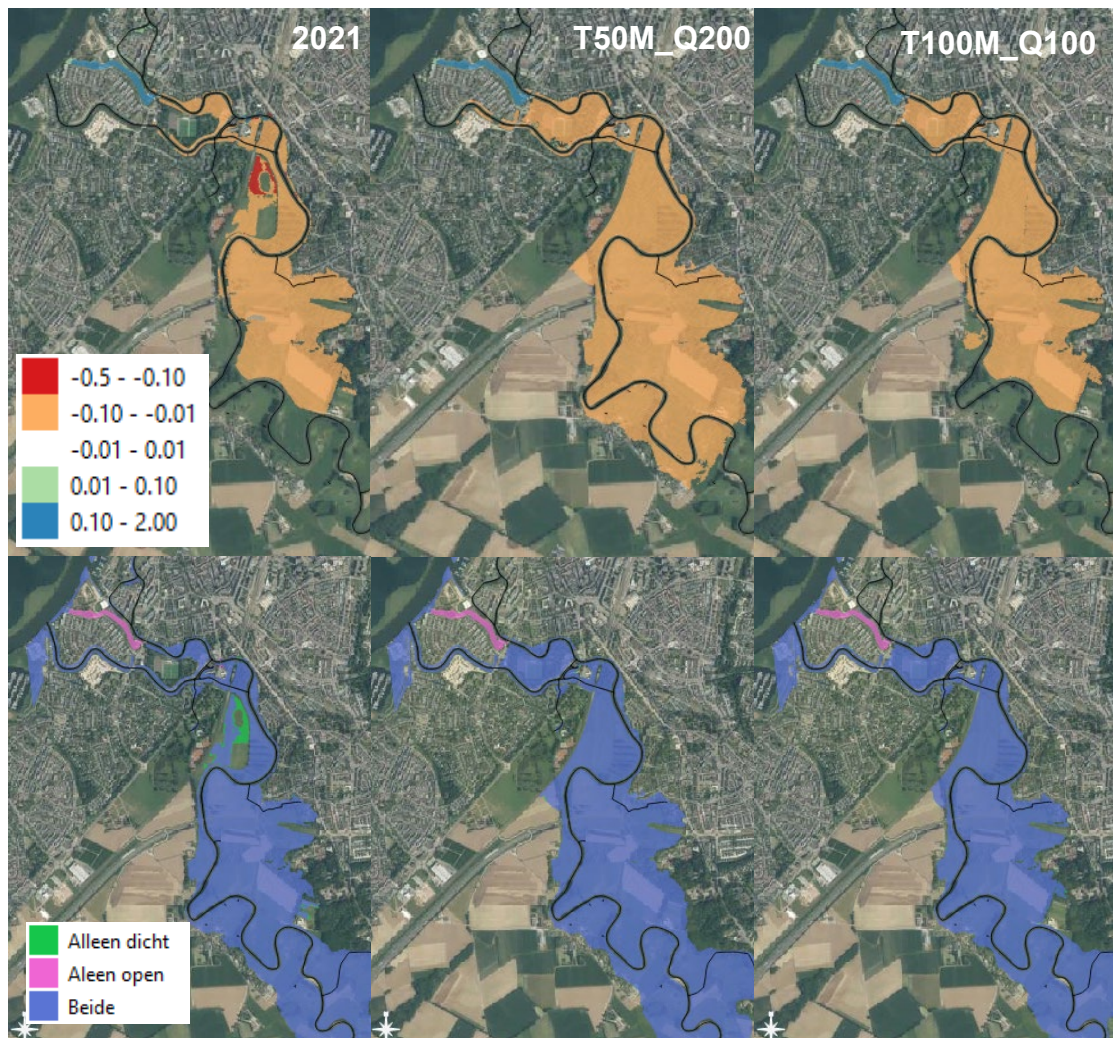
Uit berekeningen die zijn uitgevoerd tijdens de eerste fase van de watersysteemanalyse<sup>14</sup> bleek dat inzet van de overlaat tijdens het hoogwater van juli 2021 tot maximaal 20 cm lagere waterstanden had geleid op de bovenloop van de Hambeek. Bij lage afvoeren op de Maas heeft de Roer-overlaat geen effect omdat de waterstanden in de Roermond dan te laag blijven. De overlaat stroomt dan niet goed in. Bij zeer hoge afvoeren op de Maas neemt de effectiviteit ook af omdat grote delen van de Roermond dan sowieso overstromen. De overlaat is dus het meest effectief bij hoge afvoer op de Roer in combinatie met een hoogwater op de Maas zoals zich dat in juli 2021 voordeed.

<sup>13</sup> Bij de laatste beoordeling van de waterkeringen door Waterschap Limburg zijn deze dijken afgekeurd.

<sup>14</sup> Casestudie Roermond, uitgevoerd door Geertsema en Asselman (2022)

Omdat de eerdere berekeningen in de casestudie (Geertsema en Asselman, 2022) waren uitgevoerd met een relatief grof model, zijn in fase 2 van de watersysteemanalyse drie aanvullende berekeningen uitgevoerd met een gedetailleerder model. Deze berekeningen ondersteunen de eerder getrokken conclusies:

- Bij een hoogwater zoals dat in juli 2021 zou inzet van de overlaat plaatselijk tot maximaal 20 cm lagere waterstanden kunnen leiden (linksboven in Figuur 7.14). Op de meeste locaties is het effect echter beperkt tot 1 à 2 cm. De waterstand op de Maas bij Roermond bedroeg toen maximaal NAP +20,8 m en de Roerafvoer bij St. Odiliënberg is in het nieuwe model ingesteld op 155 m<sup>3</sup>/s.
- Bij een Maaswaterstand van NAP +20,9 m (~T50) en een afvoer van 200 m<sup>3</sup>/s op de Roer bij St. Odiliënberg (>T100) zou het effect gemiddeld ongeveer 2,5 cm bedragen.
- Bij een hogere Maaswaterstand van NAP +21,3 m (~T100) en een afvoer van 100 m<sup>3</sup>/s op de Roer bij St. Odiliënberg (<T10) zou het effect beperkt zijn tot ongeveer 1 cm.

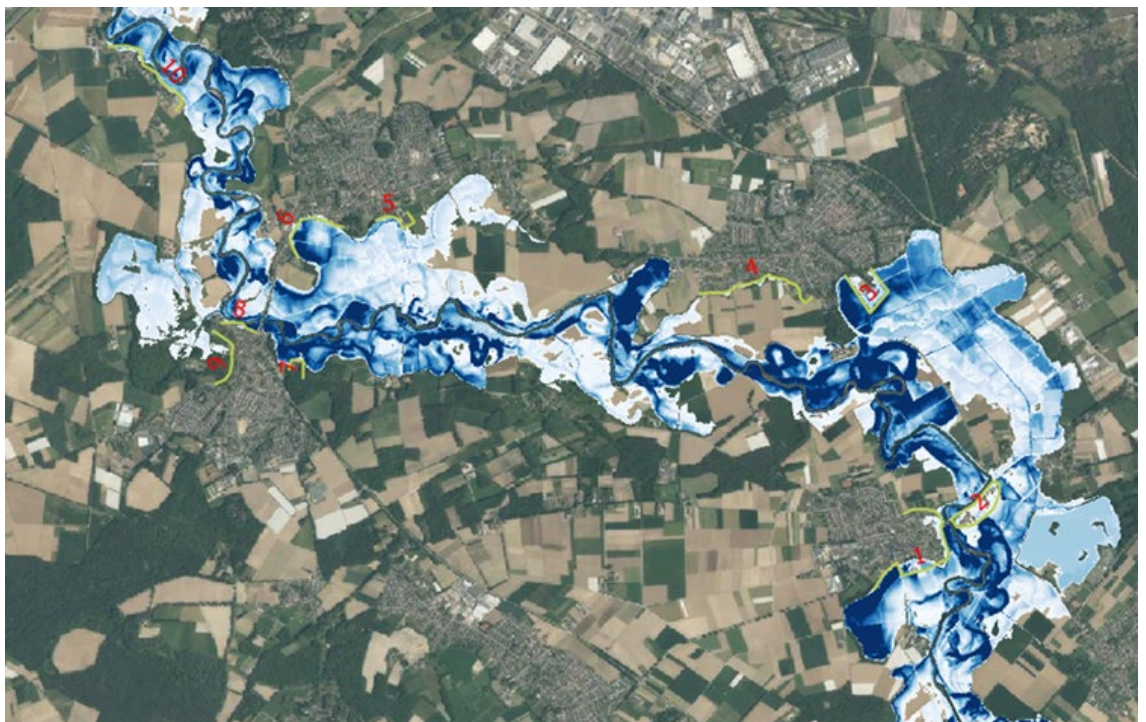


*Figuur 7.14 Versillen in overstroomd oppervlak (onder) en waterdiepte (boven) voor de drie scenario's waarbij het effect van de Roer-overlaat is bepaald. Van links naar rechts: juli 2021, T50 en T100. In de bovenste panelen geven oranje/rode kleuren een verlaging van de waterstand weer door inzet van de Roer-overlaat, terwijl blauwe kleuren een verhoging weergeven (in het gebied van de overlaat zelf).*

Geconcludeerd wordt dat inzet van de Roer-overlaat de waterstanden plaatselijk met maximaal 20 cm zou kunnen verlagen, dat het effect meestal beperkt is tot enkele centimeters. Het overstroomd oppervlak (en de schade) verandert nauwelijks. Bij inzet van de Roer-overlaat moeten wel extra kosten worden gemaakt in verband met het afgraven en herstellen van de drie dijkjes (zie Figuur 7.13). Inzet van de overlaat leidt ook tot een toename van het overstromingsrisico in het centrum van Roermond (in verband met de kans op een doorbraak van de dijken langs de overlaat).

### 7.5.7 Beschermen van bebouwde gebieden met kades

In de overstromingsvlakte van de Roer bevindt zich weinig bebouwing. De in juli 2021 getroffen woningen staan meestal aan de rand van het overstroomde gebied. Figuur 7.15 toont locaties waar gebouwen onder water kunnen lopen en die beschermd zouden kunnen worden met een kade of dijk. Tabel 7.1 geeft aan hoe diep de verschillende gebieden (die zijn genummerd in Figuur 7.15) onder water komen te staan. Dit geeft een indicatie van de benodigde dijkhoogte. Op sommige locaties varieert de waterdiepte sterk (zie bijvoorbeeld locatie 6 in Tabel 7.1). Over het algemeen staat de bebouwing op delen met relatief beperkte waterdieptes.



*Figuur 7.15 Mogelijke locaties voor de aanleg van kades om woningen te beschermen*

Tabel 7.1 Waterdieptes op locaties waar woningen onder water lopen, bij verschillende overstromingsscenario's. Per scenario staat tussen haakjes het aantal getroffen huizen en schuren vermeld (indicatief). Locaties zijn weer gegeven in Figuur 7.15.

Locatie	Diepte T25	Diepte T100	Diepte 2021	Opmerkingen
1	10-40 cm (4)	10-50 cm (15)	10-60 cm (20)	Kasteel met bijgebouwen, tuinen, schuren en huizen
2	0-10 cm (1)	10-20 cm (~10)	10-30 cm (~20)	Huizen en schuren
3	30 cm (1)	10-100 cm (3)	20-100 cm (3)	Kasteel en bijgebouwen
4	-	20 cm (1)	30 cm (3)	Schuren
5	-	5 cm (1)	10 cm (2)	Schuren
6	20-100 cm (3)	40-150 cm (11)	50-200 cm (17)	Huizen plus schuren en heel veel tuinen
7	-	-	-	Geen overlast
8	20 cm (1)	20 cm (1)	40 cm (4)	Huizen plus schuren en veel tuinen
9	-	-	-	Geen overlast
10	20-50 (1)	30-60 cm (3)	50-100 cm (6)	Huizen plus schuren plus kas en veel tuinen

Het volgende valt op in Tabel 7.1:

- Het aantal getroffen gebouwen is vaak beperkt (zie de getallen tussen haakjes in Tabel 7.1). De vraag is of de aanleg van een (dure) dijk opweegt tegen de baten (minder schade aan woningen).
- Het gaat in veel gevallen om onder gelopen tuinen en schuren. In sommige gevallen overstromen ook woningen (er was in juli 2021 veel schade aan souterrains). Op locaties 1 en 3 is sprake van een kasteel met bijgebouwen.
- De waterdiepte bij de overstroomde woningen is vaak beperkt tot een aantal decimeter. Mogelijk kunnen schotten hier ook soelaas bieden (in ieder geval bij minder extreme omstandigheden).

Opgemerkt wordt dat eerder voor gebied 1 is besloten om hier geen kering aan te leggen, omdat men de natuurlijke waterbergingscapaciteit van het Roerdal wil behouden.

In het stroomgebied van de Roer is in juli 2021 gemiddeld 106 mm neerslag gevallen. De meeste neerslag viel in het zuidelijke deel van het stroomgebied. Veel van het afstromende regenwater is geborgen in de stuwweren. Dit had een gunstig effect op de afvoer benedenstrooms. In Nederland overstromden de overstromingsvlaktes langs de Roer bovenstrooms van Roermond. Maatregelen die getroffen kunnen worden in het Nederlandse deel van de Roer kunnen lokaal de waterstanden verlagen. In veel gevallen is echter sprake van afwentelen, waardoor de waterstanden op andere locaties hoger worden. Inzet van de Roer-overlaat in Roermond leidt lokaal tot maximaal 20 cm lagere waterstanden (meestal is het effect beperkt tot enkele centimeters). Bij deze studie is alleen gekeken naar maatregelen in het Nederlandse deel van de Roer. Mogelijk kunnen maatregelen in Duitsland het overstromingsgevaar meer verkleinen. Met name het uitbreiden van het aantal reservoirs en/of het verbetering van het beheer van de reservoirs kan een positief effect hebben op zowel de hoog- als laagwaterproblematiek in Nederland.

Gemiddeld is er in juli 2021 in het stroomgebied van de Roer ongeveer 106 mm neerslag gevallen in twee dagen. Dit heeft geleid tot een zeer hoge afvoer bij de grens met Nederland. Hoe hoog de piekafvoer precies is geweest is niet bekend. Een handmeting kwam uit op een afvoer van meer dan 260 m<sup>3</sup>/s, maar Duitse modelberekeningen suggereren dat de piekafvoer ook ongeveer 350 m<sup>3</sup>/s kan zijn geweest. Zonder de aanwezige stuwweren in het Duitse deel van het stroomgebied had de afvoer nog veel hoger kunnen zijn.

De hoge afvoer heeft geleid tot grootschalige overstromingen langs de Roer bovenstrooms van Roermond. Ook in Roermond waren de waterstanden extreem hoog. Hier waren de waterstanden echter vooral het gevolg van het hoogwater op de Maas. Uit voorzorg zijn bewoners geëvacueerd, maar ondanks de hoge waterstanden zijn in Roermond alleen de hockeyvelden van Concordia overstromd.

Met betrekking tot mogelijke maatregelen om de gevolgen van extreme regenval te beperken worden de volgende conclusies getrokken (zie ook het samenvattende overzicht in Tabel 7.2):

- Vasthouden: Omdat het grootste deel van het stroomgebied in het buitenland ligt is deze maatregel niet nader onderzocht. Omdat de meeste neerslag in het zuidelijk deel van het stroomgebied is gevallen, waar bodems en gesteenten zeer slecht doorlatend zijn en waar het landgebruik vooral bestaat uit grasland en bos, lijkt er weinig extra infiltratie gecreëerd te kunnen worden.
- Bergen:
  - a) Door de verruwing van de overstromingsvlaktes (ruwere vegetatie) kan het hoogwater meer worden afgetopt. Dit leidt bovenstrooms (waar de verruwing plaatsvindt) tot 10 à 50 cm hogere waterstanden. Benedenstrooms nemen de waterstanden met 5 tot 20 cm af. In Roermond zelf is het effect beperkt tot 5 à 10 cm. Dit komt doordat de waterstanden in Roermond vooral bepaald worden door de waterstanden op de Maas.

- b) De onderzochte retentiegebieden hebben een beperkt effect (maximaal 1 tot 4 cm lagere waterstanden benedenstrooms) en dat effect neemt sterk af wanneer sprake is van een extremer of minder extreem hoogwater dan dat waarop de inlaatdrempel is afgeregeld. Maar ook wanneer het hoogwater in een ander seizoen plaatsvindt of een andere duur kent dan het hoogwater dat gebruikt is voor het ontwerp zal nauwelijks een effect te verwachten zijn. Het effect is dus beperkt en bovendien erg onzeker.
  - c) Vergroting van de berging door de afvoercapaciteit bij de bruggen te beperken leidt tot maximaal 4 cm hogere waterstanden bovenstrooms van de brug. Benedenstrooms van de bruggen daalt de waterstand met maximaal 2 cm.
- Afvoeren:
    - a) Bij twee bruggen die zorgen voor opstuwing is de doorstroomcapaciteit vergroot door de landhoofden doorstroombaar te maken. Dit leidt tot lagere waterstanden bovenstrooms van de brug (3 tot 15 cm afhankelijk van de locatie en de piekafvoer op de Roer), maar over het algemeen tot hogere waterstanden benedenstrooms (6 tot 17 cm).
    - b) In Roermond kan de afvoercapaciteit worden vergroot door inzet van de Roer-overlaat. Hierdoor kan de waterstand op een locatie met maximaal 20 cm worden verlaagd. Meestal is het effect echter beperkt tot enkele centimeters. Het overstromd oppervlak (en de schade) verandert nauwelijks. Bij inzet van de Roer-overlaat moeten wel extra kosten worden gemaakt in verband met het afgraven en herstellen van drie dijkjes. Inzet van de overlaat leidt ook tot een toename van het overstromingsrisico in het centrum van Roermond (in verband met de kans op een doorbraak van de dijken langs de overlaat).
  - Beschermen: Woningen die overstromen bevinden zich meestal op de rand van het overstromde gebied. Het aantal getroffen gebouwen is vaak beperkt (maximaal enkele tientallen). De vraag is of de aanleg van een (dure) dijk opweegt tegen de baten (minder schade aan woningen). Omdat de waterdiepte bij de overstromde woningen vaak beperkt is tot een aantal decimeters, kan bij minder extreme omstandigheden mogelijk ook worden volstaan met het plaatsen van schotten. Omdat bedijking leidt tot een afname van het overstromd gebied kan sprake zijn van afwenteling op gebieden benedenstrooms. Dit is niet onderzocht. Bij het plaatsen van schotten wordt een kleiner gebied aan de overstromingsvlakte onttrokken, waardoor veel minder sprake zal zijn van afwentelen.

In deze studie is vooral gekeken naar het effect van maatregelen in Nederland, maar mogelijk kunnen maatregelen in Duitsland het overstromingsgevaar meer verkleinen. Met name het uitbreiden van het aantal reservoirs en/of het verbetering van het beheer van de reservoirs kan een positief effect hebben op zowel de hoog- als laagwaterproblematiek in Nederland. Gezien het effect van de reservoirs is borging an sich van groot belang voor waterbeheer in Nederland. Aanbevolen wordt om dit te verkennen.

Tabel 7.2 Samenvattend overzicht berekende effecten van verschillende typen maatregelen in en langs het Nederlandse deel van de Roer (alleen positieve effecten zijn in cm gegeven, afwentelen wordt genoemd bij de opmerkingen)

Stroomgebied Roer	Neerslagsituatie			opmerking
	T25	T100 (T25 klimaat)	juli 2021 (T100 klimaat)	
<b>water vasthouden</b>	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	niet onderzocht omdat slechts klein deel van stroomgebied in NL ligt. Potentieel veel effect (reeds aanwezige reservoirs zijn van groot belang voor afvlakken hoogwater, ook in NL)
<b>water bergen: verruwing overstromingsvlakte</b>	++ en -- (≤20 cm)	++ en -- (≤20 cm)	++ en -- (≤20 cm)*	in het verruwde deel nemen waterstanden met meerdere dm toe. Benedenstreams max 20 cm lagere waterstand.
<b>water bergen: verkleinen afvoercapaciteit bruggen</b>	+ en - (<5 cm)	+ en - (<5 cm)	+ en - (<5 cm)*	bovenstreams paar cm opstuwning, benedenstreams paar cm verlaging.
<b>water bergen: inzet retentiegebieden (drempel 20 cm lager dan max waterstand)</b>	0	0	0*	gebieden stromen te vroeg in en hebben geen effect
<b>water bergen: inzet retentiegebieden (drempel 10 cm lager dan max waterstand)</b>	+ (≤ 1cm)	+ (≤ 4cm)	+ (≤ 5cm)*	klein positief effect, echter gebied ingericht op T25 hoogwater heeft geen effect bij T100 en omgekeerd
<b>verbeteren afvoercapaciteit bruggen</b>	++ en -- (<10 cm)	++ en -- (<15 cm)	++ en -- (<15 cm)*	bovenstreams max paar dm daling, benedenstreams verhoging. Effect alleen overwegend positief wanneer deel van overstromingsvlakte effectiever instroomt (T100)
<b>inzet Roer-overlaat</b>	+	+	+	enkele cm waterstands daling
<b>aanleg kades</b>	+ en -	+ en -	++ en -	kan schade aan woningen verminderen, echter afwentelen is niet onderzocht (mogelijk paar cm hogere waterstand benedenstreams, vandaar ook -)

\* niet doorgerekend, maar beoordeeld op basis van expertkennis

## 8 Oppervlakkige afstroming van regenwater in meer detail

### 8.1 Inleiding

Bij de watersysteemanalyse voor de beeksystemen is onderzocht wat het effect is op de afvoeren en waterstanden in de beken wanneer water bovenstrooms, op de plateaus, de hellingen en in de haarvaten van het systeem, kan worden vastgehouden. Hierbij is gekeken naar het effect wanneer 5 of 10 mm neerslag per dag extra kan worden geborgen. Het is echter niet bekend wat voor maatregelen er nodig zijn om zoveel water te bergen. Is het voldoende om het landgebruik op een beperkt aantal percelen aan te passen? Of zijn veel grootschaligere en ingrijpende maatregelen nodig? Om antwoord te kunnen geven op die vraag is een gedetailleerdere studie uitgevoerd naar de oppervlakkige afstroming van regenwater in een hellend gebied. Daarbij is met behulp van neerslag-afvoer-modellen onderzocht waar (welke gebieden) bijdragen aan de afstroming van regenwater, wat de invloed van het landgebruik is en hoe effectief regenwaterbuffers zijn. Deze gerichte studie is uitgevoerd voor twee kleine zijbeken van de Geul: het stroomgebied Ransdaal (met daarin de Scheumerbeek) en het stroomgebied van de Strabeker Vloedgraaf. Het onderzoek is uitgevoerd en gerapporteerd door Jetten (2022). In dit hoofdstuk presenteren we de belangrijkste bevindingen.

### 8.2 Het stroomgebied Ransdaal en het stroomgebied van de Strabeker Vloedgraaf

Het water in het stroomgebied bij Ransdaal stroomt af via de Scheumerbeek naar de Geul. De monding van de Scheumerbeek bevindt zich ter hoogte van Schin op Geul (Figuur 8.1). De Strabeker Vloedgraaf bevindt zich iets verder naar het noordwesten. Deze beek mondt uit in de Geul net benedenstroomse van het centrum van Valkenburg.

De ondergrond en de bodems zijn zeer vergelijkbaar in beide stroomgebieden, maar de stroomgebieden verschillen in grootte, reliëf, landgebruik en percentages verhard oppervlak (Tabel 8.1). In het stroomgebied van de Strabeker Vloedgraaf wordt een kleiner deel van het stroomgebied gebruikt voor akkerbouw (34% tegen 42% in het stroomgebied Ransdaal). Het aandeel bos is er groter (17% tegen 6%). Het natuurlijke bos komt vooral voor op de steile hellingen in het centrale deel van het stroomgebied van de Strabeker Vloedgraaf. Het bebouwde gebied, waaronder bebouwde kom (inclusief groene oppervlakten zoals tuinen, parken en begraafplaatsen, beslaat ongeveer 13 tot 15% van het stroomgebied. Een hoogtekaartje van beide stroomgebieden is te zien in Figuur 8.2.

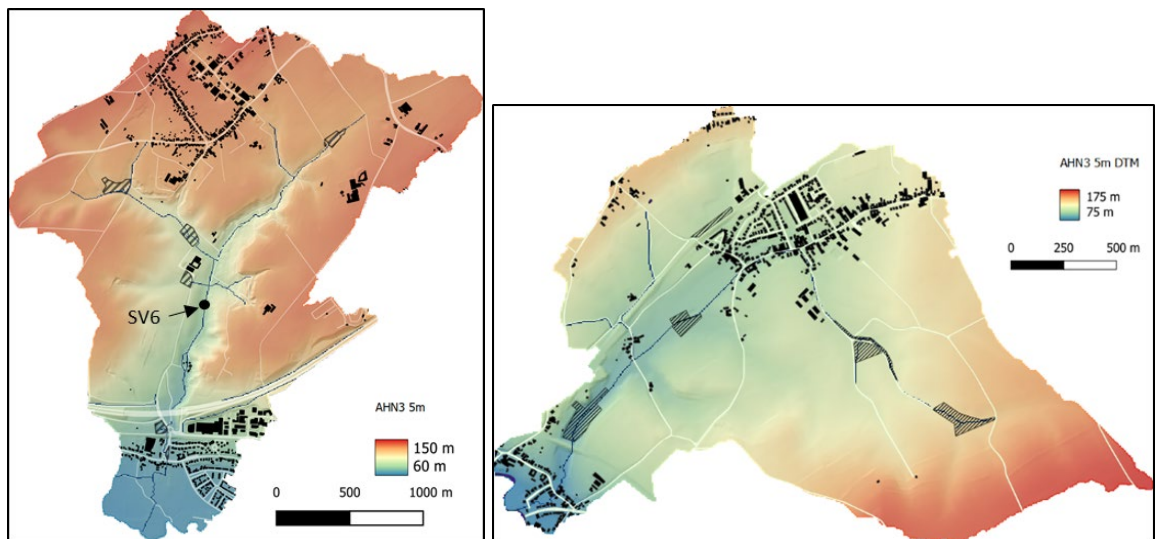
Tabel 8.1 Oppervlak en landgebruik in de onderzochte stroomgebieden

	Strabeker Vloedgraaf	Stroomgebied Ransdaal
<b>Totaal oppervlak</b>	5,83 km <sup>2</sup>	3,55 km <sup>2</sup>
<b>Landgebruik (% van totale oppervlak)</b>		
<b>Akkerland</b>	34%	42%
<b>Grasland</b>	34%	39%
<b>bos en boomkwekerijen</b>	17%	6%
<b>bebouwd gebied</b>	15%	13%





Figuur 8.1 Ligging van de onderzochte stroomgebieden Strabeker Vloedgraaf (blauw) en Ransdaal (oranje)



Figuur 8.2 Hoogteligging van de onderzochte stroomgebieden Strabeker Vloedgraaf (links) en Ransdaal (rechts). Regenwaterbuffers zijn met een arcering weer gegeven. Het afvoermeetpunt is gemarkeerd met SV6.

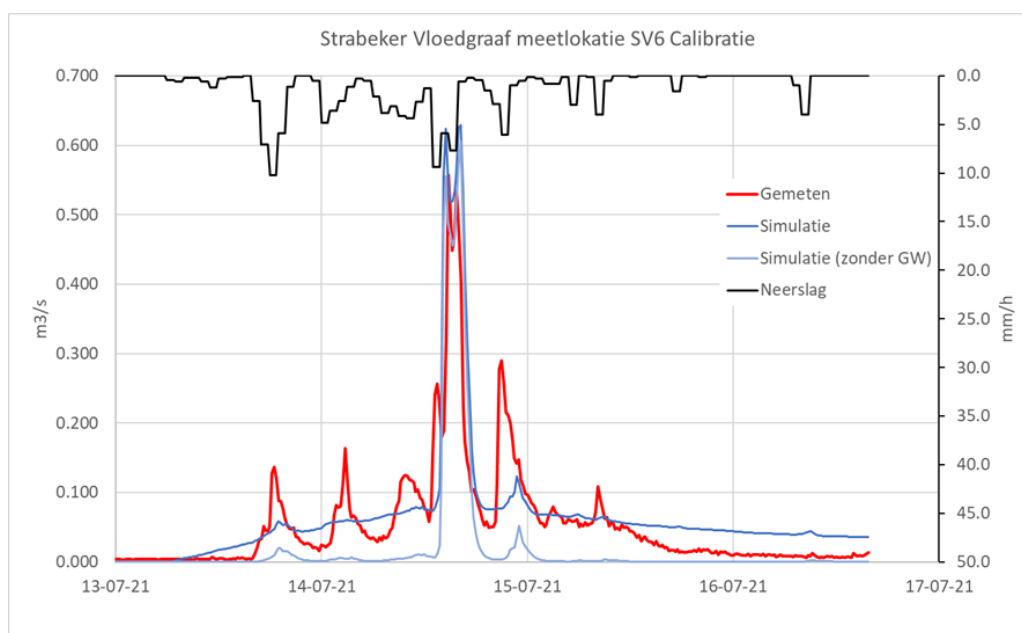
## 8.3 Wat is er gebeurd in juli 2021?

### Neerslag varieert van 118 mm tot 166 mm

Hoewel de stroomgebieden relatief dicht bij elkaar lagen verschilt de hoeveelheid neerslag die gevallen is tussen 13 en 18 juli 2021 aanzienlijk. Zo is in het stroomgebied Ransdaal 165,9 mm gemeten, terwijl de neerslag in Strabeek 118,2 mm was.

### Gemeten en berekende afvoer van de Strabeker Vloedgraaf

Alleen voor de Strabeker Vloedgraaf zijn afvoermetingen beschikbaar (Laseroms, 2021). De maximum afvoer die gemeten is bij meetpunt SV6 (zie Figuur 8.2 voor de ligging) bedroeg ongeveer 0,5 m<sup>3</sup>/s (zie rode lijn in Figuur 8.3).



Figuur 8.3 Gemeten en berekende afvoer in de Strabeker Vloedgraaf (meetpunt SV6, zie Figuur 8.2 voor de locatie).

De metingen uit de Strabeker Vloedgraaf zijn gebruikt om een gedetailleerd neerslagafvoermodel (gemaakt in openLISEM) voor dit stroomgebied te kalibreren. Het model berekent hoeveel water in de bodem kan infiltreren en hoeveel water er over het oppervlak afstroomt. De infiltratiecapaciteit van de bodem is afhankelijk van het bodemtype, maar ook van het type landgebruik (gras, akker, bos, etc.) en van de manier waarop het land bewerkt wordt. OpenLISEM corrigeert hiervoor. Ook houdt openLISEM rekening met verkorsting op akkers. Dit proces zorgt ervoor dat de infiltratiecapaciteit afneemt.

Bij de eerste modelsimulaties werd alleen gerekend met oppervlakkige afstroming en niet met stroming door de bodem. Dit leverde de gesimuleerde afvoer op zoals weergegeven met de lichtblauwe lijn in Figuur 8.3. Door stroming door de bodem mee te nemen werd de gemeten afvoer beter benaderd (donker blauwe lijn in Figuur 8.3). Echter, in de gemeten afvoer zijn meerdere piekjes te zien die samenvallen met periodes van intensere neerslag. Mogelijk hebben deze piekjes te maken met riooloverstorten in bebouwd gebied. Omdat de werking van het riool niet kan worden gesimuleerd met openLISEM kunnen deze afvoerpiekjes niet goed worden berekend. Echter, omdat het algemene verloop van de afvoer en de -maximum afvoer wel goed gesimuleerd zijn en omdat de riooloverstorten niet direct van belang zijn voor een analyse naar de mogelijkheden van infiltratie door ander landgebruik, is dit model gebruikt voor de analyses in dit hoofdstuk.

### Afvoer Ransdaal

De modelparameterwaarden die uit deze kalibratie volgden zijn daarna ook toegepast in het model voor Ransdaal, waar metingen van de afvoer ontbreken. Met dit model is berekend dat de maximale afvoer vanuit het Ransdaal stroomgebied naar de Geul ongeveer 1,3 m<sup>3</sup>/s bedroeg.

## 8.4 Hoe functioneert het systeem onder natte omstandigheden?

Om de hydrologische respons van de twee beeksystemen goed te kunnen vergelijken zijn de berekeningen voor de Strabeker Vloedgraaf herhaald, maar dan met dezelfde hoeveelheid neerslag als gevallen in Ransdaal (165,9 mm). Tabel 8.2 laat zien hoeveel procent van de gevallen neerslag (uitgaande van een bui van 165,9 mm zoals gevallen was in juli 2021 in Ransdaal) tot afvoer zou komen. Bij de Strabeker Vloedgraaf is dat ongeveer 15%, bij Ransdaal is dat hoger, ongeveer 20%. Er is minder infiltratie in het stroomgebied van Ransdaal dan in dat van de Strabeker Vloedgraaf. Dat zou kunnen komen door de afwezigheid van natuurlijk bos en een iets groter percentage akkerland.

Tabel 8.2 Totale neerslag, infiltratie en afvoer uit de stroomgebieden van de Strabeker Vloedgraaf en Ransdaal bij een bui van 165,9 mm en huidig landgebruik. ZB = zonder buffersysteem, duikers en overkluizingen<sup>15</sup>

	Neerslag (mm)	Infiltratie (mm)	Afvoer (mm)	Afvoer (%)	Afvoer (m <sup>3</sup> )	Piekafvoer (m <sup>3</sup> /s)
Strabeek huidig	165,9	136,5	24,4	15	141.378	0,9
Strabeek ZB	165,9	139,2	23,9	14	138.697	5,2
Ransdaal huidig	165,9	124,3	33,4	20	117.987	1,7
Ransdaal ZB	165,9	123,5	35,1	21	123.975	4,6

Wanneer we voor het huidige functioneren van het systeem vooral kijken naar de piekafvoer die uitmondt in de Geul, dan wordt dat beeld sterk beïnvloed door de aanwezige regenwaterbuffers, duikers en overkluizingen. Deze constructies zorgen ervoor dat het regenwater tijdelijk wordt afgeremd en geborgen. Dit heeft amper effect op de *totale hoeveelheid* water die de Geul bereikt, maar zorgt er wel voor dat de *piekafvoer* sterk wordt verlaagd. Er zijn daarom berekeningen uitgevoerd waarbij rekening is gehouden met de aanwezige buffers en berekeningen waarbij is verondersteld dat er geen buffers zouden zijn. Tabel 8.2 laat zien dat het aanwezige regenwaterbuffersysteem inderdaad nauwelijks invloed heeft op het totale volume water dat is afgevoerd. De piekafvoer zou in beide beken echter wel veel hoger zijn geweest wanneer geen sprake zou zijn van het buffersysteem. Getallen kloppen wel, maar lijken vreemd omdat niet alle componenten van de waterbalans worden genoemd (zo ontbreekt interceptie en sub-surface flow).

<sup>15</sup> De som van infiltratie en afvoer is niet altijd gelijk aan de gevallen neerslag omdat interceptie en stroming door de bodem in deze tabel ontbreken.

## 8.5 Maatregelen

### 8.5.1 Inleiding

Het effect van de volgende maatregelen is verkend, waarbij gekeken is naar het effect op de afvoer en de waterstanden:

- een verandering van akkerland naar grasland (aangeduid met 'Gras'). Dit heeft effect op de bodemdoorlatendheid. Ook is aangenomen dat bij gras geen verslemping optreedt tijdens een bui. Verslemping is het dichtslaan van de bodem wat leidt tot verkorsting. De infiltratie neemt tijdens een bui dus niet af. Bij akkerland kan dat wel gebeuren.
- een verandering van akkerland naar duurzame landbouw (aangeduid met 'Duurzaam'). Duurzame landbouw is hier gedefinieerd als landbouw waarbij de bodem zo wordt bewerkt dat dit leidt tot een betere bodemstructuur en daarmee tot een betere doorlatendheid van de bodem. In het model is hiervoor uitgegaan van een 5% lagere dichtheid en 0,5% meer organische stof.

Om te voorkomen dat de aanwezige regenwaterbuffers een vertekend beeld geven van het effect van ander landgebruik, zijn de simulaties uitgevoerd met en zonder de aanwezigheid van buffersystemen (al het regenwater stroomt dan vrij af).

### 8.5.2 Strabeker Vloedgraaf

Tabel 8.3 laat voor alle doorgerekende landgebruiksscenario's zien hoeveel neerslag is geïnfiltreerd en hoeveel is afgestroomd en tot welke piekafvoer dat zou leiden. In de huidige situatie stroomt bij een bui van 165,9 mm in twee dagen ongeveer 15% van de gevallen neerslag af. Wanneer wordt overgegaan naar duurzame akkerbouw, dan kan dat percentage afnemen tot 8,5%. Wanneer al het akkerland wordt omgezet naar grasland dan is het effect nog groter: ongeveer 7% van de neerslag zou dan worden afgevoerd. Een verandering in landgebruik resulteert ook in een afname van de piekafvoer, maar dan is het verschil tussen duurzame akkerbouw of een overgang naar gras minder groot.

Tabel 8.3 Totale neerslag, infiltratie en afvoer bij de verschillende landgebruiksscenario's van het stroomgebied van de Strabeker Vloedgraaf. ZB = zonder buffersysteem

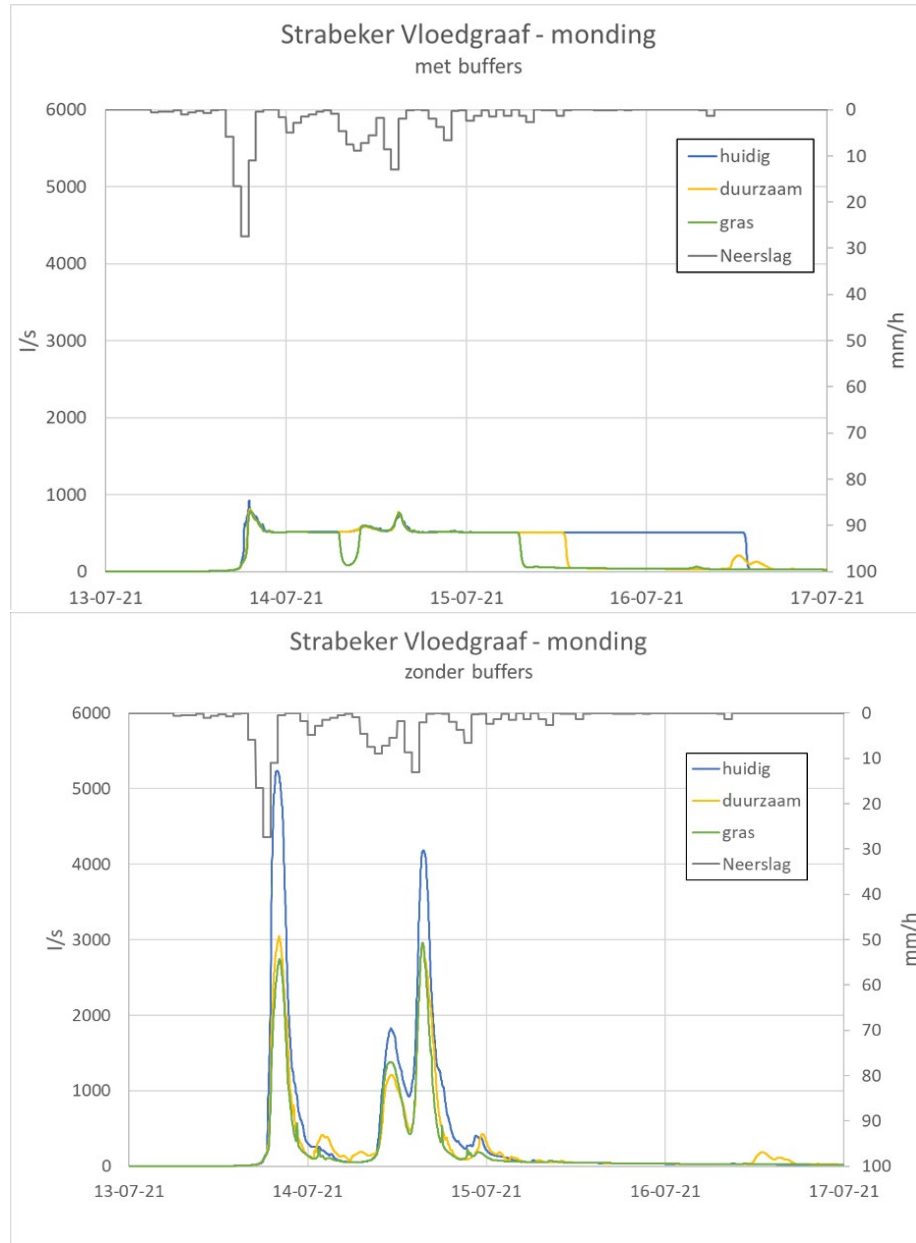
	Neerslag (mm)	Infiltratie (mm)	Afvoer (mm)	Afvoer (%)	Afvoer (m <sup>3</sup> )	Piekafvoer (m <sup>3</sup> /s)
Huidig	165,9	136,5	24,4	14,7%	141.378	0,92
Duurzaam	165,9	145,2	17,0	10,2%	98.578	0,81
Gras	165,9	149,5	14,3	8,6%	82.815	0,79
Huidig ZB	165,9	139,2	23,9	14,4%	138.697	5,23
Duurzaam ZB	165,9	145,4	16,8	10,1%	97.427	3,05
Gras ZB	165,9	149,6	14,3	8,6%	82.988	2,96

Wat opvalt is dat omzetting van het landgebruik van akkerland naar grasland (een oppervlak van 34% van het stroomgebied) resulteert in maximaal 10 mm extra infiltratie in twee dagen tijd. Wanneer akkerbouw wordt omgezet in duurzame landbouw, dan bedraagt de extra infiltratie ongeveer 7 mm in twee dagen.

Het verloop van de berekende afvoergolven is te zien in Figuur 8.4. Uit de berekening met regenwaterbuffers, duikers en overkluizingen blijkt dat deze de maximum afvoer naar de Geul sterk begrenzen. In dit geval wordt de piekafvoer bij de monding vooral beperkt door de overkluizing in Valkenburg, waarvan de maximum capaciteit geschat is op ongeveer 0,9 m<sup>3</sup>/s.

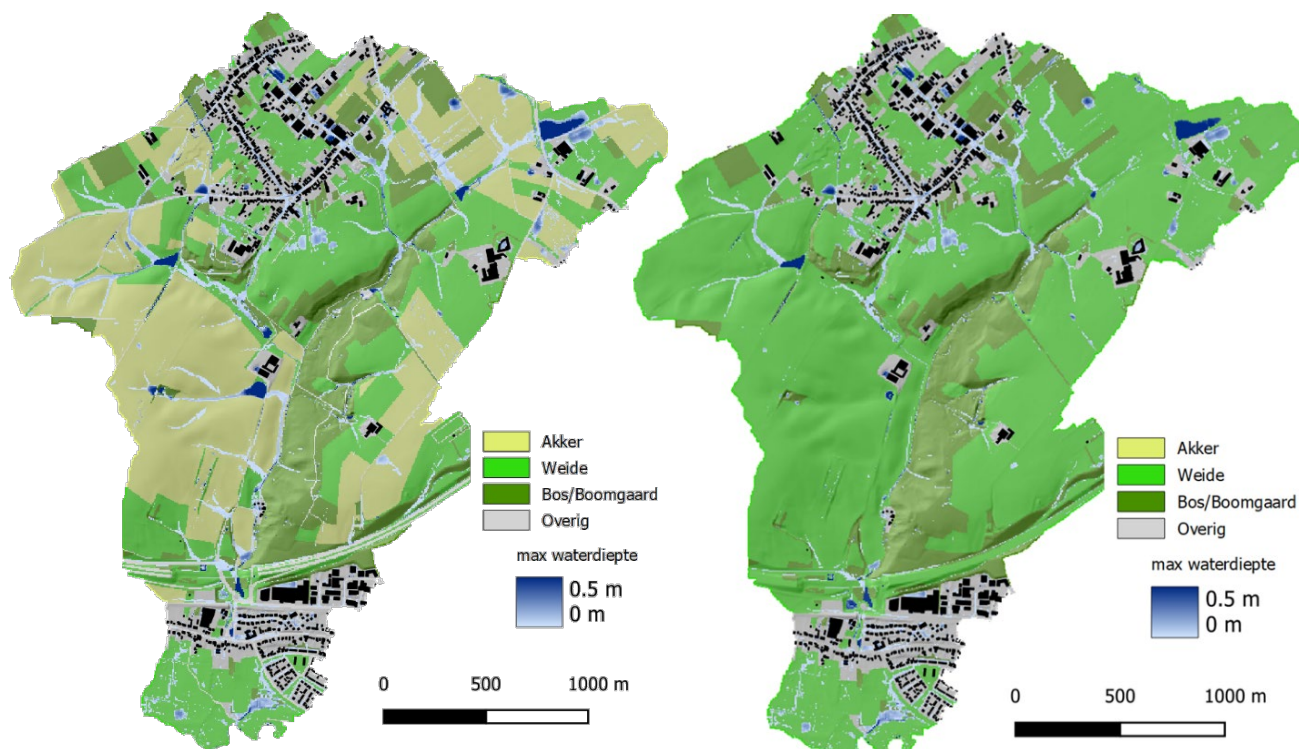
In dat geval resulteert ander landgebruik dus vooral in een langere nalevering van water naar de Geul.

De onderste grafiek in Figuur 8.4 laat zien wat er zou gebeuren wanneer de regenwaterbuffers en overkluizingen er niet zouden zijn. In dat geval heeft een verandering in landgebruik een veel groter effect op de piekafvoer. De grootste afname is te zien bij de eerste afvoerpiek en bedraagt ruim 40%. De totale afvoer neemt met 30% af wanneer wordt over gegaan op duurzame landbouw en 40% wanneer wordt over gegaan naar grasland.



*Figuur 8.4 Berekende afvoer bij de monding van de Strabeker Vloedgraaf bij verschillende landgebruiksscenario's, met en zonder rekening te houden met regenwaterbuffers, duikers en overkluizingen die het water tijdelijk tegen kunnen houden. Het effect van regenwaterbuffers, duikers en overkluizingen is duidelijk zichtbaar.*

Bij de analyses van mogelijke maatregelen is niet alleen gekeken naar de afvoer in de beek, maar ook naar overstromingen in het stroomgebied zelf. Voor het huidige landgebruik is het resultaat te zien in de linker figuur in Figuur 8.5. De grootste dieptes treden op in de regenwaterbuffers (meer dan 0,5 m), maar er is ook sprake van wateroverlast in laagtes in akkers en weilanden en in Groot Haasdal, het bebouwde gebied in het noorden<sup>16</sup>.



Figuur 8.5 Berekende maximale waterdieptes bij een bui van 165,9 mm en huidig landgebruik (links) en wanneer al het akkerland wordt omgezet in grasland (rechts) (waterdieptes in de regenwaterbuffers zijn meer dan 0,5 m).

De rechter figuur in Figuur 8.5. toont de waterdiepte wanneer het landgebruik verandert van akkerland naar grasland. Gras laat kleinere maximale waterdieptes zien en sommige 'voormalige' akkerbouwgebieden geven geen afstroming meer (midden westelijke helft). De regenwaterbuffers overstromen veelal niet meer. 'Voormalige' akkers in het noorden leveren nog wel water, waarschijnlijk doordat er afstroming ontstaat in het dorp Groot Haasdal, dat de omgeving beïnvloedt. Maar dit is minder dan bij het huidige landgebruik. De verandering in landgebruik heeft geen effect op de wateroverlast in Groot Haasdal zelf.

In de huidige situatie zou ongeveer 48 ha overstromd zijn. Wanneer akkerland wordt omgezet in grasland neemt dat af tot 35 ha. De totale lengte aan overstromde wegen zou afnemen van 3,5 km naar 2,9 km.

### 8.5.3 Ransdaal

Tabel 8.4 laat voor alle doorgerekende landgebruiksscenario's in het stroomgebied bij Ransdaal zien hoeveel neerslag is geïnfiltreerd en hoeveel is afgestroomd en tot welke piekafvoer dat zou leiden.

In de huidige situatie stroomt bijna 20% van de gevallen neerslag af. Dat is beduidend meer dan in het stroomgebied van de Strabeker Vloedgraaf (15%). Mogelijk komt dat doordat in het stroomgebied bij Ransdaal geen natuurlijk bos aanwezig is.

<sup>16</sup> Omdat LISEM geen riolering kan simuleren kunnen de overstromingen in Groot Haasdal zijn overschat.

Wanneer wordt overgegaan naar duurzame akkerbouw, dan kan het percentage neerslag dat afstroomt afnemen van 20% tot ongeveer 17%. Wanneer al het akkerland wordt omgezet naar grasland dan is het effect nog iets groter: ongeveer 15% van de neerslag zou dan worden afgevoerd. Een verandering in landgebruik resulteert ook in een afname van de piekafvoer, maar dan is het verschil tussen duurzame akkerbouw of een overgang naar gras veel minder groot.

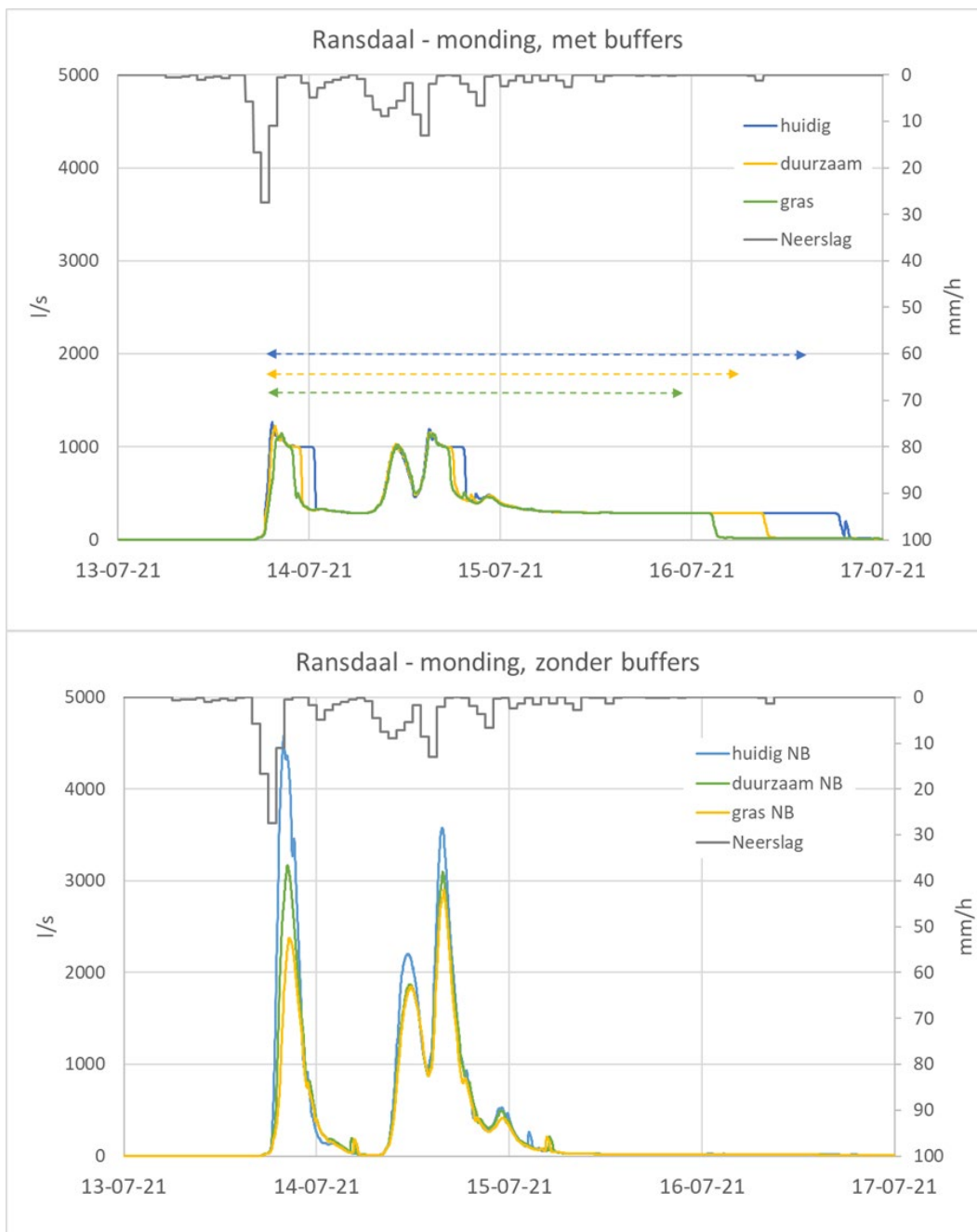
Tabel 8.4 Totale neerslag, infiltratie en afvoer bij de verschillende scenario's van het stroomgebied bij Ransdaal. ZB = Zonder buffersysteem

	Neerslag (mm)	Infiltratie (mm)	Afvoer (mm)	Afvoer (%)	Afvoer (m <sup>3</sup> )	Piekafvoer (m <sup>3</sup> /s)
<b>Huidig</b>	165,9	124,3	33,4	20,1	117.987	1,26
<b>Duurzaam</b>	165,9	129,4	28,3	17,1	99.975	1,10
<b>Gras</b>	165,9	133,7	25,4	15,3	89.648	1,16
<b>Huidig ZB</b>	165,9	123,5	35,1	21,2	123.975	4,58
<b>Duurzaam ZB</b>	165,9	128,6	30,1	18,1	106.495	3,43
<b>Gras ZB</b>	165,9	133,1	26,2	15,8	92.601	3,16

Wat opvalt is dat omzetting van het landgebruik van akkerland naar grasland (een oppervlak van 42% van het stroomgebied) resulteert in maximaal 5 mm extra infiltratie in twee dagen tijd gemiddeld over het hele stroomgebied. Wanneer akkerbouw wordt omgezet in duurzame landbouw, dan bedraagt de extra infiltratie maximaal ongeveer 4 mm in twee dagen. Dit effect is kleiner dan in het stroomgebied van de Strabeker Vloedgraaf. Mogelijk komt dit (deels) doordat de akkers in het stroomgebied van Ransdaal in juli voor een deel volledig bedekt waren met gewas. In het stroomgebied van de Strabeker Vloedgraaf was de vegetatiebedekking op akkers minder goed. De vegetatie remt het afstromende water en biedt meer gelegenheid voor infiltratie. Omzetten naar gras levert dan minder winst op dan wanneer gras vergeleken zou worden met een kale akker.

Het verloop van de berekende afvoergolven is te zien in Figuur 8.6. Uit de berekening met buffersysteem blijkt dat met name de duikers en overkluizingen de maximum afvoer naar de Geul sterk begrenzen tot ongeveer 1 m<sup>3</sup>/s. In dat geval resulteert ander landgebruik dus (net zoals bij de Strabeker Vloedgraaf) vooral in een kortere nalevering van water naar de Geul. Zonder de duikers en overkluizingen en heeft een verandering in landgebruik een veel groter effect op de piekafvoer. Deze conclusie geldt tot op zekere hoogte ook voor regenwaterbuffers, zo lang de buffercapaciteit voldoende is en de buffers niet overlopen, hebben veranderingen in landgebruik een relatief klein effect. Er stroomt weliswaar minder water over het oppervlak af, maar dit leidt vooral tot minder vulling van de regenwaterbuffers. Echter, bij extremere buien waarbij de buffers wel overlopen kan een verandering in landgebruik meer effect hebben. Veranderingen in landgebruik kunnen er dan voor zorgen dat de buffers niet, of minder, overlopen.

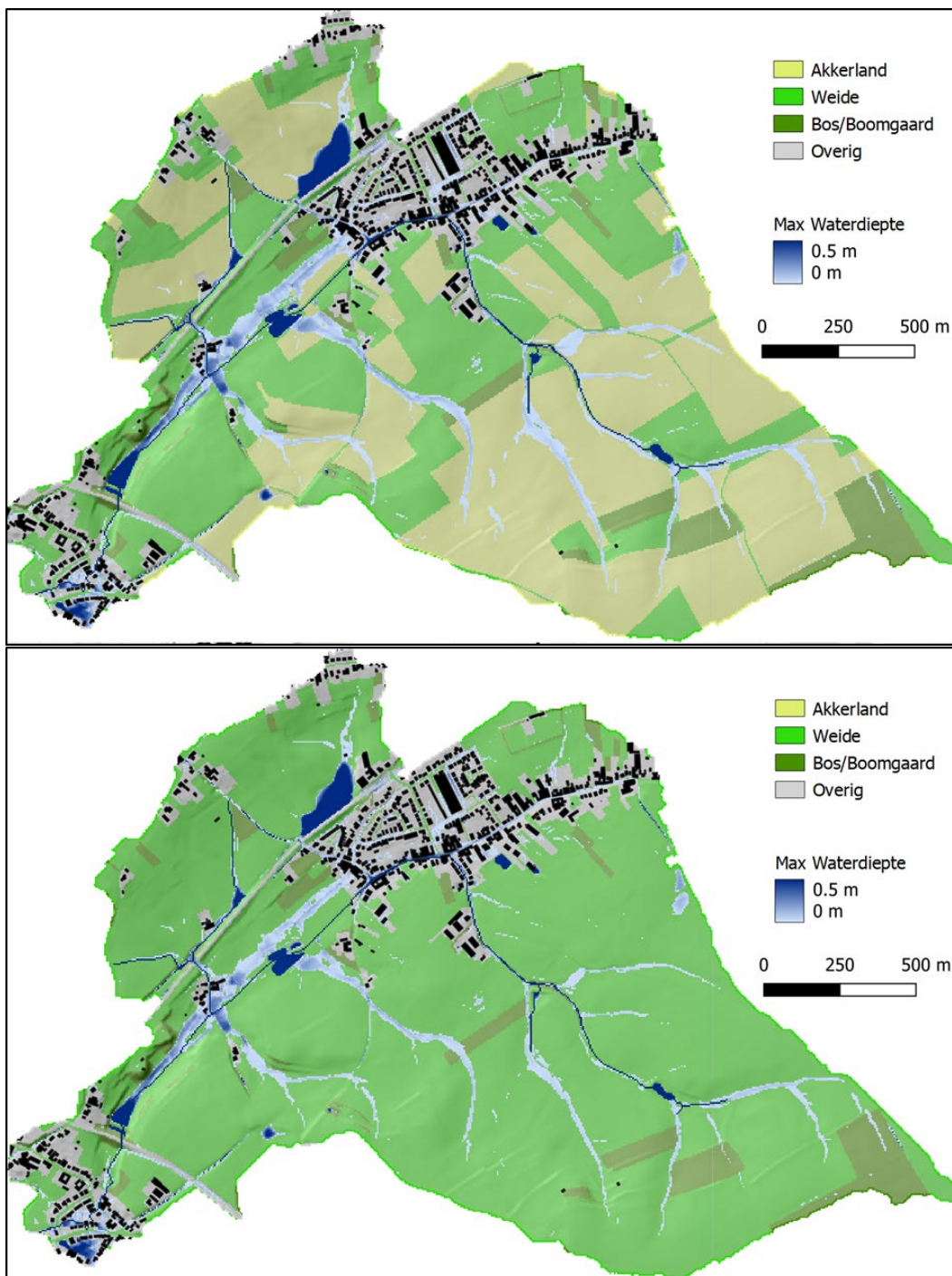
Figuur 8.7 toont de maximum waterdieptes die zijn berekend met LISEM. De grootste dieptes treden op in de regenwaterbuffers (meer dan 0,5 m), maar er is ook sprake van wateroverlast in laagtes in akkers en weilanden. De waterdiepte is hier meestal minder dan 10 cm, maar de getroffen zone kan wel tot 50 meter breed zijn. Wat verder opvalt is dat de beek niet altijd op het laagste punt in het dal ligt. Er ontstaat daardoor een soort 'tweede waterloop' tussen Ransdaal en de Geul.



Figuur 8.6 Berekende afvoer bij de monding van het stroomgebied bij Ransdaal bij verschillende landgebruiksscenario's, met en zonder rekening te houden met regenwaterbuffers, duikers en overkluizingen die het water tijdelijk tegen kunnen houden.

Wanneer het landgebruik verandert van akkerland naar grasland leidt dat lokaal tot iets kleinere waterdieptes. Het valt op dat er relatief weinig verschil is in afstroming vanaf het 'voormalige' akkerland in het zuidoostelijk deel van het stroomgebied. Dit komt mogelijk doordat in juli veel van deze akkers bedekt waren met gewas, waardoor er relatief veel water kon infiltreren. De waterdiepte in de regenwaterbuffers en de zone tussen Ransdaal en Schin op Geul neemt wel iets af.





Figuur 8.7 Berekende maximale waterdieptes bij een bui van 165,9 mm en huidig landgebruik (boven) en wanneer al het akkerland wordt omgezet in grasland (onder) (waterdieptes in de regenwaterbuffers zijn meer dan 0,5 m).

In de huidige situatie zou ongeveer 30 ha overstromd zijn. Wanneer akkerland wordt omgezet in duurzame akkerbouw of grasland neemt dat af tot 27 ha. De totale lengte aan overstromde wegen bedraagt ongeveer 3 km. Dit verandert nauwelijks bij ander landgebruik.

Uit de studie naar het effect van landgebruik op oppervlakkige afstroming blijkt dat omzetten van akkerland naar grasland (in een zomersituatie en wanneer 40% van het stroomgebied in gebruik is als akkerland) resulteert in ongeveer 10 mm extra berging in twee dagen tijd. Bij het huidige landgebruik wordt 24 tot 35 mm neerslag (van de 165 mm) afgevoerd. Wanneer al het akkerland wordt omgezet naar grasland neemt dat af tot 14 à 26 mm; een afname van 25 tot 40%. Het overgaan naar duurzame akkerbouw kan 5 tot 7 mm extra infiltratie opleveren in twee dagen tijd. Veranderingen in landgebruik hebben een groot effect op de piekafvoer. Dit geldt met name voor stroomgebieden waarin geen regenwaterbuffers aanwezig zijn.

Voor twee zijbeken van de Geul is gekeken naar het effect van veranderingen in landgebruik op de afstroming van regenwater. De belangrijkste getallen zijn samengevat in Tabel 8.5.

Tabel 8.5 Effect van veranderingen in landgebruik op oppervlakkige afstroming wanneer er 165,9 mm neerslag valt in twee dagen, zonder rekening te houden met het aanwezige buffersysteem (ZB)

	Strabeker Vloedgraaf			Ransdaal		
	afvoer (mm)	afvoer (%)	piekafvoer (m <sup>3</sup> /s)	afvoer (mm)	afvoer (%)	piekafvoer (m <sup>3</sup> /s)
<b>Huidig ZB</b>	23,9	14,4	5,23	35,1	21,2	4,58
<b>Duurzaam ZB</b>	16,8	10,1	3,05	30,1	18,1	3,43
<b>Gras ZB</b>	14,3	8,6	2,96	26,2	15,8	3,16

Uit het onderzoek blijkt dat bij extreme neerslag in de zomer ongeveer 15 tot 20% van de gevallen neerslag afstroomt. De rest infiltreert in de bodem. Omzetting van al het aanwezige akkerland naar grasland (een oppervlak van ongeveer 40% van het stroomgebied) leidt tot maximaal 10 mm extra infiltratie in twee dagen tijd. Dit zal ook een positief effect hebben op erosie. Wanneer akkerbouw wordt omgezet in duurzame landbouw, dan bedraagt de extra infiltratie in de nu uitgevoerde berekeningen maximaal ongeveer 7 mm in twee dagen.

Regenwaterbuffers en andere buffers hebben geen effect op de totale hoeveelheid neerslag die afstroomt, maar zorgen wel voor vertraging en afvlakking van de piekafvoeren. Wanneer geen rekening wordt gehouden met de aanwezige regenwaterbuffers, duikers en overkluizingen die het water tijdelijk tegen kunnen houden, dan leidt het omzetten van akkerland naar grasland tot een 25 tot 40% lagere piekafvoer.

In werkelijkheid zijn in beide stroomgebieden regenwaterbuffers, duikers en overkluizingen aanwezig die de afvoer van water beperken. Uit de resultaten blijkt dat de afvoer naar de Geul aanzienlijk wordt beperkt door dit buffersysteem. Een verandering in landgebruik heeft in sterk gebufferde systemen vooral invloed op de duur van het hoogwater: bij akkerland infiltreert minder water, dit wordt opgevangen in de buffers en van daaruit gaat de nalevering van water langer door.

#### Betekenis op systeemniveau

Wanneer we uitzoomen naar systeemniveau dan suggereren de resultaten uit deze studie dat voor gebieden die rond de 40% uit akkerland bestaan, het omzetten van akkerland naar grasland leidt tot 5 à 10 mm extra infiltratie in twee dagen. Bij het verkennen van mogelijke maatregelen in de Geul en Geleenbeek (zie vorige hoofdstukken) is uit gegaan van 5 à 10 mm extra infiltratie per dag.

Om dit te realiseren is dus meer nodig dan omzetting van akkerland naar grasland. Te denken valt dan onder meer aan het laten infiltreren van neerslag gevallen in stedelijk gebied. De aanleg van extra regenwaterbuffers vergroot slechts beperkt de infiltratie, maar kan wel zorgen voor een afname van de piekafvoer.

Opgemerkt wordt dat het effect van verandering in landgebruik in een wintersituatie mogelijk groter is. In de zomer zijn veel akkers (deels) bedekt met gewassen. De extra infiltratie bij overgang van akkerland naar grasland is dan relatief beperkt. In een wintersituatie zal bij grasland nog steeds relatief veel water infiltreren, terwijl op de kale akkers dan juist veel meer water af zou stromen.

## 9 Bescherming tegen overstromen – waterkeringen langs de Maas

### 9.1 Inleiding

Voor de Maas is geen stroomgebiedbrede systeemanalyse uitgevoerd. Een systeemanalyse voor het Nederlandse deel van de Maas is opgepakt binnen Spoor 5 van de Landelijke Beleidstafel Wateroverlast en Hoogwater. In de watersysteemanalyse die is uitgevoerd voor Waterschap Limburg en Provincie Limburg is daarom vooral gekeken naar het functioneren van de waterkeringen langs de Maas, waarvan Waterschap Limburg de beheerder is.

Bij dit deelonderzoek is net als bij de andere deelonderzoeken, gestart met het beantwoorden van de vraag ‘wat is er gebeurd in juli 2021’? Daarbij is gekeken naar de afvoer en de waterstanden op de Maas en naar incidenten met de waterkeringen. Hoe extreem was de afvoer op de Maas? Kwamen de waterstanden overeen met eerder gemodelleerde waterstanden? Zijn incidenten waargenomen op locaties waar waterkeringen zijn afgekeurd? Of had men op basis van de beoordeling juist op andere locaties incidenten verwacht? In overleg met Waterschap Limburg zijn vier locaties geselecteerd die nader zijn onderzocht. Doel van deze onderzoeken was om te bepalen of en waarom er sprake was van tegenstrijdigheden tussen de waargenomen incidenten en de resultaten van de beoordeling. Op deze manier is geprobeerd om meer inzicht in en gevoel te krijgen voor de betrouwbaarheid van de beoordeling van de waterkeringen op basis van de beoordelingsystematiek van het WBI (Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017).

Dit deelonderzoek is uitgevoerd door Deltares, HKV Lijn in Water en Witteveen & Bos en gerapporteerd in Stoutjesdijk et al. (2022).

### 9.2 Wat is er gebeurd in juli 2021?

#### **Een recordafvoer op de Maas**

De extreme regenval van juli 2021 leidde tot een recordafvoer op de Maas van 3.284 m<sup>3</sup>/s bij Borgharen en 3.310 m<sup>3</sup>/s bij Sint Pieter (Van der Veen & Agtersloot, 2021). De Jong et al. (2022) schatten dat dit hoogwater een herhalingstijd heeft tussen de 90 en 200 jaar. Ze merken daarbij wel op dat de kans dat dit in de zomer gebeurt veel kleiner is. Wanneer ze alleen kijken naar metingen uit het zomerhalfjaar, dan wordt de herhalingstijd geschat op meer dan 600 jaar.

#### **Zeer hoge waterstanden, vooral op Grensmaas**

Deze ‘recordafvoer’ leidde vooral op de Grensmaas tot extreem hoge waterstanden. Wanneer de gemeten waterstanden op dit traject worden vergeleken met de waterstandsberekeningen die zijn uitgevoerd voor het Wettelijk BeoordelingsInstrumentarium dat gebruikt wordt om de waterkeringen te beoordelen (WBI2017), dan lijkt de herhalingstijd die bij deze waterstanden hoort uit te komen op 100 tot 200 jaar (ENW, 2021). Benedenstrooms van de Plassenmaas (Roermond) waren de waterstanden minder extreem. Dit kwam door de sterke mate van topvervlakking. Topvervlakking is het verschijnsel dat een afvoergolf, terwijl deze zich in stroomafwaartse richting voortplant, steeds verder afvlakt. De piekafvoer neemt daardoor af en waterstanden in de benedenloop van de rivier blijven lager. Het effect van topvervlakking is sterk afhankelijk van de golfvorm: hoe spits het hoogwater, des te sterker het effect van topvervlakking (De Jong & Asselman, 2019).

Omdat het hoogwater van juli 2021 van uitzonderlijk korte duur was (de afvoergolf had dus een zeer spitse vorm), nam de piekafvoer benedenstrooms van Roermond sterk af. De waterstanden bleven daardoor lager. De herhalingstijd van de piekwaterstand bij Venlo wordt geschat op ongeveer 50 jaar. En bij Gennepe was dat zelfs ongeveer 15 jaar.

### Bestaande modellen onderschatten de waterstand

De hydraulische modellen die worden gebruikt om de hydraulische belastingen bij waterkeringen te berekenen, onderschatten de waterstand (Figuur 9.1). Dit komt vooral doordat deze modellen uitgaan van een wintersituatie, waarbij de vegetatieruwheid veel lager is (struiken en bomen hebben geen bladeren en akkers zijn onbegroeid). Dit leidt tot minder opstuwing. Waterstanden kunnen daardoor lokaal soms een paar decimeter lager zijn dan in een zomersituatie. De zomersituatie leidde met name op de Grensmaas tot waterstanden die veel hoger waren dan verwacht op basis van de afvoer te Borgharen. Verder benedenstrooms waren de waterstanden minder extreem in verband met de eerder genoemde topvervlakking.



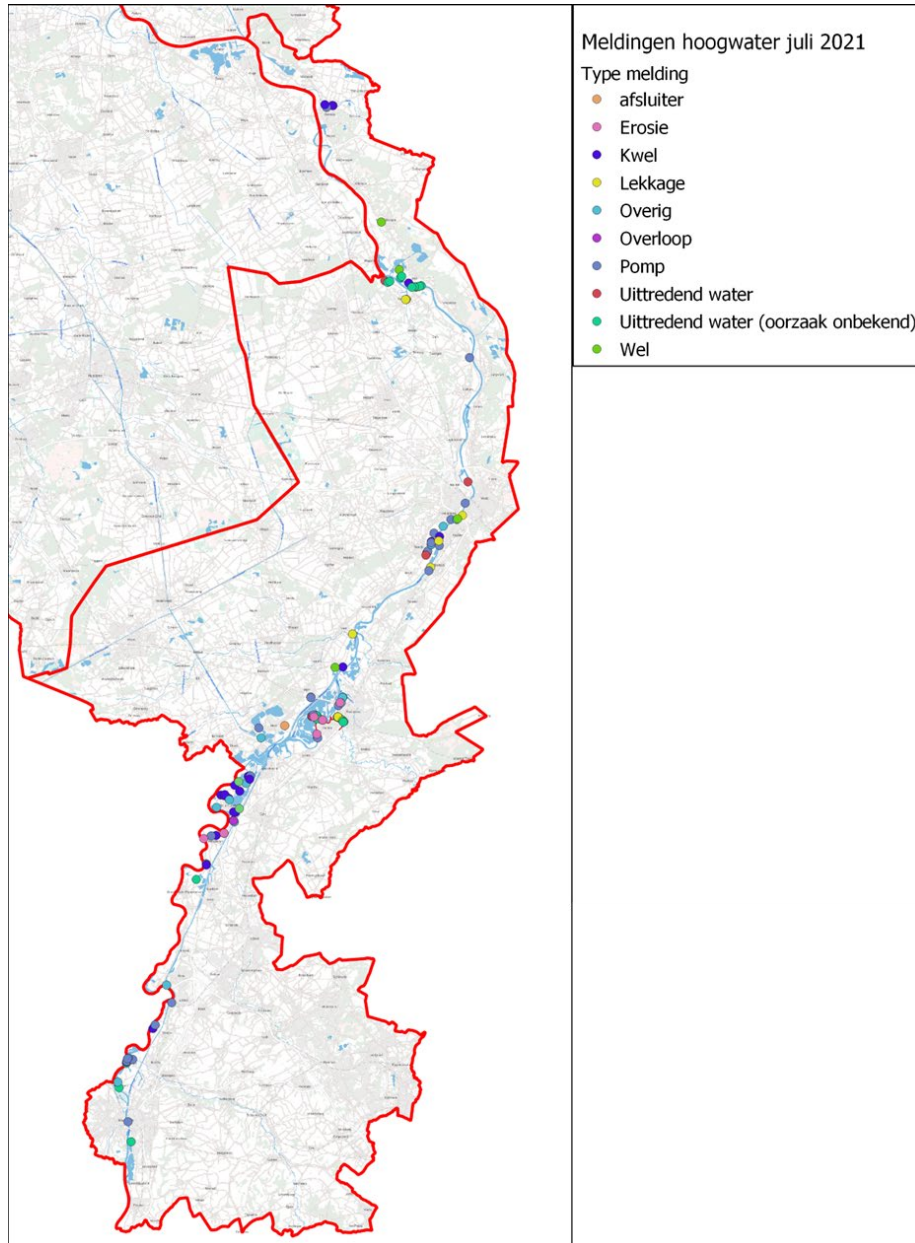
Figuur 9.1 Verschil in maximale waterstand (cm) berekend met het model WAQUA t.o.v. meting. Het gebruikte WAQUA-model is het meest actuele model dat de situatie in 2021 weergeeft. Het model gaat echter wel uit van een wintersituatie (lagere ruwheid). Negatieve waarden (blauwe kleuren) duiden op een onderschatting van de waterstand in het model<sup>17</sup>. (Bron: De Jong et al., 2022).

<sup>17</sup> De symbolen geven aan of meetpunten al lang of juist kort op dezelfde plaats liggen: oorspronkelijke meetpunten (rond), verplaatste meetpunten (driehoek), nieuwe meetpunten (plusteken) en Vlaamse meetpunten (vierkant). Voor deze studie is dat niet relevant.

Naast het verschil in ruwheid zijn er ook locatiespecifieke aandachtspunten in de gebruikte modellen. Zo melden De Jong et al. (2022) dat het berekende verval over stuw Borgharen ongeveer 20 cm groter is dan het gemeten verval. Bij meetpunt Maaseik zijn de berekende waterstanden 28 cm lager dan de gemeten waterstanden. Dit komt deels door het verschil in ruwheid, maar mogelijk ook doordat het model de afvoer door de Oude Maas overschat. Voor een volledig overzicht wordt verwezen naar De Jong et al. (2022).

### Incidenten aan keringen

De extreem hoge waterstanden hebben geleid tot incidenten bij de waterkeringen. Figuur 9.2 geeft een overzicht van alle meldingen die bekend waren bij Waterschap Limburg (locatie en indicatie van het probleem). Voor de verdere analyses is vooral gekeken naar locaties met erosie, overloop van water over de kruin van de dijk, en locaties waar water in de vorm van kwel en wellen onder de dijk doorstroomde (sommige wellen voerden ook zand mee).



Figuur 9.2 Overzicht van incidenten die zijn gemeld bij de waterkeringen langs de Maas tijdens het hoogwater van juli 2021 (bron: Waterschap Limburg)

## Komen locaties met incidenten overeen met bekende 'zwakke plekken' op basis van de beoordeling?

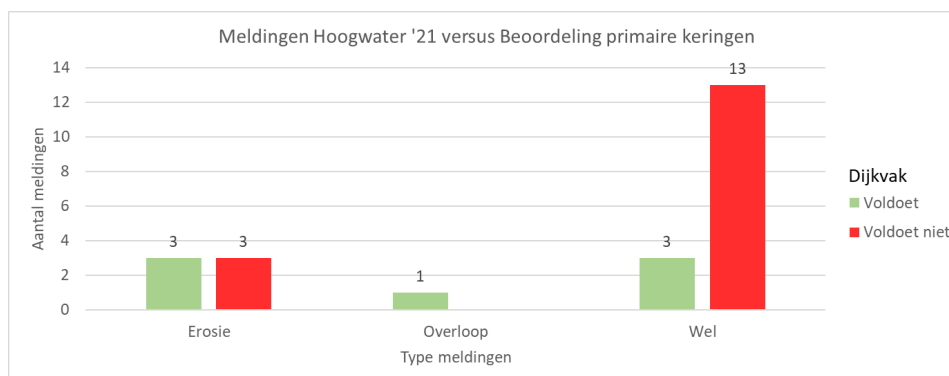
Om antwoord te kunnen geven op de vraag of de waargenomen incidenten overeenkomen met bekende 'zwakke plekken' is gebruik gemaakt van de meest recente beoordeling van de waterkeringen langs de Maas. Tussen 2019 en 2022 zijn meer dan 46 dijktrajecten beoordeeld. Het veiligheidsoordeel per traject kan variëren van A+ tot D, waarbij A+ en A (ruimschoots) aan de minimaal vereiste beschermingsnorm voldoet, B nu voldoende scoort, maar bij een volgende beoordeling mogelijk niet meer, en C en D niet aan de eisen voldoen.

Tabel 9.1 geeft voor alle dijktrajecten langs de Maas in Limburg aan welk veiligheidsoordeel bij de beoordeling is toegekend. Uit het overzicht blijkt dat 19 van de 46 dijktrajecten niet aan de wettelijk vereiste beschermingsnorm voldoen (veiligheidsoordeel C of D).

Tabel 9.1 Beoordeelde dijktrajecten in Limburg inclusief het veiligheidsoordeel

Dijktraject	Veiligheidsoordeel	Dijktraject	Veiligheidsoordeel
41-4 Molenhoek	C	76-1 Roermond	C
54-1 Ottersum-Mook	D	76-2 Roermond-Alexanderhaven	A
55-1 Gennep	C	76a-1 Roermond Hammerveld	C
56-1 Afferden	B	77-1 Roermond Merum-Ool-Herten	C
57-1 Nieuw-Bergen	B	78-1 Heel	B
59-1 Aijen-Bergen	B	78a-1 Beegden	A
60-1 Well	B	79-1 Thorn-Wessem	C
61-1 Wanssum-Geijsteren	B	80-1 Clauscentrale	B
62-1 Wanssum-Blitterswijk	B	81-1 Ohé & Laak-Stevensweert	C
63-1 Ooijen	A	82-1 Aasterberg	B
63-2 Boltweg	A	83-1 Nattenhoven-Roosteren	C
64-1 Broekhuizenvorst	B	84-1 Visserweert	B
65-1 Arcen	A	85-1 Urmond	A
66-1 Lottum	B	86-1 Maasband	A
67-1 Grubbenvorst	B	87-1 Meers	C
68-1 Venlo	C	88-1 Geulle aan de Maas	A
68-2 Velden	C	89-1 Voulwames	B
69-1 Blerick	C	90-1 Maastricht-Oost	C
70-1 Baarlo	A	91-1 Itteren	C
71-1 Belfeld	B	92-1 Borgharen	B
73-1 Beesel	A	93-1 Bosscherveld	C
74-1 Neer	C	94-1 St. Pieter	C
75-1 Buggenum	A	95-1 Eijsden	C

Figuur 9.3 toont voor drie typen meldingen of deze zijn waargenomen op goedgekeurde of afgekeurde dijkvakken. De zes meldingen die te maken hadden met erosie zijn waargenomen op zowel goed- als afgekeurde vakken. De melding met overloop trad op bij een dijkvak dat was goed gekeurd. De meeste wellen (13 van de 16 meldingen) zijn waargenomen bij dijkvakken die waren afgekeurd. Tabel 9.2 laat echter zien dat veel meer dijkvakken zijn afgekeurd op het faalmechanisme *piping*<sup>18</sup> (81 in het totaal), maar dat bij 80% van de afgekeurde dijkvakken geen wellen zijn waargenomen.



Figuur 9.3 Overzicht van typen incidenten en of deze voorkwamen op goed- of afgekeurde dijkvakken

Tabel 9.2 Overzicht van dijkvakken die zijn goedgekeurd en afgekeurd op het faalmechanisme *piping* en de waargenomen wellen

	Goedgekeurd dijkvak	Afgekeurd dijkvak
Incident gemeld	3	13
Geen incident gemeld	274	68
Totaal aantal dijkvakken	277	81

## 9.4 Waarom zijn waargenomen incidenten wel of juist niet in overeenstemming met de beoordeling?

Wanneer de locaties met waargenomen incidenten worden vergeleken met de afgekeurde dijktrajecten, dan valt op dat deze vaak overeenkomen, maar niet altijd. In sommige gevallen (zoals bij Aasterberg, dijktraject 82-1) was sprake van een incident (er stroomde water over de dijk), terwijl de dijk hier niet op is afgekeurd. Dit roept de vraag op waarom waargenomen incidenten wel of juist niet in overeenstemming zijn met de uitgevoerde beoordeling en wat we daarvan kunnen leren.

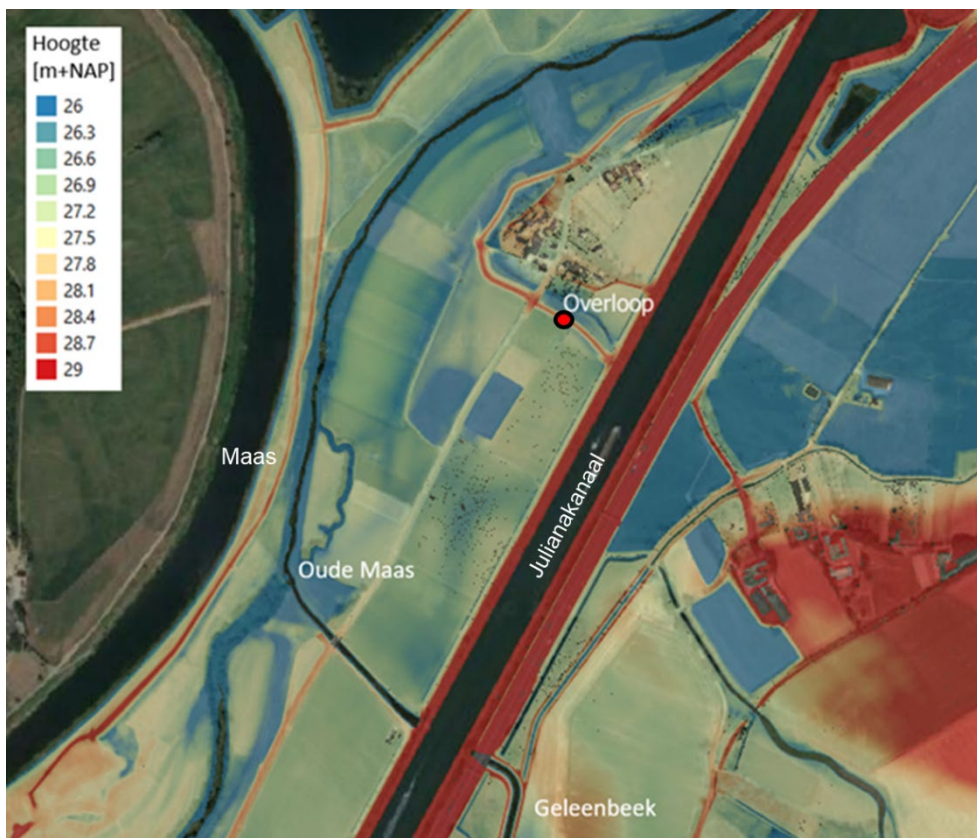
Op basis van de beoordeling en de waargenomen incidenten zijn (in overleg met Waterschap Limburg) vier locaties geselecteerd waarvoor nadere analyses zijn uitgevoerd. Voor deze locaties is dus onderzocht waarom de beoordeling wel of juist niet in lijn was met de waarnemingen tijdens het hoogwater.

### 9.4.1 Aasterberg (dijktraject 82-1)

Figuur 9.4 toont de hoogteligging van het gebied nabij Aasterberg. De dijkkring (82-1) ligt in het winterbed van de Maas tegen de waterkering van het Julianakanaal aan geplakt. De locatie waar tijdens het hoogwater van juli 2021 water over de dijk heen stroomde bevindt zich in het zuiden en is aangegeven met een rood rondje 'overloop'.

<sup>18</sup> *Piping* is het verschijnsel dat er water onder de dijk doorstroomt en zand meeneemt en daarmee de dijk verzwakt





Figuur 9.4 Hoogtekaart van het gebied nabij Aasterberg. De locatie waar water over de dijk heen stroomde is aangegeven met een rood rondje.

Figuur 9.5 toont twee luchtfoto's van de locatie waar water over de dijk heen stroomde, genomen tijdens (links) en na afloop van het hoogwater (rechts). Op de rechter foto zijn de geplaatste witte zandzakken nog duidelijk waarneembaar.



Figuur 9.5 Luchtfoto's van de waterkering aan de zuidzijde van dijktraject 82-1. Links: op 16 juli 2021 (tijdens het hoogwater); rechts: op 19 juli 2021 (na afloop van het hoogwater)

Volgens de gegevens die zijn gebruikt bij het beoordelen van de waterkering ligt de kruinhoogte van de dijk op NAP +28,43 m. Voor een A of een B beoordeling moet de hoogte minimaal NAP +28,06 m zijn. Bij deze hoogte kan er tijdens een hoogwater wel water over de dijk heen stromen, maar niet zoveel dat dit leidt tot bijvoorbeeld zeer sterke erosie van het binnentalud van de dijk en daarmee een te grote kans op een dijkdoorbraak.

Op basis van waterstandsmetingen bij Maaseik (een paar kilometer bovenstrooms van Aasterberg) en een hydraulisch model waarbij de ruwheid van de uiterwaarden was aangepast naar de zomersituatie, wordt de piekwaterstand in juli 2021 bij de overlooplocatie geschat op ongeveer NAP +28,4 m. Echter, op basis van de modellen die gebruikt worden bij het WBI werd een ongeveer 30 cm lagere waterstand verwacht. Het feit dat hier water over de dijk stroomde terwijl dit op basis van de beoordeling niet werd verwacht, kan dus deels te wijten zijn aan een onderschatting van de waterstand door het hydraulisch model. De reden van deze onderschatting kan onder andere te maken hebben met: (1) de belastingen voor de beoordeling worden berekend op basis van een veel gladdere wintersituatie en (2) de afvoer via de Oude Maas is in het model mogelijk iets overschat.

#### 9.4.2 Ohé & Laak – Stevensweert (dijktraject 81-1)

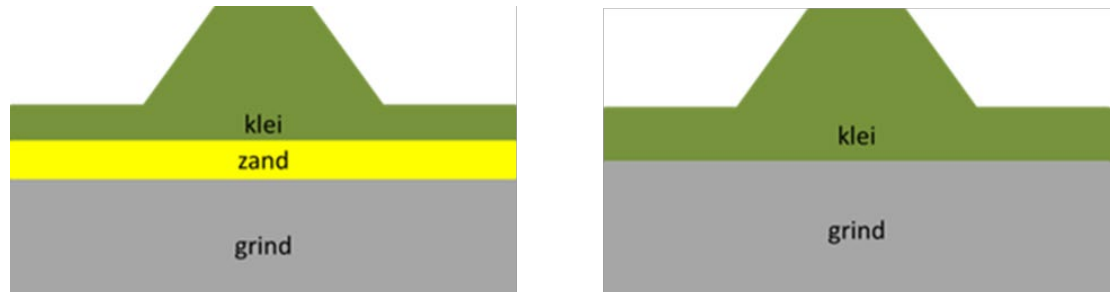
Binnen dit dijktraject werden meerdere dijkvakken slecht beoordeeld op het faalmechanisme *piping*. Toch was tijdens het hoogwater van 2021 slechts op 1 locatie sprake van een zandmeevoerende wel. Deze locatie is aangegeven met de blauwe ster in Figuur 9.6. De vraag is waarom zich op andere locaties geen problemen hebben voor gedaan. Om deze vraag te beantwoorden zijn berekeningen uitgevoerd voor de locatie die in Figuur 9.6 is gemarkeerd met een rode ster.



Figuur 9.6 Beoordelingsresultaten voor het faalmechanisme *piping* waarbij rekening is gehouden met bewezen sterkte op basis van het hoogwater van juli 2021. De blauwe ster toont de locatie waar sprake was van een zandmeevoerende wel. De rode ster toont een dijkvak dat slecht is beoordeeld, maar waar geen sprake was van een incident.

Voor de beoordeling wordt op basis van boringen gekeken hoe de ondergrond onder de dijk er uit ziet. In veel boringen in dit gebied is sprake van een afdeklaag (klei) op een grindpakket (de situatie rechts in Figuur 9.7). Omdat grind zeer doorlatend is, kan hier veel water doorheen stromen. De kans dat dit water ook het grind in beweging brengt is echter klein. Er kan dus wel sprake zijn van kwel, maar de kans op *piping* is klein.

Echter, bij sommige boringen is sprake van een tussenliggende zandlaag (linker situatie in Figuur 9.7). In dit geval kan er ook water door de zandlaag stromen. Omdat zandkorrels veel lichter zijn dan grind, kan dit eerder worden meegevoerd.

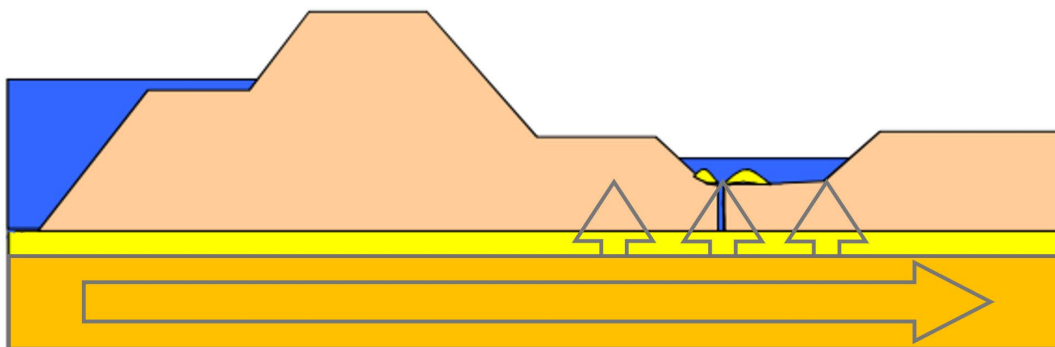


Figuur 9.7 Ondergrondscenario's die voor kunnen komen bij dijktraject 81-1 (links: zand op grind, rechts: grind)

Bij de beoordeling is gerekend met een éénlaagsmodel. Wanneer alleen grind is aangetroffen, dan wordt gerekend met de doorlatendheid en korrelgrootte van grind. Dit leidt meestal tot een positieve beoordeling (zeer kleine kans op *piping*). Echter, wanneer zand is aangetroffen, dan wordt in het éénlaagsmodel gerekend met de doorlatendheid van grind en de korrelgrootte van zand. Dit leidt tot een overschatting van de stroming door de zandlaag en daardoor tot een overschatting van de kans dat zand wordt mee gevoerd en een *pipe* ontstaat onder de dijk. Dit leidt tot relatief grote faalkansen. Uit de analyses in deze studie blijkt dat de faalkans op de onderzochte locatie 15 keer kleiner wordt (1:150 in plaats van 1:10 per jaar) wanneer wordt gerekend met een tweelaagsmodel.

Het rekenen met een gedetailleerder model (meerdere lagen) kan leiden tot een realistischere inschatting van de faalkans, maar idealiter moet in dat model ook de ruimtelijke verdeling van het zand in de ondergrond beter worden mee genomen. Bij de locatie met de blauwe ster was tijdens het hoogwater sprake van een zandmeevoerende wel. Stoutjesdijk et al. (2022) geven aan dat hier in het verleden een geul lag. Omdat de oude geul de dijk kruist, is de kans groot dat hier sprake is van een doorlopende zandbaan in de ondergrond (zoals weer gegeven in Figuur 9.7, links). Op andere locaties waar zand is aangetroffen, is niet met zekerheid te zeggen of sprake is van een zandlaag die *doorloopt* onder de dijk. Want alleen dan kan dit tot problemen leiden met *piping*.

Tot slot wordt opgemerkt dat de zandmeevoerende wel die is waargenomen op de locatie met de blauwe ster nog geen bewijs is voor het ontstaan van een pipe onder de dijk. Het is mogelijk dat het water vooral stroomt door het grind en achter de dijk door de zandlaag heen omhoog komt (zie Figuur 9.8). Er is dan geen sprake van een pipe onder de dijk, maar slechts van het lokaal uitspoelen van zand.



Figuur 9.8 Verticale stroming (dit wordt ook wel 'heave' genoemd) in een zandlaag (geel) die op een grindlaag (oranje) ligt. De pijlen tonen de waterstroming onder de dijk door.

#### 9.4.3 Nattenhoven – Roosteren (dijktraject 83-1)

Ook in deze dijkkring zijn veel dijkvakken slecht beoordeeld op het faalmechanisme *piping*. Desondanks zijn hier tijdens het hoogwater geen zandmeevoerende wellen waargenomen. De redenen voor deze 'discrepantie' komen waarschijnlijk grotendeels overeen met de hiervoor genoemde aandachtspunten. Een extra reden kan te maken hebben met het aanwezige voorland. Tussen de waterkeringen en de hoofdgeul van de Maas ligt een brede weerd (voorland). Deze weerd kan er voor zorgen dat het water dat onder de dijk doorstroomt een veel grotere weg moet afleggen. Dit leidt tot een kleinere kans op *piping*. Het is echter lastig om in te schatten in hoeverre dit voorland mee mag worden genomen bij de beoordeling. Volgens de regels mag het intredepunt (ofwel het punt vanaf waar het water door de grond gaat stromen) in het model niet te ver weg worden gelegd, namelijk op maximaal een keer de afstand van de dijkbasis. Ofwel: wanneer de dijk aan de onderkant 40 m breed is en er ligt een brede uiterwaard voor de dijk, dan mag bij de beoordeling worden aangenomen dat het intredepunt 40 m van de dijk aflight. Echter, wanneer de uiterwaard breder is en er een gesloten kleidek op ligt, dan kan het werkelijke intredepunt veel verder weg liggen.

In deze studie zijn voor drie vakken aanvullende berekeningen uitgevoerd, waarbij is aangenomen dat het intredepunt op een afstand ligt van 1x (standaard), 2x of zelfs 3x de dijkbasis. Uit de resultaten blijkt dat de faalkans veel kleiner wordt wanneer een groter deel van het voorland in rekening wordt gebracht. Wanneer het intredepunt zich op een afstand van 3x de dijkbasis bevindt, dan zou op geen van de onderzochte dijkvakken sprake zijn van een kritieke situatie voor *piping*, zelfs niet wanneer sprake zou zijn van een doorlopende zandlaag in de ondergrond. Bij de standaard berekeningen zou in dat geval op alle drie de locaties wel sprake zijn van een kritieke situatie.

#### 9.4.4 Merem Ool Herten (dijktraject 77-1)

Dijktraject 77-1 beschermt de wijken Merum-Ool-Herten in de gemeente Roermond tegen hoogwater van de Maas en de Roer (zie Figuur 9.9). Volgens de beoordeling voldoen veel dijkvakken op dit traject niet aan de gestelde eisen voor het faalmechanisme *piping* bij kunstwerken. Op twee locaties (witte stippen in Figuur 9.9) was tijdens het hoogwater van juli 2021 sprake van een incident.



*Figuur 9.9 Dijktraject 77-1 Roermond Merum-Ool-Herten*

Bij locatie (1) was sprake van uittredend water door de demontabele kering tijdens het hoogwater, zie Figuur 9.10. Bij het veldbezoek na het hoogwater bleek verder dat binnendijks de zandlaag onder de tegels was omgewoeld. Bij locatie (2) zijn, tijdens het veldbezoek na afloop van het hoogwater, binnendijks zandmeevoerende wellen waargenomen (Figuur 9.11).



*Figuur 9.10 Uittredend water door de demontabele kering bij locatie (1) tijdens hoogwater (links) en omgewoelde zandlaag binnendijks na afloop van het hoogwater (rechts)*



Figuur 9.11 Zandmeevoerende wellen bij locatie (2) tijdens het veldbezoek na afloop van het hoogwater

Wanneer sprake is van *piping* bij een kunstwerk dan moeten de volgende faalmechanismen *alle drie* optreden:

1. de deklaag (grond) achter de kering moet opbarsten;
2. er moet sprake zijn van *heave* (ofwel verticale stroming van water en zand langs het kunstwerk);
3. en er moet sprake zijn van terugschrijdende erosie onder het kunstwerk waardoor een *pipe* wordt gevormd.

De waarnemingen op locaties (1) en (2) leken in lijn met de beoordeling. Nadere analyses wezen echter uit dat op locatie (1) mogelijk toch geen sprake is geweest van *heave*, maar alleen van grondwaterstroming onder de tegels. Vermoedelijk zijn de tegels alleen opgedrukt door het verschil in waterdruk over de keermuur (als gevolg van het verschil in waterstand binnen- en buitendijks) en is er geen zand mee gevoerd. Bij locatie (2) zou er volgens de berekeningen wel sprake kunnen zijn geweest van alle drie de faalmechanismen (opbarsten, *heave* en terugschrijdende erosie) bij de piekwaterstand. De ontwikkeling van een *pipe* onder het kunstwerk door uitspoeling van zand vergt echter tijd. Waarschijnlijk was de duur van het hoogwater te kort om tot falen te leiden.

## 9.5 Conclusies

Het hoogwater van juli 2021 leidde tot de volgende inzichten met betrekking tot het functioneren van de waterkeringen:

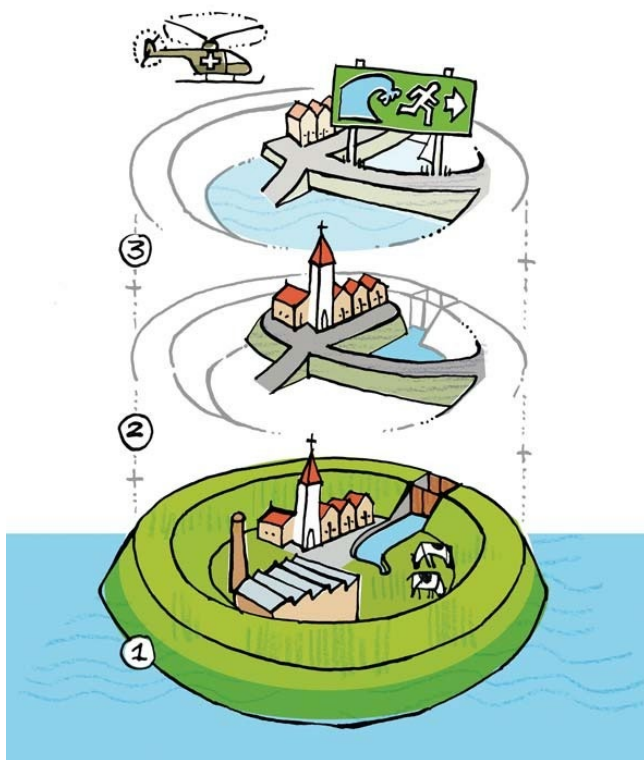
- De recordafvoer op de Maas van 3.310 m<sup>3</sup>/s leidde met name op de Grensmaas tot waterstanden die veel hoger waren dan verwacht op basis van de bestaande hydraulische modellen die gebruikt worden voor de beoordeling van waterkeringen. Dit komt vooral doordat sprake was van een zomersituatie (hogere ruwheid).
- Op dit moment wordt bij de beoordeling van waterkeringen geen rekening gehouden met de kans op hoogwater in het zomerhalfjaar. Wanneer men dit wel zou doen, dan zou dat kunnen leiden tot een slechtere beoordeling, vooral omdat de waterstanden tijdens een zomerhoogwater hoger zijn.

- Veel dijken langs de Maas hebben een slechte beoordeling voor het faalmechanisme *piping*. Toch was het aantal locaties waar een zandmeevoerende wel is waargenomen beperkt. Mogelijk wordt de kans op *piping* overschat doordat:
  - Wordt gerekend met een éénlaagsmodel en conservatieve waarden voor de doorlaatbaarheid en korrelgrootte
  - De kans op een onder de dijk doorlopende zandlaag wordt overschat
  - Onvoldoende bekend is over *piping* in situaties waarbij een zandlaag op een grindlaag ligt; mogelijk is alleen sprake van *heave* (verticale stroming door het zand), en wordt geen *pipe* gevormd onder de dijk.
- Ook het beperkt meenemen van het aanwezige voorland kan tot een overschatting van de kans op *piping* leiden.
- Er gaat tijd overheen voordat er zoveel zand is mee gespoeld dat een *pipe* kan ontstaan die tot falen leidt. Op een van de onderzochte locaties bij Roermond lijkt sprake te zijn geweest van *piping*, maar was de duur van het hoogwater mogelijk te kort om tot falen te leiden. Er kan echter ook sprake zijn geweest van verticale uitstroming van water en zand, zonder dat een *pipe* werd gevormd (zie Figuur 9.8).

# 10 Overstromingsgevaar en de gevolgen van overstromingen

## 10.1 Inleiding

In voorgaande hoofdstukken lag de nadruk sterk op het functioneren van het watersysteem. De onderzochte maatregelen betroffen eveneens vooral ingrepen in het watersysteem zelf. Deze maatregelen zijn bedoeld om het overstromingsgevaar te verkleinen (zie ook de toelichting op relevante begrippen hoofdstuk 1). Dat wil zeggen dat ze de kans op een overstroming verkleinen of er voor zorgen dat de 'ernst' van de overstroming minder wordt, bijvoorbeeld door te zorgen dat de waterdieptes, stroomsnelheden en/of het overstroomd oppervlak kleiner worden. In het concept van de meerlaagsveiligheid<sup>19</sup> maken de in voorgaande hoofdstukken onderzochte maatregelen deel uit van de eerste laag (Figuur 10.1) en zijn gericht op preventie. Laag 2 en 3 zijn gericht op het beperken van de gevolgen van een overstroming.



Figuur 10.1 Meerlaagsveiligheidsbenadering: 1) preventie, 2) ruimtelijke adaptatie en 3) crisismanagement

Omdat een groot deel van Nederland bedijkt is, wordt bij preventie al snel gedacht aan het aanleggen of versterken van waterkeringen. Echter, de kans op een overstroming kan ook worden verkleind door bronmaatregelen te treffen die er voor zorgen dat meer water in de haarvaten van het watersysteem wordt vast gehouden. Te denken valt dan aan veranderingen in landgebruik en de aanleg van regenwaterbuffers (zie ook hoofdstuk 8).

<sup>19</sup> Voor meer uitleg zie o.a. <https://www.stowa.nl/deltafacts/waterveiligheid/innovatieve-dijkconcepten/meerlaagsveiligheid-de-praktijk>



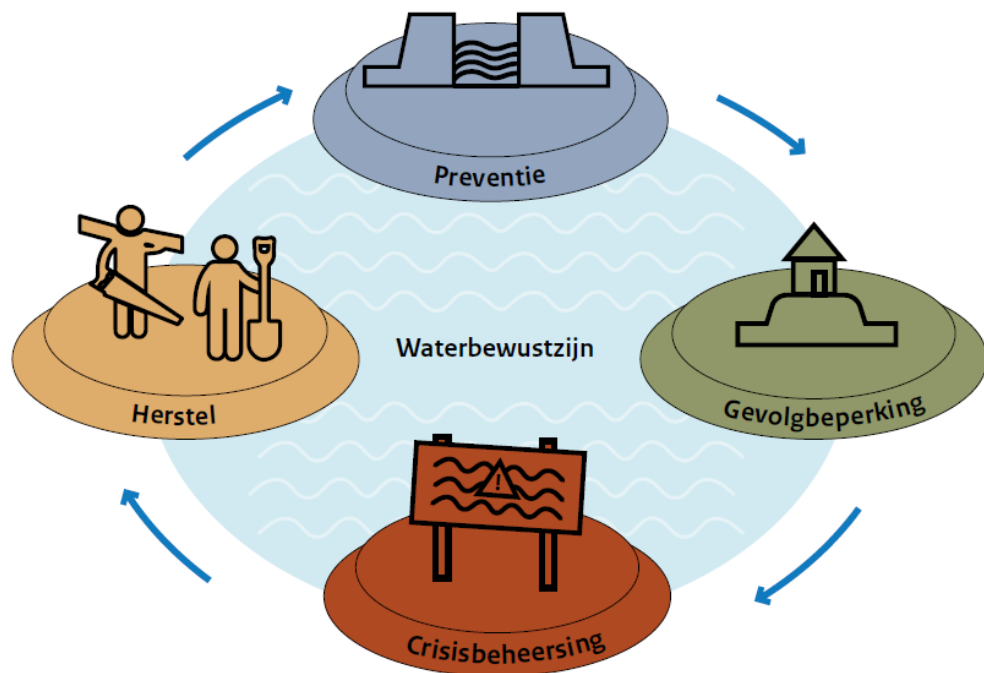
Ook het vergroten van de afvoercapaciteit van de beek kan de kans op een overstroming verkleinen. Dergelijke maatregelen zijn in hoofdstuk 5, 6 en 7 beschreven. Dit hoofdstuk richt zich op maatregelen die kunnen worden getroffen om de gevolgen van een overstroming te verkleinen. Deze maatregelen maken deel uit van laag twee en drie van de meerlaagsveiligheidsbenadering (Figuur 10.1):

- Ruimtelijke adaptatie: maatregelen in de ruimtelijke ordening om de gevolgen van een mogelijke overstroming te beperken.
- Crisismanagement: maatregelen om de gevolgen tijdens een ramp te beperken.

Bij ruimtelijke adaptatie kan men denken aan maatregelen in de sfeer van de ruimtelijke ordening: het slim inrichten van de openbare ruimte. Men kan bijvoorbeeld besluiten om niet te bouwen in gebieden die vaak en/of diep onder water kunnen komen te staan. Men kan ook besluiten om aangepast te bouwen.

Bij crisismanagement kan men denken aan waarschuwing en evacuatie van burgers, maar men kan ook maatregelen treffen die de zelfredzaamheid van burgers vergroten.

Recent is deze meerlaagsveiligheidsbenadering uitgebreid (Beleidsstafel wateroverlast en hoogwater, 2022). Vergroten van het water- of risicobewustzijn heeft een centrale plek gekregen (Figuur 10.2). En naast de eerder genoemde lagen preventie, gevolgbeperking (waaronder ruimtelijke adaptatie) en crisisbeheersing is er een extra laag aan toegevoegd, namelijk die van (klimaat)robuust herstel. Internationaal wordt in deze context ook vaak gesproken over *'building back better'*.



Figuur 10.2 Meerlaagsveiligheid zoals gedefinieerd in het advies van de Beleidsstafel wateroverlast en hoogwater.

In dit hoofdstuk gaan we dieper in op de gevolgen van een overstroming. We kijken daarbij naar de verwachte schade en de kans op slachtoffers. Ook zijn er gevaarkaarten gemaakt. Deze kaarten geven het potentiële risico aan. Dat wil zeggen: de *schadegevaarkaarten* geven aan hoe groot de gemiddelde jaarlijkse schade zou zijn door overstromingen *als* men op een bepaalde plek zou bouwen.

Vergelijkbaar geven de *verdrinkingsgevaarkaarten* aan hoe groot de kans is dat iemand door een overstroming overlijdt wanneer hij/zij het hele jaar op deze plek zou verblijven (ook tijdens een overstroming). Omdat het potentiële risicokaarten zijn, geven beide kaarttypen ook waarden voor gebieden waar nu niet gebouwd is en waar geen mensen verblijven. Schade- en verdrinkingsgevaarkaarten kunnen worden gebruikt bij de ruimtelijke ordening; ze geven aan waar het veiliger en minder veilig is om te bouwen. Ze kunnen ook worden gebruikt bij het maken van rampenbestrijdingsplannen omdat ze een goed ruimtelijk beeld geven van gebieden die gevaarlijker of juist minder gevaarlijk zijn in geval van overstroming.

Het onderzoek naar de gevolgen van overstromingen is uitgevoerd door Slager en Rikkert (2022).

## 10.2 Wat is er gebeurd in juli 2021?

Om de gevolgen van de overstromingen van juli 2021 te kwantificeren is een inventarisatie van de schade uitgevoerd en zijn interviews gehouden onder getroffen bewoners en bedrijven. Dit gaf inzicht in de economische schade. De kans op slachtoffers is berekend met behulp van een overstromingsmodel en een slachtoffermodel.

### 10.2.1 Economische schade

Vlak na de overstromingen van 2021 zijn er verschillende schattingen gedaan van de totale schade die is opgetreden in Limburg en Noord-Brabant. Hieronder een chronologisch overzicht.

- Een eerste snelle schatting van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) – in opdracht van het Ministerie van Justitie en Veiligheid belast met de uitvoering van de Wet tegemoetkoming schade bij rampen<sup>20</sup> – gaf begin augustus 2021 een schatting die neerkwam op ruim 1,8 miljard euro schade voor het totale rampgebied. Deze schatting betrof de maximaal mogelijke directe materiële schade en kosten (RVO, 2021).
- In het *fact-finding* onderzoek van Task Force Fact-finding Hoogwater 2021 (begin september 2021) is een schatting gegeven van de directe schade plus schade door bedrijfsuitval voor het totale rampgebied in Nederland van 350 tot 600 miljoen euro, waarvan het grootste deel langs de Geul en de Maas. Een belangrijke noot hierbij was dat er veel onzekerheid zit bij de inschatting van bedrijfsuitval (het tijdelijk niet volledig kunnen functioneren na een overstroming). In deze studie werd ook geconstateerd dat de totale schade als gevolg van het hoogwater van juli 2021 hoger is dan de schades die bij het hoogwater van 1993 en 1995 langs de Maas en Rijn zijn opgetreden.
- Verzekeraars hebben op verschillende momenten in de afgelopen periode een stand van zaken gegeven. In de laatste update, halverwege 2022, gaf het verbond van verzekeraars aan dat de verzekerde schade door het noodweer in juli 2021 zeker 180 - 210 miljoen euro bedroeg, waarvan het merendeel in Zuid-Limburg (Verbond van Verzekeraars, 2022). Er zijn uiteindelijk zo'n 25.000 schademeldingen ontvangen. Het merendeel van de claims betreft particuliere schade aan woningen en voertuigen.

---

<sup>20</sup> De Wts juli 2021 voorziet in een tegemoetkoming voor materiële schade die niet redelijkerwijs verzekeraar is. De Wts juli 2021 voorziet niet in een compensatie van alle geleden schade. De regeling is dus geen aanvulling op de verzekering. De regeling is bedoeld voor de zogenoemde primaire woonfunctie. Daar valt bijvoorbeeld schade aan de tuin niet onder. De enige uitzondering hierop is schade aan personenauto's (schade aan andere vervoersmiddelen, zoals scooters, campers, en (motor)fietsen valt niet onder de Wts juli 2021. Op 22 februari 2022 is de regeling voor landbouwers met teeltplantschade in de buitendijkse gebieden langs de Maas hieraan toegevoegd. Op 14 maart 2022 werd een coulanceregeling van kracht voor particulieren die niet onder de Wts vallen uit gebieden die waterschade hadden door overlopende beken en geulen. Het gaat dan om particuliere gedupeerden die niet verzekerd waren voor schade als gevolg van de wateroverlast terwijl de schade wel redelijkerwijs verzekeraar was (<https://www.rvo.nl/subsidies-financiering/waterschaderegelingen-juli-2021/wts/schade-en-kostensoorten>).

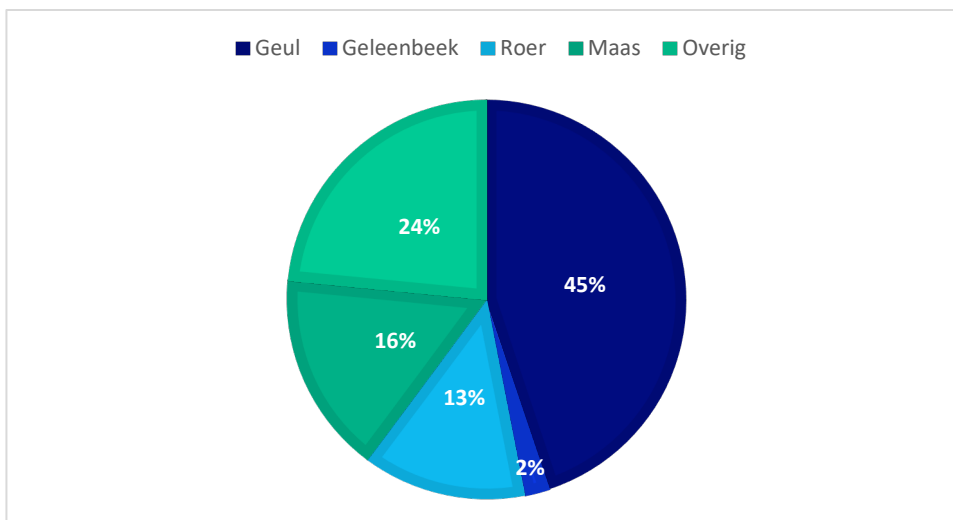
- Naast materiële schade is er ook schade aan gewassen en door bedrijfsonderbreking. Ten slotte is er veel schade aan overheidseigendommen, die zijn in de regel niet verzekerd.
- Het ministerie van Veiligheid en Justitie en van Economische Zaken raamde in juli 2022 de schade op zo'n half miljard euro (Rijksoverheid, 2022).
  - De RVO heeft op 31 oktober 2022 een (definitief) overzicht geleverd van alle op dat moment getaxeerde en tegemoetgekomen bedragen in het kader van de waterschade-regelingen, Wts juli 2021, Teeltplanschade in de uiterwaarden van de Bedijkte Maas en de Beleidsregel coulance wateroverlast. Het totaal aan schade dat uiteindelijk is getaxeerd in het kader van deze regelingen is ongeveer 94 miljoen euro. Het bedrag dat is uitgekeerd als tegemoetkoming ligt lager en is ongeveer 66 miljoen euro.
  - In het kader van de Beleidstafel wateroverlast en Hoogwater (2022) is onderzoek uitgevoerd naar de schade, om de eerdere schatting van de Task Force Fact-Finding van het ENW (zie hierboven) te valideren. De voorlopige totale getaxeerde schade wordt geraamd op 433 miljoen euro.

Een overzicht van de geraamde schade is gegeven in Tabel 10.1. De totale geraamde kosten van de schade is geschat op 433 miljoen euro. Het is belangrijk om te vermelden dat er verschil zit tussen tegemoetkomingen of vergoedingen zoals vermeld in de tabel en werkelijk opgetreden schade. Tevens is er net als bij inschattingen bij verzekeringen, een verschil tussen getaxeerde dagwaardes en - door getroffen en te betalen - nieuwwaardes. De totale kosten aan schade valt dus waarschijnlijk nog hoger uit.

Tabel 10.1 Totaal overzicht tegemoetkomingen en uitgekeerde schade

Categorie	Geraamde schade juli 2022	Geraamde schade eind 2022	Bron update
<b>A. Kosten van tegemoetkoming schade Wts, Beleidsregel coulance en Wet veiligheidsregio's</b>	€ 261 miljoen	€ 95 miljoen	Beleidstafel, 2022
<b>B. Kosten van schade voor gemeenten niet vergoed door cat. A (o.a. Valkenburg a/d Geul, Gulpen-Wittem en Meerssen), en herstelkosten infrastructuur RWS</b>	Nog niet inzichtelijk	€ 37 miljoen	Beleidstafel, 2022
<b>C. Kosten van beleidsregel tegemoetkoming teeltplanschade uiterwaarden</b>	€ 6 miljoen	€ 9 miljoen	RVO, november 2022
<b>D. Totale verzekerde schade</b>	€ 160 miljoen	€ 210 miljoen	Verbond van Verzekeraars, juli 2022
<b>Totaal geraamde schade juli 2022</b>	€ 500 miljoen		
<b>Tegemoetkoming omzetsderving bedrijven<sup>2</sup></b>	€ 24 miljoen	€ 24 miljoen	RVO, 2022
<b>Schade waterschap Limburg</b>		€ 17 miljoen	WL, 2022
<b>Schade spoor Prorail</b>		€ 1 miljoen	Beleidstafel, 2022
<b>Overige schade (nog niet bekend – bijv. beurspolis)</b>		€ 40 miljoen	Beleidstafel, 2022
<b>Update totaal geraamde kosten van schade</b>	€ 524 miljoen	€ 433 miljoen	

Tabel 10.1 geeft een overzicht van de totale schade voor heel Limburg en delen van Brabant. Alleen voor de tegemoetkoming Wts is in detail bekend *waar* de meeste schade is opgetreden. De verdeling van de uitgekeerde tegemoetkoming tussen de verschillende (stroom)gebieden is te zien in Figuur 10.3 en per postcodegebied in het linker kaartje in Figuur 10.4.

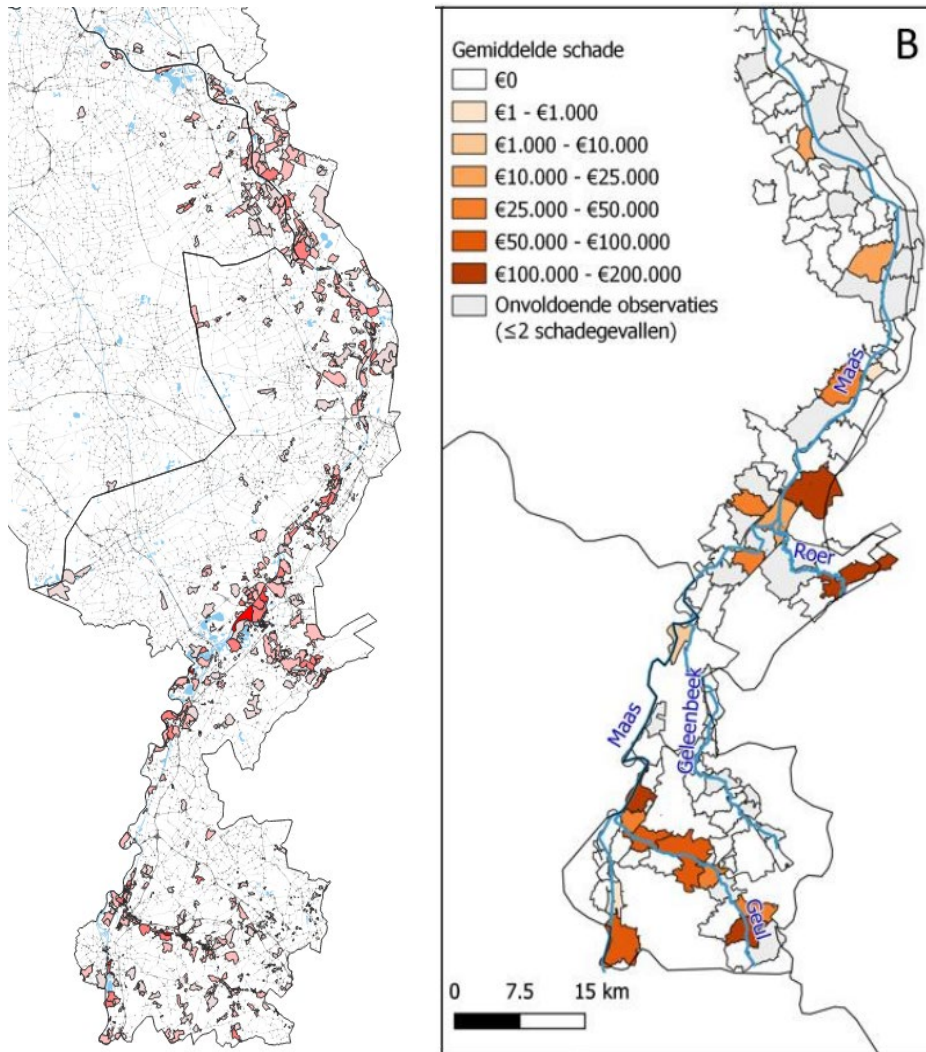


*Figuur 10.3 Indicatie ruimtelijke verdeling taxaties van schade bij uitvoering Wts*

Na het hoogwater van juli 2021 hebben de Vrije Universiteit van Amsterdam (VU) en Deltares een enquête uit gestuurd naar bewoners en bedrijven in de getroffen gebieden. In deze enquête is onder meer gevraagd naar de geleden schade. Omdat niet alle bewoners en bedrijven gereageerd hebben kan op basis van deze enquête geen totale schade worden geraamd<sup>21</sup>. Echter, vanwege de grote respons kan wel een beeld worden verkregen van de ruimtelijke verdeling ervan. De ruimtelijk verdeling van de schade gemeld in de ingevulde enquêtes is te zien in het rechter kaartje in Figuur 10.4.

---

<sup>21</sup> Er zijn 11.000 enquêtes verstuurd. Daarvan zijn er 1600 ingevuld.



Figuur 10.4 Spreiding van economische schade. Links: tegemoetkomingen WTS per 4-cijferig postcodegebied (data beschikbaar gesteld door RVO, 31 oktober 2022). Rechts: gemiddelde schade per huishouden per 6-cijferig postcodegebied (op basis van ingevulde enquêtes, uitgezet door VU en Deltares)

Verzekeraars hebben om privacy redenen geen gedetailleerde schadebedragen gepubliceerd. Tabel 10.2 geeft een overzicht van de in 2021 uitbetaalde verzekerde schades zoals vermeld in de klimaatmonitor verzekeraars. De bedragen hebben echter niet alleen betrekking op het hoogwater van juli 2021. Zo valt op dat er relatief veel schade is vergoed in de gemeenten Landgraaf en Kerkrade. Deze schade heeft waarschijnlijk te maken met de extreme neerslag in juni 2021 (zie Van Heeringen et al., 2022b). In juli 2021 hebben zich hier weinig problemen voor gedaan.

De hoogste schadebedragen zijn gemeld voor de gemeenten Valkenburg en Meerssen. Hier is ruim 45 miljoen euro uitgekeerd (bijna 60% van de totale uitgekeerde schadevergoeding). Andere gemeenten met relatief veel schade zijn onder andere Gulpen-Wittem en Heerlen.

Tabel 10.2 Overzicht van in 2021 uitbetaalde verzekerde schades uit de Klimaatmonitor verzekeraars

Gemeente	schade (M€)	schade (% totaal)	Gemeente	schade (M€)	schade (% totaal)
Mook en Middelaar	0.01	0%	Stein	0.33	0%
Gennep	0.12	0%	Beek	0.33	0%
Bergen (L.)	0.14	0%	Beekdaelen	1.24	2%
Venray	0.19	0%	Brunssum	0.60	1%
Venlo	0.63	1%	Voerendaal	1.10	1%
Horst aan de Maas	0.52	1%	Heerlen	5.59	7%
Peel en Maas	0.38	0%	Landgraaf	2.66	3%
Beesel	0.27	0%	Kerkrade	2.94	4%
Roermond	1.87	2%	Simpelveld	0.96	1%
Leudal	0.79	1%	Vaals	0.66	1%
Nederweert	0.04	0%	Gulpen-Wittern	4.41	6%
Weert	0.32	0%	Eijsden-Margraten	0.92	1%
Maasgouw	0.18	0%	Maastricht	1.48	2%
Roerdalen	0.85	1%	Meerssen	19.85	26%
Echt-Susteren	0.61	1%	Valkenburg a/d Geul	25.68	33%
Sittard-Geleen	1.89	2%	<b>Totaal</b>	<b>77.53</b>	<b>100%</b>

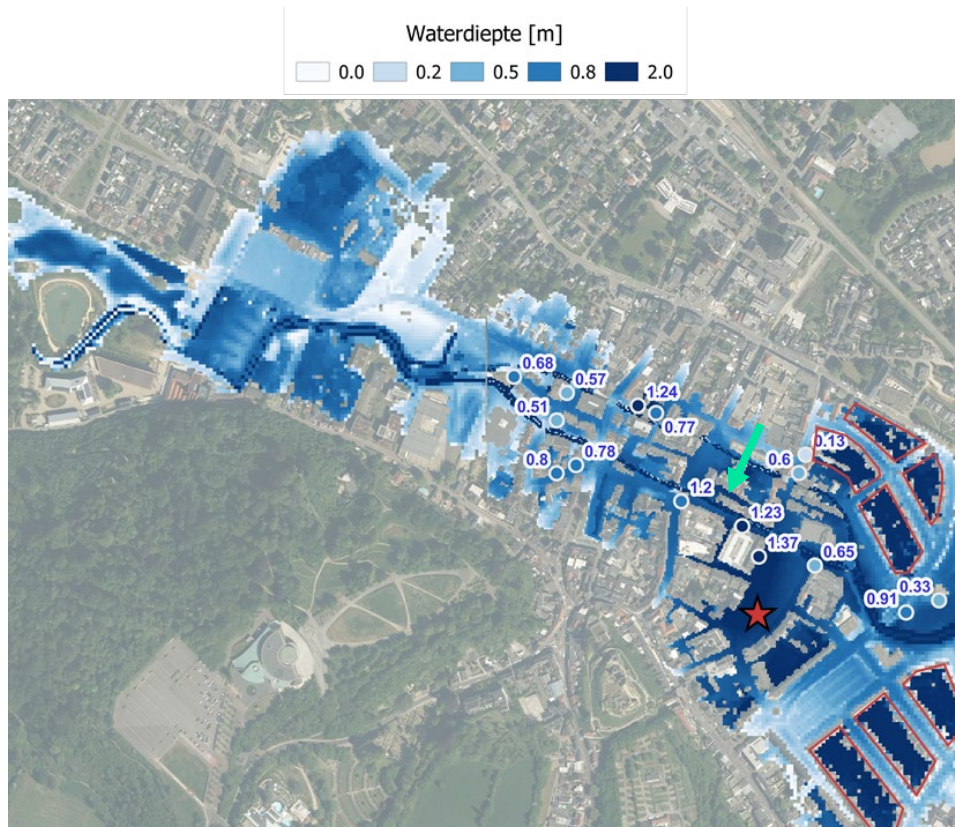
## 10.2.2 Kans op slachtoffers – een detailstudie voor Valkenburg

Tijdens de overstromingen van juli 2021 zijn er in Nederland gelukkig geen personen verdronken. Betekent dit dat 'we gewoon geluk hebben gehad' of dat de kans om te verdrinken klein was (een beperkt verdrinkingsgevaar)? Om antwoord te geven op deze vraag is een analyse uitgevoerd voor het centrum van Valkenburg. Met een gedetailleerd overstromingsmodel van Valkenburg en directe omgeving is geprobeerd om de overstroming van juli 2021 te simuleren. De berekende waterdieptes, stroomsnelheden en stijgsnelheden<sup>22</sup> zijn gebruikt om de kans om te overlijden te berekenen.

### Waterdieptes tot meer dan 2 m

Figuur 10.5 toont de met het model berekende waterdieptes. Op veel plekken varieerde de waterdiepte tussen de 0,5 en 1,3 m. Lokaal zijn echter ook grotere waterdieptes berekend. Dit is onder meer het geval in een aantal laaggelegen achtertuinen (rood omrande vakken in Figuur 10.5).

<sup>22</sup> De stijgsnelheid geeft aan hoe snel het water stijgt. Wanneer de stijgsnelheid groot is, is er weinig tijd om een veilig heenkomen te vinden. De kans om te overlijden neemt dan toe.



*Figuur 10.5 Kaart van de gesimuleerde maximale waterdiepte in Valkenburg tijdens de overstroming in juli 2021. De bolletjes geven observaties aan die gedaan zijn door Waterschap Limburg. Rood omlijnd zijn de wijken waar huizen laaggelegen achtertuinen hebben, vaak enkele meters lager dan straatniveau. Rode ster: Walramplein. Groene pijl: Gosewijnstraat.*

Uit dronebeelden die beschikbaar zijn gesteld door Waterschap Limburg en uit filmpjes die op internet te vinden zijn, blijkt dat in Valkenburg op diverse plaatsen sprake was van zeer hoge stroomsnelheden. Figuur 10.6 toont een dronebeeld van het centrum van Valkenburg. Aan de witte sporen in het water is te zien dat het water hard stroomt. Er is sprake van snel stromend water in de Geul en de Molentak, maar ook in de Gosewijnstraat. Gelukkig was het water daar wel minder diep. Ook direct langs de Geul stroomde het water snel.



*Figuur 10.6 Dronebeeld van het centrum van Valkenburg op 15 juli 2021 (de ochtend na de hoogwaterpiek). In het midden bovenin is de Geulpoort zichtbaar.*

Figuur 10.7 toont de maximale stroomsnelheden die zijn berekend met het model. Volgens modelsimulaties was sprake van snel stromend water in en direct langs de Geul, maar ook in straten die evenwijdig liepen aan de Geul, zoals de Gosewijnstraat en de Passage. Ook bij de Overlaat Kruitmolen, benedenstrooms van het centrum van Valkenburg, stroomde het water snel. Dit komt overeen met het drone beeld (Figuur 10.6). Ter referentie: een volwassen persoon kan niet blijven staan in water van 50 cm diep dat stroomt met 1,5 m/s (Jonkman and Penning, 2008).





*Figuur 10.7 Kaart van de gesimuleerde maximale stroomsnelheid in Valkenburg tijdens de overstroming in juli 2021.*

De kans op overlijden tijdens een overstroming is afhankelijk van de stroomsnelheid, de waterdiepte en de stijgsnelheid van het water. Hoe sneller het water omhoog komt, des te minder tijd er beschikbaar is om een veilig heenkomen te vinden. Op grond van studies naar slachtoffers bij overstromingen in het verleden zijn relaties opgesteld tussen deze kenmerken en het aantal slachtoffers. Deze kennis is ook hier gebruikt om de kans op overlijden te schatten.

Op de meeste plaatsen in Valkenburg was de stijgsnelheid beperkt (minder dan 0,5 m per uur). Op een beperkt aantal locaties, waar water plotseling over een drempel naar een lager gelegen gebied kan stromen, kan de stijgsnelheid lokaal groter zijn. Wanneer we uitgaan van de waterdieptes en stroomsnelheden afgebeeld in Figuur 10.5 en Figuur 10.7 en een stijgsnelheid van 0,5 m/uur, dan leidt dat tot een kans op overlijden zoals afgebeeld in Figuur 10.8.

Kans op overlijden [%]

1 2.5 5



Figuur 10.8 Berekende kans op overlijden tijdens het hoogwater van juli 2021

De theoretische kans op overlijden varieert tussen de 0,1 en 1% en is het grootst in zones en straten die direct grenzen aan de Geul en de Molentak. De kans op overlijden in de straten die iets verder van de Geul afliggen is kleiner. Figuur 10.7 liet zien dat de stroomsnelheid in een aantal straten (waaronder de Gosewijnstraat) weliswaar groot is, maar omdat de waterdiepte kleiner is, wordt de kans op overlijden toch lager ingeschat. De kans op overlijden is ook relatief groot in laaggelegen achtertuinen die diep onder water kunnen lopen. De kans op overlijden kan hier nog iets groter zijn dan aan gegeven op deze kaart omdat de stijgsnelheid groter is dan 0,5 m per uur. Wanneer het water vanuit de Geul deze tuinen bereikt, dan kunnen ze relatief snel vollopen. Hoewel de kans op overlijden op sommige locaties relatief groot is, hoeft dat niet tot grote aantallen slachtoffers te leiden. Immers, wanneer mensen op tijd een veilig heenkomen vinden (dat kan ook op de bovenverdieping van een huis) en gevaarlijke plekken mijden, dan kan de kans op slachtoffers sterk worden beperkt.

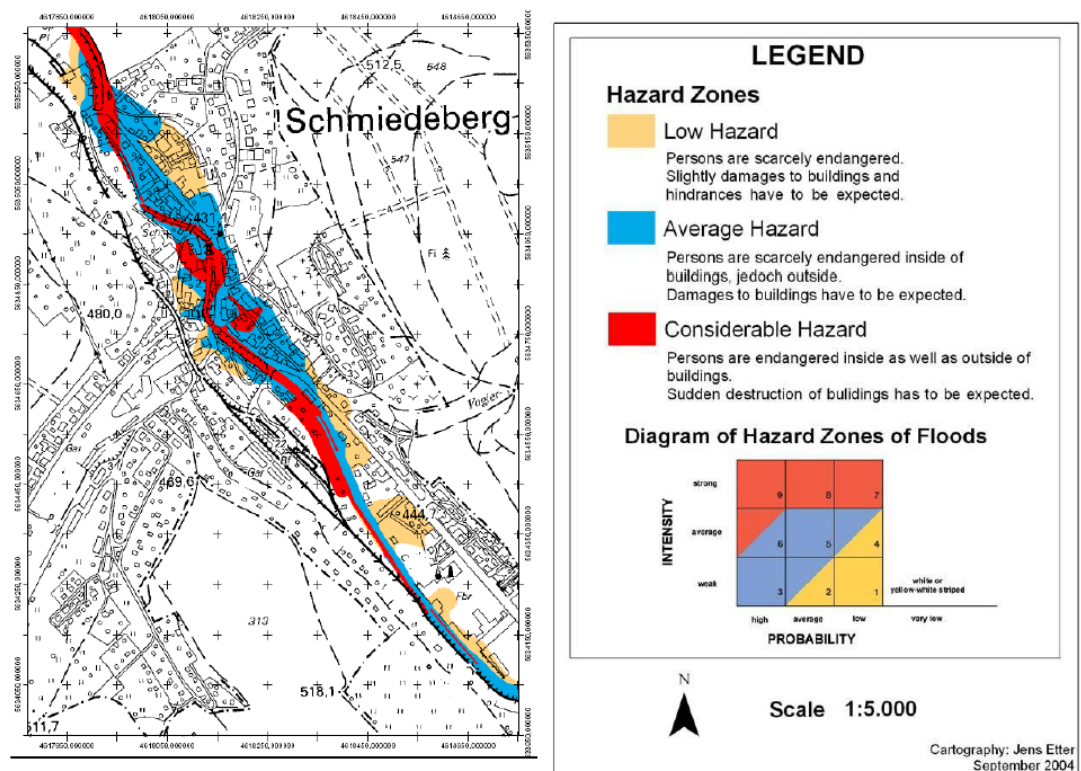
De relaties tussen overstromingskenmerken en kans op overlijden zijn gebruikt om het verwachte aantal slachtoffers te berekenen voor de Geleenbeek, de Geul en de Roer. Als invoer is gebruik gemaakt van de overstromingskaarten uit het Landelijk Informatiesysteem Water en Overstromingen (LIWO)<sup>23</sup>. Bij overstromingen met een herhalingstijd van 1000 jaar (vergelijkbaar met of iets ernstiger dan die in juli 2021) worden voor de Geleenbeek, Geul en Roer respectievelijk drie, vier en zeven slachtoffers berekend. In de bewoonde gebieden langs de beken in Limburg is het aannemelijk dat onder zeer extreme omstandigheden mensen kunnen verdrinken.

<sup>23</sup> <https://basisinformatie-overstromingen.nl/#/maps>

## 10.3 Hoe functioneert het systeem onder natte omstandigheden: hoe groot is het overstromingsgevaar?

### 10.3.1 Inleiding

Om in algemene zin een uitspraak te kunnen doen over de kans op een overstroming en de 'ernst' of 'intensiteit' van een overstroming in verschillende gebieden, zijn gevaarkaarten gemaakt. Gevaarkaarten zijn gebaseerd op de kans op een overstroming en één of meer kenmerken van die overstroming (waterdiepte, stroomsnelheid, etc.). Figuur 10.9 toont een voorbeeld van een overstromingsgevaarkaart (in het Engels *flood hazard map*) wanneer een Zwitserse methode wordt toegepast op een gebied bij Schmiedeberg (Duitsland). In dit geval wordt de kans op een overstroming gecombineerd met een maat voor de intensiteit van die overstroming, waarbij de intensiteit wordt uitgedrukt in de verwachte schade aan gebouwen en de kans op slachtoffers.



Figuur 10.9 Voorbeeld van een overstromingsgevaarkaart (in het Engels *flood hazard map*) volgens de methode die in Zwitserland wordt gehanteerd (toegepast op een gebied bij Schmiedeberg door Dransch et al., 2014)

Gevaarkaarten zijn voor het eerst in Nederland ontwikkeld voor het Deltaprogramma Nieuwbouw en Herstructurering in 2011 en 2012 (Van de Pas et al., 2011 en 2012). Ook is de methode om te komen tot overstromingsgevaarkaarten eerder gepubliceerd in een wetenschappelijk tijdschrift (De Bruijn et al., 2012).

In het kader van de watersysteemanalyse zijn twee typen gevaarkaarten gemaakt:

- *Schadegevaarkaarten* geven aan hoe groot de jaarlijkse schade zou zijn wanneer je op die plek zou bouwen. De 'intensiteit' van een overstroming wordt in dit geval geschaald op basis van de verwachte schade aan een eengezinswoning van 200.000 euro.

De belangrijkste invoer voor deze kaart is informatie over de overstromingskans en de waterdiepte.

- De *verdrinkingsgevaarkaart* geeft aan hoe groot de jaarlijkse kans is op een bepaalde locatie om te verdrinken. Voor dit soort kaarten wordt de 'intensiteit' van een overstroming dus uitgedrukt in een theoretische kans op overlijden als gevolg van een mogelijke overstroming wanneer men 365 dagen per jaar op deze plek zou blijven staan (ook tijdens een overstroming). Hierbij wordt gebruik gemaakt van informatie over de overstromingskans en de waterdiepte, maar ook van informatie over stroomsnelheden en stijgsnelheden.

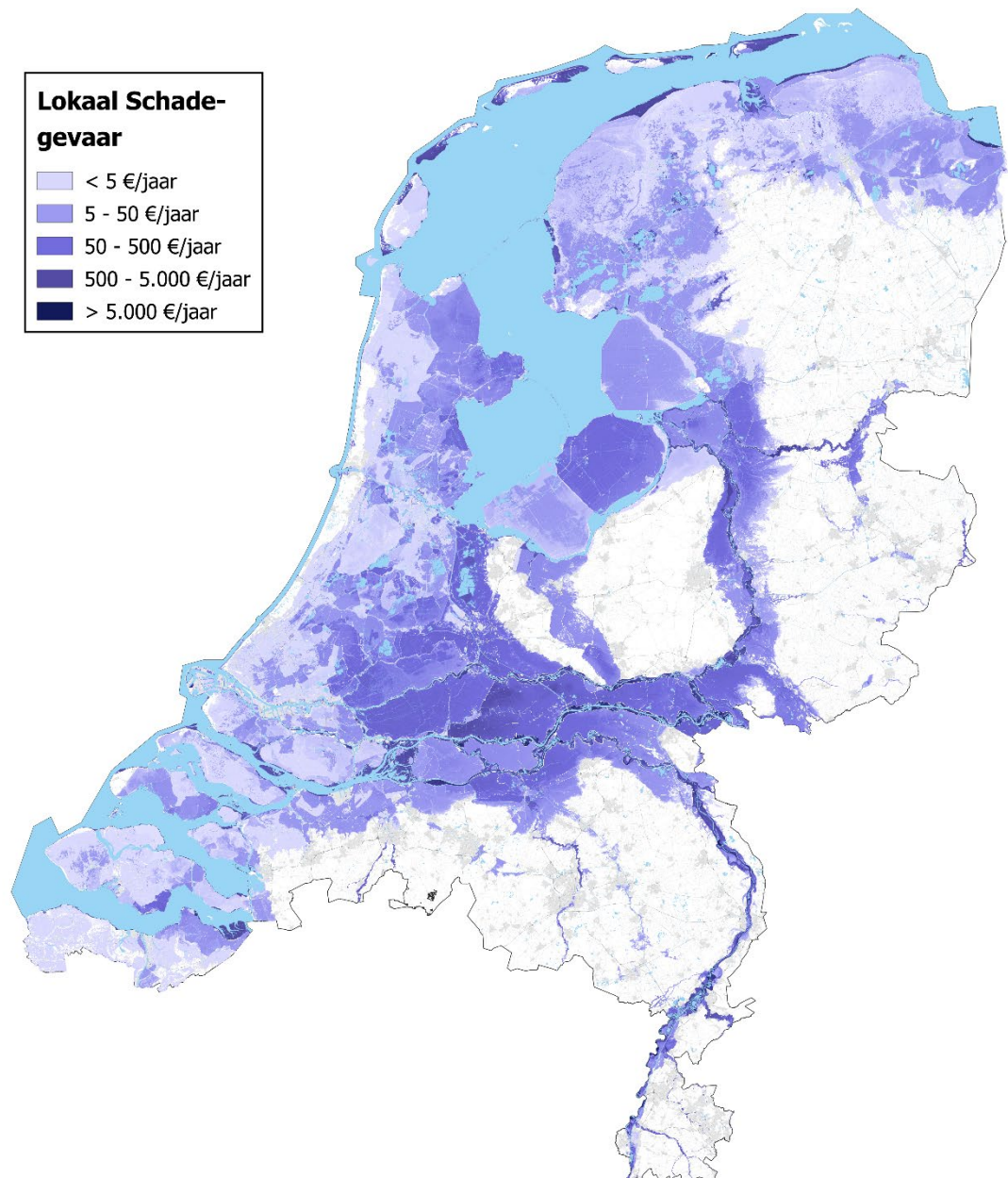
Voor de kaarten is gebruik gemaakt van informatie die al beschikbaar was vóór het hoogwater van juli 2021. Het gaat dan vooral om de overstromingsberekeningen die zijn uitgevoerd voor drie overstromingen met verschillende kans van voorkomen, namelijk eens in de 10, 100 en 1000 jaar. De waterdieptekaarten behorend bij deze overstromingen zijn te vinden op het Landelijk Informatiesysteem Water en Overstromingen (LIWO).

### 10.3.2 Schadegevaar (potentieel schaderisico indien gebieden worden bebouwd)

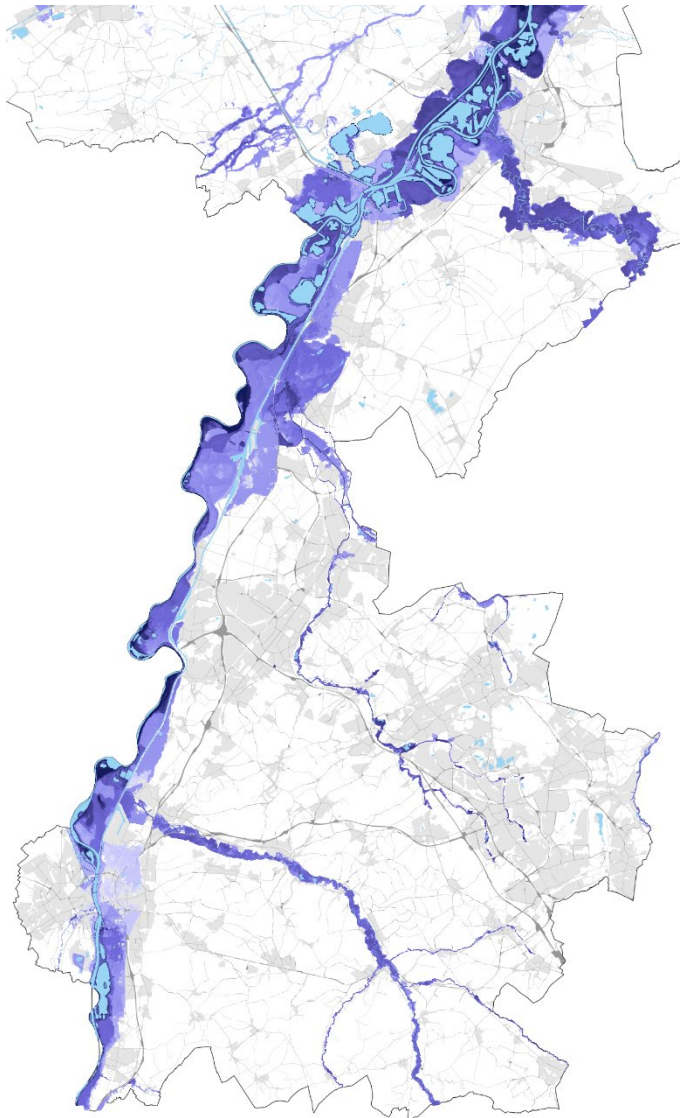
Het schadegevaar is berekend als jaarlijks verwachte gemiddelde schade die een standaard eengezinswoning (met inboedel) zou ondervinden als gevolg van alle mogelijke overstromingen op die locatie; zowel ondiepe, frequente overstromingen als diepe meer zeldzame overstromingen. De jaarlijkse gemiddelde schade is uitgedrukt in euro's. Dergelijke gevaarkaarten zijn eerder ontwikkeld voor de grote bedijkte gebieden langs de kust en in het rivierengebied. Voor deze studie zijn ze aangevuld met informatie voor onbedijkte gebieden, zoals de buitendijks gelegen gebieden langs de Maas en de beken in Limburg. De landelijke schadegevaarkaart is te zien in Figuur 10.10. Op deze kaart valt het volgende op:

- In tegenstelling tot wat vaak wordt gedacht, is het huidige schadegevaar (uitgaande van de huidige zeespiegelstand) niet het grootst in laag gelegen polders langs de kust, maar in grote hellende dijkringen in het rivierengebied. Vergelijk hiervoor bijvoorbeeld het westelijke deel van de Betuwe met de Haarlemmermeerpolder ten zuidwesten van Amsterdam).
- Het gevaar is ook groot in de buitendijkse gebieden langs de Rijntakken en de Maas.
- Ook langs de beken in Limburg is sprake van een relatief groot schadegevaar. Dit geldt met name voor de overstromingsvlakten langs de Roer, maar ook op smallere stroken langs de Geleenbeek en de Geul (Figuur 10.11).

Het is belangrijk dat men zich realiseert dat het hier een *potentieel* schaderisico betreft en niet het actuele overstromingsrisico. Informatie over de kwetsbaarheid (dus of een gebied bebouwd is en er daadwerkelijk schade op kan treden) is niet meegenomen in deze analyses. Het overstromingsgevaar is dan ook niet hetzelfde als het overstromingsrisico (zie ook Figuur 1.2). Het overstromingsgevaar kan ook groot zijn in gebieden waar op dit moment helemaal geen schade optreedt, bijvoorbeeld omdat er niet is gebouwd, er geen mensen wonen of bedrijven gevestigd zijn. Dit is onder meer het geval in de overstromingsvlaktes langs de Roer. Uit de schadegevaarkaart blijkt dat het gevaar groot is omdat deze overstromingsvlaktes vaak en diep onder water kunnen komen te staan. Hier wonen echter nauwelijks mensen. Dit komt mogelijk doordat deze gebieden voor de aanleg van de stuwmeren in Duitsland nog vaker onder water stonden dan nu. Daardoor is in het verleden bij het kiezen van vestigingsplaatsen rekening gehouden met opgetreden waterstanden. De meeste dorpen, zoals Vlodrop en Melick, liggen veel hoger. Hierdoor is het daadwerkelijke overstromingsrisico langs de Roer op dit moment relatief beperkt.



*Figuur 10.10 Landelijke schadegevaarkaart De kans op een overstroming is gecombineerd met de intensiteit van een overstroming, waarbij de intensiteit is geschaald als de verwachte schade aan een eengezinswoning met een waarde van 200 duizend euro.*

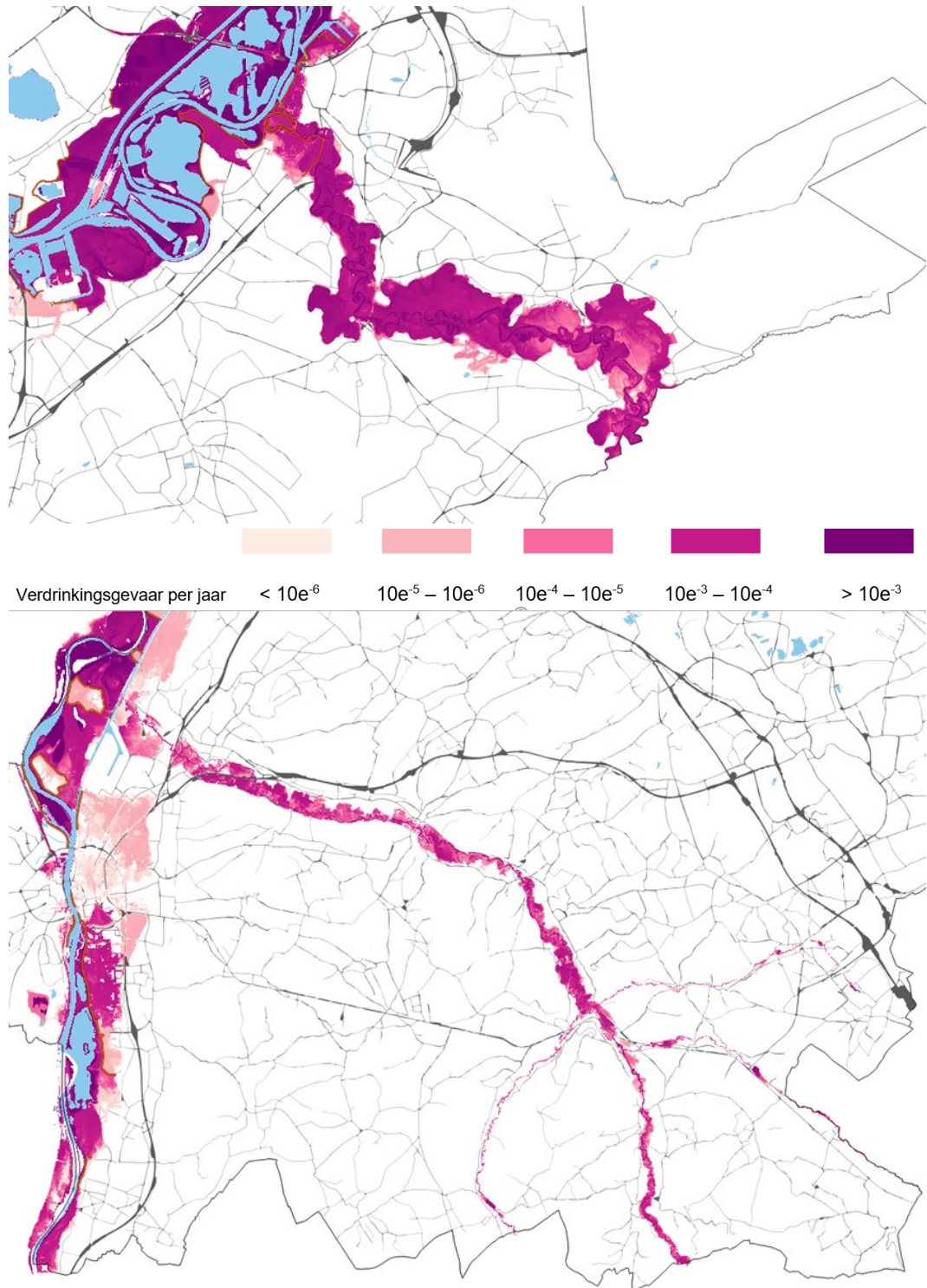


*Figuur 10.11 Meer gedetailleerde schadegevaarkaart voor Zuid-Limburg. De kans op een overstroming is gecombineerd met de intensiteit van een overstroming, waarbij de intensiteit is geschaald als de verwachte schade aan een eengezinswoning met een waarde van 200 duizend Euro.*

### 10.3.3 Verdrinkingsgevaar

Het verdrinkingsgevaar is berekend als de kans op overlijden als gevolg van een overstroming wanneer een persoon 365 dagen per jaar op die plek zou verblijven, ook tijdens een overstroming. Het verdrinkingsgevaar kan dus groot zijn in gebieden waar op dit moment niemand woont of verblijft. De kaart toont het potentiële risico *indien* er mensen aanwezig *zouden* zijn.

Figuur 10.12 toont het lokaal verdrinkingsgevaar voor de Roer en de Geul. Bij deze kaarten is geen rekening gehouden met evacuatie en andere maatregelen die de kans op slachtoffers verkleinen. Het verdrinkingsgevaar is het grootst in de buitendijkse gebieden langs de Maas. Ook de overstromingsvlakten langs de Roer kennen een relatief groot verdrinkingsgevaar. Langs de Geul is het gevaar op de meest plaatsen iets minder groot.



*Figuur 10.12 Lokaal verdrinkingsgevaar langs de Roer (boven) en de Geul (onder) (kans op overlijden door een overstroming wanneer een persoon 365 dagen per jaar op deze plek verblijft, ook tijdens een overstroming)*

## 10.4 Maatregelen om de gevolgen te beperken

Informatie over de potentiële economische schade en kans op slachtoffers als gevolg van overstromingen die is weergegeven op de overstromingsgevaarkaarten kan worden gebruikt bij maatregelen in de tweede en derde laag van de meerlaagsveiligheidsbenadering: ruimtelijke adaptatie en crisismanagement (Figuur 10.1).

Voor wat betreft laag twee, kan men bij ruimtelijke adaptatie denken aan maatregelen in de sfeer van de ruimtelijke ordening. De kaarten kunnen bijdragen aan de invulling van het beleid 'water en bodem sturend'. Hoe zorg je er voor dat je de openbare ruimte inricht zodanig dat de kans op schade en overlijden het kleinst is. De gevaarkaarten kunnen bijvoorbeeld vertaald worden naar zones waarvoor verschillende regels gelden (vergelijkbaar met de risicogerichte benadering die in verschillende landen, waaronder Zwitserland, wordt toegepast). Op locaties met een groot schadegevaar (ofwel gebieden die vaak en/of diep onder water kunnen komen te staan) kan men besluiten om niet te bouwen of bepaalde activiteiten niet meer toe te staan. Op locaties met een iets kleiner gevaar zou men kunnen besluiten om aangepast te bouwen of om specifieke maatregelen voor te schrijven of te adviseren. Zo kan in gebieden die vaak, maar ondiep onder water lopen veel schade worden voorkomen door schotten te plaatsen of om tegelvloeren te nemen in plaats van parket. Welke gebieden diep onder water kunnen lopen is niet te zien in de gevarenkaarten zelf, maar wel in de onderliggende kaarten die gemaakt zijn in het kader van deze studie en/of de kaarten die te vinden zijn op de website van het Landelijk Informatiesysteem Water en Overstromingen (LIWO).

In het advies van de beleidstafel (Beleidsstafel Wateroverlast en Hoogwater, 2022) zijn ook andere handvatten aangedragen: een label voor een huis dat onder water kan komen te staan, een aangepaste verzekering, kaarten verstrekt door gemeenten met gevaarlijke plekken in een wijk, etc.

Voor wat betreft laag drie, het crisismanagement, kunnen de kaarten ook waardevol zijn. Ze maken inzichtelijk welke gebieden als eerste zouden moeten worden afgesloten om te voorkomen dat mensen zich hier verzamelen. Bij het opstellen van evacuatieplannen kan men besluiten om bewoners bij relatief gevaarlijke plekken als eerste te evacueren. Ook geven deze kaarten aan waar prioriteit moet worden gegeven voor het (door)ontwikkelen van een goed hoogwater waarschuwingssysteem. Ten slotte wordt duidelijk of belangrijke infrastructuur op plekken ligt die niet door hoogwater geraakt wordt. Denk aan vluchtroutes, brandweerkazernes, telefoonmasten, elektrische voorzieningen en winkels.

Binnen de nieuwe meerlaagsveiligheidsbenadering (Figuur 10.2) staat het risicobewustzijn centraal, zowel bij overheden als burgers. Ook voor dit doel kunnen de gevaarkaarten en de onderliggende kaarten met informatie over overstromingsdiepten gebruikt worden. In dit geval is het belangrijk dat niet alleen gesproken wordt over de dreiging, maar ook over het handelingsperspectief. Wanneer bewoners weten onder welke omstandigheden hun huis kan overstromen en hoe diep het dan kan worden, dan kunnen ze ook meedenken over mogelijke maatregelen, zoals het plaatsen van schotten, het naar boven brengen van waardevolle spullen of het vervangen van een houten vloer voor een tegelvloer (wanneer de kans op overstromen groot is). Kaarten met het lokale verdrinkingsgevaar zien er dreigend uit, maar de kans om te verdrinken kan aanzienlijk kleiner worden wanneer bewoners op de eerste verdieping van hun huis blijven en niet de straat op gaan. Waardevolle eigendommen kan men – mits tijdig gewaarschuwd - voor de overstroming in veiligheid brengen, maar wanneer het water is gearriveerd is het in veel gevallen beter om ze te laten staan. Personenauto's gaan bijvoorbeeld al snel drijven en kunnen door het kolkende water worden meegesleurd. Het weghalen van voorwerpen uit lager gelegen ruimtes die, wanneer het water eenmaal is gearriveerd, snel vollopen kan gevaarlijk zijn. Denk hierbij aan laaggelegen tuinen, kelders en souterrains.



De grootschalige overstromingen in juli 2021 hebben geleid tot zeker 433 miljoen euro schade. Volgens modelberekeningen waren de omstandigheden (waterdieptes en stroomsnelheden) dusdanig dat er ook slachtoffers hadden kunnen vallen. Het schadegevaar langs de beken in Limburg is vergelijkbaar met het gevaar in de buitendijkse gebieden langs de Maas. Maatregelen die kunnen worden getroffen om de gevolgen van overstromingen (schade en kans op slachtoffers) te beperken hebben betrekking op vergroting van het water- of risicobewustzijn, ruimtelijke ordening en crisisbeheersing. De gevaarkaarten (en de onderliggende waterdieptekaarten) kunnen hierbij helpen.

De grootschalige overstromingen in juli 2021 hebben geleid tot zeker 433 miljoen euro schade. De meeste schade is opgetreden langs de Geul (onder andere Valkenburg en Meerssen), maar ook in het stroomgebied van de Geleenbeek (bij Heerlen) is veel schade gemeld. In Nederland is niemand verdrongen tijdens het hoogwater. Volgens modelberekeningen waren de omstandigheden (waterdieptes en stroomsnelheden) dusdanig dat dit wel degelijk het geval had kunnen zijn.

Gemodelleerde waterdieptes bij hoogwaters met een verschillende kans van voorkomen, zijn gebruikt om het overstromingsgevaar te bepalen. Het overstromingsgevaar kan worden gezien als het potentiële risico en is groot in gebieden die vaak en diep onder water lopen. Zo geeft de kaart met het lokale schadegevaar aan hoe groot het risico zou zijn wanneer men zou besluiten ergens te gaan bouwen. De kaart met het lokale verdrinkingsgevaar geeft aan hoe groot de kans op overlijden zou zijn wanneer een persoon permanent op die locatie zou verblijven (ook tijdens een hoogwater).

Uit de kaarten blijkt dat het overstromingsgevaar langs de beken in Zuid-Limburg vergelijkbaar is met dat in de buitendijkse gebieden langs de Maas. De overstromingsvlaktes langs de Roer kennen het grootste overstromingsgevaar. Omdat hier nauwelijks is gebouwd (de dorpen langs de Roer liggen op hogere gronden), is het actuele risico klein. De Geul en de Geleenbeek kennen een iets kleiner overstromingsgevaar.

Maatregelen die kunnen worden getroffen om de gevolgen van overstromingen (schade en kans op slachtoffers) te beperken hebben vooral betrekking op ruimtelijke ordening en crisisbeheersing, laag twee en drie van het meerlaagsveiligheidsbenadering. Recent is dit beleid uitgebreid met vergroting van het water- of risicobewustzijn en herstel (Beleidsstafel Wateroverlast en Hoogwater, 2022). De gevaarkaarten (en de onderliggende waterdieptekaarten) kunnen helpen bij de invulling van dit beleid. Hierbij kan men denken aan onderstaande maatregelen:

- Geen nieuwbouw op gevaarlijke plekken (bijvoorbeeld overstromingsvlakte Roer)
- Aangepast bouwen op iets minder gevaarlijke locaties (minder gevaarlijke plekken Geuldal en Geleenbeek)
- Risicobewustzijn burgers vergroten (communicatie, informatieloket, ....)
- Goede voorspellingssystemen en tijdige waarschuwing van burgers inclusief handelingsperspectief
- Goede informatievoorziening aan burgers tijdens een ramp
- Evacuatieplanning en crisisbeheersing waarbij rekening is gehouden met gevaarlijke plekken (Welke straten eerst? Welke straten en pleinen snel afsluiten voor publiek?)

# 11 Synthese: overstromingen voorkomen is lastig – inzetten op het beperken van gevolgen

## **Het schadegevaar van overstromingen in de beekdalen in Limburg is vergelijkbaar met het gevaar in buitendijkse gebieden langs de Maas**

Bij veel mensen leeft het beeld dat laaggelegen polders in het westen van het land de meest gevaarlijke plekken zijn in Nederland, waarbij gevaar gedefinieerd is als een combinatie van de kans op overstromen en de 'intensiteit' van een overstroming in termen van bijvoorbeeld verwachte schade aan gebouwen. Eind jaren '90 van de vorige eeuw is gestart met het maken van overstromingsmodellen voor alle dijkkringen in Nederland. De resultaten van die modellen deden het beeld kantelen: niet de kustgebieden bleken het meest gevaarlijk, maar juist de grote, hellende dijkkringen in het rivierengebied. De gevaarkaarten die met behulp van overstromingsmodellen zijn gemaakt zijn nu uitgebreid met onbedijkte gebieden langs de grote rivieren, maar ook langs regionale rivieren en beken, waaronder de beken in Limburg.

Voordat het hoogwater van juli 2021 optrad, werd bij overstromingen vanuit de beken in Limburg mogelijk vooral gedacht aan 'wateroverlast'. De overstromingen langs de Roer, de Geleenbeek en de Geul hebben dat beeld bijgesteld en de nieuwe overstromingsgevaarkaarten bevestigen dat beeld: het overstromingsgevaar langs de beken in Limburg is op veel plaatsen vergelijkbaar met het gevaar in buitendijkse gebieden langs de Maas en andere relatief gevaarlijke plekken in het rivierengebied.

## **Mogelijkheden om die dreiging te verminderen zijn beperkt**

Voor de buitendijkse gebieden langs de grote rivieren geldt dat men zich van oudsher in meer of mindere mate bewust is van het overstromingsgevaar. En doordat hier de Beleidslijn Grote Rivieren (BGR) van toepassing is mag er ook niet zo maar een nieuw initiatief worden ontplooid. Er is daardoor wel sprake van een relatief groot gevaar, maar niet van een groot risico. Voor de bedijkte gebieden in het rivierengebied geldt dat de waterkeringen voor 2050 zullen worden versterkt zodat ze (uiterlijk in 2050) aan de nieuwe beschermingsnormen zullen voldoen. Het overstromingsgevaar zal daardoor vooral in het centrale rivierengebied sterk afnemen.

De vraag die nu voorligt is welke maatregelen kunnen worden getroffen in de stroomgebieden van de Geul, de Geleenbeek en de Roer om het gevaar te verkleinen of in ieder geval om te voorkomen dat een groot gevaar in de toekomst ook een groot risico wordt<sup>24</sup>. Deze vraag is op te splitsen in drie deelvragen:

1. Hoe kan de kans op een overstroming worden verkleind?
2. Hoe kan de blootstelling of 'intensiteit' van een overstroming worden verkleind? Ofwel: hoe kunnen we er voor zorgen dat waterdieptes en stroomsnelheden kleiner worden?
3. Hoe kan de kwetsbaarheid worden verminderd, ofwel: wat kunnen we verbeteren in de Ruimtelijke Ordening en het crisismanagement en hoe kunnen we de zelfredzaamheid van burgers vergroten om de gevolgen van een overstroming te beperken?

---

<sup>24</sup> Het gevaar kan ook groot zijn in gebieden waar niemand woont. Er wordt namelijk geen rekening gehouden met het landgebruik. Het gaat om een *potentieel* risico; het risico dat zou ontstaan indien men op die locatie gaat bouwen of wonen.

In de watersysteemanalyses die zijn uitgevoerd voor de Geul, de Geleenbeek en de Roer zijn verschillende typen maatregelen onderzocht die als doel hebben om de kans op een overstroming of de intensiteit van een overstroming te verkleinen. Uit de studies blijkt dat veel maatregelen leiden tot iets lagere afvoeren en waterstanden, maar dat het niet mogelijk is om een overstroming zoals in juli 2021 geheel te voorkomen. Enkele voorbeelden:

- Wanneer het landgebruik wordt aangepast, bijvoorbeeld door al het akkerland om te zetten in grasland, dan zal er meer water in de bodem infiltreren, waardoor de piekafvoer af neemt en de maximale waterstanden in de beken enkele centimeters tot decimeters lager zullen worden.
- Wanneer meer bergingsgebieden worden ontwikkeld dan kan dat ook leiden tot iets lagere waterstanden benedenstrooms, maar ook met die maatregel alleen is het voorkomen van een overstroming zoals in juli 2021 niet mogelijk.
- Lokaal kan het overstromingsgevaar worden verkleind door de afvoer juist te verbeteren. Deze maatregel zal in eerste instantie worden uitgevoerd bij bruggen of duikers die nu voor opstuwung zorgen, waardoor gebouwen onder water lopen. Het is echter onvoldoende effectief om overstromingen zoals in juli 2021 te voorkomen en kan bovendien het gevaar benedenstrooms wat doen toenemen.
- Op een aantal locaties kan de overstromingskans worden verkleind door kades aan te leggen. Deze maatregel is vooral geschikt langs reeds bebouwde gebieden, waar nog wel voldoende ruimte beschikbaar is om een dijk aan te leggen. Wanneer de maatregel grootschalig wordt toegepast, gaat veel berging verloren en zullen waterstanden bij dezelfde hoeveelheid neerslag steeds hoger worden. Ook zal sprake zijn van afwenteling naar benedenstrooms gelegen gebieden: het overstromingsgevaar zal daar toenemen.

In algemene zin geldt dat een combinatie van de onderzochte maatregelen kan leiden tot een, op de meeste locaties, beperkte afname van het overstromingsgevaar. Hoe groot de afname zal zijn is afhankelijk van de omvang van de maatregelen (hoe groter het oppervlak in de stroomgebieden dat onder gras of bos komt te staan en hoe groter de bergingsgebieden, des te groter het effect). Afhankelijk van de locatie waar maatregelen getroffen kunnen worden, zal het gevaar op de ene plek meer af kunnen nemen dan op de andere plek. Bijvoorbeeld, wanneer het doorstroomprofiel van een brug wordt vergroot om opstuwung te verminderen, dan kan dat *lokaal* leiden tot geringere waterdieptes en dus een kleiner gevaar. Echter, omdat de doorvoer van water wordt vergroot, zullen de waterstanden benedenstrooms van de brug toenemen. De aanleg van waterkeringen kan eveneens leiden tot afwenteling. In het beschermde gebied achter de waterkering zal het gevaar afnemen omdat de overstromingskans afneemt. De waterkeringen kunnen echter zorgen voor opstuwung en daarmee hogere waterstanden bovenstrooms. Benedenstrooms kunnen waterstanden ook toenemen doordat het oppervlak in het beekdal waar water geborgen kan worden kleiner is geworden. In sterk hellende gebieden verdient de aanleg van kades sowieso extra aandacht, omdat water dat bovenstrooms over de kades heen stroomt, niet terug kan stromen naar de beek. Waterdieptes kunnen daardoor, met name in het benedenstrooms gelegen deel van het bedijkte gebied, juist groter worden.

Het beeld dat overheerst is dat het heel moeilijk zal zijn om het overstromingsgevaar (dus de kans op een overstroming en de waterdieptes die daarbij optreden) in het gehele stroomgebied significant te verminderen. De maatregelen die daarvoor nodig zijn in het watersysteem zijn vaak te groot, te duur en/of te ingrijpend, bijvoorbeeld omdat ze niet inpasbaar zijn in het landschap. Zo is berekend dat waterkeringen in Valkenburg ongeveer 3,5 meter hoog zouden moeten worden om overstromingen bij een gebeurtenis zoals in juli 2021 te voorkomen. Een andere effectieve maatregel voor Valkenburg is het vergroten van de afvoercapaciteit van de Geul. Dit kan door het doorstroomprofiel te vergroten, maar daarvoor zouden huizen in het centrum van Valkenburg verwijderd moeten worden. Een andere optie is de aanleg van een tunnel om het water af te voeren.

De landschappelijke impact van deze maatregel is waarschijnlijk kleiner, maar de kosten zijn waarschijnlijk enorm hoog.

### **Om dorpen en steden in Zuid-Limburg een bescherming tegen overstromen van 1:100 per jaar te bieden zijn ingrijpende maatregelen nodig**

Naar aanleiding van het Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW) uit 2003 is sinds 2009 in Limburg door de provincie een normering voor wateroverlast vastgelegd. Deze norm geeft aan tot welk beschermingsniveau wateroverlast vanuit het regionale watersysteem door het waterschap voorkomen dient te worden. De norm is gebaseerd op de functietoekenning in de Provinciale Omgevingsvisie (POVI). Ofwel: de toelaatbaar geachte kans op wateroverlast is gerelateerd aan de economische waarde van het landgebruik en de te verwachten schade bij overstroming. Voor landelijk gebied is daarbij afhankelijk van het grondgebruik een norm van 1:10, 1:25 of 1:50 (glastuinbouwgebieden) per jaar vastgesteld. Voor natuurgebieden is geen norm. Voor bebouwde gebieden is grotendeels een 1:100 norm vastgesteld. Voor een aantal bebouwde gebieden in Zuid-Limburg is destijds besloten om een norm van 1:25 per jaar toe te kennen, omdat een 1:100 beschermingsniveau op basis van landschappelijke inpasbaarheid en de kosten-baten verhouding niet haalbaar was. Het waterschap toetst periodiek of het watersysteem nog aan deze norm voldoet. Als dat niet het geval is heeft het waterschap een inspanningsplicht om zodanige maatregelen te treffen dat wel weer aan de norm wordt voldaan.

De conclusie van deze studie dat het moeilijk is om het overstromingsgevaar significant te verkleinen komt dus niet geheel als een verrassing. Het is immers de belangrijkste reden dat voor veel dorpen en steden in Zuid-Limburg op dit moment een norm voor wateroverlast geldt van 1:25 in plaats van 1:100 per jaar, zoals elders in het land meestal toegepast. Hoewel we in deze studie niet in detail hebben gekeken naar de maatregelen die nodig zijn in het watersysteem wanneer wordt besloten om over te gaan naar een 1:100 norm, kan wel worden geconcludeerd dat deze maatregelen ingrijpend zullen zijn. De gebeurtenis van juli 2021 heeft volgens het KNMI voor het huidige klimaat een kans in van ongeveer 1:500 per jaar, maar door klimaatverandering zou de kans in de loop van deze eeuw kunnen toenemen tot 1:100 per jaar. Dat betekent dat wanneer men nu zou besluiten om het watersysteem zo in te richten dat aan de 1:100 norm wordt voldaan, dat men dan bij het ontwerp van die maatregelen uit kan gaan van een neerslaggebeurtenis zoals in juli 2021. Dit geldt zeker voor grotere infrastructurele maatregelen. Zo kijkt men in Nederland bij de aanleg en versterking van waterkeringen minimaal 50 jaar vooruit (de levensduur van de dijk is in dat geval minimaal 50 jaar). Voor de aanleg van een toekomstbestendige waterkering langs de Geul met een norm van 1:100 per jaar, zou dat betekenen dat deze hoog genoeg moet zijn om het water tijdens het hoogwater van juli 2021 te keren.

### **Inzetten op gevolgbeperking**

Het gebruik van deze normen voor wateroverlast betekent overigens niet dat de waterbeheerders geen enkele verantwoordelijkheid hebben voor gebeurtenissen die extremer zijn dan de norm. Deze ligt dan echter vooral in de sfeer van crisisbeheersing. Dat betekent onder andere: beschikken over crisisplannen, zorgdragen voor goede informatievoorziening en ondersteunen in het beperken van schade. Omdat zich altijd situaties kunnen voordoen die extremer zijn dan de norm (dus zeldzamer dan 1:25 voor bebouwd gebied in Zuid-Limburg) is het sowieso goed om na te denken over maatregelen die de gevolgen beperken. Dit kan door maatregelen te treffen die de 'kwetsbaarheid' verkleinen en daarmee de gevolgen (economische schade en aantallen slachtoffers) beperken. Dit kan door ruimtelijke adaptatie (niet bouwen in gevaarlijke gebieden, aangepast bouwen in iets minder gevaarlijke gebieden) en verbeteren van het crisismanagement (inclusief verbetering van de voorspellings- en waarschuwingssystemen). Maar het vergroten van het risicobewustzijn en de zelfredzaamheid van burgers kan hier ook aan bijdragen.

Een voorbeeld van een initiatief dat in dit kader door burgers is opgezet is de stichting Water-Stop.NU<sup>25</sup> in de omgeving van de Geulmonding. De stichting werkt samen met onder andere de gemeente Meerssen aan een crisisplan. Doel van dit plan is om bewoners van het Geulmondgebied te ondersteunen bij een (dreigend) hoogwater. Een van de maatregelen die in dit kader al zijn getroffen is het opzetten van een WhatsApp-groep waarin deelnemers informatie kunnen delen die er voor kan zorgen dat bewoners tijdens een (dreigende) overstroming weten wat er aan de hand is en op tijd maatregelen kunnen treffen om zo de gevolgen te verkleinen.

---

<sup>25</sup> <https://www.water-stop.nu>

## 12 Aanbevelingen - Van een 'eerste verkenning van maatregelen op systeemniveau' naar 'de schop in de grond'

### 12.1 Vervolgstappen

Deze studie had tot doel om meer kennis op te doen over het functioneren van het watersysteem tijdens zeer natte omstandigheden en om een eerste beeld te krijgen van typen maatregelen die mogelijk kansrijk zouden kunnen zijn. Dit zijn de eerste stappen op weg naar een 'masterplan' met een overzicht van locatie specifieke maatregelen die gerealiseerd gaan worden. Na deze eerste screening van type maatregelen op systeemniveau moet het effect van deze maatregelen op specifieke locaties nader worden onderzocht. Wanneer de maatregel dan nog steeds effectief lijkt, kan een ontwerp worden gemaakt, waarna tot uitvoering kan worden overgegaan. Deze vervolgstappen maken geen deel uit van voorliggende watersysteemanalyse, maar zullen door verschillende overheden, in het programma Waterveiligheid en Ruimte Limburg (WRL) gezamenlijk worden opgepakt, in samenhang met de bevindingen en aanbevelingen van de landelijke beleidstafel wateroverlast en hoogwater (Beleidstafel Wateroverlast en Hoogwater, december 2022).

### 12.2 Maatregelen om nader te verkennen

Omdat we in deze verkenning hebben gekeken naar typen maatregelen is het onmogelijk om een compleet overzicht te geven van concrete mogelijk effectieve maatregelen op verschillende locaties in de stroomgebieden van de Geul, de Geleenbeek en de Roer. Onderstaand overzicht bevat een aantal concretere maatregelen die, op basis van de verkenning op systeemniveau, effectief zouden kunnen zijn. We melden er nadrukkelijk bij dit overzicht (1) niet volledig is en (2) niet is gebaseerd op gedetailleerde analyses (dat betekent dat de maatregelen een ander effect kunnen hebben dan we nu inschatten op basis van de uitgevoerde verkenning).

#### **Meer water vasthouden in de haarvaten van het watersysteem**

We zien verschillende mogelijkheden om in de haarvaten van de stroomgebieden meer water vast te houden. Voor de stroomgebieden van de Geul en de Roer geldt dit nadrukkelijk ook voor het in het buitenland gelegen deel.

- Verandering in landgebruik: wanneer akkerland wordt omgezet in grasland dan leidt dat tot extra infiltratie. Hetzelfde geldt voor aangepaste landbewerkingsmethoden. De maatregel is onvoldoende om overstromingen geheel te voorkomen, maar draagt wel bij aan de verkleining van de kans. In deze studie is gekeken naar het effect in een zomersituatie. Het effect is dan relatief klein, omdat veel akkers in de zomer begroeid zijn. In een wintersituatie kan het effect nog groter zijn dan voor een zomersituatie, omdat de akkers dan kaal zijn. Het verschil in infiltratie tussen akkers en grasland is dan nog groter. Het effect kan ook groter worden wanneer akkerland of grasland wordt omgezet in bos.
- Water uit bebouwd gebied laten infiltreren: grijp alle kansen die zich voordoen en stimuleer actief (via bijvoorbeeld subsidieregelingen) om water dat valt op verhard oppervlak (zowel gebouwen als wegen) te laten infiltreren. Dit geldt niet alleen voor de grote stedelijke gebieden, zoals bijvoorbeeld de regio Heerlen maar ook voor het landelijk gebied van bijvoorbeeld de Geul. Voorkom verdere toename van verhard oppervlak.

- Water bergen in de haarvaten: ook wanneer het water al in de bovenloop van de beek terecht is gekomen, is het nog steeds zinvol om water te bergen en te vertragen. Dit kan door de aanleg van regenwaterbuffers maar ook door het verruigen van die bovenstroomse haarvaten. In Limburg zijn al meer dan 450 regenwaterbuffers aangelegd, vooral in de zijbeken. Deze buffers kunnen zorgen voor aftopping van de piekafvoeren naar de grotere beken. Zeker bij minder extreme neerslaggebeurtenissen kunnen de buffers effectief zijn. Afvoerpieken kunnen ook worden verlaagd en/of vertraagd door het verruigen van de bovenstroomse beken (haarvaten).

### **Water bergen in het beekdal (topvervlakking vergroten)**

- Overstromingsvlaktes benutten: aanvullend op het water vasthouden in de haarvaten, kan ook worden gezocht naar extra berging van water in de beekdalen zelf. Zorg dat de bestaande overstromingsvlaktes maximaal worden benut. Waar dat niet (voldoende) het geval is, kan dit worden gerealiseerd door een drempel dwars op de beek aan te leggen, of door de afvoercapaciteit bij bruggen te verkleinen. Kansen hiervoor zien we op diverse locaties, zowel in de Geul (o.a. ten noorden van Gulpen) als de Geleenbeek.
- Aanleg van reservoirs: gezien het grote effect van de bestaande reservoirs in het Duitse deel van het stroomgebied van de Roer op de piekafvoer, wordt ook dit type maatregel als kansrijk gezien voor de andere beken. Bijkomend voordeel is dat reservoirs ook helpen om het droogterisico te verkleinen.

### **Vergroten van de afvoercapaciteit**

- Het vergroten van de afvoercapaciteit bij bruggen kan lokaal voor lagere waterstanden zorgen. Dit is onder meer het geval bij de bruggen over de Roer bij Vlodrop en Sint Odiliënberg, maar ook in het centrum van Valkenburg en Sittard. Omdat nu op systeemniveau is gekeken is niet goed te zeggen in welke mate vergroten van de afvoercapaciteit bij deze bruggen leidt tot minder schade. Dit zou in een meer gedetailleerde studie beter moeten worden onderzocht. In zo'n studie moet ook beter worden gekeken naar een eventuele toename van de schade benedenstrooms door afwenteling.
- Het vergroten van de afvoercapaciteit bij Valkenburg kan leiden tot een aanzienlijke afname van de overstromingskans in deze stad. Dit kan door het profiel van de Geul en de Molentak te vergroten, maar dat zou erg ingrijpend zijn (sloop van gebouwen). De afvoercapaciteit kan ook worden vergroot door een tunnel. Deze maatregel is echter relatief duur. Mogelijk bieden bestaande rioolbuizen onder het centrum van Valkenburg een optie om de afvoercapaciteit te vergroten of is het mogelijk om op een andere manier de afvoer om Valkenburg heen te leiden via een derde waterloop.
- Vergroting van de afvoercapaciteit van de Geulmonding door water over te hevelen naar het Julianakanaal of door de capaciteit van de sifon te vergroten. Dit laatste kan door de aanleg van een extra buis, maar ook door te voorkomen dat sediment en drijfvuil zich in en voor de sifon ophopen. Om drijfvuil af te vangen is in december 2022 al een constructie geplaatst bovenstrooms van de sifon onder het Julianakanaal.

### **Beschermen met behulp van kades**

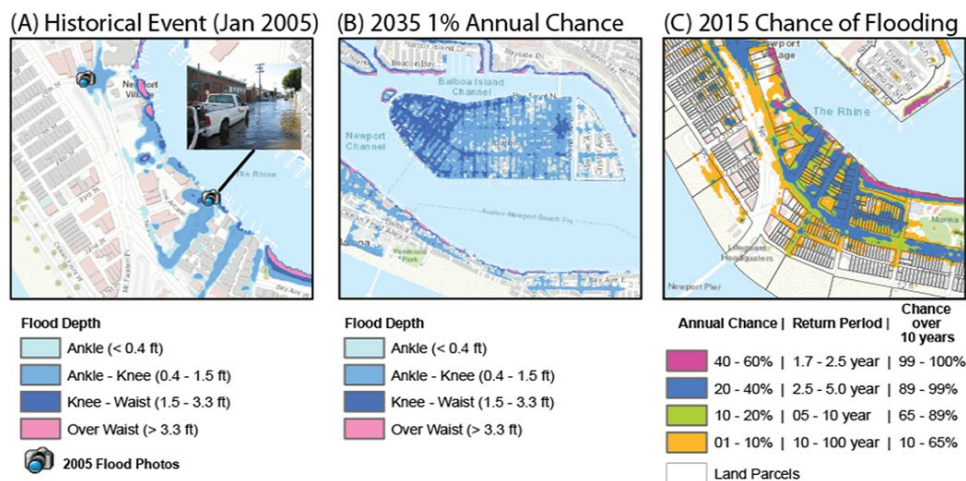
- Waterkering langs de noordoever van de Geul (bovenstrooms van de sifon onder het Julianakanaal): deze waterkering verkleint de kans dat een zeer groot gebied ten noorden van de Geul en ten oosten van het Julianakanaal onder water loopt. De waterkering zorgt er voor dat de waterstand in de Geul hoger wordt. Dit heeft als nadeel dat dit tot enkele kilometers bovenstrooms tot hogere waterstanden kan leiden (dat dient verder te worden onderzocht), maar heeft als voordeel dat de afvoercapaciteit van de sifon beter wordt.

- Langs de Roer bovenstrooms van Roermond kan worden onderzocht of bescherming met schotten een oplossing kan zijn, vooral tijdens minder extreme hoogwaters.
- Langs de Geleenbeek zijn in de buurt van Sittard diverse bedrijfsterrainen die aanvullend kunnen worden beschermd door middel van kades.

### **Gevolgbeperking**

- Ruimtelijke adaptatie: inzetten op beperking van het overstromingsrisico door niet of aangepast te bouwen op locaties die vaak en/of diep onder water kunnen lopen. De gevaarkaarten in hoofdstuk 10 zijn bewust weer gegeven in één kleurschakering, omdat ze tot doel hebben om de ruimtelijke spreiding van het overstromingsgevaar weer te geven. Het gebruik van 'stoplichtkleuren' kan een andere boodschap suggereren (in rode gebieden is het gevaar zo groot dat geen ontwikkelingen zijn toegestaan, in groene gebieden is het gevaar zo klein dat er geen restricties gelden). Een kaart met stoplichtkleuren kan de uitkomst zijn van een proces om te komen tot risicozonering. Daarvoor is echter eerst een maatschappelijke discussie nodig over het risico dat als aanvaardbaar wordt gezien. Wat is aanvaardbaar voor wat betreft overlast of gevaar? Wat hebben we er voor over in termen van kosten? Het gaat om een gesprek om de balans te bepalen tussen deze twee uitersten. De gemaakte gevaarkaarten vormen de eerste stap in een proces om te komen tot risicozonering en ruimtelijke adaptatie.
- Verbeterde hoogwatervoorspelling: het ontwikkelen van een goed hoogwatervoorspellingssysteem waarbij ook kennis en metingen van buurlanden worden gebruikt.
- Verbeterde waarschuwingssystemen: uit de enquête die is uitgevoerd door de VU en Deltares (Endendijk et al., 2022) bleek dat veel bewoners geen tijdige waarschuwing hadden ontvangen. Verbeterde waarschuwing verkleint de kans op schade en slachtoffers vooral wanneer dit gecombineerd is met goede communicatie voorafgaand aan het hoogwater (vergroting van het risicobewustzijn) en/of een duidelijk handelingsperspectief. Voor burgers is het lastig om te bepalen wat hen te wachten staat bij een bepaalde afvoer of waterstand. Zelfs een code geel, oranje of rood biedt vaak onvoldoende houvast. Geef aan welke gebieden wanneer en hoe diep onder water kunnen lopen en geef ook aan wat bewoners zelf kunnen doen om de gevolgen te beperken.
- Vergroten van het risicobewustzijn van burgers: dit kan door gerichte communicatie met burgers, maar ook door te zorgen voor adequate informatie over de kans op een overstroming en de kenmerken van die overstroming (waterdiepte, stroomsnelheid). Bestaande kaarten en kaarten gemaakt in het kader van dit onderzoek kunnen een vertrekpunt vormen, maar aanbevolen wordt om samen met burgers te kijken naar specifieke informatiebehoeften en de manier waarop de informatie wordt gevisualiseerd. Figuur 12.1 toont voorbeelden van kaarten die door wetenschappers en burgers gezamenlijk zijn opgesteld. Zo is de waterdiepte niet gegeven in meters, maar ten opzichte van de lengte van een mens (enkel-, knie- of heupdiep).





Figuur 12.1 Voorbeeld van overstromingsgevaarkaarten (flood hazard maps) voor Newport Bay (USA). (A) waterdiepte bij een eerdere overstroming; (B) waterdiepte bij een T100 hoogwater en (C) indicatie van de overstromingskans (bron: Sandes et al., 2020).

## 12.3 Gebruik van data en modellen

In deze studie hebben we gebruik gemaakt van reeds beschikbare modellen. Deze zijn gemaakt om vaker voorkomende en daarmee lagere afvoeren te simuleren. De werking van deze modellen is nooit voor de omstandigheden van juli 2021 bedoeld geweest. Om toch uitspraken te kunnen doen, hebben we deze modellen zo goed mogelijk aangepast op basis van de waarnemingen van juli 2021. Het bleek desondanks niet altijd mogelijk om de modellen zo af te regelen dat de waterstanden overal in het stroomgebied goed konden worden gemodelleerd. Zo zijn de berekende waterstanden langs de Geul op veel plaatsen aan de lage kant, ondanks dat de berekende afvoer eerder aan de hoge kant lijkt. Ook langs de Geleenbeek en de Roer komen de berekende waterstanden niet volledig overeen met de metingen.

Voor het vervolg op deze verkenning van maatregelen is het noodzakelijk om een goed simulatiemodel ter beschikking te hebben. Dit model moet zowel op systeemniveau als ook op detailniveau in staat zijn om effecten van maatregelen door te rekenen. De uitdaging zal zijn om juist ook het hydrologische deel van het model te verbeteren, zodat de aanvoer van water naar de verschillende beken nauwkeuriger kan worden berekend. Idealiter zou bij die modellen ook in meer detail naar de interactie met het grondwater moeten worden gekeken. Ook de hydraulische modellen moeten verbeterd worden om de effecten van individuele maatregelen beter te kunnen bepalen en om een goed ontwerp te kunnen maken. Concrete verbeterpunten zijn genoemd in de deelrapporten.

Om modellen beter te kunnen kalibreren en om beter te kunnen reconstrueren wat er tijdens een hoogwater is gebeurd, zijn goede metingen onontbeerlijk. Al met al is de beschikbaarheid van goede metingen van zowel neerslag als waterhoogte en afvoer een probleem: in juli 2021 zijn veel meetstations uitgevallen. Het is nodig om prioriteit te geven aan het beschikbaar zijn van metingen, ook bij dit soort extremere omstandigheden: goede metingen zijn nodig om een goed model te kunnen bouwen, waarmee een goede onderbouwing kan worden geleverd voor te nemen maatregelen.

## 12.4 Kennisleemtes

Om de werking van het watersysteem beter te begrijpen is meer onderzoek nodig naar de rol van het grondwater. Over het algemeen gaat men er vanuit dat het weken zo niet maanden duurt voordat de neerslag die valt op de plateaus en in de bodem infiltreert in het grondwater terecht komt. Verschillende grondwaterstandsmetingen lieten tijdens het hoogwater van juli 2021 echter een zeer snelle respons zien: het grondwater op de plateaus steeg soms meer dan 2 m in twee dagen tijd. Dit suggereert dat regenwater sneller tot grote diepte in de bodem wegzakt dan nu wordt aangenomen. Onbekend is of dit alleen lokaal gebeurt, bijvoorbeeld in gebieden met karstverschijnselen, of op grotere schaal. Wanneer aanvulling van het grondwater op grote schaal plaatsvindt, dan zou dat aanleiding kunnen zijn voor aanpassing van de hydrologische modellen. Wanneer het een lokaal fenomeen is, dan biedt dit wellicht mogelijkheden tot het nemen van specifieke maatregelen, zoals het leiden van water naar plekken waar het makkelijk (snel en diep) in de bodem weg kan zakken. Meer kennis over de werking van het grondwater is niet alleen belangrijk voor studies naar overstromingsrisico's, maar ook voor studies naar droogterisico's (het grondwater vormt een zeer belangrijke buffer) en voor waterkwaliteitsstudies waarbij gekeken wordt naar de uitspoeling van vervuilende stoffen naar het grondwater.

Een tweede kennisleemte heeft te maken met de kans op samenvallen van afvoergolven uit de beken in Limburg en hoogwater op de Maas. Wanneer maatregelen worden getroffen in het stroomgebied van de beeksystemen of in het stroomgebied van de Maas die van invloed zijn op de timing van het hoogwater (het hoogwater vertragen of juist versnellen), dan beïnvloedt dat de kans dat afvoerpieken wel of juist niet samenvallen. Omdat de piekafvoer in de beken in Limburg meestal voor de afvoerpiek op de Maas wordt bereikt, lijken maatregelen die de afvoer in de beken vertragen nadelig. De kans dat de afvoergolf samen valt met de piekafvoer op de Maas wordt dan groter. Echter, om te bepalen of een verandering in timing leidt tot een verergering van de problemen in de monding van de beken of langs de Maas is mee inzicht nodig in de kans op samenvallen en op de gevolgen daarvan.

## 13 Conclusies

De conclusies geven eerst antwoord op de drie hoofdvragen. Daarna volgen de belangrijkste conclusies per hoofdstuk.

### 13.1 Antwoord op de hoofdvragen

Het hoogwater van juli 2021 werd veroorzaakt door een grote hoeveelheid neerslag die in twee dagen viel. De herhalingsjijd van de bui wordt geschat op ongeveer 500 jaar. Door klimaatverandering kan een bui zoals gevallen in juli 2021 vaker gaan voorkomen. Ongeveer 30% van de gevallen neerslag is door de beken afgevoerd naar de Maas. De rest is vastgehouden in onder andere de bodem. Het is belangrijk om de bestaande sponswerking van de bodem te behouden en uit te breiden. De onderzochte maatregelen die genomen kunnen worden in het watersysteem hebben een waterstandsverlagend effect maar kunnen overstromingen tijdens een gebeurtenis zoals in juli 2021 niet voorkomen. Het is daarom belangrijk om ook in te zetten op gevolgbeperking in de vorm van aanpassingen in de ruimtelijke ordening, vergroten van het waterbewustzijn bij burgers en verbeterde crisisbeheersing.

#### **Wat is er gebeurd in juli 2021?**

In juli 2021 is een grote hoeveelheid neerslag gevallen in de stroomgebieden van de Geul, de Geleenbeek en de Roer. De herhalingsjijd voor de neerslag in het stroomgebied van de Geul wordt geschat op ongeveer 500 jaar. Een zeer groot deel van de neerslag is weggezakt in de bodem. Zo is in het stroomgebied van de Geul en de Geleenbeek gemiddeld maar 30% van de gevallen neerslag afgevoerd naar de Maas. In het stroomgebied van de Roer is veel water geborgen in de daar aanwezige stuwweren. Desondanks heeft de extreme neerslag geleid tot zeer hoge afvoeren en overstromingen. In Nederland zijn geen mensen verdronken, maar de economische schade bedroeg meer dan 433 miljoen euro.

#### **Hoe functioneert het watersysteem onder natte omstandigheden?**

De neerslag die is gevallen in juli 2021 leidde tot zeer hoge afvoeren en overstromingen. Echter, ook bij minder extreme neerslaggebeurtenissen met herhalingsjijden in de orde van 25 tot 100 jaar kunnen overstromingen optreden. De waterdieptes en overstroomde gebieden zijn dan wel iets minder groot.

Wanneer de neerslag van juli 2021 gevallen zou zijn in de winter, dan had dat waarschijnlijk geleid tot nog grotere afvoeren. In de zomer zijn veel akkers begroeid en is de bodem minder nat. Hierdoor is een groot deel van de neerslag in de bodem weggezakt. In een wintersituatie zijn akkers kaal en is de kans groter dat de bodem (bijna) verzadigd is. Er stroomt dan meer neerslag oppervlakkig af, wat leidt tot hogere afvoeren in de beken.

De mate waarin een hoogwater wordt afgetopt is ook afhankelijk van het seizoen. Doordat de overstromingsvlakten langs de beken in de zomer dichter begroeid zijn, wordt het water meer afgeremd. Dit leidt tot lagere piekafvoeren benedenstrooms.

Tijdens het hoogwater van juli 2021 is een groot deel van de neerslag in de bodem gezakt. Dat heeft een positief effect op de piekafvoeren. Berekeningen voor de Geul laten zien dat indien het hele stroomgebied verstedelijkt zou zijn, dat tot een drie keer hogere piekafvoer bij Valkenburg zou kunnen leiden.

De waterstanden bij de mondingen van de Geul, Geleenbeek en de Roer worden zeer sterk bepaald door de waterstand op de Maas. Wanneer het hoogwater in de beken samenvalt met hoogwater op de Maas leidt dit bij de monding tot veel hogere waterstanden en een grotere kans op overstromingen.

### **Welke maatregelen zijn mogelijk effectief om overstromingsrisico's te beperken?**

Bij de watersysteemanalyses voor de drie beeksystemen is gestart met het verkennen van mogelijk maatregelen in het watersysteem. Deze maatregelen zijn er op gericht om het overstromingsgevaar te verkleinen. Dat wil zeggen dat ze de kans op overstroming verkleinen, of leiden tot kleinere waterdieptes of lagere stroomsnelheden. Een samenvattend overzicht van de onderzochte maatregelen en hun effect is te zien in Tabel 13.1.

Het effect van de meeste onderzochte maatregelen is te klein om overstromingen tijdens een gebeurtenis zoals in juli 2021 te voorkomen. Bij gebeurtenissen met minder neerslag zullen maatregelen die bijdragen aan het vasthouden van water in de bodem, in regenwaterbuffers of in het beekdal, relatief gezien effectiever zijn. Maatregelen die de infiltratie bevorderen en die de berging in het beekstelsysteem vergroten zijn dus altijd nuttig, ook al kunnen ze overstromingen tijdens een neerslaggebeurtenis zoals in juli 2021 niet voorkomen. Daar komt bij dat het overstromingsgevaar als gevolg van klimaatverandering verder toe zal nemen. Dit soort maatregelen kunnen helpen om de effecten van klimaatverandering (vaker hevige buien) deels te compenseren.

Omdat overstromingen niet kunnen worden voorkomen<sup>26</sup>, zal ook moeten worden ingezet op maatregelen die de gevolgen van overstromingen beperken. Hierbij valt te denken aan maatregelen in de ruimtelijke ordening (ruimtelijke adaptatie genoemd). De gevaarkaarten kunnen worden gebruikt om invulling te geven aan het beleidsprincipe 'water en bodem sturend'. Ze kunnen gebruikt worden in het proces om te komen tot risicozonering, waarbij kan worden voorgesteld om niet te bouwen in gebieden met een zeer groot overstromingsgevaar en om aangepast te bouwen in gebieden met een iets kleiner gevaar. Andere maatregelen die de gevolgen kunnen beperken zijn verbetering van het crisismanagement (goede hoogwatervoorspelling, waarschuwing en evacuatie) en het vergroten van het risicobewustzijn van burgers, zodat zij weten hoe te handelen bij een dreigend hoogwater.

---

<sup>26</sup> Er kunnen zich altijd situaties voordoen waarop de capaciteit van het watersysteem niet is berekend, zelfs wanneer besloten wordt om de beschermingsnorm voor dorpen en steden in Zuid-Limburg aan te scherpen tot bijvoorbeeld 1:100 per jaar.

Tabel 13.1 Samenvattend overzicht berekende effecten van verschillende typen maatregelen. De tussen haakjes genoemde effecten betreffen het positieve effect. Eventuele negatieve effecten worden benoemd bij de opmerkingen.

Samenvattend overzicht	Neerslagsituatie			opmerking
	T25	T100 (T25 klimaat)	juli 2021** (T100 klimaat)	
<b>water vasthouden</b>	++*	++*	++ (≤ 20cm)	Het relatieve effect is het grootst bij minder extreme buien. Overstromingen kunnen dan worden voorkomen.
<b>water bergen: verruwing overstromingsvlakke</b>	+ en - (5-20 cm)	+ en - (5-20 cm)	+ en - (5-20 cm)	Afname met max 5 cm in Geul en Geleenbeek (beperkt deel van beekdal verruwd) tot 20 cm benedenstrooms langs Roer. In verruwde deel nemen waterstanden met cm tot meerdere dm toe.
<b>water bergen: drempels of verkleinen afvoercapaciteit bruggen</b>	++ en - (5-20cm)	++ en - (5-20cm)	++ en - (5-50 cm)	Bovenstrooms opstuwing, benedenstrooms waterstandsverlaging. Effecten orde centimeters (Roer) tot maximaal paar decimeter (Geul en Geleenbeek). Effect het grootst bij gebeurtenis waarop doorlaatcapaciteit is ontworpen. Geschikt wanneer hogere waterstand bovenstrooms van drempel niet leidt tot meer schade. Kansrijker langs Geul en Geleenbeek dan Roer.
<b>water bergen: inzet retentiegebieden</b>	+ (≤ 1cm)	+ (≤ 4cm)	+ (≤ 5cm)	Alleen onderzocht voor de Roer. Klein positief effect, maar weinig robuust: gebied ingericht op T25 hoogwater heeft geen effect bij T100 en omgekeerd. Wanneer waterstanden iets anders zijn dan waarbij het ontwerp rekening mee is gehouden wordt het effect ook veel kleiner.
<b>verbeteren afvoercapaciteit bruggen en duikers</b>	++ en - (10-20 cm)	++ en - (10-20 cm)	++ en - (10-20 cm)	Bovenstrooms max paar dm daling, benedenstrooms wat verhoging.
<b>Verdubbelen afvoercapaciteit Valkenburg</b>	+ (20 cm)	++ en - (≤ 100 cm)	+++ en - (≤ 100 cm)	Heel effectief voor Valkenburg zelf, met slechts beperkt afwenteffect benedenstrooms (enkele cm hogere waterstanden benedenstrooms).
<b>Verbeteren afvoercapaciteit bij sifon Geulmonding</b>	0	+ (≤ 10 cm)	++ (≤ 20 cm)	Probleem doet zich voor vanaf een T100 afvoer (ongeveer en mede afhankelijk van de waterstand op de Maas), maar dan heel effectief.
<b>Verbeteren afvoercapaciteit: inzet Roer-overlaat</b>	+	+	+	Enkele cm waterstands daling in Roermond.
<b>Aanleg kades</b>	+ en -	+ en -	+ en -	Kan schade aan woningen verminderen, echter vaak afwenteling bovenstrooms i.v.m. opstuwing en benedenstrooms i.v.m. afname berging. Wanneer waterkeringen in hellende gebieden overlopen kan dat tot grotere waterdieptes leiden.

\* niet doorgerekend, maar beoordeeld op basis van expertkennis

\*\* voor de Geleenbeek is de T300 doorgerekend in plaats van de daadwerkelijk opgetreden juli 2021 situatie

## 13.2 Conclusies per onderdeel

### Neerslag

In juli 2021 is een grote hoeveelheid neerslag gevallen in de stroomgebieden van de Geul, de Geleenbeek en de Roer. De gemiddelde neerslag in de Geul bedroeg 128 mm in twee dagen. In de Geleenbeek viel gemiddeld 93 mm en in de Roer viel gemiddeld 106 mm in twee dagen. Lokaal, zoals rond Heerlen, viel veel meer neerslag tot wel 175 mm.

De herhalingstijd van deze neerslaggebeurtenis werd voor de Geul geschat op ongeveer 900 jaar. Dit was op basis van de gemiddelde statistiek voor Nederland. Wanneer rekening wordt gehouden met de invloed van het reliëf dan wordt de herhalingstijd geschat op ongeveer 500 jaar. De neerslaghoeveelheden in de regio Heerlen hadden een herhalingstijd van ongeveer 1000 jaar. Volgens het KNMI wordt de kans op een vergelijkbare gebeurtenis in de loop van deze eeuw ongeveer 6 keer groter als gevolg van klimaatverandering.

### Geul

In het stroomgebied van de Geul viel gemiddeld 128 mm neerslag in twee dagen tijd. Gemiddeld over het hele stroomgebied is 1/3 deel tot afstroming gekomen en afgevoerd naar de Maas. De rest is vastgehouden in de bodem en het (soms diepe) grondwater. De afstromende neerslag leidde tot een berekende piekafvoer bij Valkenburg van ongeveer 135 m<sup>3</sup>/s. Ongeveer 60 tot 70% van het passerende water kwam uit België. De hoge afvoeren hebben langs de hele Geul geleid tot grootschalige overstromingen, met veel schade als gevolg.

We zien ook dat op een aantal plekken met schade als gevolg van overstroming, dat de Geul (of de zijbeken) daar te weinig ruimte heeft. Met name bij Valkenburg is er een groot aantal bruggen en is er simpelweg een te klein doorstroomprofiel. Vanuit het oogpunt van de Geul staat de bebouwing in de weg, wat leidt tot een flessenhals.

Voor het stroomgebied van de Geul zien we dat met geen van de verkende maatregelen het mogelijk is om overstromingen tijdens een hoogwater als van juli 2021 te voorkomen:

- Bronmaatregelen leiden tot lagere afvoeren en waterstanden. Wanneer 10 mm extra neerslag per dag zou kunnen infiltreren, dan leidt dat tot maximaal 20 cm lagere waterstanden in de Geul.
- Het vergroten van de berging bovenstrooms in de stroomdalen om daarmee de afvoergolf te remmen leidt tot lagere waterstanden benedenstrooms. Bij de berekeningen waarbij de beekbodem wordt verhoogd om meer afvoer door de overstromingsvlakte te leiden, namen de waterstanden bovenstrooms met lokaal 20 cm toe. De benedenstroomse verlaging bedroeg veelal 5 à 10 cm.
- Het vergroten van de berging in de beekdalen door middel van drempels leidt ook tot lagere waterstanden benedenstrooms (in dit geval maximaal 20 tot 50 cm). De waterstandstoename bovenstrooms van de drempels is afhankelijk van de hoogte van de drempel en bedroeg in de doorgerekende varianten meer dan 1 m. Aandachtspunten bij de aanleg van drempels zijn de inpassing in het landschap en zeker ook het bepalen van de doorlaatcapaciteit: vanaf welke afvoer moet water geborgen worden?
- Het verhelpen van lokale hydraulische knelpunten zoals bruggen, leidt lokaal tot wel 20 cm lagere waterstanden. De mate van afwenteling is beperkt: waterstanden benedenstrooms nemen vaak maar enkele cm toe. De afvoer bij Bunde kan worden vergroot door vergroting van de capaciteit van de sifon onder het Julianakanaal, maar ook door water af te laten naar het Julianakanaal.

- Op sommige locaties kan wateroverlast worden voorkomen door kades aan te leggen, zoals aan de noordkant van de Geul bij Bunde. Op andere plekken, zoals bij Valkenburg, is de aanleg van kades erg ingrijpend: de kades zouden erg hoog moeten worden. Wanneer de kades te laag worden aangelegd, of wanneer een kade aan bovenstroomse zijde doorbreekt, dan kan het overstromingsgevaar zelfs toenemen. Het water loopt dan door het centrum van Valkenburg, maar kan benedenstrooms niet terug stromen naar de Geul. De waterdieptes nemen daardoor toe.

### **Geleenbeek**

In de Geleenbeek is gemiddeld 93 mm neerslag gevallen in twee dagen, maar lokaal in het zuiden (gebied rond Heerlen) in de Caumerbeek en het zuiden van de Geleenbeek zijn neerslagsommen tot wel 175 mm opgetreden. Dit heeft geleid tot veel wateroverlast. Het meetpunt Brommelen heeft de hoogste afvoer gehaald die ooit is gemeten. Daarentegen is in de rest van het systeem veel minder neerslag gevallen en daarmee is op het niveau van het totale watersysteem bij het laatste meetpunt maar net een T1 situatie overschreden. Ofwel: bij het uitstroompunt van de Geleenbeek in de Maas was de piekafvoer gelijk aan een afvoer die gemiddeld ieder jaar wordt bereikt.

Het watersysteem van de Geleenbeek kent veel locaties die tijdens heftige buien gevoelig zijn voor wateroverlast als gevolg van de relatief hoge mate van verharding. Het gaat dan vooral om regenwater dat oppervlakkig afstroomt en minder om overstromingen vanuit de Geleenbeek zelf. Daarmee is het ook noodzakelijk om al op lokaal niveau voor voldoende buffercapaciteit te zorgen en bescherming tegen wateroverlast mogelijk te maken. Verhard gebied heeft 'van nature' weinig sponswerking en die zal dus op kunstmatige wijze moeten worden gerealiseerd met behulp van bijvoorbeeld regenwaterbuffers. Dit wordt uiteraard ook al lange tijd nagestreefd en lijkt ook goed te functioneren.

Er is een verkennende analyse van mogelijke maatregelen uitgevoerd om overstromingen vanuit de Geleenbeek zelf te beperken. Helaas was voor deze verkenning geen goed model beschikbaar. Zo ontbraken in het model allerlei maatregelen en verbeteringen in het watersysteem die in de afgelopen jaren zijn uitgevoerd. Ook is het belangrijk om op te merken dat de verkenning is uitgevoerd op het watersysteem als geheel. De gekozen buien voor T25 en T100 zijn vooral op systeemniveau extreem (ofwel benedenstrooms rond Sittard) en minder bovenstrooms (zoals de Caumerbeek). Als gevolg daarvan wordt de meeste schade in Sittard berekend en vooral in het bedrijventerrein langs de Doctor Nolenslaan. Desalniettemin zijn wel zinvolle conclusies uit de maatregelenanalyse af te leiden.

Het vergroten van de buffercapaciteit in het watersysteem, vooral op lokaal niveau (bronmaatregelen) maar ook op systeemniveau (retentiegebieden) geeft een duidelijke verlaging van de afvoerpieken en wateroverlast.

Daarentegen zijn maatregelen als het oplossen van knelpunten en het plaatsen van kades erg lastig, in die zin dat ze voor dit stroomgebied al snel leiden tot afwentelen naar elders. Dat soort maatregelen moeten dus alleen met de grootste voorzichtigheid en detailuitwerking plaatsvinden.

### **Roer**

Gemiddeld is er in juli 2021 in het stroomgebied van de Roer 106 mm neerslag gevallen in twee dagen. Dit heeft geleid tot een zeer hoge afvoer bij de grens met Nederland. Hoe hoog de piekafvoer precies is geweest is niet bekend. Een handmeting kwam uit op een afvoer van ongeveer 260 m<sup>3</sup>/s, maar Duitse modelberekeningen suggereren dat de piekafvoer ook ongeveer 350 m<sup>3</sup>/s kan zijn geweest. Zonder de aanwezige stuwmeren in het Duitse deel van het stroomgebied had de afvoer nog veel hoger kunnen zijn.

De hoge afvoer heeft geleid tot grootschalige overstromingen langs de Roer bovenstrooms van Roermond. Ook in Roermond waren de waterstanden extreem hoog. Hier werden de waterstanden echter vooral beïnvloed door het hoogwater op de Maas. In Roermond zijn alleen de hockeyvelden van Concordia overstromd. Wel zijn bewoners uit voorzorg geëvacueerd.

Met betrekking tot mogelijke maatregelen in het Nederlandse deel van de Roer, worden de volgende conclusies getrokken:

- **Bergen:**
  - Door de verruwing van de overstromingsvlaktes (ruwere vegetatie) kan het hoogwater meer worden afgetopt. Dit leidt bovenstrooms (waar de verruwing plaatsvindt) tot 10 à 50 cm hogere waterstanden. Benedenstrooms nemen de waterstanden met 5 tot 20 cm af. In Roermond zelf is het effect beperkt tot 5 à 10 cm. Dit komt doordat de waterstanden in Roermond vooral bepaald worden door de waterstanden op de Maas.
  - De onderzochte retentiegebieden hebben een beperkt effect (maximaal 1 tot 4 cm lagere waterstanden benedenstrooms) en dat effect neemt sterk af wanneer sprake is van een extremer of minder extreem hoogwater dan dat waarop de inlaatdrempel is afgeregeld. Maar ook wanneer het hoogwater in een ander seizoen plaatsvindt of een andere duur kent dan het hoogwater dat gebruikt is voor het ontwerp zal nauwelijks een effect te verwachten zijn. Het effect is dus beperkt en bovendien erg onzeker.
  - Vergroting van de berging door de afvoercapaciteit bij de bruggen te beperken leidt tot maximaal 4 cm hogere waterstanden bovenstrooms van de brug. Benedenstrooms van de bruggen daalt de waterstand met maximaal 2 cm.
- **Afvoeren:**
  - Bij twee bruggen die zorgen voor opstuwing is de doorstroomcapaciteit vergroot door de landhoofden doorstroombaar te maken. Dit leidt tot lagere waterstanden bovenstrooms van de brug (3 tot 15 cm afhankelijk van de locatie en de piekafvoer op de Roer), maar over het algemeen tot hogere waterstanden benedenstrooms (6 tot 17 cm).
  - In Roermond kan de afvoercapaciteit worden vergroot door inzet van de Roer-overlaat. Hierdoor kan de waterstand op een locatie met maximaal 20 cm worden verlaagd. Meestal is het effect echter beperkt tot enkele centimeters.
- **Beschermen:** Woningen die overstromen bevinden zich meestal op de rand van het overstromde gebied. Omdat de waterdiepte bij de overstromde woningen vaak beperkt is tot een aantal decimeters, kan bij minder extreme omstandigheden mogelijk ook worden volstaan met het plaatsen van schotten.

In deze studie is vooral gekeken naar het effect van maatregelen in Nederland, maar mogelijk kunnen maatregelen in Duitsland het overstromingsgevaar meer verkleinen. Met name het uitbreiden van het aantal reservoirs en/of het verbetering van het beheer van de reservoirs kan een positief effect hebben op zowel de hoog- als laagwaterproblematiek in Nederland.

#### **Effect van landgebruiksverandering op oppervlakkige afstroming van regenwater**

Voor twee zijbeken van de Geul is gekeken naar het effect van veranderingen in landgebruik op de afstroming van regenwater. Uit dat onderzoek blijkt dat bij extreme neerslag in de zomer 15 tot 20% van de gevallen neerslag afstroomt. De rest infiltreert in de bodem. Omzetting van het aanwezige akkerland naar grasland (een oppervlak van ongeveer 40% van het stroomgebied) leidt tot maximaal 10 mm extra infiltratie in twee dagen tijd. Bij het huidige landgebruik wordt 24 tot 35 mm neerslag (van de 165 mm) afgevoerd.



Wanneer al het akkerland wordt omgezet naar grasland neemt dat af tot 14 à 26 mm; een afname van 25 tot 40%. De oppervlakkige afstroming neemt evenredig af. Wanneer akkerbouw wordt omgezet in duurzame landbouw, dan bedraagt de extra infiltratie maximaal ongeveer 7 mm in twee dagen. Wanneer geen rekening wordt gehouden met de aanwezige regenwaterbuffers, duikers en overkluizingen die het water tijdelijk tegen kunnen houden, dan leidt het omzetten van akkerland naar grasland tot een 25 tot 40% lagere piekafvoer. In werkelijkheid zijn in beide stroomgebieden regenwaterbuffers, duikers en overkluizingen aanwezig die de afvoer van water beperken. Uit de resultaten blijkt dat de afvoer naar de Geul wordt beperkt door dit buffersysteem. Een verandering in landgebruik heeft in sterk gebufferde systemen vooral invloed op de duur van het hoogwater: bij akkerland infiltreert minder water, dit wordt opgevangen in de buffers en van daaruit gaat de nalevering van water langer door.

Wanneer we uitzoomen naar systeemniveau dan suggereren de resultaten uit deze studie dat omzetten van akkerland naar grasland (wanneer dit ongeveer 40% van het stroomgebied beslaat) leidt tot 5 à 10 mm extra infiltratie in twee dagen. Bij het verkennen van mogelijke maatregelen in de Geul en Geleenbeek is uit gegaan van 5 à 10 mm extra infiltratie per dag. Om dit te realiseren is dus meer nodig dan omzetting van akkerland naar grasland. Te denken valt dan onder meer aan het laten infiltreren van neerslag gevallen in bebouwd gebied. De aanleg van extra regenwaterbuffers heeft beperkt effect op de infiltratie, maar kan wel zorgen voor een afname van de piekafvoer. Opgemerkt wordt dat het effect van verandering in landgebruik in een wintersituatie mogelijk groter is. In de zomer zijn veel akkers (deels) bedekt met gewassen. De extra infiltratie bij overgang van akkerland naar grasland is dan relatief beperkt. In een wintersituatie zal bij grasland nog steeds relatief veel water infiltreren, terwijl op de kale akkers dan juist veel meer water af zou stromen.

### Waterkeringen Maas

Het hoogwater van juli 2021 leidde tot de volgende inzichten met betrekking tot het functioneren van de waterkeringen:

- De recordafvoer op de Maas van 3.310 m<sup>3</sup>/s leidde met name op de Grensmaas tot waterstanden die veel hoger waren dan verwacht op basis van de bestaande hydraulische modellen die gebruikt worden voor de beoordeling van waterkeringen. Dit komt vooral doordat sprake was van een zomersituatie (hogere ruwheid).
- Op dit moment wordt bij de beoordeling van waterkeringen geen rekening gehouden met de kans op hoogwater in het zomerhalfjaar. Wanneer men dit wel zou doen, dan zou dat kunnen leiden tot een slechtere beoordeling, vooral omdat de waterstanden tijdens een zomer hoogwater hoger zijn.
- Veel dijken langs de Maas hebben een slechte beoordeling voor het faalmechanisme *piping*. Toch was het aantal locaties waar sprake was van een zandmeevoerende wel beperkt. Mogelijk wordt de kans op *piping* overschat doordat:
  - wordt gerekend met een éénlaagsmodel en conservatieve waarden voor de doorlaatbaarheid en korrelgrootte;
  - de kans op een onder de dijk doorlopende zandlaag wordt overschat;
  - onvoldoende bekend is over *piping* in situaties waarbij een zandlaag op een grindlaag ligt; mogelijk is alleen sprake van *heave* (verticale stroming door het zand), en wordt geen *pipe* gevormd onder de dijk.
- Ook het beperkt meenemen van het aanwezige voorland kan tot een overschatting van de kans op *piping* leiden.
- Gelukkig gaat er tijd overheen voordat er zoveel zand is mee gespoeld dat een *pipe* kan ontstaan die tot falen leidt. Op een van de onderzochte locaties lijkt wel degelijk sprake te zijn geweest van *piping*, maar was de duur van het hoogwater mogelijk te kort om tot falen te leiden.

## **Gevolgen van overstromingen schade en slachtoffers**

De grootschalige overstromingen hebben geleid tot ten minste 433 miljoen euro schade. De meeste schade is opgetreden langs de Geul (onder andere Valkenburg en Meerssen) en in de regio Heerlen. In Nederland is niemand verdronken tijdens het hoogwater. Volgens modelberekeningen had dit wel gekund.

Gemodelleerde waterdieptes bij hoogwaters met een verschillende kans van voorkomen, zijn gebruikt om het overstromingsgevaar te bepalen. Het gevaar is groot in gebieden die vaak en diep onder water lopen. Het overstromingsgevaar kan worden gezien als het potentiële risico. Zo geeft de kaart met het lokale schadegevaar aan hoe groot het risico zou zijn wanneer men zou besluiten ergens te gaan bouwen. De kaart met het lokale verdrinkingsgevaar geeft aan hoe groot de kans op overlijden zou zijn wanneer een persoon permanent op die locatie zou verblijven (ook tijdens een hoogwater).

Uit de kaarten blijkt dat het overstromingsgevaar langs de beken in Zuid-Limburg vergelijkbaar is met dat langs de buitendijkse gebieden van de Maas. De overstromingsvlaktes langs de Roer kennen het grootste overstromingsgevaar. Van oudsher is er niet of nauwelijks gebouwd in deze overstromingsvlaktes (de dorpen langs de Roer liggen op hogere gronden), waardoor het risico klein is.

Maatregelen die kunnen worden getroffen om de gevolgen van overstromingen (schade en kans op slachtoffers) te beperken hebben vooral betrekking op laag twee en drie van de meerlaagsveiligheidsbenadering (ruimtelijke adaptatie en crisismanagement). Door de landelijke beleidstafel worden in dat kader ook vergroting van het water- of risicobewustzijn en herstel genoemd. Voorbeelden van maatregelen waaraan men zou kunnen denken zijn:

- Geen nieuwbouw op gevaarlijke plekken (bijv. overstromingsvlakte Roer)
- Aangepast bouwen op iets minder gevaarlijke locaties (minder gevaarlijke plekken Geuldal en Geleenbeek)
- Risicobewustzijn burgers vergroten (communicatie, informatieloket)
- Goede voorspellingssystemen en tijdige waarschuwing van burgers inclusief handelingsperspectief
- Goede informatievoorziening aan burgers tijdens een ramp
- Evacuatieplanning en crisisbeheersing waarbij rekening is gehouden met gevaarlijke plekken (welke straten eerst? Welke straten en pleinen snel afsluiten voor publiek?)

De gevaarkaarten (en de onderliggende waterdieptekaarten) kunnen hierbij helpen.

## **Bescherming tegen wateroverlast**

Veel bebouwde gebieden in Zuid-Limburg hebben een norm voor de bescherming tegen wateroverlast van 1:25 per jaar (in de rest van Nederland geldt voor bebouwd gebied veelal een norm van 1:100 per jaar). Hiertoe is in 2009 besloten omdat een 1:100 beschermingsniveau op basis van kosten-baten niet haalbaar was. De resultaten van deze studie laten ook zien dat zeer omvangrijke en ingrijpende maatregelen nodig zijn om aan dit beschermingsniveau te voldoen.

Ongeacht de hoogte van de norm kunnen zich altijd situaties voordoen die extremer zijn dan de norm waarop het watersysteem is ingericht. Het is daarom sowieso belangrijk om maatregelen te treffen die de gevolgen beperken. Dit kan door ruimtelijke adaptatie en verbetering van het crisismanagement, maar ook door het vergroting van het water- of risicobewustzijn van burgers en door in te zetten op een sneller herstel.

## **Vervolg**

Deze watersysteemanalyse beperkt zich tot een eerste verkenning van typen maatregelen op systeemniveau. De verkenning geeft inzicht in de omvang van de effectiviteit van de diverse type maatregelen. Om te komen tot maatregelen die uitgevoerd kunnen worden is een aantal vervolgstappen nodig. Zo moeten de maatregelen locatiespecifiek worden gemaakt en moet voor die locatiespecifieke maatregelen in meer detail naar de effecten worden gekeken. Dergelijk gedetailleerd onderzoek maakte geen deel uit van deze studie, maar zullen in het vervolgtraject vanuit het programma Waterveiligheid en Ruimte Limburg (WRL) worden opgepakt.

Voor dit vervolg is het noodzakelijk om een goed (beter dan nu) simulatiemodel ter beschikking te hebben. Dit model moet zowel op systeemniveau als ook op detailniveau in staat zijn om effecten van maatregelen door te rekenen. De uitdaging zal zijn om juist ook het hydrologische deel van het model te verbeteren, gezien de beperkte hoeveelheid van goede metingen van hoogwaters. Het is dan ook nodig om hier gemeenschappelijk prioriteit aan te geven: goede metingen om een goed model te bouwen en daarmee een goede onderbouwing voor maatregelen te nemen.

# 14 Referenties

## 14.1 Rapporten die deel uitmaken van de watersysteemanalyse

### 14.1.1 Rapporten casestudies (Fase 1 van de watersysteemanalyse)

#### **Overkoepelend rapport:**

Asselman, N., Heeringen, K.J. van, J. de Jong, T. Geertsema (2022) Juli 2021 overstrooming en wateroverlast in Zuid-Limburg - Eerste bevindingen voor Valkenburg, Geulmonding, Roermonding en Eygelshoven

#### **Rapportage per casestudie:**

De Jong, J. en N. Asselman (2022) Analyse overstroomingen Geulmonding - Watersysteemevaluatie Waterschap Limburg. Deltares rapport 11207700-000-ZWS-0013.

Geertsema, T. en N. Asselman (2022) Analyse hoogwater Roermonding - Watersysteemevaluatie Waterschap Limburg. Deltares rapport 11207700-000-ZWS-0020.

Van Heeringen, K.J. van, N. Asselman, A. Overeem, J. Beersma, S. Philip (2022a) Analyse overstrooming Valkenburg - Watersysteemevaluatie Waterschap Limburg. Deltares rapport 11207700-000-ZWS-0014.

Van Heeringen, K.J. van, N. Asselman en L. van Wolfswinkel (2022b) Analyse wateroverlast Eygelshoven - Watersysteemevaluatie Waterschap Limburg. Deltares rapport 11207700-000-ZWS-0010.

### 14.1.2 Rapporten systeembrede analyse (Fase 2 van de watersysteemanalyse)

#### **Overkoepelend rapport (voorliggend rapport):**

Asselman, N. en KJ van Heeringen (2022) Een watersysteemanalyse – wat leren we van het hoogwater van juli 2021? Inzichten in het functioneren van beeksystemen bij grote hoeveelheden neerslag en het effect van systeemmaatregelen. Deltares rapport 11207700-000-ZWS-0035.

#### **Technische achtergrondrapportage per deelstudie:**

Bosch, S. (2022), Analyse & Maatregelen wateroverlast in de Geleenbeek, Siebe Bosch Hydroconsult, 2022

Horn, G. en R. Hurkmans (2022) Analyse & Maatregelen wateroverlast Roer. HKV rapport PR4714.10.

Jetten, V. (2022) Evaluatie van potentiële veranderingen in landgebruik op oppervlakte afvoer - een model analyse met openLISEM van de stroomgebieden Ransdaal en de Strabeek. Rapport Universiteit Twente, Department of Applied Earth Sciences, ITC - Faculty of Geoinformation Sciences and Earth Observation.

Weijers, L. en D. Heuvelink (2022), Analyse & Maatregelen wateroverlast in de Geul, RHDHV rapport BI6792-RHD-ZZ-XX-RP-Z-0005

Slager, K. en S. Rikkert (2022) Gevolgen overstromingen Limburg: Economische schade en kans op verdrinken. Deltares rapport 11207700-007-ZWS-0011\_v0.1

Stoutjesdijk T., R. van der Meij, J. Caspers en L. Halbmeijer (2022) Analyse waterkeringen Limburg - Hoogwater juli 2021. Rapport van Deltares, HKV lijn en water en Witteveen & Bos, 11207700-007-ZWS-0010.

## 14.2 Overige referenties

Beleidsstafel wateroverlast en hoogwater (2022) : Voorkomen kan niet, voorbereiden wel: allemaal aan de slag. Eindadvies Beleidsstafel wateroverlast en hoogwater, december 2022.

Bogena, H.R., C. Montzka, J.A. Huisman, A. Graf, M. Schmidt, M. Stockinger, C. von Hebel, H.J. Hendricks-Franssen, J. van der Kruk, W. Tappe, A. Lücke, R. Baatz, R. Bol, J. Groh, T. Pütz, J. Jakobi, R. Kunkel, J. Sorg, and H. Vereecken (2018) The TERENORur Hydrological Observatory: A multiscale multi-compartment research platform for the advancement of hydrological science. *Vadose Zone J.* 17:180055. doi:10.2136/vzj2018.03.0055

De Bruijn, K. M., F. Klijn, B. van de Pas & C. T. J. Slager (2015) Flood fatality hazard and flood damage hazard: combining multiple hazard characteristics into meaningful maps for spatial planning. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 1297–1309, doi:10.5194/nhess-15-1297-2015

De Graaf-van Dinther et al. (2021), Climate Resilient Urban Areas, Governance, Design and Development in Coastal Delta Cities, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-57537-3>

De Jong, J. en N. Asselman (2019) Topvervlakking Maas - Het effect van golfvormen, bergingsgebieden en rivierverruiming. Deltares rapport 11203684-003-ZWS-0002.

De Jong, J., F. Diermanse, R. Agtersloot en T. Geertsema (2022) Systeemwerking Maas en waterveiligheid: Onderzoek voor beleidsstafel wateroverlast en hoogwater. Deltares rapport 11208036-012-ZWS-0003. Maps for natural risk management

Dransch, D., J. Etter, U. Walz (2005) Maps for natural risk management. Mapping approaches into a changing world; A Coruna. 10.

Eingrüber, N en W. Korres (2022) Climate change simulation and trend analysis of extreme precipitation and floods in the mesoscale Rur catchment in western Germany until 2099 using Statistical Downscaling Model (SDSM) and the Soil & Water Assessment Tool (SWAT model). *Science of The Total Environment*, 838-1, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155775>.

Endendijk, T., W. Botzen, K. Slager, H. de Moel, J. Aerts, M. Kok en B. Kolen (2022) Resultaten vragenlijst Hoogwater Limburg 2021: Ervaren waterstanden, schades, en genomen risicoreductiemaatregelen.

Goudenhoofd, E., L. Delobbe en M. Journee (2022) The rainfall estimation challenge for the July 2021 flood. Presentatie gegeven op het Internationale Maassymposium, 17 oktober 2022 te Luik.

Homann, C. (2022) Forecast-System for the Rur-Reservoirs. Presentation given at the International Meuse Symposium, Liege.

Jonkman, S.N. and E. Penning-Rowsell, 2008. Human Instability in Flood Flows. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 44(4):1-11. DOI: [10.1111/j.1752-1688.2008.00217.x](https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00217.x)

- Klein, A. (2022), Hydrological Response of the Geul Catchment to the Rainfall in July 2021, [master thesis](#) TU Delft
- Laseroms, R, 2021. Oplossingen voor diepe insnijding van beken in het heuvelland. Rapport nummer 2021/OBN253-HE, Kennisnetwerk OBN, Driebergen.
- LIWO (2022) Landelijk Informatiesysteem Water en Overstromingen, <https://basisinformatie-overstromingen.nl>
- NOS (2021) 400 miljoen euro schade door overstroming Valkenburg, 2300 huizen beschadigd. <https://nos.nl/artikel/2390198-400-miljoen-euro-schade-door-overstroming-valkenburg-2300-huizen-beschadigd>
- Rijksoverheid (2022) Kamerbrief over schadeafhandeling wateroverlast juli 2021. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2022/07/08/tk-schade-afhandeling-wateroverlast-juli-2021>
- Rijkswaterstaat Projectbureau VNK (2014) De veiligheid van Nederland in kaart – eindrapportage. VNK-Rapport HB 2540621
- RVO (2021) Quick Scanrapport overstromings- en regenvalschade in Limburg en het onbedijkte deel langs de Maas in Noord-Brabant juli 2021. Versie 1.0. Definitief.
- Sanders, B. F., Schubert, J. E., Goodrich, K. A., Houston, D., Feldman, D. L., Basolo, V., et al. (2020). Collaborative modeling with fine-resolution data enhances flood awareness, minimizes differences in flood perception, and produces actionable flood maps. *Earth's Future*, 7, e2019EF001391. <https://doi.org/10.1029/2019EF001391>
- Slager, K., A. Becker, L. Bouaziz, and J. Kwadijk (2022) Rapid assessment study on the Geul river basin: Screening of flood reduction measures. Deltares report.
- STOWA, 2019. WaterSchadeSchatter via <https://www.waterschadeschatter.nl>
- Stroming (2022) Analyse functioneren klimaatbuffers in het Geul stroomgebied tijdens extreme neerslag in juli 2021. Rapport van Bureau Stroming in opdracht van Natuurmonumenten
- Van de Pas, B., K. Slager, K.M. de Bruijn & F. Klijn (2011) Overstromingsrisicozonering. Fase 1: Methode voor het identificeren van overstromingsgevaarzones. Deltares-rapport 1204144-019.
- Van de Pas, B., K. Slager, K.M. de Bruijn & F. Klijn (2012) Overstromingsrisicozonering. Fase 1 en 2: Het identificeren van overstromingsgevaarzones. Deltares-rapport 1205160.
- Van der Veen, R. en R. Agtersloot (2021) Topafvoeren hoogwater Maas juli 2021. Rura-Arnhem en Agtersloot Hydraulisch Advies rapport P210910R v2.0 d.d. 16 december 2021
- Verbond van Verzekeraars, 2022. Watersnood Limburg. <https://www.verzekeraars.nl/verzekeringstemas/duurzaamheid-en-klimaat/duurzaamheid-en-klimaat/klimaat/watersnood-limburg> en <https://www.verzekeraars.nl/publicaties/actueel/watersnood-limburg-ruim-95-particuliere-schades-afgehandeld-door-verzekeraars>
- Volkskrant (2022) Rijk keerde tot nu toe 34 miljoen euro uit aan gedupeerden watersnood Limburg. <https://www.volkskrant.nl/nieuws-achtergrond/rijk-keerde-tot-nu-toe-34-miljoen-euro-uit-aan-gedupeerden-watersnood-limburg~bdd1f170/>
- Weeronline (2021), <https://www.weeronline.nl/nieuws/neerslag-en-noodweer>

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

**Deltares**

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