

Analyse overstrooming Valkenburg

Watersysteemevaluatie Waterschap Limburg



Analyse overstrooming Valkenburg

Watersysteemevaluatie Waterschap Limburg

Auteur(s)

Klaas-Jan van Heeringen
Nathalie Asselman
Aart Overeem (KNMI)
Jules Beersma (KNMI)
Sjoukje Philip (KNMI)

Partners

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI), DE BILT

Foto voorpagina: bron waterschap Limburg, drone-opname van het overstroomde centrum van Valkenburg op 15 juli 2021

Analyse overstrooming Valkenburg

Watersysteemevaluatie Waterschap Limburg

Opdrachtgever	Waterschap Limburg
Contactpersoon	de heer drs. A.G.A Janssen
Referenties	
Trefwoorden	Overstroming, Geul, Valkenburg, juli 2021

Documentgegevens

Versie	0.3
Datum	26-04-2022
Projectnummer	11207700-000
Document ID	11207700-000-ZWS-0014
Pagina's	59
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Klaas-Jan van Heeringen	
	Nathalie Asselman	
	Jules Beersma (KNMI)	
	Aart Overeem (KNMI)	
	Sjoukje Philip (KNMI)	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.3	Klaas-Jan van Heeringen	Elgard van Leeuwen (TU Delft)	Bianca Peters b.a.	

Samenvatting

In juli 2021 zijn grote delen van Limburg getroffen door hevige regenval. In korte tijd steeg het water in de Limburgse beken tot recordhoogte. Dit leidde op verschillende plaatsen tot overstromingen en daarmee tot schade aan huizen en bedrijven. In deze casestudie-analyse is voor Valkenburg onderzocht waarom sprake van grootschalige overstromingen en de Geul de grote hoeveelheid water niet goed af kon voeren en buiten haar oevers trad.

Voor Valkenburg geldt een beschermingsnorm tegen wateroverlast van 1:25 per jaar. Dat betekent dat het watersysteem zo moet zijn ingericht dat het een hoogwater met een herhalingstijd van 25 jaar veilig af kan voeren. Onder extremere omstandigheden, zoals in juli 2021, kunnen delen van de stad onder water lopen.

In juli viel in Zuid-Limburg lokaal meer dan 160 mm neerslag in 48 uur. In de Ardennen viel op een aantal locaties zelfs meer dan 250 mm in 48 uur. In het stroomgebied van de Geul viel gemiddeld 128 mm neerslag. De meeste neerslag viel in het Belgische deel van het stroomgebied. De herhalingstijd van deze extreme neerslaggebeurtenis wordt voor de Geul geschat op 900 jaar. Bij het afleiden van die herhalingstijd is echter gebruik gemaakt van de gemiddelde Nederlandse statistiek, waarbij geen rekening is gehouden met orografische effecten (de kans op grote hoeveelheden neerslag is groter in het heuvelland dan in vlakke gebieden). Daardoor kan deze herhalingstijd met een factor 2 zijn overschat. In dat geval zou de herhalingstijd ongeveer 500 jaar zijn. Door klimaatverandering kan een bui zoals gevallen in juli 2021 nog vaker voorkomen. In 2050 kan dat 3 keer vaker zijn en in 2085 kan dat zelfs wel 6 keer zo vaak zijn als nu.

De extreme hoeveelheid neerslag in juli 2021 leidde tot zeer hoge afvoeren op de Geul en de Roer. Modelberekeningen laten zien dat de piekafvoer van de Geul bij Valkenburg ongeveer 135 m³/s was. Het meeste water (ongeveer 90 m³/s) kwam uit België. In België kwam bijna 60% van de gevallen neerslag tot afstroming. Voor het *hele* stroomgebied van de Geul geldt dat ruim 30% van de gevallen neerslag naar de Maas is afgevoerd. Een groot deel van de gevallen neerslag is dus 'gebufferd', onder meer in de bodem en in de overstroomde gebieden langs de Geul. De hoge afvoer op de Geul heeft geleid tot grootschalige overstromingen langs de hele Geul. Ook het centrum van Valkenburg liep onder water. Gemeten waterdieptes bedroegen daar ongeveer 1.25 m.

Om overstromingen in het centrum van Valkenburg te verminderen of te voorkomen kan gedacht worden aan de aanleg van een tunnel of waterkeringen. Deze maatregelen zijn lokaal zeer effectief, maar hebben geen (of een negatief) effect op boven- en benedenstrooms gelegen gebieden. Waterkeringen hebben als bijkomend nadeel dat ze een enorme invloed hebben op de beleving van het oude stadscentrum. Om een hoogwater zoals dat van afgelopen zomer te kunnen keren zouden ze namelijk 3 meter hoog moeten zijn. Een andere effectieve maar ingrijpende maatregel is het verlagen van de oeverzone langs de Geul, in het centrum van de stad. Aanpassing van de bruggen kan lokale opstuwung verminderen, maar heeft te weinig effect om overstroming van het centrum te voorkomen. Een maatregel die niet alleen effect heeft op de overstromingen in Valkenburg, maar op de overstromingen over grotere gebieden langs de Geul, is de aanleg van waterbuffers. Om overstromingen van afgelopen zomer in Valkenburg te voorkomen zou 6 tot 10 miljoen m³ water gebufferd moeten worden.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Casestudie Valkenburg	8
1.3	Onderzoeksvragen	8
1.4	Aanpak	9
1.5	Leeswijzer	9
2	Gebiedsbeschrijving	10
2.1	Algemeen	10
2.2	Hydrologie	11
2.3	Toegepaste normering en toetsing	11
2.4	Waterbeheer rond Valkenburg	12
3	Analyse neerslag	14
3.1	Gemeten neerslagvolumes	14
3.2	Duiding herhalingstijd	17
4	Analyse wateroverlast en schade	19
4.1	Afvoeren, waterstanden en schade zomer 2021	19
4.2	Reproduceren overstrooming met modelberekeningen	22
4.3	Conclusies	28
5	Verkenning van mogelijke maatregelen	30
5.1	Algemeen	30
5.2	Tunnel	31
5.3	Kades verhogen	33
5.4	Herinrichting – accoladeprofiel	34
5.5	Buffering en waterberging bovenstrooms	35
6	Conclusies en aanbevelingen	37
6.1	Conclusies	37
6.2	Aanbevelingen	39
	Referenties	40
A	Metingen waterhoogtes en afvoeren	41

B	Detailanalyse neerslag	44
B.1	Dataset juli 2021	44
B.1.1	Neerslagvolumes op basis van radardata	44
B.1.2	Herhalingstijden op basis van radardata	48
B.1.3	Herhalingstijden stationsdata	50
B.2	Attributiestudie	56
B.3	Dankwoord	57
C	Afleiding “gevaar” bij overstromingen	58

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

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

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

Voorafgaand aan de systeembrede evaluatie voor heel Zuid-Limburg is aan Deltares gevraagd de wateroverlast en overstromingen in vier 'casestudies' te analyseren. Deze casestudies zijn: Valkenburg, de Geulmonding nabij Meerssen en Bunde, de Roermonding nabij Roermond en Eygelshoven.

In alle vier de geselecteerde gebieden hebben zich afgelopen zomer problemen voor gedaan, maar de aard van de problemen waren verschillend. Valkenburg kampte met grootschalige overstromingen vanuit de Geul. Dit gold ook voor de Geulmonding, maar hier speelde de interactie met het hoogwater op de Maas. Bij Roermond was de vraag of waterstanden op de Roer lager zouden zijn geweest wanneer de groene rivier zou zijn ingezet. En bij Eygelshoven stonden eind juni de straten en naastgelegen huizen onder water doordat grote hoeveelheden neerslag oppervlakkig afstroomden.

Voor iedere casestudie wordt een aanscherping van de *fact finding* uitgevoerd. Er wordt gekeken naar het functioneren van het watersysteem en een eerste handelingsperspectief. Omdat de analyses binnen 4 maanden gereed moeten zijn, zijn de analyses vooral kwalitatief of gebaseerd op principeberekeningen. De kwaliteit van de resultaten wordt gelimiteerd door de beschikbare tijd. Gedetailleerdere analyses maken deel uit van de systeembrede evaluatie met een langere doorlooptijd.

Dit rapport beschrijft de analyse van de overstroming in de casestudie Valkenburg.

1.2 Casestudie Valkenburg

Het karakteristieke, oude centrum van de stad Valkenburg werd op 14 juli getroffen door een overstroming van de Geul. De overstroming leidde tot grote schade, zowel directe schade aan infrastructuur, panden en bedrijven als indirecte schade als gevolg van misgelopen inkomsten.

De schade in Valkenburg was groot, maar ook andere dorpen langs de Geul werden overstroomd. Het waterschap heeft besloten de problematiek van het centrum van Valkenburg (dus niet de gemeente Valkenburg aan de Geul) in de watersysteemevaluatie mee te nemen als casestudie. Omdat de casestudie-analyses binnen 4 maanden gereed moeten zijn, zijn de analyses vooral kwalitatief en gebaseerd op principeberekeningen. De mate van detail van de resultaten wordt gelimiteerd door de beschikbare tijd. Eventueel gedetailleerdere analyses maken deel uit van vervolgonderzoek.

De keuze voor Valkenburg is enerzijds om recht te doen aan de problematiek van Valkenburg, maar anderzijds vooral ook om inzicht te krijgen in omvang en effecten mogelijke typen maatregelen, zowel voor Valkenburg als later voor de andere dorpen.

1.3 Onderzoeksvragen

In Valkenburg waren de waterstanden extreem hoog, waardoor overstromingen en forse schade is ontstaan. Meer inzicht in het ontstaan van de overstromingen is gewenst.

De hoofdvragen voor deze casestudie zijn: *Wat is er waterhuishoudkundig in Valkenburg gebeurd en welke kansrijke maatregelen kunnen de risico's in de toekomst verkleinen?*

De onderliggende vragen hebben betrekking op (1) het zo nauwkeurig mogelijk beschrijven van de gebeurtenissen van juli 2021 (aanscherping van de fact finding rapporten die zijn uitgevoerd door adviesbureau WSP (WSP, 2021) enerzijds en ENW (ENW, 2021) anderzijds), (2) het vergroten van het systeembegrip (hoe functioneert het watersysteem van de Geul rondom Valkenburg in geval van hevige neerslag?) en (3) het verkennen van mogelijke maatregelen. Concreet zijn de volgende onderzoeksvragen meegegeven aan Deltares:

- 1) Wat is er waterhuishoudkundig en qua schade gebeurd? (fact finding)
 - a) Welke afvoeren en waterstanden zijn opgetreden?
 - b) Hoe bijzonder was dit? (overschrijdingskans, relatie tot de norm)
 - c) Welke gebieden zijn overstroomd?
 - d) Waar is veel schade opgetreden?
 - e) Wat was de meest belangrijke oorzaak van de opgetreden schade?
 - f) Functioneerden de regelkunstwerken?
 - g) Was er sprake van blokkades van bruggen?
- 2) Systeembegrip: hoe functioneert het watersysteem bij Valkenburg onder extreem natte omstandigheden?
 - a) In welke mate dragen blokkades van bruggen bij aan hoge waterstanden?
- 3) Maatregelen/beleid:
 - a) Welk type maatregelen zijn kansrijk op de korte termijn en lange termijn?
 - b) Hoe effectief zijn deze maatregelen en de overige door derden gesuggereerde maatregelen (door de media, externe indieners). Denk hierbij aan het aanleggen van een tunnel of het afgraven van gebieden naast de beek? (effecten lokaal én benedenstrooms).
 - c) Hoe hoog zouden kademuren in Valkenburg moeten worden om de stad te beschermen tegen een 1:100 of 1:1000 hoogwater?

1.4 Aanpak

Het onderzoek is gericht op analyse en duiding van de problematiek en verkenning van mogelijke effectieve maatregelen, ook gerelateerd aan te hanteren ontwerpnormen.

Voor de duiding van de neerslag (hoeveelheden en overschrijdingskansen) is gebruik gemaakt van beschikbare informatie van meetstations en radarbeelden, als ook de neerslagstatistieken die zijn opgesteld door de STOWA. Deze analyses zijn uitgevoerd door het KNMI.

De overstroming zelf is met behulp van het bestaande SOBEK-1D2D model geanalyseerd. Op die manier zijn lokale en regionale effecten van maatregelen in kaart gebracht.

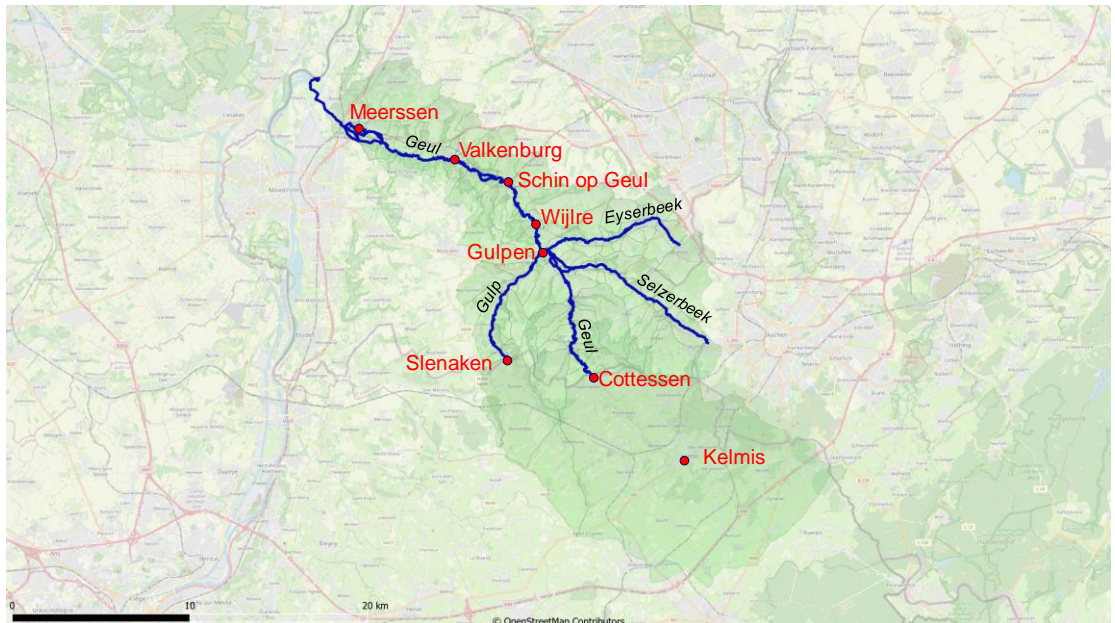
1.5 Leeswijzer

Na deze inleiding, volgt in hoofdstuk 2 een uitgebreidere beschrijving van het gebied. Hoofdstuk 3 gaat in op de gevallen neerslag (hoeveelheden en herhalingstijden). In hoofdstuk 4 gaan we dieper in op de wateroverlast en opgetreden schade. Een eerste verkenning van mogelijke maatregelen staat beschreven in hoofdstuk 5 En in hoofdstuk 6 sluiten we af met de belangrijkste conclusies en aanbevelingen.

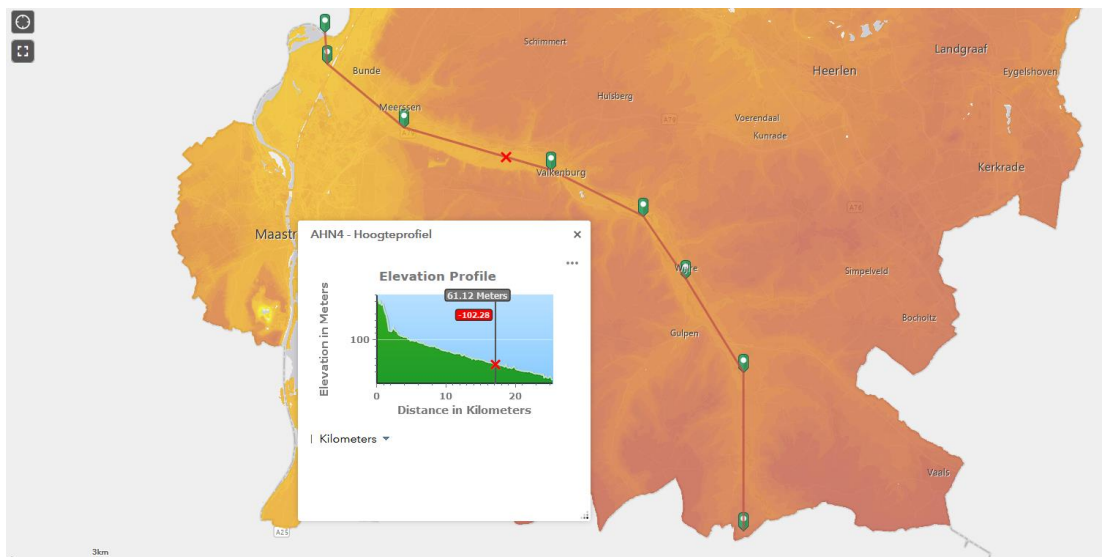
2 Gebiedsbeschrijving

2.1 Algemeen

Het stroomgebied van de Geul wordt gekenmerkt door heuvelslandschap (zie Figuur 1). De Geul en enkele van de zijrivieren ontspringen in België en komen de grens van Nederland en het beheergebied van waterschap Limburg binnen bij Cottessen (de Geul) en Slenaken (de Gulp). Ten noordoosten van Gulpen komen de zijbekken de Gulp, de Selzerbeek en de Eyserbeek samen in de Geul. De Geul stroomt bij Bunde in de Maas. De omvang van het totale stroomgebied is circa 340 km².



Figuur 1 Overzichtkaart van het stroomgebied van de Geul met de zijrivieren



Figuur 2 Hoogteprofiel van de loop van de Geul van Cottessen tot aan uitstroompunt in de Maas

De Geul zelf kent een totaal hoogteverschil van orde 250 m tot het uitstroompunt in de Maas op circa NAP+45 m. De totale lengte bedraagt 58 km. Hiervan ligt 21 km in België en 37 km in Nederland. Het gemiddelde verval bedraagt ongeveer 4.3 m per km, maar zoals te zien is in het hoogtepfiel in Figuur 2, is het deel van de Geul bovenstrooms van Gulpen beduidend steiler dan benedenstroomse van Gulpen.

2.2 Hydrologie

De Geul stroomt door een heuvelachtig landschap. Op de plateaus liggen veel landbouwakkers. De steile hellingen zijn veelal bebost en in de dalen vindt men vooral grasland. Het unieke aan de Geul is dat de beek voor Nederlandse begrippen snel stroomt en dat het een van de weinige rivieren in Nederland is die weinig oeverbescherming heeft waardoor min of meer natuurlijke meandering optreedt.

Door het voor Nederlandse begrippen relatief grote verhang in het landschap, stroomt ten tijde van hevige neerslag het water snel van de hellingen af richting de beken. De beken hebben in de beekdalen op veel plekken ruimte om buiten de oevers te treden zonder dat schade optreedt, maar bij de dorpen ontstaan problemen bij hoge afvoeren; dat zijn knelpunten en plekken waar schade kan optreden.

Om voldoende veiligheid tegen wateroverlast en overstroming te kunnen bieden heeft het waterschap (onder andere) op grote schaal regenwaterbuffers aangelegd. Deze buffers liggen vooral in de zijbeken, droogdalen (dalen zonder beekloop) en op hellingen in hogere delen van het stroomgebied. In deze buffers wordt regenwater opgevangen en vertraagd afgevoerd. Het vullen en ook weer ledigen van de buffers gaat via een vaste constructie; er komt – met uitzondering van enkele grote buffers - geen sturing of elektronica aan te pas. De uitlaat is zo ingesteld dat een volle buffer in ongeveer één dag weer helemaal is leeg gelopen. De overstromingsvlaktes van het Geuldal zelf fungeren uiteraard ook als buffer waardoor afvoergolven worden afgevlakt.

Het effect van lokale hoosbuien – zoals in 2012 ten zuiden van Slenaken – is doorgaans beperkt tot de directe omgeving. Pas wanneer het om grootschalige neerslag gaat worden de afvoeren in het benedenstroomse deel van de Geul zo groot dat wateroverlast kan ontstaan. Dit bleek ook bij de regenval van 6 en 7 februari 2022, waarbij veel regen viel in het Belgische deel van het Geulstroomgebied. Voordat de afvoergolf bij Valkenburg was, was de afvoerpiek al weer wat in hoogte afgenomen (overigens beperkt, omdat de Geul benedenstrooms niet buiten de oevers trad). Maatgevende condities (waarbij de waterlopen buiten de oevers treden) in dit deel van de Geul ontstaan pas wanneer het één of meer dagen lang op grote schaal in het stroomgebied regent. Dit was onder meer het geval in juli 2021.

2.3 Toegepaste normering en toetsing

De provincie Limburg heeft de normering voor regionale wateroverlast beschreven in het Provinciaal Waterplan en vastgelegd in de Provinciale Omgevingsverordening. Voor Valkenburg is de beschermingsnorm 1:25 (uitgedrukt in de kans op overstroming per jaar), net als voor veel bebouwde kernen in het Heuvelland van Zuid-Limburg. Dit is lager dan de norm die voor de meeste bebouwde kernen elders in Limburg en Nederland langs regionale wateren geldt (veelal 1:100). Deze afwijkende norm is in 2010 tot stand gekomen op grond van een kosten-baten analyse: het bleek toen voor veel Zuid-Limburgse kernen niet kosteneffectief om een hogere norm dan 1:25 vast te stellen.

Concreet betekent deze norm dat de burgers van Valkenburg mogen verwachten dat een situatie met een overschrijdingskans van 1:25 per jaar niet tot schade leidt. Er mag wel water op straat staan en daarmee enige wateroverlast optreden. Het betekent ook dat extremere situaties wel degelijk tot schade kunnen leiden.

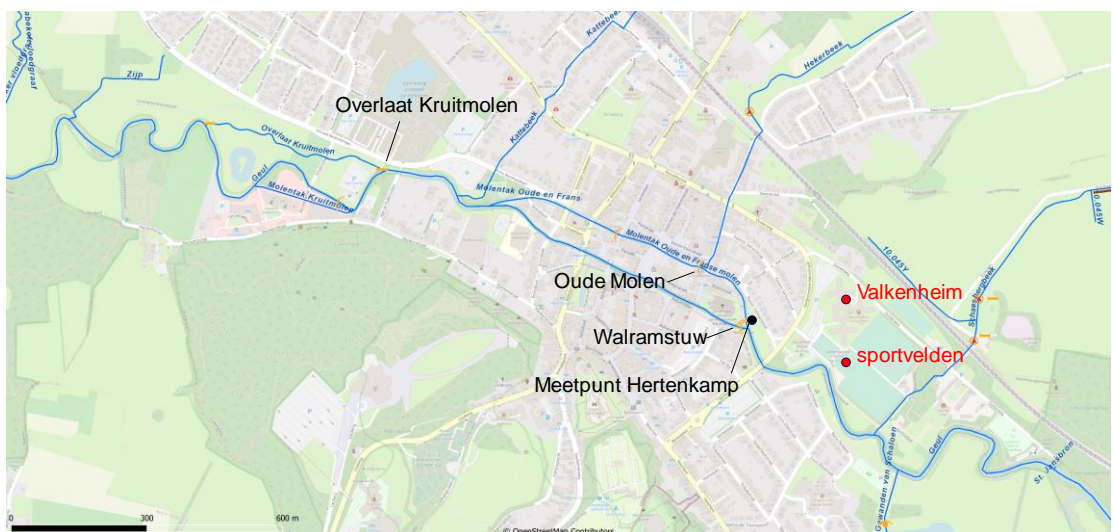
Het waterschap Limburg heeft het watersysteem van de Geul in 2014 en 2015 getoetst aan deze normen door middel van berekeningen met een hydrologisch neerslagafvoermodel in combinatie met een hydraulisch Sobek-1D2D simulatiemodel (RHDHV, 2015). Het neerslagafvoermodel is gebouwd met HBV (software van SMHI). In dit model wordt het proces van neerslag tot afvoer gemodelleerd. Dit gebeurt op het niveau van deelstroomgebieden. Deze variëren sterk in grootte: zo is het Belgische deel van de Gulp en van de Geul in dit model elk slechts één apart deelstroomgebied.

Het hydraulische SOBEK-1D2D model berekent het verloop van de afvoeren, waterhoogtes en overstromingen. Hierbij is ook rekening gehouden met de invloed van duikers en bruggen. Het model bevat alleen het Nederlandse deel van het stroomgebied. Op de grens (bij Slenaken, Cottessen etc.) worden de afvoeren “opgelegd” uit het neerslagafvoermodel. De neerslag die in het Belgische deel van het stroomgebied valt is dus als randvoorwaarde meegenomen, maar de waterstanden in België worden niet in detail gemodelleerd.

Volgens de in 2014 uitgevoerde toetsing met dit model voldoet het watersysteem in Valkenburg niet overal aan de huidige normen tegen wateroverlast. De T=25 afvoeren en waterhoogtes zijn zo dat dan tot 15 cm overstroming van de straten in Valkenburg optreedt. Het is dan ook door het waterschap als een nog op te lossen knelpunt opgenomen in het waterbeheerprogramma 2022-2027.

2.4 Waterbeheer rond Valkenburg

De Geul komt aan de oostkant Valkenburg binnen (zie Figuur 6). Na het passeren van de sportvelden en verpleeghuis Valkenheim splitst de Geul zich in twee takken: links naar de Geul zelf en rechts naar de Molentak. De waterverdeling tussen beide takken wordt gestuurd door middel van twee schuiven in elk van de takken: de Walramstuw (inclusief vistrap) voor de Geul (Figuur 4) en de Oude Molen voor de Molentak. De aansturing van deze schuiven gebeurt automatisch op basis van een regeling gebaseerd op de waterstand. Het peilbeheer is afgestemd op het functioneren van de vispassage en de veilige afvoer van water bij een hoog debiet. Bij verhoogde waterstanden gaan de schuiven open.



Figuur 3 Situatie van de Geul rond Valkenburg



Figuur 4 Zicht op de Walramstuw rechts en vispassage links (foto Nathalie Asselman, genomen vanaf benedenstroomse zijde, richting oosten)

Het streefpeil bovenstrooms van de Walramstuw is ingesteld op NAP+67.25 m. Ter beveiliging (tegen eventuele storingen) is een contactelektrode op NAP+68.40 m aangebracht waarop bij activering de Walramstuw opent.

Het doorstroomprofiel van zowel de Geul als de Molentak is krap. Door bebouwing pal langs de waterlopen is er aan weerszijden geen extra ruimte (zie Figuur 5). Weliswaar zijn er kademuren, maar die hebben boven het straatniveau geen waterkerende functie; daar zitten veel openingen in. Ook de gevels van de huizen zijn niet ontworpen op het keren van water.



Figuur 5 Zicht op het doorstroomprofiel van de Geul (foto Nathalie Asselman)

Aan de westkant van Valkenburg is recent overlaat Kruitmolen aangelegd om meer ruimte te bieden aan de Geul om water af te voeren en zo de waterstanden te verlagen.

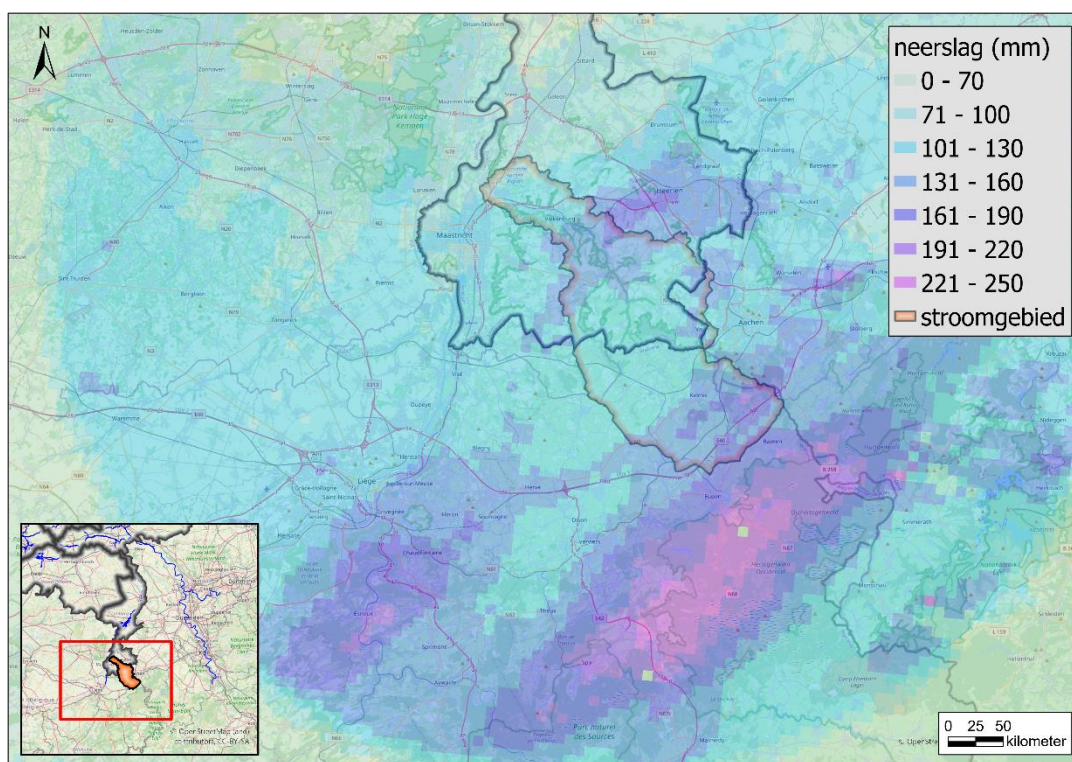
3 Analyse neerslag

3.1 Gemeten neerslagvolumes

Gedurende 13 en 14 juli 2021 is in het stroomgebied van de Geul veel neerslag gevallen. Deze neerslag was onderdeel van een groot weersysteem, gelegen over de Ardennen, de Eifel en Zuid-Limburg. Het totale weersysteem is reeds uitgebreid beschreven in diverse rapporten (zie ENW, 2021 en WWA, 2021) en daarom hier niet verder uitgewerkt. We beperken ons tot de neerslag in het stroomgebied van de Geul.

KNMI heeft op basis van de beschikbare neerslagmeetpunten en neerslagradar een zo goed mogelijke neerslagdataset opgesteld voor beide dagen. Hierbij is alle beschikbaar gestelde data gebruikt van Nederlandse, Belgische en Duitse organisaties.

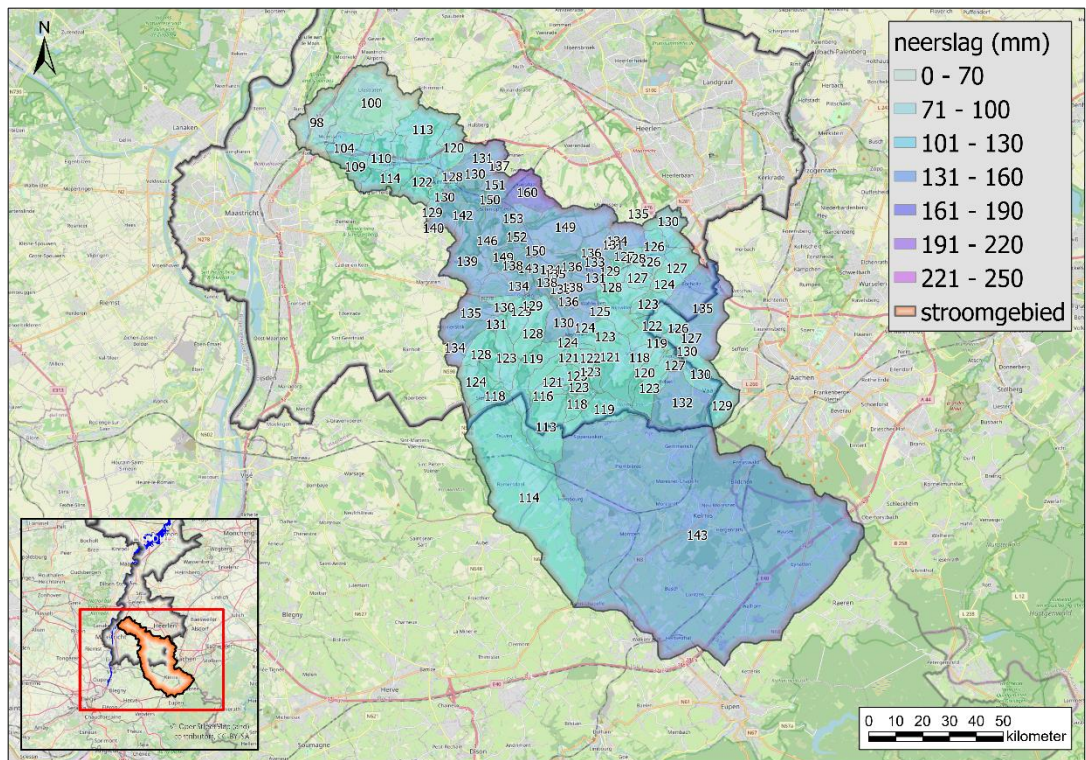
Uiteindelijk resulteert dit in een vlakdekkend 1x1 km raster met uurwaarden voor de neerslag (zie Figuur 6). In bijlage B is de aanpak in detail beschreven.



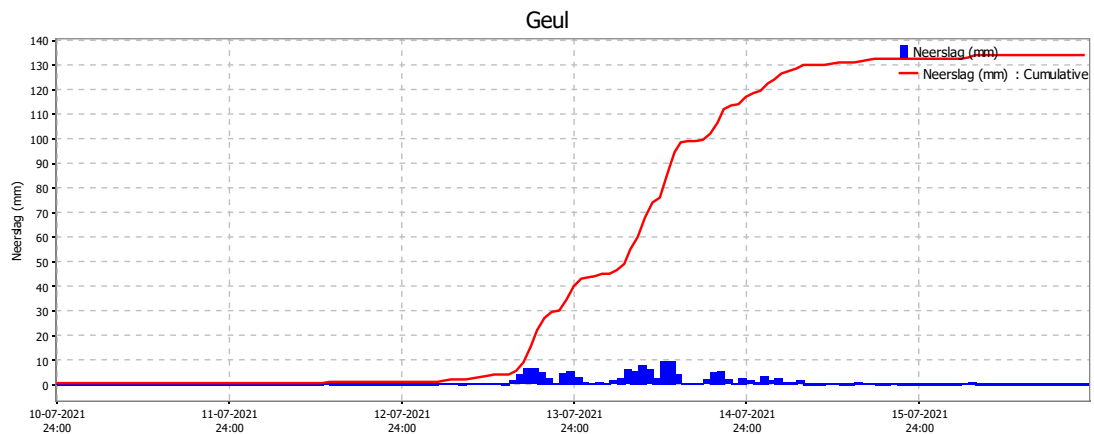
Figuur 6 Ruimtelijke verdeling van de neerslag (neerslagsom van 13 juli 10:00 tot 15 juli 10:00)

Ondanks de uitgestrektheid van het weersysteem, is er een duidelijke ruimtelijke verdeling van de neerslag. Dat is ook goed te zien in Figuur 7 die de neerslagsom toont per deelstroomgebied. Terwijl dieper in de Ardennen en de Eifel neerslagsommen van meer dan 200 mm zijn waargenomen, is de gebiedsgemiddelde neerslag voor de zuidelijke deelstroomgebieden van de Geul al veel minder. Het gebied bovenstrooms van Cottessen komt tot een neerslagsom van 143 mm terwijl in de buurt van Bunde (bij het uitstroompunt van de Geul in de Maas) een neerslagsom van circa 100 mm is bepaald.

Op het totaal van de hele Geul zorgt de ruimtelijke variatie voor het uitmiddelen van de neerslagsom tot 128 mm. Hiervan viel 58 mm op 13 juli en 70 mm op 14 juli. Op het KNMI meetstation Ubachsberg is een neerslagsom van 182 mm gemeten, op Epen 110 mm en op Valkenburg 134 mm.



Figuur 7 Gemiddelde neerslagsom (van 13 juli 10:00 tot 15 juli 10:00) per deelstroomgebied van de Geul

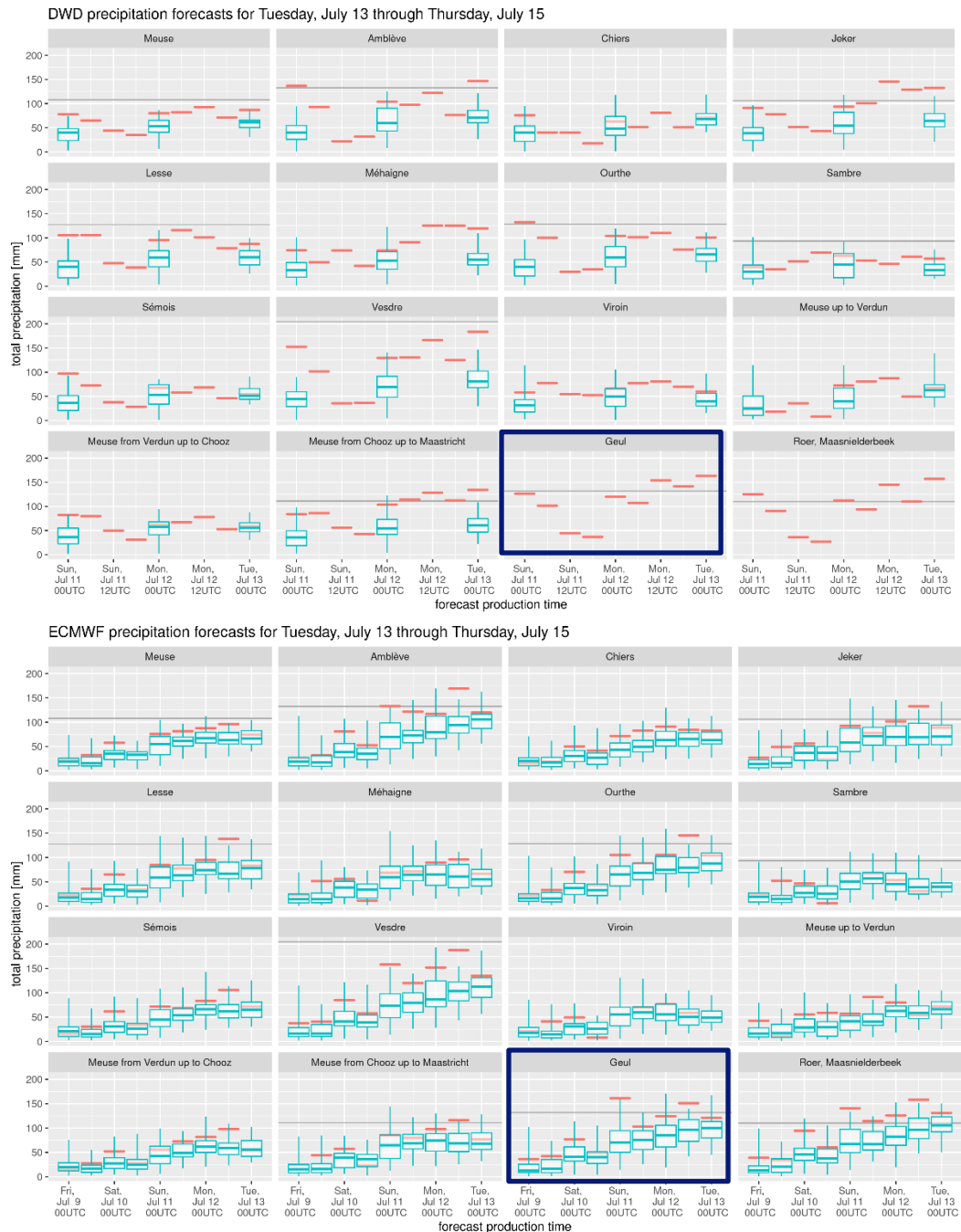


Figuur 8 Neerslagverloop voor het stroomgebied van de Geul (gebiedsgemiddelde)

Overigens is het interessant om te zien dat het gebied in en ten noordoosten van het Geulstroomgebied (de streek rondom Heerlen) ook een hogere neerslagsom had¹. Daar zijn ook veel problemen geweest.

¹ Dit gebied maakt geen deel uit van deze casestudie-analyse, maar zal wel in de systeembrede evaluatie worden verkend.

In een verkennende studie heeft Jan Verkade (ForecastVerification.com, december 2021) geanalyseerd hoe goed de neerslagverwachtingen waren in de dagen voorafgaand aan het hoogwater. Dit is gedaan voor de verschillende Belgische zijrivieren van de Maas en recent aangevuld met de Limburgse stroomgebieden. Figuur 9 toont de deterministische voorspellingen van ICON-EU (het weermodel van de DWD) met oranje streepjes. De blauwe balkjes geven de verwachting op basis van een ensemble. Voor een aantal deelstroomgebieden van de Maas is daarnaast een horizontale grijze lijn te zien. Dit is de werkelijk gevallen neerslag. Het onderste deel van de grafiek toont de verwachtingen van ECMWF.



Figuur 9 Kwaliteit van de neerslagverwachtingen in de dagen voorafgaand aan het hoogwater (bron: forecastverification.com). Bovenste deel geeft de verwachtingen van de DWD en het onderste deel die van ECMWF. De verwachtingen voor het Geul stroomgebied zijn omkaderd

Al op zondagochtend 11 juli werd het neerslagvolume door bijvoorbeeld ICON-EU voor het stroomgebied van de Geul heel goed ingeschat (het oranje streepje valt nagenoeg samen met de grijze lijn). De verwachting van zondagavond en maandagochtend was weliswaar een stuk lager maar daarna weer hoog. Al met al was de verwachting voor de Geul behoorlijk nauwkeurig en er was in ieder geval sprake van een tijdige indicatie voor heel veel neerslag. Voor deze specifieke situatie liepen de verwachtingen van ECMWF een stuk achter bij die van de DWD. De DWD gaf al veel vroeger een indicatie voor veel neerslag.

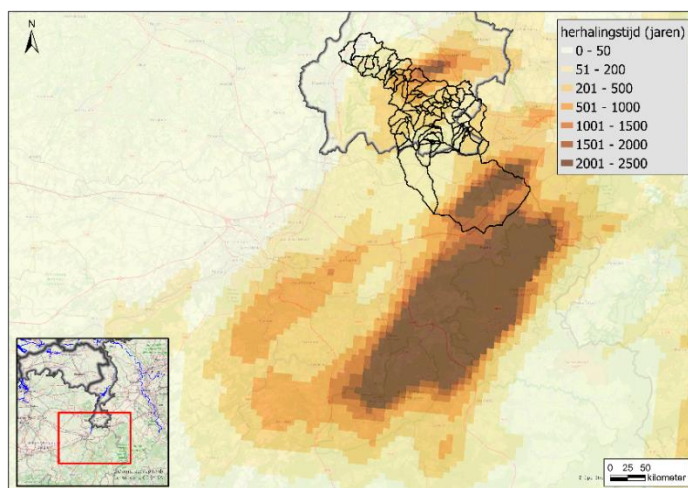
3.2 Duiding herhalingstijd

Voor het afleiden van gemiddelde herhalingstijden² van neerslagsommen is gebruik gemaakt van de neerslagstatistieken die STOWA heeft laten opstellen (STOWA, 2019) door KNMI. Volgens deze statistieken zou de herhalingstijd voor de waargenomen 2-daagse neerslagsom op KNMI station Ubachsberg circa 3000 jaar bedragen. Bij Valkenburg is dit al veel lager (~350 jaar), maar nog veel minder bij Epen (circa 90 jaar) en bij Beek (17 jaar).

De neerslagstatistieken voor een stroomgebied vereisen het toepassen van een gebiedsreductiefactor op basis van de grootte van het (stroom)gebied (NERC, 1975 en STOWA, 2019). Met zo'n reductiefactor wordt gecorrigeerd voor ruimtelijke effecten: een zomerse hoosbui is doorgaans beperkt van omvang.

De gebiedsgemiddelde 48-uur neerslagsom voor het stroomgebied van de Geul (340 km²) is 128 mm (van 13 juli 10:00 – 15 juli 10:00, zomertijd). Deze neerslagom heeft voor het huidige klimaat een herhalingstijd van circa 900 jaar. Hiervan viel 58 mm op 13 juli (van 13 juli 10:00 – 14 juli 10:00, zomertijd) en 70 mm op 14 juli (van 14 juli 10:00 – 15 juli 10:00, zomertijd). De herhalingstijd van de beide individuele dagen is veel lager: respectievelijk 15 en 40 jaar. Juist de opeenvolging van beide dagen maakt de gebeurtenis veel zeldzamer.

Het is mogelijk om de herhalingstijden voor elk radargridcel in het radarbeeld te bepalen (zie Figuur 10). Duidelijk blijkt hieruit ook een soort zuidwest – noordoost oriëntatie van de gebeurtenis. In dat licht gezien, is het stroomgebied van de Geul er met een oriëntatie van zuidoost naar noordwest goed vanaf gekomen. Als het neerslaggebied ook maar 25 km naar het noorden had gelegen zou de gebiedsgemiddelde neerslag veel groter zijn geweest.



Figuur 10 Herhalingstijd per radargridcel voor 48 uur neerslagsom van 13 juli 10:00 tot 15 juli 10:00

² Zie gedetailleerde toelichting in de bijlage ten aanzien van het toepassen van gemiddelde Nederlandse statistiek voor dit specifieke, deels in België liggende stroomgebied.

Wanneer we de verandering van herhalingstijden proberen in te schatten voor klimaatverandering moeten we allereerst beseffen dat KNMI verschillende klimaatscenario's onderscheidt. Deze zijn in meer detail, samen met een detailuitwerking voor de herhalingstijden beschreven in bijlages B.1.3 en B.2.

Onder de "2050_upper" en "2085_upper" scenario's zou de bovengenoemde ~900 jaar (voor de 48-uur van 128 mm neerslag gemiddeld over het Geulstroomgebied) reduceren tot een herhalingstijd van respectievelijk ~300 jaar en ~150 jaar. Ofwel 3 en 6 keer zo vaak onder deze twee klimaatscenario's als nu.

Onder de "2050_lower" en "2085_lower" klimaatscenario's zijn de veranderingen in de neerslag heel beperkt: ongeveer 0.5% voor 2050 en 2% voor 2085. De daarmee corresponderende veranderingen in herhalingstijden zijn daarmee ook klein en niet berekend. De onzekerheid over de toekomstige veranderingen van een dergelijke event, in termen van herhalingstijd (~kans van optreden) is dus groot; voor 2050 een vrijwel onveranderde kans tot een 3 keer zo grote kans en voor 2085 een licht toegenomen kans tot een 6 keer zo grote kans.

Al met al concluderen we dat het weersysteem heel extreem is geweest. We moeten ook concluderen dat Limburg nog veel heftiger had kunnen worden getroffen. De situatie zou veel extremer zijn geweest als het weersysteem bijvoorbeeld 50 km meer naar het noorden had gelegen. Nu is alleen het meest zuidelijke deel van het Belgische deelstroomgebied van de Geul extreem belast geweest en (in Nederlands Limburg) het gebied tussen Valkenburg en Heerlen met herhalingstijden van 2000-2500 jaar per km² gridcel. Weliswaar zouden dan vanwege andere orografie iets andere neerslagprocessen optreden, maar soortgelijke neerslagvolumes zijn ook in Nederland zeker mogelijk (Deltares, 2021)

4 Analyse wateroverlast en schade

4.1 Afvoeren, waterstanden en schade zomer 2021

De grote hoeveelheid neerslag heeft geresulteerd in een nooit eerder waargenomen afvoerpiek in de Geul. Als gevolg hiervan ontstond op grote schaal rondom de Geul en de zijbeken wateroverlast en overstromingen. Dit leidde tot veel schade. Door de hoge afvoer en waterstanden zijn veel meetpunten van het waterschap uitgevallen. Andere meetpunten bleven wel functioneren maar kwamen buiten hun meetbereik. De grafieken met metingen van een aantal meetpunten zijn weergegeven in bijlage A.

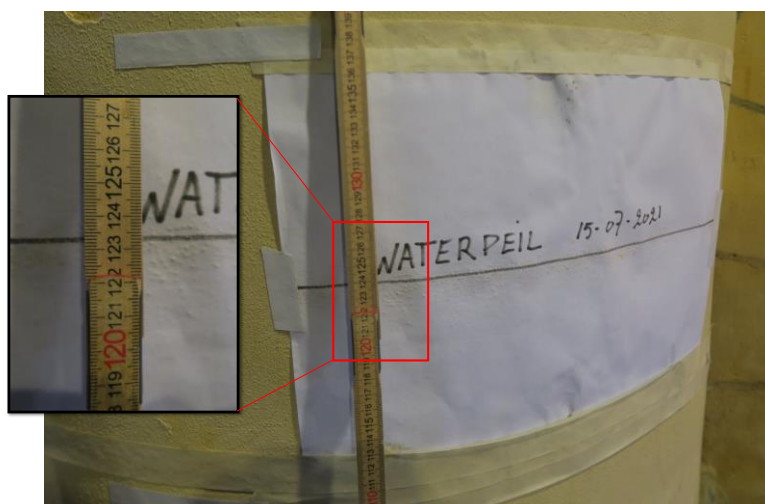
Op basis van veldwerk van waterschappers is na afloop van het hoogwater op diverse plaatsen achterhaald hoe hoog het water overall is gekomen. Op deze manier is de maximale waterhoogte bij Hommerich ingeschat op NAP+95.70 m, aangezien bij de naastgelegen sportvelden het gras tot circa 20-25cm hoog in het gras zat. Deze waterstand is in de avond van 14 juli opgetreden.

Het is een stuk lastiger om de afvoeren in te schatten. Geen enkel afvoermeetpunt functioneerde nog goed. En daar waar nog wel waterstanden konden worden gemeten is de onzekerheid van de vertaling van waterhoogte naar afvoer heel groot, omdat de relatie tussen beiden voor dit soort zeldzame situaties niet goed bekend is, zoals bijvoorbeeld bij Cottessen en Hommerich. Op basis van de recent ontwikkeld afvoerrelatie voor meetpunt Hommerich (HKV, 2021) zou een afvoer van circa 80 m³/s kunnen worden ingeschat. Op het Belgische meetpunt Kelmis (behoorlijk bovenstrooms in het Belgische deel van de Geul) is al een afvoerpiek van 55 m³/s gemeten. De waarde bij Hommerich is daarbij vergeleken nog relatief laag.

De afvoerpieken van de zijbeken worden door het waterschap als volgt ingeschat:

- Selzerbeek: 10 m³/s
- Eyserbeek: 12 m³/s
- Gulp te Gulpen: 15 m³/s

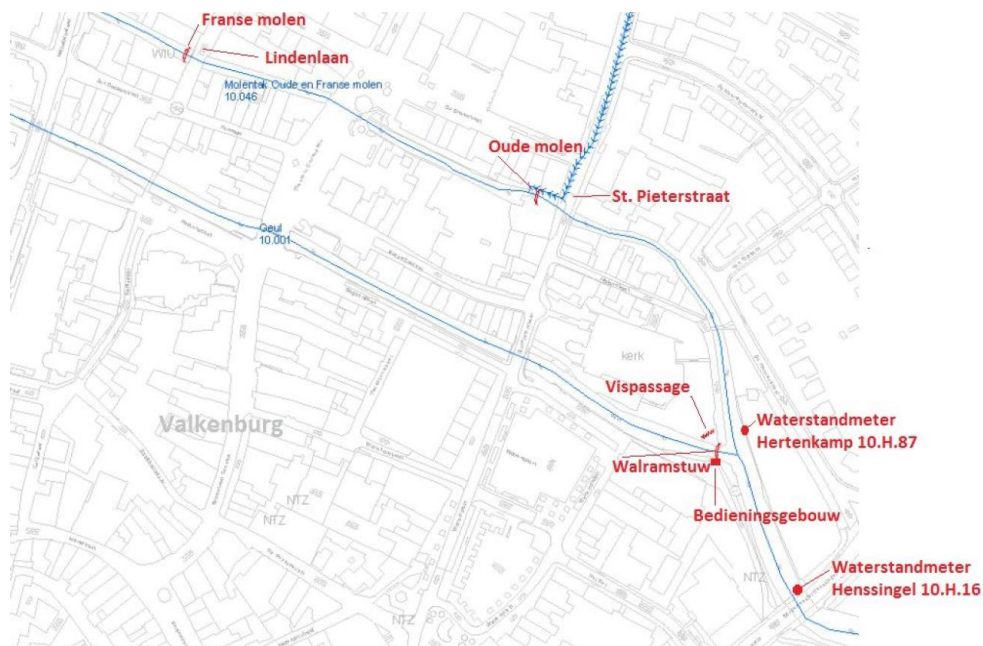
Ter hoogte van Valkenburg is de afvoer door het waterschap ingeschat op circa 100 tot 120 m³/s.



Figuur 11 Indicatie van hoogte waterstand in de HH Nicolaas en Barbarakerk (foto Nathalie Asselman)

In de avond van 14 juli stijgen de waterhoogtes in de Geul en de Molentak tot ver boven de oevers en ontstaat in en rond Valkenburg op grote schaal een overstroming. Het centrum van Valkenburg overstroomt tot een diepte van circa 125 cm (zie Figuur 11). Alle panden (huizen, horeca, winkels etc.) in de nabijheid van de Geul overstroomden. Daarbij zijn de stroomsnelheden van het water groot. De bewoners uit het centrum van Valkenburg worden geëvacueerd. De brug van de Emmalaan over de Geul stort in.

De snelheid waarmee het water steeg op de meetpunten Hertenkamp en Wiegert bedroeg gemiddeld circa 15-20 cm per uur. Nog voordat meetpunt Hertenkamp uitviel maar al op het moment dat de Geul overstroomde stegen de waterstanden nog sneller. Tussen 18:00 en 22:00 uur op 14 juli was de stijgsnelheid gemiddeld circa 40 cm per uur.



Figuur 12 Situatie van meetpunten en kunstwerken bij Valkenburg

Helaas viel ook alle meetapparatuur rond Valkenburg-oost uit. Op 14 juli 23:25 is nog een laatste goede meting beschikbaar. Daarna ontstaat een eerste storing waarop de automatische regeling van de schuiven van de Walramstuw en de Oude Molen (zie Figuur 12) deze schuiven dicht gaat zetten. Voordat de schuiven volledig worden gesloten, valt echter de elektriciteit uit waardoor de schuiven van de Walramstuw nog boven het water bleven en die van de Oude Molen wel volledig sloten. Het effect hiervan wordt in de volgende paragraaf doorgerekend.

De situatie in Valkenburg kreeg en krijgt veel aandacht in de media. Maar in veel andere dorpen zijn ook overstromingen opgetreden (zoals Gulpen, Schin op Geul, Mechelen, maar ook Simpelveld, Eys en Partij langs de Selzerbeek en de Eyserbeek), zij het dat de omvang van de overstroming in Valkenburg in termen van totale schade en aantal getroffen personen als zodanig verreweg het grootst was. De directe schade als gevolg van de overstroming, maar ook de indirecte schade als gevolg van bijvoorbeeld misgelopen inkomsten, is op dit moment nog niet bekend maar wordt alleen al in de gemeente Valkenburg aan de Geul ingeschat op orde € 400 miljoen.

Eén van de gevolgen van de overstroming is ook dat veel erosie heeft plaatsgevonden, waardoor de waterloop bij meetpunten is verdiept of juist aangezand. De beschikbare waterstand-afvoerrelaties gelden hierdoor niet meer, ook niet tijdens de overstroming.



Figuur 13 Shot uit dronebeelden van het waterschap, genomen in de ochtend van 15 juli, na het passeren van de afvoerpijk vanaf de voormalige Leeuwbrouwerij richting brug Polfermolen



Figuur 14 Oevererosie achter brug en straat Polfermolen als gevolg van hoge stroomsnelheden (foto Nathalie Asselman)

Het waterschap heeft de beschikking over een operationeel hydrologisch voorspellingsstelsel voor de Geul. Met dit stelsel wordt de actuele weersverwachting vertaald naar afvoeren en waterhoogtes met behulp van een “snelle variant” op het hiervoor genoemde SOBEK model, waarin alleen ééndimensionaal wordt gerekend. Vanwege onderhoud aan dit stelsel kon het waterschap dit stelsel niet gebruiken. Tijdens het hoogwater zijn berekeningen wel handmatig aangezet om toch een indicatie te krijgen van de te verwachten hoogwatergolf.



Figuur 15 Shot uit dronebeelden van het waterschap, genomen in de ochtend van 15 juli, na het passeren van de afvoerpijk vanaf brug Polfermolen richting het westen, bypass voormalige Leeuwbrouwerij (het parcours)

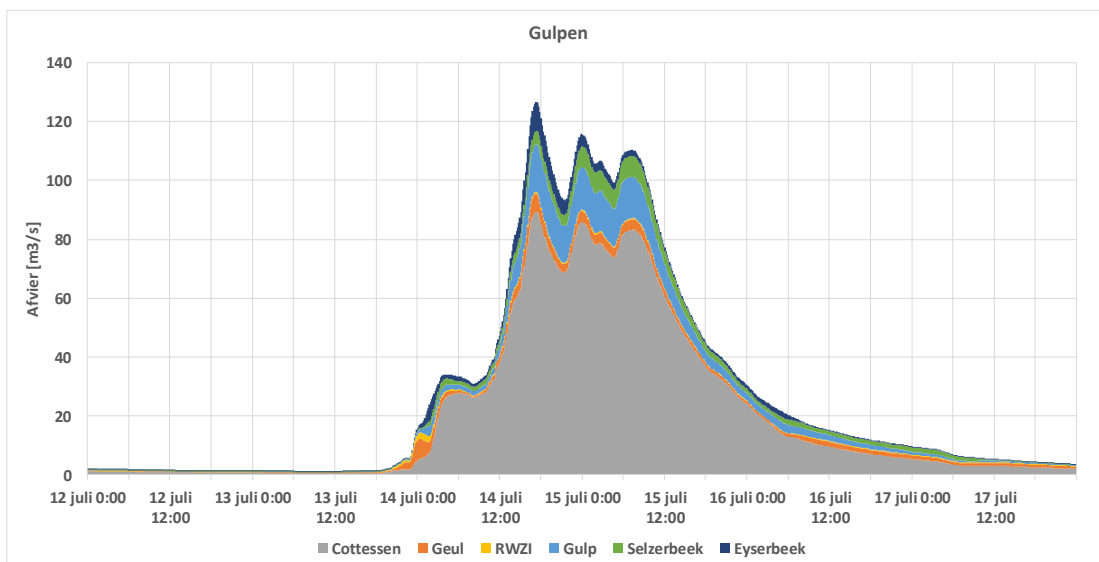
4.2 Reproduceren overstroming met modelberekeningen

Op basis van de beschikbare informatie bij het waterschap is met behulp van het SOBEK simulatiemodel (zie toelichting in paragraaf 2.3) zo goed mogelijk geprobeerd om de situatie zoals deze zich in juli 2021 heeft voorgedaan te reproduceren. Met dit model kunnen knelpunten worden gecontroleerd en de effecten van eventuele maatregelen worden verkend.

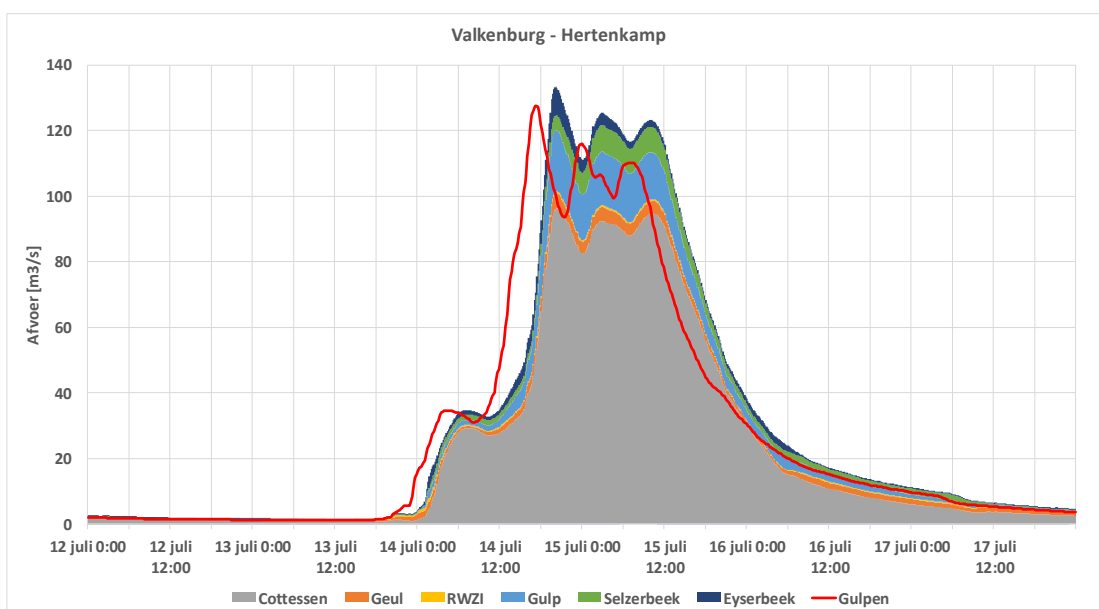
De modelberekeningen zijn uitgevoerd met:

- als neerslag de Final-Reanalysis radarbeelden die KNMI heeft gemaakt, gebaseerd op zowel de Nederlandse als de Belgische en Duitse neerslagradars. Dit neerslagproduct vormt de basis voor de fine-tuning die KNMI heeft uitgevoerd om te komen tot de neerslaganalyse zoals beschreven in hoofdstuk 3. Omdat de hydrologische processen vaak een lange inspeeltijd nodig hebben is gerekend vanaf 1 april tot 20 juli 2021. Deze neerslag is ruimtelijk gemiddeld per deelstroomgebied.
- het HBV model om te komen tot een afvoer.
- de afvoer uit HBV is met het hydraulische model doorgerekend, waarmee waterstanden en overstromingen zijn bepaald.

In Figuur 16 en Figuur 17 wordt de berekende afvoer getoond bij respectievelijk Gulpen en Valkenburg, waarbij in kleuren de herkomst van het water is aangegeven. Het water afkomstig van RWZI's is gebaseerd op effluentmetingen. Alle andere afvoeren zijn gebaseerd op het HBV neerslagafvoermodel. Duidelijk is dat een groot deel van de afvoer (relatief ten opzichte van het afvoerend oppervlak) vanuit het Belgische deel van de Geul via Cottessen wordt gevormd. Dit correspondeert met de extreme neerslag die we in dit gebied zagen (hoofdstuk 3). Het valt op dat de piek na Gulpen nauwelijks meer toeneemt (zie ook Figuur 17 waarin de afvoer van Gulpen ter referentie is aangegeven). De extra toevoer na Gulpen is heel beperkt en leidt nauwelijks meer tot extra afvoer. De "reistijd" van de afvoerpijk van Gulpen naar Valkenburg is circa 3 uur.



Figuur 16 Berekende afvoer net ten noorden van Gulpen, na samenkomst van alle zijbeken. De herkomst van het water uit de verschillende deelstroomgebieden is met kleur aan gegeven

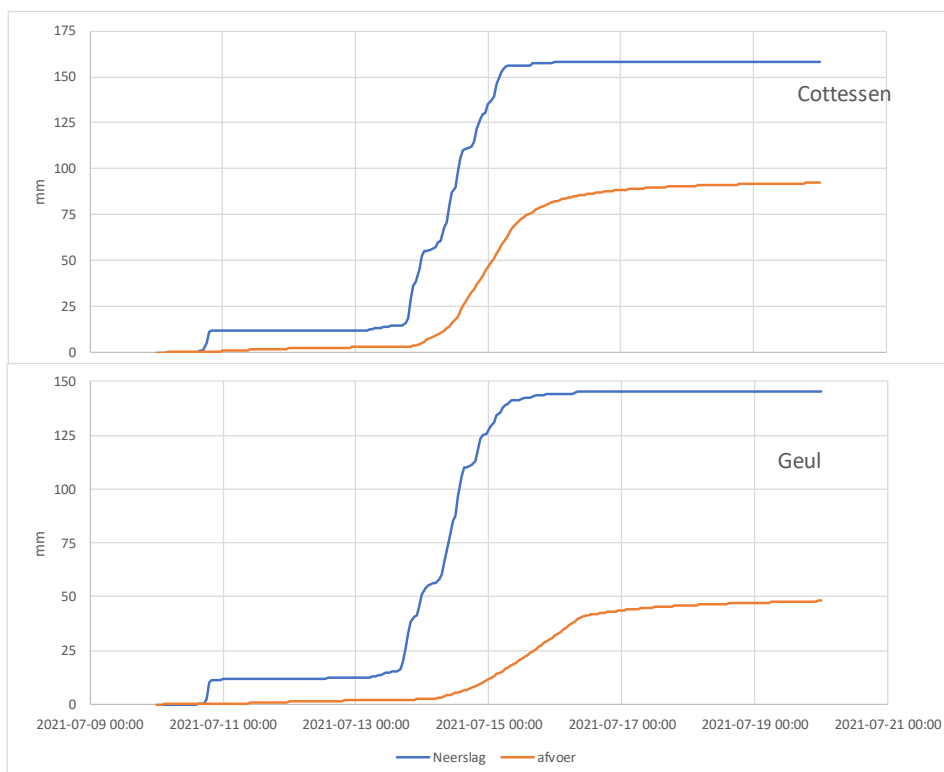


Figuur 17 Berekende afvoer net ten oosten van Valkenburg (meetpunt Hertenkamp). De herkomst van het water uit de verschillende deelstroomgebieden is met kleur aan gegeven

De berekende afvoerpiek bij Valkenburg (aan de oostkant, ter hoogte van Hertenkamp) is circa 130 m³/s. Dit is iets hoger dan de inschatting (puur op basis van expert-judgement) door het waterschap, gemaakt kort na het hoogwater.

Ter illustratie van de hydrologische processen in het stroomgebied toont Figuur 18 de gebiedsgemiddelde neerslag en de met het model³ berekende afvoer, uitgedrukt in mm vanaf 10 juli, voor zowel Cottessen als de gehele Geul. Duidelijk is te zien dat bovenstrooms van Cottessen ruim de helft van de neerslag tot daadwerkelijke afstroming is gekomen. Op de schaal van de hele Geul is ongeveer een derde deel van de gevallen neerslag afgestroomd.

³ Merk op dat het neerslagafvoermodel is gebouwd op basis van afvoeren tot orde 25 m³/s bij Cottessen. In hoeverre dit model gebeurtenissen zoals in juli goed simuleert zal in de systeembrede evaluatie verder moeten worden onderzocht.



Figuur 18 Berekende cumulatieve neerslag en afvoer bij Cottessen (boven) en uitstroompunt van de Geul in de Maas (onder)

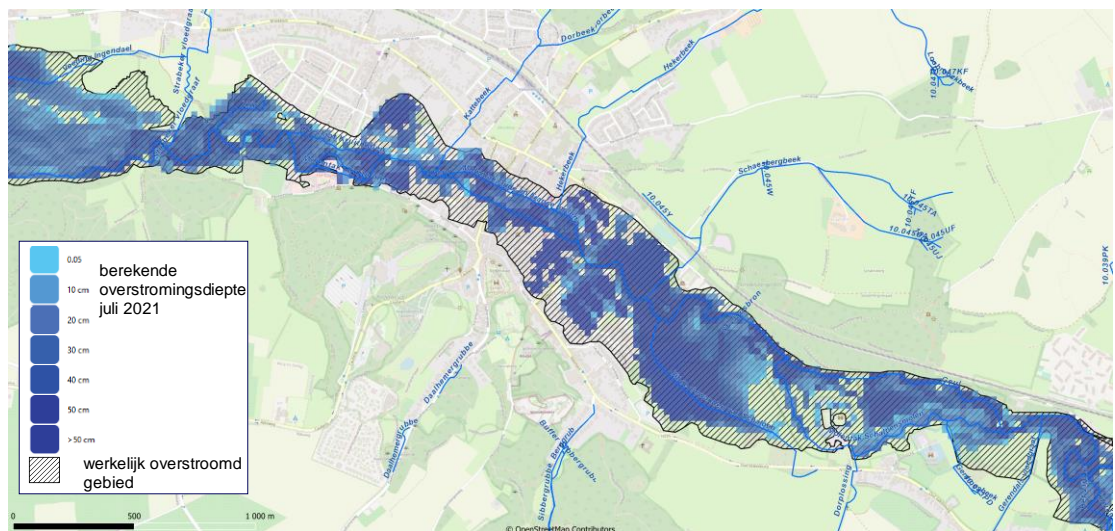
Dit alles correspondeert ook met de hydrologische kenmerken van de verschillende beken. Zo kenmerkt het Belgische deel van de Geul (en vooral het zuidelijke deel daarvan) zich door een harde ondoordringbare laag dicht onder het maaiveld. De bodem kan daardoor weinig water opnemen. De Eyserbeek is juist precies omgekeerd. Daar is de bodem juist veel doorlatender waardoor per saldo met name het verhard oppervlak tot afstroming komt en de neerslag op onverhard gebied infiltreert en in de bodem verdwijnt.

Kaarten van de berekende overstromingsdieptes voor de hele Geul als ook ingezoomd op Valkenburg staan in Figuur 19 en Figuur 20. Het model berekent correct dat op grote schaal langs de Geul overstromingen zijn opgetreden. Wanneer wordt ingezoomd op Valkenburg is ook duidelijk dat de hele omgeving van de Geul, van oost tot west en verder fors is overstroomd. Het model berekent de mate van overstroming goed zoals te zien is in Figuur 20. De maximum ingeschatte waterhoogtes (bijvoorbeeld bij meetpunt Wiegert, ter hoogte van het Odapark, NAP+67.75 m) komen heel goed overeen. De maximaal berekende waterhoogte bij Hertenkamp is NAP+69.75 m, maar daar is geen meting. Iets verder bovenstrooms is door WSP in de quick-scan voor Valkenheim afgeleid dat daar een maximale waterstand van NAP+70.66 m is opgetreden (met ± 10 cm onzekerheid). Het model komt daar tot NAP+70.35 m, ofwel circa 30 cm lager. Het model berekent daardoor ook iets minder ondergelopen gebied. Dit wijten we aan de grofheid van het overstromingsmodel, maar ook een onderschatting van de afvoergolf kan (een deel van) de oorzaak zijn.

In deze berekening is overigens niet de storing op de schuiven van de Walramstuw en Oude Molen meegenomen. Wanneer die wel wordt meegenomen en op 14 juli 23:30 de schuiven dicht worden gezet, conform werkelijkheid, is de berekende maximale waterstand bij Hertenkamp 1-2 cm hoger. Het negatieve effect was per saldo dus heel beperkt.



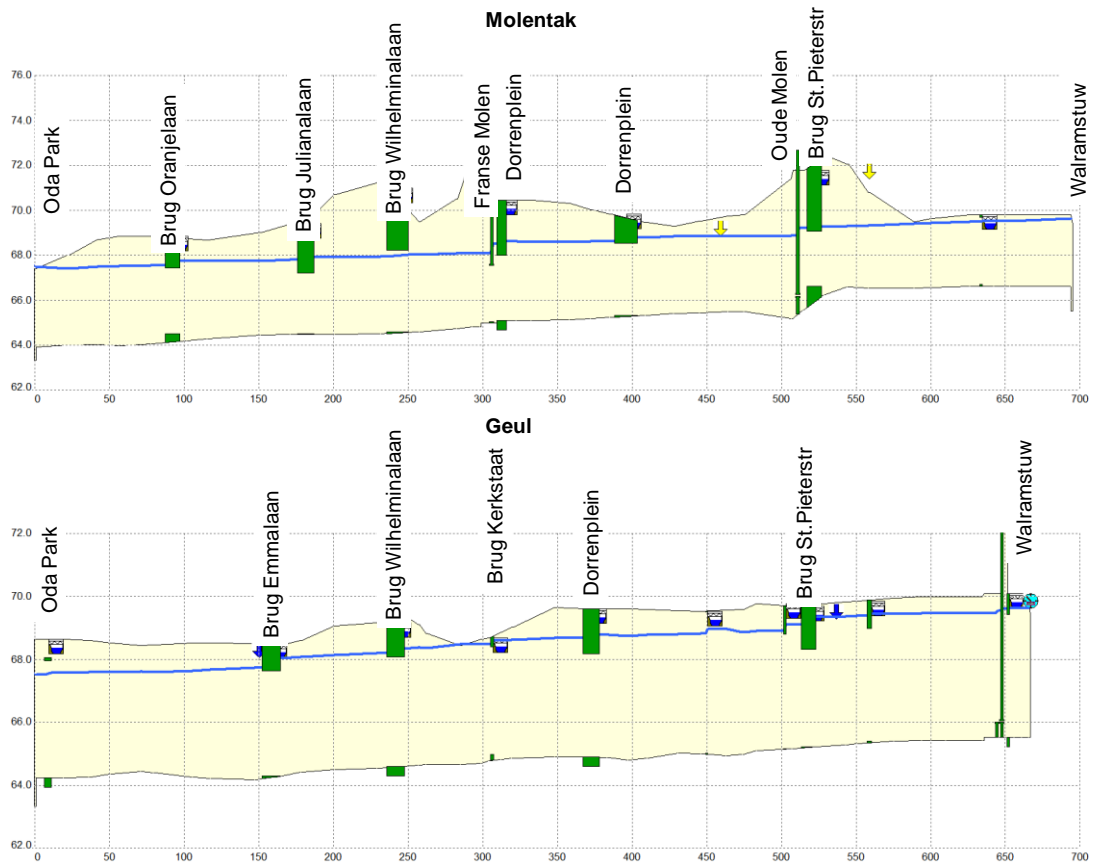
Figuur 19 Berekende overstromingen vanuit de Geul voor gehele stroomgebied



Figuur 20 Berekende overstromingen voor omgeving Valkenburg

Wanneer de waterstanden in de Geul en de Molentak stijgen tot aan de brugdekken en de brugdekken zelfs overstromen neemt de weerstand die het stromende water ondervindt toe. Op de Geul zijn het de brugdekken en balkons die overhangen boven het water die de doorstroming belemmeren wanneer de waterstanden ze gaan raken. In Figuur 21 is het opstuwende effect van de bruggen te herkennen aan de knikpunten in de verhanglijn: bij vrijwel alle bruggen is een 'trapje' zichtbaar in de waterstandslijn.

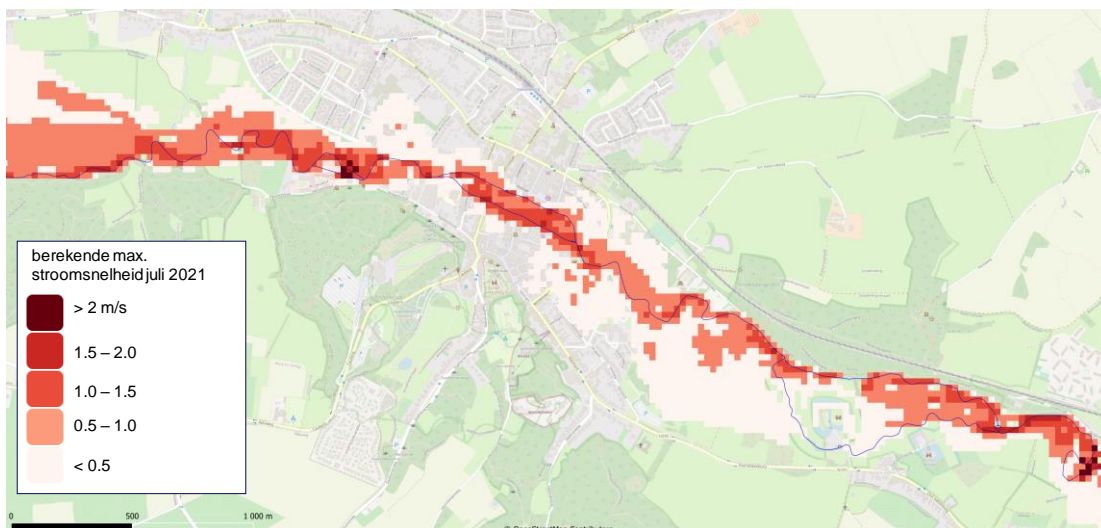
De verwoeste brug over de Emmalaan veroorzaakte een opstuwung van circa 30 cm en de brug Sint Pieterstraat circa 25cm; de overige bruggen veroorzaakten een opstuwung van circa 5 tot maximaal 10 cm. Bij de Molentak zijn het met name de Oude Molen en de Franse Molen die voor veel opstuwung zorgen: respectievelijk circa 30 en 40 cm.



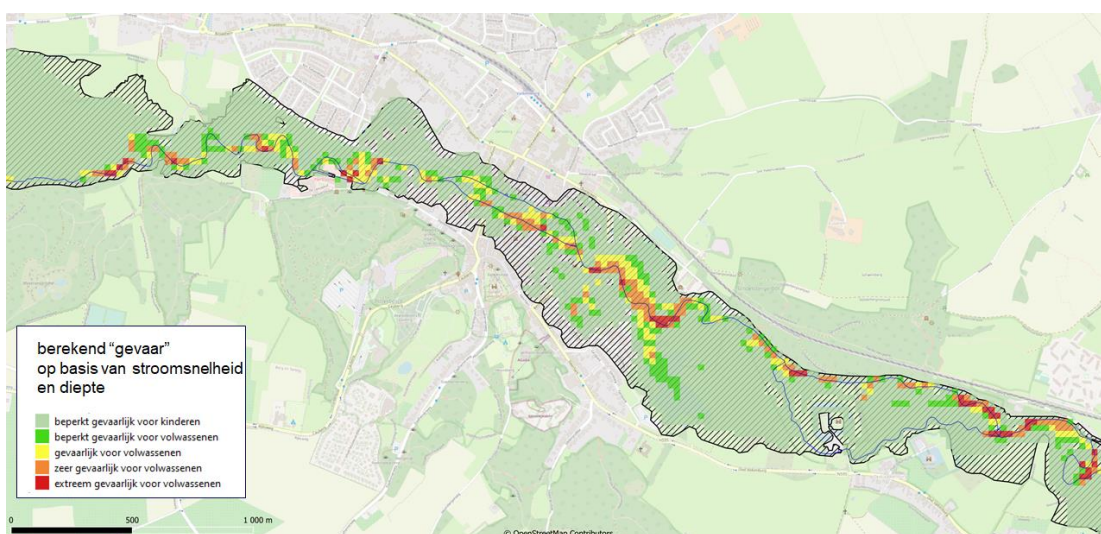
Figuur 21 Langsprofiel van maximale waterhoogtes in de Molentak (boven) en Geul (onder)

Het is wel goed om op te merken dat het model met een 2D rooster resolutie van 25 meter mogelijk wel wat grof is om op hoog detailniveau uitspraken te kunnen doen over overstromingen in stedelijk gebied. Desalniettemin is dit het enige model dat het waterschap tot zijn beschikking heeft en dat ook is gebruikt in de toetsing aan de normering tegen wateroverlast. Vandaar dat dit model ook in deze analyse is gebruikt. Het model is in ieder geval goed genoeg om in dit stadium richting te geven aan mogelijke maatregelen en het identificeren van knelpunten.

De combinatie van snel stijgende waterstanden, de snelle opkomst van de overstroming en hoge stroomsnelheden maakte de situatie in juli 2021 vlak rondom de Geul heel gevaarlijk. Op basis van een Australische berekeningsmethode (AIDR 2017) is mogelijk om de mate van gevaar te bepalen, zie bijlage C). Hoe gevaarlijk het is wordt berekend aan de hand van de diepte en de stroomsnelheid (zie Figuur 22). Figuur 23 toont deze "hazard" kaart op basis van de simulatie. De kaart toont aan dat op een aantal plaatsen in het centrum maar ook al bovenstrooms levensgevaarlijke situaties optraden.



Figuur 22 Berekende maximale stroomsnelheid



Figuur 23 Indicatie van gevaar (hazard) op basis van stroomsnelheid en diepte volgens methode AIDR 2017 (zie bijlage C)

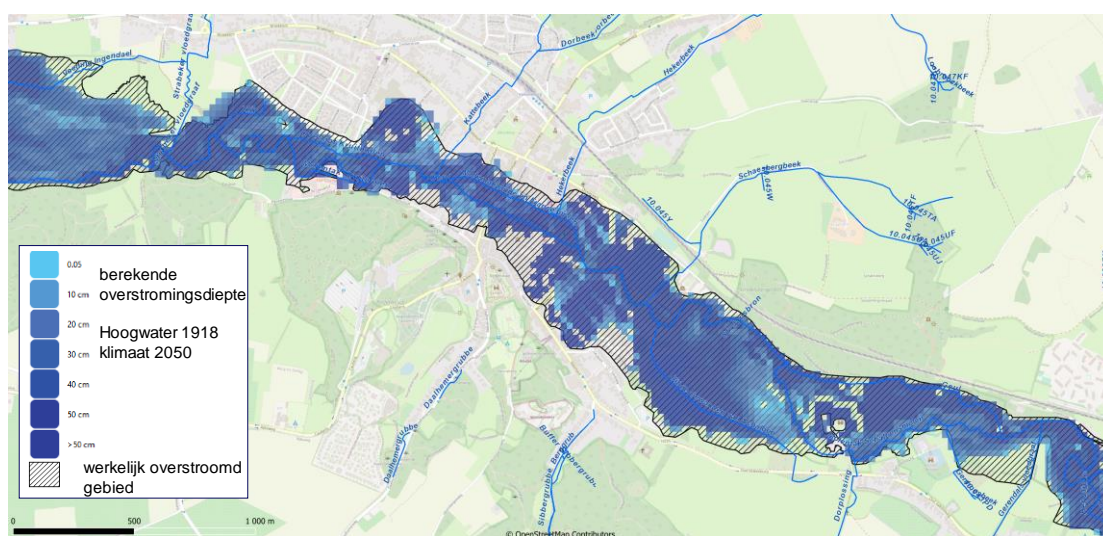
Wat betreft de herhalingstijd van de opgetreden of berekende afvoeren moet worden opgemerkt dat dit lastig is in te schatten. De afvoerreeksen zijn vaak veel te beperkt in lengte om voor de meer extreme situaties met grote herhalingstijden nauwkeurige uitspraken te kunnen doen. Een indicatie van de herhalingstijden van de opgetreden piekafvoeren in juli 2021 zou sowieso met de grootste voorzichtigheid moeten plaatsvinden. In Tabel 1 zijn de door het waterschap ingeschatte T=100 afvoerpieken vergeleken met de berekende afvoerpieken voor juli 2021. Hieruit blijkt dat deze pieken circa 50 tot 60% hoger liggen dan de T=100 afvoeren.

Tabel 1 Afvoeren langs de Geul vergeleken met de T=25 en T=100 afvoer

Meetpunt	Afvoer T=25 [m ³ /s]	Afvoer T=100 [m ³ /s]	Max. berekende afvoer juli '21 [m ³ /s]
Cottessen	39	62	100
Valkenburg - Hertenkamp	51	84	134
Meerssen	50	77	102

Figuur 24 toont de berekende overstrooming voor een bij het waterschap gehanteerde worst-case scenario voor het klimaat in 2050, gebaseerd op een fictief hoogwater (van 1918, uit de samengestelde tijdreeks). Deze berekening komt wat betreft overstroomd gebied behoorlijk goed overeen met de opgetreden situatie van juli 2021. Echter, de in dit scenario berekende waterhoogtes en afvoeren zijn fors hoger dan de berekende voor de situatie van juli 2021. Bij Hertenkamp wordt de maximale waterhoogte circa NAP+70.05 m (30 cm hoger dan berekend in de opgetreden situatie) en de afvoer circa 170 m³/s (ten opzichte van 130 m³/s zoals berekend voor de opgetreden situatie).

Dit alles wijst er op dat het simulatiemodel nog eens goed moet worden getoetst voor dit soort extreme situaties. De berekende waterhoogtes worden onderschat. Dit kan liggen aan het onderschatten van de afvoeren van dit hoogwater maar het kan ook mogelijk zijn dat het 2D rooster dat is gebruikt voor de overstroomingsberekeningen te grof of te oud is om de daadwerkelijke overstrooming goed te beschrijven. Merk op dat in het model de 1D-ruwheid al is verhoogd van Manning default 0.03 naar 0.05 m^{1/3}/s, om beter recht te doen aan de zomersituatie en daarmee de iets hogere begroeiingsgraad. In bijlage C is voor het centrumgebied van Valkenburg een analyse in meer detail beschreven.



Figuur 24 Berekende overstroomingen voor omgeving Valkenburg bij hoogwatergolf 1918 voor klimaat 2050 (bron: waterschap)

4.3 Conclusies

De grote hoeveelheid neerslag die op 13 en 14 juli 2021 is gevallen in het stroomgebied van de Geul heeft geleid tot grootschalige overstroomingen en veel schade. Alleen al in de gemeente Valkenburg aan de Geul wordt de schade geschat op circa € 400 miljoen.

De overstrooming zelf is een complex samenspel van hoe de ruimtelijk sterk verdeelde neerslag tot afvoer komt, hoe die afvoer door de zijbeken en de Geul leidt tot olopende waterstanden, het volstromen van beekdalen maar ook hoe die afvoer zich door de relatief krappe waterlopen door de dorpen moet “persen”. In het algemeen gesproken heeft de Geul in de dorpen weinig ruimte, waardoor afvoerknelpunten ontstaan met wateroverlast of overstroomingen tot gevolg. Dit was ook zeker het geval in Valkenburg. De historisch gegroeide situatie van de Geul en de Molentak met veel objecten direct grenzend aan de beek, heeft als consequentie dat het water wordt opgestuwd en veel schade kan veroorzaken bij extreem grote afvoeren; het is bepaald niet optimaal voor het kunnen verwerken van zulke grote afvoeren. De situatie voldoet nu niet overal aan de normen tegen wateroverlast (1:25 per jaar), met de kanttekening dat de berekende overstrooming dan beperkt is tot circa 15 cm.

Daarbij hebben we gezien dat zeer veel schade kan ontstaan wanneer zich bovenmaatgevende gebeurtenissen voordoen, zoals in juli 2021.

Het samenspel van het weer, de hydrologie van de heuvels en de hydraulica van de beken maakt het complex om de overstroming van juli in Valkenburg te duiden voor wat betreft de herhalingstijd. Op het geheel van het stroomgebied van de Geul wordt de herhalingstijd van de gevallen neerslag ingeschat op circa 900 jaar, uitgaande van de statistieken die zijn afgeleid voor het huidige klimaat. De herhalingstijd van de opgetreden afvoeren en waterstanden ligt voor Valkenburg iets lager (komt iets vaker voor), omdat het relatief aan het einde van het stroomgebied ligt en door het uitmiddelen van de extremen over het hele stroomgebied. Maar het is heel moeilijk om hier uitspraken over te doen.

Met behulp van het bij het waterschap beschikbare simulatiemodel van het Geulstroomgebied is de overstroming nagerekend. Het wordt aanbevolen om het model goed te toetsen en af te regelen voor dit soort extreme gebeurtenissen, zowel in het neerslagafvoerproces als het berekenen van de overstromingen. Wat betreft het verbeteren van het neerslagafvoermodel wijzen we op het GRADE⁴ project dat goede mogelijkheden biedt om veel verschillende soorten neerslaggebeurtenissen te onderzoeken en ook de verschillende deelprocessen en de ruimtelijke verdeling daarvan goed mee te nemen.

Ten slotte merken we op dat het voor het waterschap lastig is gebleken om in de loop van de jaren goede tijdreeksen van gemeten afvoeren en waterhoogtes op te bouwen. Dit is nog los van het feit dat een aantal meetpunten tijdens het hoogwater is uitgevallen. Het blijkt vanwege ecologische doelstellingen steeds lastiger om goede en vaste meetpunten te handhaven waarmee langjarige tijdreeksen kunnen worden opgebouwd, die uiteindelijk de basis vormen voor het opstellen van goede modellen, het doen van toetsingen en het maken van goede operationele verwachtingen. Hiermee komt uiteindelijk ook de kwaliteit van de ontwerpen en toetsingen in het geding.

⁴ Zie ook: <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/project/knmi-grade>

5 Verkenning van mogelijke maatregelen

5.1 Algemeen

In dit hoofdstuk beschrijven we de resultaten van een verkenning van mogelijke maatregelen die is uitgevoerd in nauwe samenwerking met de gemeente en het waterschap.

De zoektocht naar mogelijke maatregelen was gericht het op reduceren van schade bij bovenmaatgevende gebeurtenissen, vergelijkbaar met juli 2021.

De onderzochte maatregelen onderscheiden we naar type, namelijk:

- Bronmaatregelen
- Regenwaterbuffers
- Oplossen knelpunten
- Reduceren schade door bescherming eigendommen (knop 4 maatregelen uit programma Water in Balans)

Bij bronmaatregelen kan men denken aan allerlei maatregelen die er voor zorgen dat minder water tot afstroming komt. Dit kan bijvoorbeeld door het verbeteren van de infiltratie (door het plaatsen van dwarsdijkjes of graften en andere vegetatie) of door het plaatsen van regentonnen en dergelijke.

Het waterschap en de gemeenten hebben de afgelopen jaren in Zuid-Limburg al meer dan 400 regenwaterbuffers aangelegd. Deze werken grotendeels ongestuurd, wat wil zeggen dat de buffers via de bovenzijde vollopen met oppervlakkig afstromend regenwater en dat alleen de uitlaat wordt afgeknepen tot een maximaal debiet. Dit gebeurt met een zogeheten spindelschuif. Dit maximaal debiet en daarmee de instelling van de spindelschuif is zodanig dat de buffers in 24 uur leeglopen. Enkele grotere buffers in het hoofdbekensysteem zijn wel geautomatiseerd, deze fungeren feitelijk als gestuurde waterberging. Het volume water dat geborgen kan worden in een buffer varieert per buffer. De grootste regenwaterbuffers hebben een volume van ongeveer 100.000 m³. De grootste buffer in het Geuldal is Nijswiller (automatisch gestuurd) met een volume van 62.500 m³.

Bronmaatregelen en buffering zijn gericht op het beperken van de piekafvoer van water naar de grotere beken door water bovenstrooms vast te houden en daarna gedoseerd af te voeren. Bronmaatregelen hebben bij grote neerslaghoeveelheden doorgaans een beperkt effect: een orde van 10 mm aan neerslag kan worden “opgelost”. In deze casestudie-analyse is dat niet verder uitgewerkt. Dit zal worden gedaan in de integrale watersysteemevaluatie. Het oplossen van afvoerknelpunten is juist gericht op het vergroten van de afvoercapaciteit van de beken. Dit kan bijvoorbeeld door verbreding van het doorstroomprofiel van de beek, het verwijderen van bruggen en andere obstakels die tot opstuwung leiden, of de aanleg van een tunnel zoals gesuggereerd werd als oplossing voor Valkenburg na het hoogwater van afgelopen zomer.

De kans op een overstroming is, ook wanneer aanvullende maatregelen worden getroffen, nooit tot nul te reduceren. Het is daarom goed om ook te kijken naar maatregelen die gericht zijn op het verkleinen van de schade in geval van een overstroming. Voorbeelden van maatregelen die burgers kunnen treffen om schade te voorkomen of te verminderen zijn:

- Het plaatsen van zandzakken
- Het plaatsen van schotten voor de deuren
- Tegelvloeren op de begane grond
- Stopcontacten niet te laag bij de grond

Het waterschap heeft dit onderdeel vormgegeven in hun programma Water in Balans (WL, 2020), waar dit soort maatregelen als de '4e knop' wordt gezien waaraan kan worden gedraaid (naast knoppen 1 t/m 3, die zich richten op maatregelen in respectievelijk het buitengebied, bebouwd gebied en het watersysteem).

Om schade aan privé-eigendommen te verminderen is het belangrijk dat burgers hierover ook goede voorlichting krijgen. Daarnaast dienen ze ook tijdig en goed gewaarschuwd te worden op het moment dat wateroverlast dreigt, zodat ze tijdig maatregelen kunnen nemen om eventuele schade te beperken. Dit aspect van early warning is in dit onderzoek niet verder uitgewerkt.

In de volgende subhoofdstukken wordt een aantal maatregelen verkend. De effecten van maatregelen illustreren we aan de hand van kaarten met de berekende maximale waterdieptes en grafieken met het verloop van de waterdieptes op een aantal punten.

Uit de modelberekening bleek dat de bruggen in Valkenburg een fors opstuwend effect kunnen hebben. Hier zouden beweegbare bruggen een oplossing kunnen zijn. Dit is nu niet verder onderzocht, maar is het wel waard om nader te onderzoeken in een vervolgonderzoek.

5.2 Tunnel

Direct na afloop van het hoogwater van juli 2021 werd door verschillende partijen, waaronder Witteveen+Bos en RHDHV, voorgesteld om een tunnel aan te leggen onder Valkenburg waardoor overtollig water zou kunnen worden afgevoerd. Deze maatregel wordt al toegepast in het buitenland, onder andere in Zwitserland bij Thun.



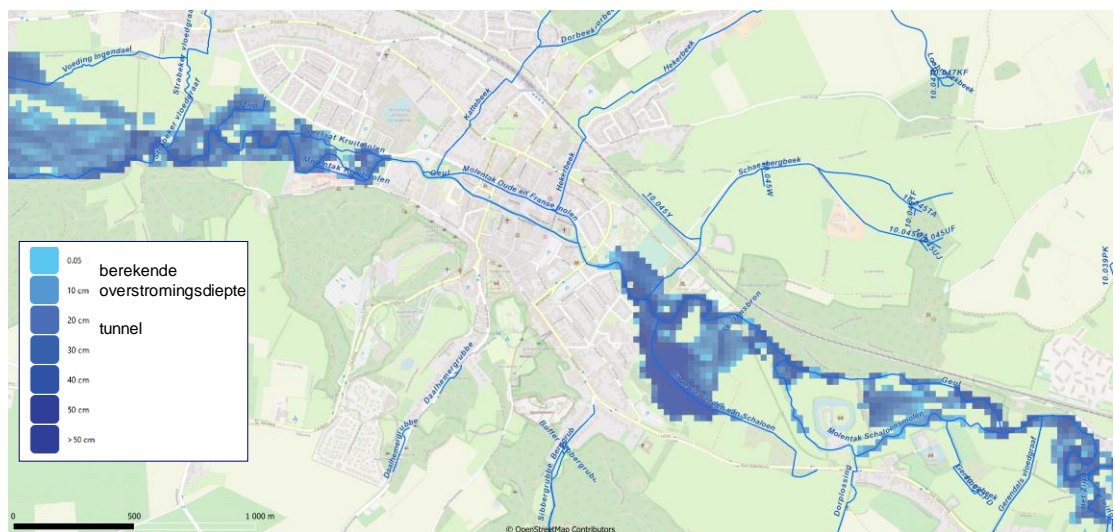
Figuur 25 Impressie van voorstel van tunnel door Witteveen+Bos

(bron: [https://www.witteveenbos.com/nl/nieuws/tunnel-kan-overstromingoverlast-Valkenburg-beperken/](https://www.witteveenbos.com/nl/nieuws/tunnel-kan-overstromingoverlast- Valkenburg-beperken/))

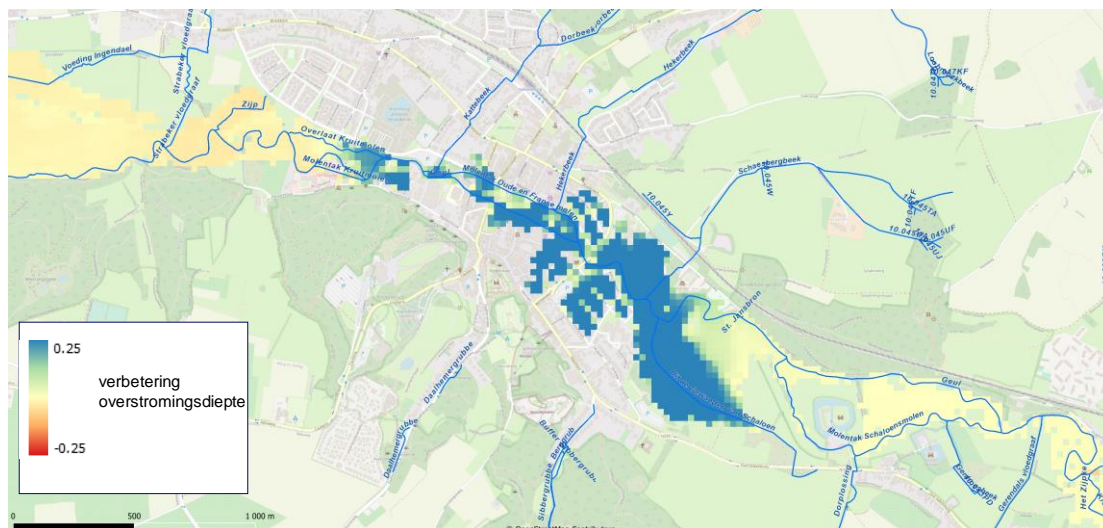
In deze verkenning hebben we aangenomen dat een tunnel wordt aangelegd, bestaande uit twee buizen met elk een doorsnede van 3.5 m, die als een sifon diep onder de bebouwing door gaan. Het instroompunt van de tunnel bevindt zich ten oosten van Valkenheim en de sportvelden. Ten westen van het centrum, ter hoogte van de Polfermolen, stroomt het water uit de tunnel weer terug in de Geul. Het idee van RHDHV is in zoverre vergelijkbaar dat een vergelijkbare afvoerfunctie wordt gerealiseerd, naast een verkeersfunctie.

Tijdens een hoogwater zoals opgetreden in juli 2021 zou een dergelijke tunnel overstroming van het centrum van Valkenburg volgens de berekening (met de kanttekening dat die de waterhoogtes deels onderschatte) grotendeels hebben voorkomen (Figuur 26). Er stroomt dan tot circa 40 m³/s door de tunnelbuizen. Deze afvoer is sterk afhankelijk van hoe “makkelijk” het water vanuit de Geul de tunnel in en uit kan stromen. De piekafvoer door de Geul en Molentak zou daardoor dus met een derde zijn gereduceerd.

De tunnel vormt echter geen oplossing voor de overstromingen boven- en benedenstrooms van Valkenburg. Direct bovenstrooms van de tunnel is de waterdiepte wel afgenomen, maar onvoldoende om overstromingen te voorkomen (Figuur 27). Nog verder bovenstrooms is geen effect merkbaar.



Figuur 26 Overstromingen rond Valkenburg na aanleg van twee tunnelbuizen met elk een diameter van 3.5 m



Figuur 27 Verschil in berekende waterdieptes in de huidige situatie en na aanleg van twee tunnelbuizen met elk een diameter van 3.5 m

Wanneer de afvoercapaciteit lokaal wordt vergroot, bijvoorbeeld zoals in dit geval door de aanleg van een tunnel, dan kan dat tot grotere problemen leiden benedenstrooms. We noemen dat afwentelen. Op basis van de berekening die is uitgevoerd voor deze analyse lijkt de mate van afwentelen, bij aanleg van één tunnel op één locatie, mee te vallen. Direct benedenstrooms nemen waterstanden in deze berekening met maximaal enkele centimeters toe, verder richting Meerssen zijn de effecten nihil. Wanneer zou worden besloten om op meerdere stedelijke knelpunten tunnels aan te leggen, dan zou het effect van afwentelen op benedenstrooms gelegen gebieden groter kunnen zijn. Daarnaast moet het effect voor andere afvoergolven goed in kaart worden gebracht en kan niet op basis van deze ene berekening worden geconcludeerd dat dit voor Valkenburg dé oplossing is.

Wanneer deze oplossingsrichting verder wordt verkend, wordt aangeraden om als variant van de tunnel na te gaan of het mogelijk is om gebruik te maken van een bestaande rioleringsbuis die onder het grootste deel van de Geul in Valkenburg centrum ligt (vanaf de Walramstuw tot aan Polfermolen). Deze buis (2.50m breed en 1.50m hoog) zal waarschijnlijk moeten worden verlengd en worden losgekoppeld van de rest van het riool. De extra afvoercapaciteit van deze buis schatten we dan in op circa $5 \text{ m}^3/\text{s}$, maar dat is sterk afhankelijk van de optimalisatie van de inlaat- en uitlaatkunstwerken. Daarnaast heeft de buis nu ook al een afvoerfunctie, die natuurlijk moet worden gecompenseerd. Dit alles zal nader moeten worden onderzocht.

5.3 Kades verhogen

Langs de Geul en Molentak zijn in Valkenburg kademuurtjes aangelegd. In deze studie is onderzocht hoeveel deze muren zouden moeten worden verhoogd om overstroming van Valkenburg te voorkomen. Ook is gekeken tot hoever bovenstrooms de muren of dijken moeten worden doorgetrokken. De verhoogde kademuuren leiden immers tot hogere waterstanden in Valkenburg en (in verband met opstuwing) ook bovenstrooms van Valkenburg.

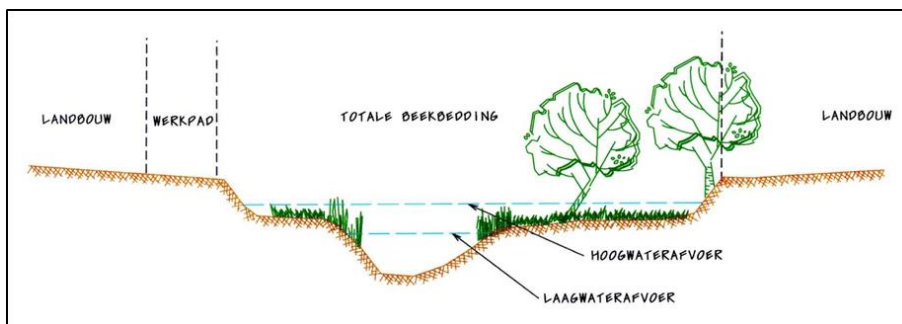
Voor een hoogwater zoals opgetreden in juli 2021 blijken ter hoogte van meetpunt Hertenkamp en de Walramstuw de waterhoogtes dan NAP+72.50 m te worden, ruim 2.5 meter hoger! Dit betekent dat de bestaande de muren dus met ongeveer 2 m moeten worden verhoogd (totale hoogte ongeveer 3 m ten opzichte van maaiveld).

Deze maatregel heeft daarmee een groot effect op de inrichting en beleving van het centrum van Valkenburg. Ook de realisatie van de maatregel kan problemen opleveren. Het is namelijk de vraag of de huidige kademuren eenvoudig verhoogd kunnen worden (met steen of door schotten op de kades te plaatsen bij een dreigend hoogwater). Hoogst waarschijnlijk moet hiervoor de fundering van de muren en de muren zelf verbeterd worden. Ook moeten doorgangen bij bruggen worden afgesloten en moet worden nagegaan hoe de woningen en andere gebouwen die direct grenzen aan de Geul waterkerend kunnen worden gemaakt. Ten slotte moet worden opgemerkt dat het plaatsen van schotten alleen werkt als het hoogwater tijdig wordt verwacht.

Tot slot wordt er op gewezen dat ook bovenstrooms van Valkenburg dijkes zullen moeten worden aangelegd. Dit is om te voorkomen dat water dat eerder al uit de Geul is gestroomd 'achterlangs' naar Valkenburg stroomt en tot overstroming van het centrum leidt. De aanleg van hogere kades in het centrum van Valkenburg leidt immers lokaal ook tot fors hogere waterstanden en daarmee tot opstuwning bovenstrooms. Dit betekent dat zonder de aanleg van keringen bovenstrooms, de overstromingen hier toe zullen nemen ten opzichte van de huidige situatie. Uit de berekeningen blijkt dat verhoogde kades nodig zijn tot aan het Beverpad / Veeweg. Dat is een locatie halverwege Schin op Geul, 2,5 km bovenstrooms van Valkenburg, ter hoogte van het bungalowpark.

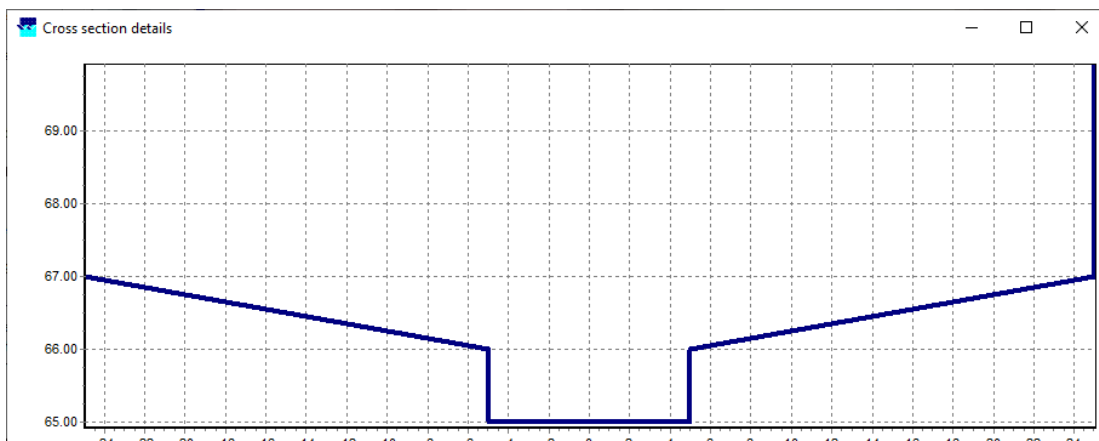
5.4 Herinrichting – accoladeprofiel

Als derde maatregel is gekeken naar herinrichting van de zones langs de Geul in het centrum van Valkenburg. Daarbij is aangenomen dat de oevers langs Geul worden verlaagd. Dit vergroot het doorstroomoppervlak van de Geul. Zo'n getrapt profiel wordt een accoladeprofiel genoemd. Een voorbeeld van zo'n profiel is te zien in Figuur 28. In dit voorbeeld zijn de lager gelegen zones langs de beek ingericht als natuur. Wanneer geen sprake is van hoge afvoeren op de Geul, kunnen de gecreëerde lager gelegen zones langs de Geul in Valkenburg gebruikt worden voor terrassen. Een soortgelijk idee speelt momenteel voor de Mark in Breda, daar groene kades genoemd (zie www.greenquays.nl).



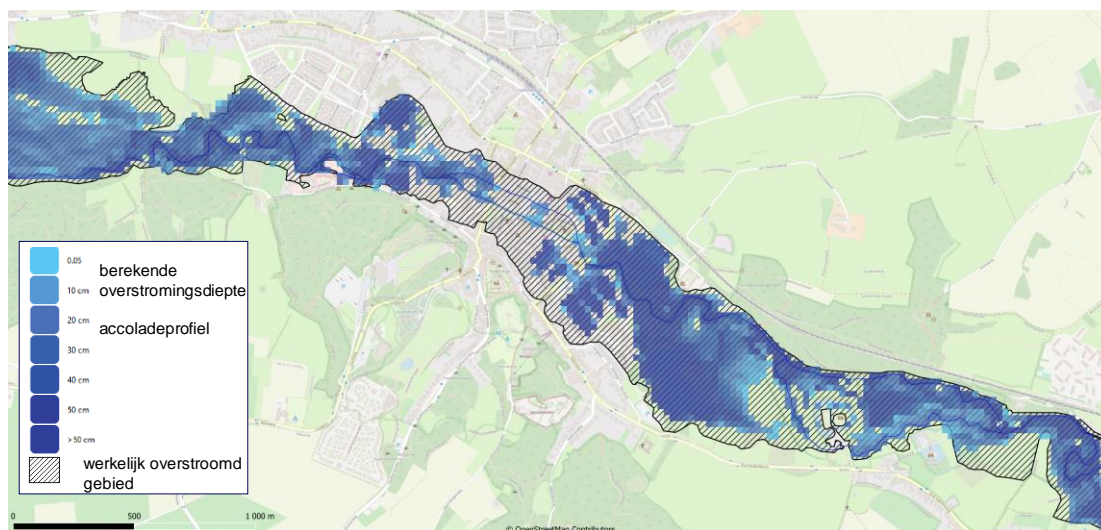
Figuur 28 Een voorbeeld van een accoladeprofiel, waarbij de lager gelegen zones langs de beek zijn ingericht als natuur (figuur overgenomen van <https://lokaleregelgeving.overheid.nl/CVDR406842>)

Bij het bepalen van de effectiviteit van een accoladeprofiel hebben we het doorstroomprofiel als volgt aangepast: de breedte van de bestaande Geul is gehandhaafd (circa 10m breed) maar de straatniveaus direct langs de Geul zijn verlaagd over een totale breedte van 50m (zie Figuur 29). Bij zo'n breedte zou ook bebouwing moeten worden verwijderd. Het is natuurlijk de vraag in hoeverre dat realistisch is, maar het geeft in ieder geval een indicatie van de effectiviteit van deze oplossingsrichting.



Figuur 29 Aangenomen accoladeprofiel ter hoogte van Walramstuw

Realisatie van het accoladeprofiel voor de Geul leidt lokaal tot maximaal circa 1.30 m lagere waterstanden (net benedenstrooms van de Walramstuw: modelobject 139: 68.40 versus 69.70). Het resterende overstromd oppervlak en waterdieptes in de overstromde gebieden is te zien in Figuur 30.



Figuur 30 Overstromde gebieden in en nabij Valkenburg na realisatie van het accoladeprofiel in het centrum van Valkenburg tussen Walramstuw en Odapark

5.5 Buffering en waterberging bovenstrooms

De aanleg van aanvullende waterberging bovenstrooms van Valkenburg zou ook bij kunnen dragen aan het verminderen van de overstromingen in Valkenburg. Deze maatregel heeft als bijkomend voordeel dat dit niet alleen een positief effect heeft op de overstromingen in Valkenburg, maar ook in andere plaatsen langs de Geul, zoals Schin op Geul bovenstrooms en Meerssen benedenstrooms. Gezien de grote bijdrage van de beken in België (bovenstrooms van Cottessen) aan de afvoer in het Nederlandse deel van de Geul zou bekeken kunnen worden of buffering ook in België plaats kan vinden.

Om overstromingen in Valkenburg bij een situatie zoals die in juli 2021 te voorkomen zou minimaal 6 tot 10 miljoen m³ water geborgen moeten worden. Dit volume is bepaald door te kijken naar de afvoeren in Valkenburg die hoger waren dan de zogenaamde *bankfull* afvoer, ofwel de afvoer waarbij de Geul buiten haar oevers treedt. Als we de afvoergolf op dit niveau aftoppen dan komen we op een volume van teveel water van ruim 6 miljoen m³. Om dit volume daadwerkelijk in buffers geborgen te krijgen is al snel circa 50% extra volume nodig. Dat betekent dat zo'n 10 miljoen m³ aan bufferruimte bovenstrooms van Valkenburg moet worden gevonden. Er valt dan niet te ontkomen aan rigoureuze ingrepen in het landschap, waaronder dwarsdammen op de dalbodem en op veel plaatsen dijkjes rondom bebouwing.

Buffers kunnen wel efficiënter worden als ze worden gestuurd, zodat het moment van inzetten en daarmee de bufferwerking optimaal wordt afgestemd op de actuele situatie. Dit vereist echter ook het kunnen maken van goede operationele afvoerverwachtingen. Anders kan het sturen juist ook contraproductief werken.

In feite werkt het Geuldal ook al als een grote natuurlijke buffer, die op dit moment ook grotendeels meestroomt. De dempende werking van deze buffer op de afvoerpieken kan worden vergroot door juist in de bovenstroomse delen de weerstand te vergroten, zodat de overstroomde vlaktes minder meestroomt.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Het karakteristieke, oude centrum van het dorp Valkenburg werd op 14 juli getroffen door een overstroming van de Geul. De overstroming leidde tot grote schade, zowel directe schade aan infrastructuur, panden en bedrijven als indirecte schade als gevolg van misgelopen inkomsten. In deze studie is onderzocht wat er in juli 2021 in Valkenburg gebeurd is, hoe het watersysteem onder deze zeer natte omstandigheden heeft gefunctioneerd en welke maatregelen in theorie mogelijk effectief zouden kunnen zijn om de overstromingsrisico's in de toekomst te verkleinen.

De overstromingen zijn veroorzaakt doordat op 13 en 14 juli sprake was van grote hoeveelheden neerslag. De gebiedsgemiddelde neerslag in het stroomgebied van de Geul komt uit op 128 mm. Hiervan viel 58 mm op 13 juli en 70 mm op 14 juli. De neerslag was niet homogeen over het gebied verdeeld. Zo viel in het uitgestrekte gebied bovenstrooms van Cottessen gemiddeld ongeveer 143 mm terwijl in de buurt van Bunde (bij het uitstroompunt van de Geul in de Maas) een neerslagsom van 100 mm is geregistreerd.

De herhalingstijd van de gebiedsgemiddelde neerslag die in het stroomgebied van de Geul is gevallen, wordt geschat op ongeveer 900 jaar (voor het huidige klimaat). Door klimaatverandering kan de herhalingstijd afnemen tot ongeveer 150 à 300 jaar. Hierbij is uitgegaan van het hoge scenario van het KNMI met als zichtjaar 2050.

Er zijn geen goede afvoermetingen beschikbaar, in ieder geval niet voor deze extreme gebeurtenis. Ter hoogte van Valkenburg is de afvoer door het waterschap ingeschat op circa 100 tot 120 m³/s. De modelberekeningen komen uit op een maximum afvoer van circa 130 m³/s. Volgens deze berekeningen is het grootste deel van de afvoer (ruim 90 m³/s) afkomstig uit België (bovenstrooms van Cottessen). Dit komt niet alleen omdat daar de meeste neerslag viel en dit ook het grootste deel van de stroomgebied vormt, maar waarschijnlijk ook door de hydrologische kenmerken van dit gebied.

Deze afvoer heeft geleid tot overstroming van het centrum van Valkenburg met een maximale waterdiepte van ongeveer 1.25 m. De totale schade wordt op dit moment ingeschat op circa € 400 miljoen.

De aanleg van een tunnel (twee buizen met elk 3.5 meter diameter) om de afvoercapaciteit bij Valkenburg te vergroten had de overstromingen van afgelopen zomer in Valkenburg fors kunnen reduceren. Deze maatregel heeft volgens de berekening echter geen of nauwelijks effect op de gebieden bovenstrooms van Valkenburg. Bij de aanleg van een tunnel blijven negatieve effecten op benedenstroomse gebieden bij deze afvoergolf beperkt tot een maximale toename van de waterstand met enkele centimeters.

Het verhogen van de kademuren langs de Geul is een ingrijpende maatregel. Wanneer men met deze maatregelen overstromingen in juli 2021 had willen voorkomen, dan hadden deze muren een hoogte moeten krijgen van ongeveer 3 m boven maaiveld (2 m hoger dan de huidige muren, die lang niet overal aanwezig zijn). Daarvoor zou de fundering van de bestaande muren moeten worden aangepast en zouden heel wat nieuwe stukken kademuur met vele coupures (doorgangen) moeten worden aangelegd. Ook moeten deze doorgangen afsluitbaar worden gemaakt en woningen die grenzen aan de Geul moeten waterkerend worden gemaakt. Omdat de waterstanden in het centrum van Valkenburg zo'n 2 m hoger worden leidt dit ook tot hogere waterstanden bovenstrooms van Valkenburg. Om overstroming 'achterlangs' te voorkomen zijn dijken nodig tot het Beverpad / Veeweg halverwege tussen Schin op Geul en Valkenburg (zo'n 2.5 km bovenstrooms van Valkenburg, ter hoogte van het bungalowpark).

Realisatie van een zogeheten accoladeprofiel in het centrum van Valkenburg, met lager gelegen zones direct langs het water van de Geul die gebruikt kunnen worden voor terrassen, vergroot het doorstroomoppervlak van de Geul. Wanneer wordt aangenomen dat de huidige Geul gehandhaafd blijft (breedte 10 m), maar daarnaast over tweemaal 20 m een verlaagde zone wordt gerealiseerd, dan leidt dit tot 1.3 m lager waterstanden bij de Walramstuw. De overstromingen in Valkenburg zouden dan bij een soortgelijke situatie als in juli 2021 veel minder erg worden, maar niet geheel voorkomen kunnen worden.

Wanneer overstroming van Valkenburg zou moeten worden voorkomen door alleen water bovenstrooms te bufferen, dan is daar een totaal bergingsvolume voor nodig van bijna 10 miljoen m³. (Ter illustratie: hiervoor is een oppervlakte nodig van circa 1400 voetbalvelden, aangenomen dat er 1 meter water op komt te staan.)

Deze maatregel heeft als voordeel dat dit niet alleen een positief effect heeft op de overstromingen in Valkenburg, maar ook in andere plaatsen langs de Geul, zoals Schin op Geul bovenstrooms en Meerssen benedenstrooms. Omdat een groot deel van de afvoer afkomstig is uit België (bovenstrooms van Cottessen) zou bekeken kunnen worden of buffering onder andere ook daar kan plaatsvinden. Daarnaast kan worden onderzocht in hoeverre de bufferende werking van het Geuldal zelf kan worden vergroot door bijvoorbeeld graften of het verbreden van het beekdal.

Al deze genoemde maatregelen hoeven niet naast elkaar te staan, als "concurrerende" alternatieven. Elk van de onderzochte maatregelen kan ook in een beperktere uitvoering bijdragen aan een deel van de oplossing. Zo is er winst te behalen door het verruimen van de afvoercapaciteit door Valkenburg maar ook door bronmaatregelen en een betere bovenstroomse buffering. Dit zal in een vervolgonderzoek verder moeten worden opgepakt, waarbij het hydrologische en hydraulische functioneren van het hele Geul stroomgebied integraal moet worden meegenomen. We raden aan om niet te snel en op korte termijn ad-hoc maatregelen te nemen.

Al met al concluderen we dat het weersysteem heel extreem is geweest, veel extremer dan de normering tegen wateroverlast en overstroming. Als gevolg van het hoogwater is op landelijk niveau een discussie opgestart over de toekomstige invulling van de normering tegen wateroverlast. Voordat tot een definitieve keuze van maatregelen kan worden gekomen zal hier eerst meer duidelijkheid over moeten komen.

6.2 Aanbevelingen

Wat betreft het gebruikte SOBEK model van het stroomgebied van de Geul merken we op dat dit model is gebruikt voor de toetsing van de normering. Met de beschikbaarheid van nieuwe hoogte-informatie (AHN4) maar vooral ook met de ervaring van het hoogwater van juli 2021 is het zaak om dit model te actualiseren en waar nodig te verbeteren om beter de opgetreden situatie voor het hele stroomgebied te kunnen simuleren. Rond de kernen kan het model verder worden verfijnd om daar met meer detail beter de eventuele overstromingen in kaart te brengen en in meer detail te kunnen kijken naar het effect van mogelijke maatregelen. De neerslagafvoerprocessen in het HBV model moeten ook worden getoetst, waarbij wordt aanbevolen de samenwerking te zoeken met het GRADE project (zie par. 4.3).

Als vervolgstap adviseren we om voor het hele stroomgebied van de Geul een nadere systeemanalyse uit te voeren om stroomgebiedsbreed inzicht te krijgen in knelpunten en haalbare oplossingen. Die systeemanalyse moet dan integraal – en waar nodig zelfs in samenhang met de andere beeksystemen van Limburg en België – worden uitgevoerd. Maatregelen kunnen niet op zichzelf staand worden uitgewerkt; altijd moet de impact op het totale systeem worden meegenomen. Enerzijds om ongewenst afwentelen te voorkomen, anderzijds ook om bovenstroomse kansen die positief naar benedenstrooms uitwerken te pakken.

Referenties

Cornes, R., G. van der Schrier, E.J.M. van den Besselaar, and P.D. Jones. (2018). An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Datasets, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 123. doi:10.1029/2017JD028200

Deltares (2009) Validatie van hydrologische data van de Geul en de Geleenbeek, Q4548, januari 2009

Deltares (2009-2) Modelling Geul, beschrijving modelschematisering, Q4548, januari 2009

Deltares (2021). Wat als 'de waterbom' elders in Nederland was gevallen? Hackathon Deltares, november 2021

HKV (2021). Meetpunt Hommerich, verbeteren nauwkeurigheid hoogwaterafvoeren, PR441910, september 2021

ENW (2021). Hoogwater 2021 Feiten en Duiding. Expertise Netwerk Waterveiligheid. Versie 2, 20 september 2021. Met bijdragen van TU Delft, Deltares, Wageningen University, Erasmus MC, HKV, Universiteit Utrecht, IVM, VU, KNMI, Universiteit Twente
https://www.enwinfo.nl/publish/pages/183541/211102_enw_hoogwater_2021-dv-def.pdf

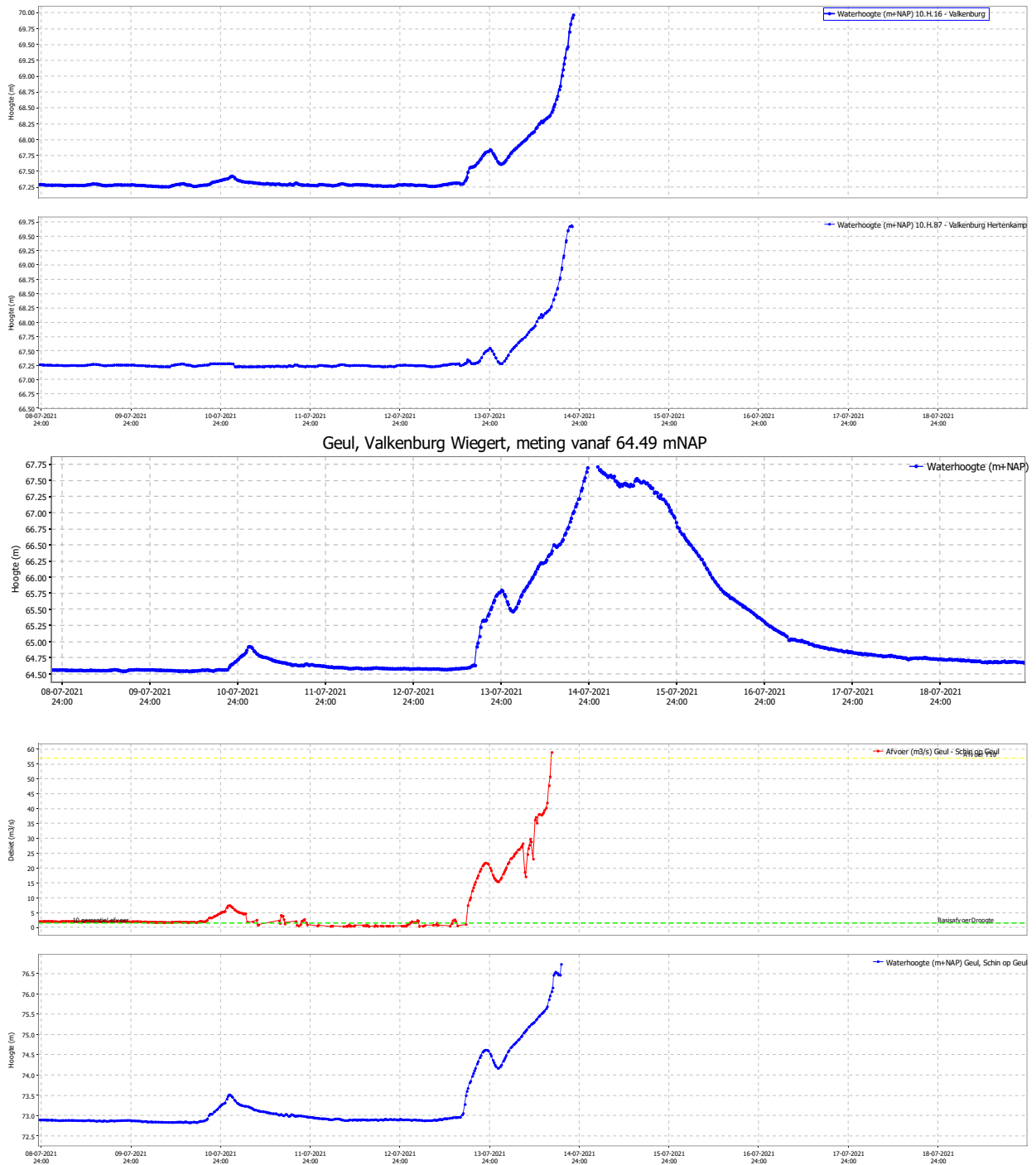
RHDHV (2014). Watersysteemtoets Geul, Geleenbeek en Roer, BD1336, RoyalHaskoningDHV, 6 november 2014

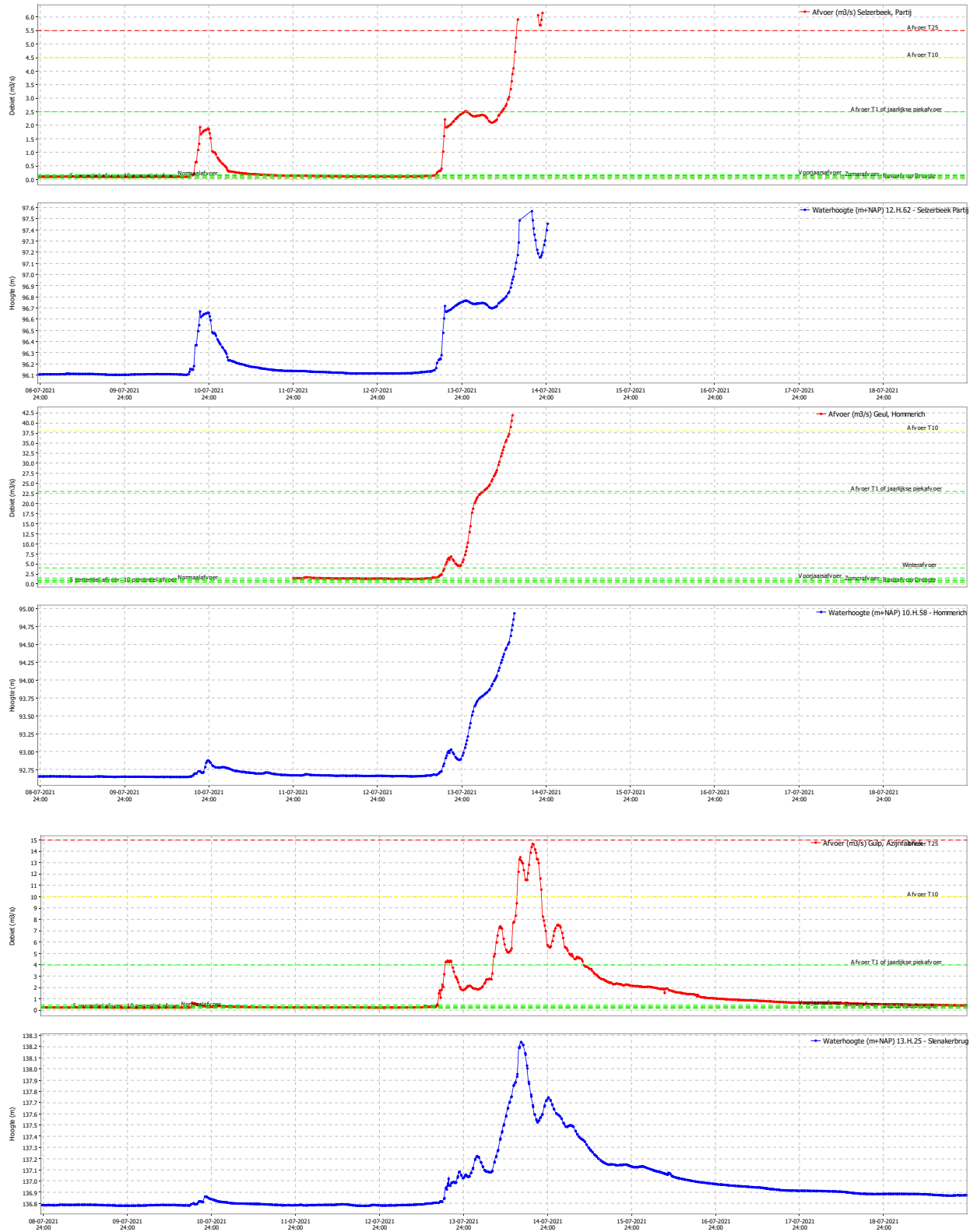
WWA (2021). Rapid attribution of heavy rainfall events in Western Europe July 2021, <https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/Scientific-report-Western-Europe-floods-2021-attribution.pdf>

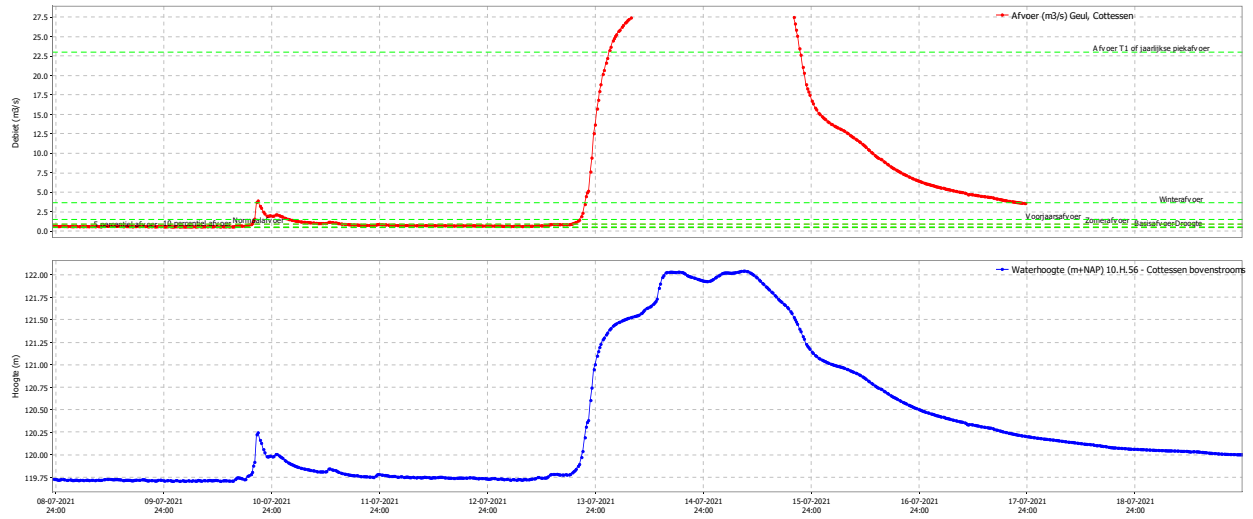
Websites

- www.forecastverification.com
- <https://knowledge.aidr.org.au/media/3518/adr-guideline-7-3.pdf>
- <https://www.witteveenbos.com/nl/nieuws/tunnel-kan-overstromingoverlast-valkenburg-beperken/>
- www.greenquays.nl
- <http://voies-hydrauliques.wallonie.be>
- <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/project/knmi-grade>

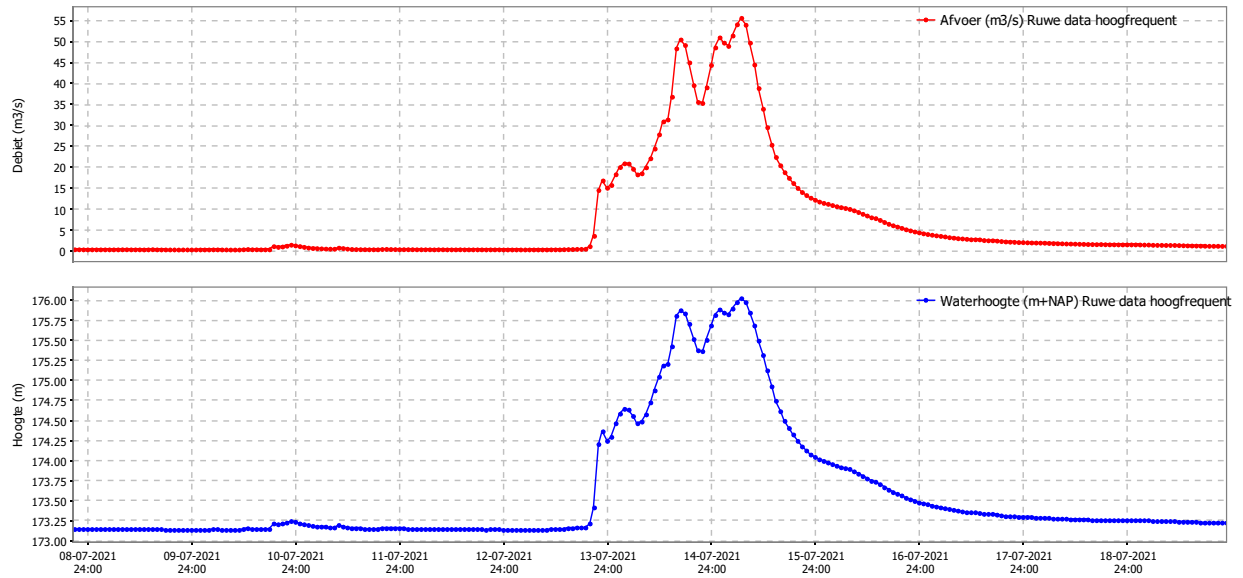
A Metingen waterhoogtes en afvoeren







Kelmis



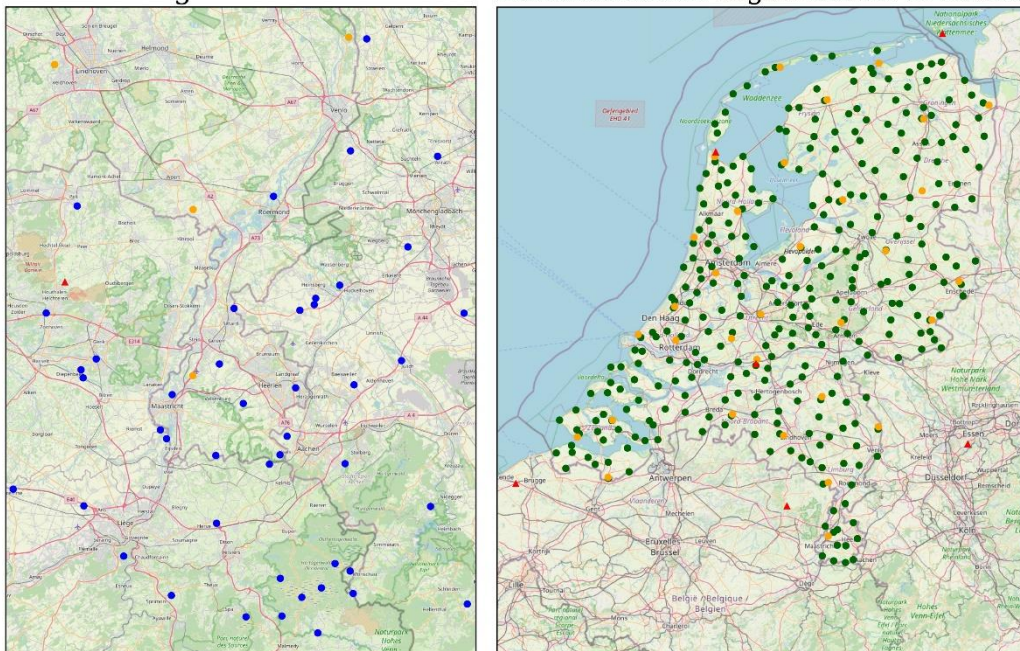
B Detailanalyse neerslag

B.1 Dataset juli 2021

B.1.1 Neerslagvolumes op basis van radardata

Gedurende 13 en 14 juli 2021 is in het stroomgebied van de Geul veel neerslag gevallen. Deze neerslag was onderdeel van een groot weersysteem, gelegen over de Ardennen, de Eifel en Zuid-Limburg. Het totale weersysteem is reeds uitgebreid beschreven in diverse rapporten (zie ENW, 2021 en WWA, 2021) en daarom hier niet verder uitgewerkt.

Locaties regenmeters & radars



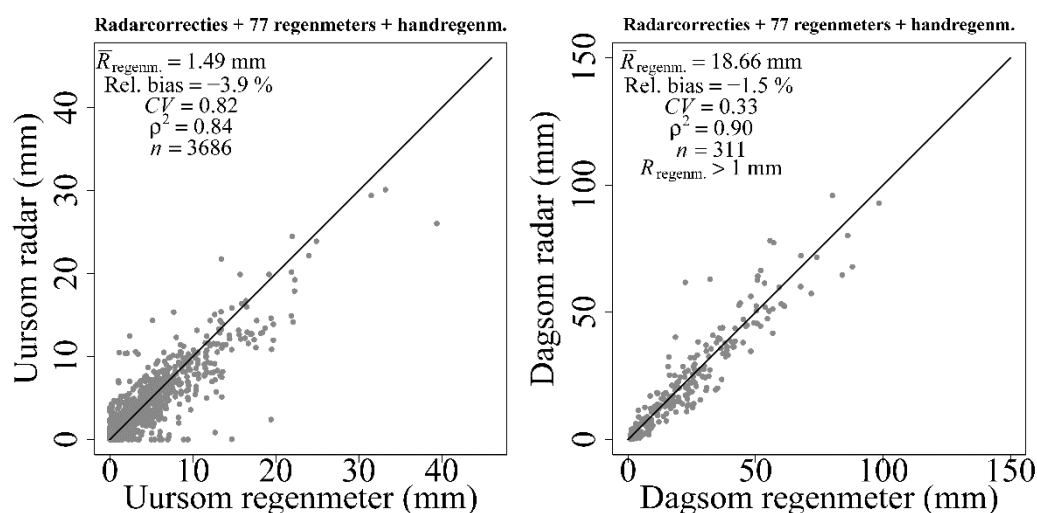
Figuur 31 (Links) Kaart van de provincie Limburg en omgeving met de locaties van de weerradar in Houthalen-Helchteren (rode driehoek), KNMI automatische regenmeters (oranje stippen) en lokale automatische regenmeters (blauwe stippen). (Rechts) Kaart van Nederland en omgeving met de locaties van weerradars (rode driehoeken), KNMI automatische regenmeters (oranje stippen) en KNMI-handregenmeters (groene stippen) © OpenStreetMap contributors

Het KNMI heeft op basis van de beschikbare regenmeterdata en neerslagradardata een zo goed mogelijke neerslagdataset opgesteld voor de periode 13 juli 10:00 - 15 juli 10:00. Het radarneerslagproduct van het KNMI bleek in real time de neerslag fors te onderschatten. Hierin zijn de radardata alleen gecorrigeerd met de data van 32 KNMI automatische regenmeters en is de correctiefactor voor elke radargridcel hetzelfde en varieert deze alleen in de tijd. Na correctie met KNMI-handregenmeterdata zijn de neerslagschattingen al een stuk beter in de final (re)analysis producten. Om voor de evaluatie van de extreme neerslag tot zo goed mogelijke neerslagschattingen te komen:

- 1 zijn extra algoritmes op de radardata toegepast. Concreet wordt gecorrigeerd voor demping van het radarsignaal door extreme neerslag (Overeem et al., 2021), voor het effect van verticale variatie in neerslag en voor snel bewegende buien. Daarnaast worden niet-meteorologische echo's extra verwijderd (o.a. Overeem et al., 2020);
- 2 worden data van 45 lokale regenmeters in Zuid-Limburg en omgeving gebruikt in de correctie van radardata, samen met de bestaande data van 32 KNMI automatische

regenmeters over Nederland. Hierbij wordt per radargridcel een aparte correctiefactor berekend. Dit levert al uursommen op die een stuk beter zijn dan de radardata die in real time beschikbaar waren. Daarna wordt opgeteld tot dagsommen en vervolgens ruimtelijk gecorrigeerd met de dagsommen van de KNMI-handregenmeters. Het correctiefactorveld wordt vervolgens toegepast op de uursommen. De gebruikte radardataset heeft een vlakdekkend ~1x1 km raster en bestaat uit achtenveertig 1-uursommen, twee dagsommen en een 48-uursom.

De Nederlandse radars in Den Helder en Herwijnen (KNMI), de Belgische radars in Jabbeke (Koninklijk Meteorologisch Instituut, KMI) en Houthalen-Helchteren (Vlaamse Milieumaatschappij, VMM) zijn gebruikt als basis. De Duitse radars zijn buiten beschouwing gelaten omdat de data die benodigd zijn voor de correctie van signaaldemping niet tijdig beschikbaar waren. Automatische regenmeterdata zijn verkregen voor 77 locaties (Figuur 31): Voor Nederland van het KNMI (32) en Waterschap Limburg (8), voor België van het KMI (1), VMM/Hydrologisch informatiecentrum (HIC, 5) en Service public de Wallonië (SPW, 11), voor Duitsland van DWD (17) en Wasserverband Eifel-Rur (3). Van deze regenmeters zijn de (geaccumuleerde) klokuursommen gebruikt. Voor sommige regenmeterdatasets is bekend dat achteraf (vrijwel) geen correcties zijn uitgevoerd en van de automatische regenmeters van het KNMI zijn wel de complete en gevalideerde klokuursommen gebruikt. Ten slotte zijn de complete en gevalideerde dagsommen van de KNMI-handregenmeters gebruikt.



Figuur 32 (Links) Spreidingsdiagrammen voor uursommen uit radardatasets versus uursommen van de 77 automatische regenmeters in figuur 6. Dit is geen onafhankelijke verificatie. (Rechts) Spreidingsdiagrammen voor dagsommen uit radardatasets versus de dagsommen van de KNMI-handregenmeters (onafhankelijke verificatie). Beide figuren over de periode 13 juli 10:00 tot 15 juli 10:00

Vanwege de impact van de extreme neerslag is deze casestudie een ultieme test van de kwaliteit van radarneerslagschattingen. Figuur 32 toont de uursommen van de radardataset versus de corresponderende uursom van de automatische regenmeter voor 77 locaties. Al worden ook de KNMI automatische regenmeters buiten Limburg hier meegenomen (Figuur 31), het zwaartepunt van de verificatie ligt dus in Zuid-Limburg e.o. Zeker gegeven de verschillen in meetvolumes en hun locaties tussen radar en regenmeter, zijn de radarneerslagschattingen in goede overeenstemming met de regenmeterdata. Dit is echter geen onafhankelijke verificatie. Voor de dagsommen is dat wel het geval, alleen wordt daarbij geverifieerd t.o.v. de ongeveer 320 KNMI-handregenmeters over heel Nederland. Ook dan wordt de kwaliteit van de radarneerslagschattingen bevestigd. Mogelijk dat de radardataset nog verder zal worden verbeterd, o.a. door het meenemen van data van de radar in Essen, Duitsland.

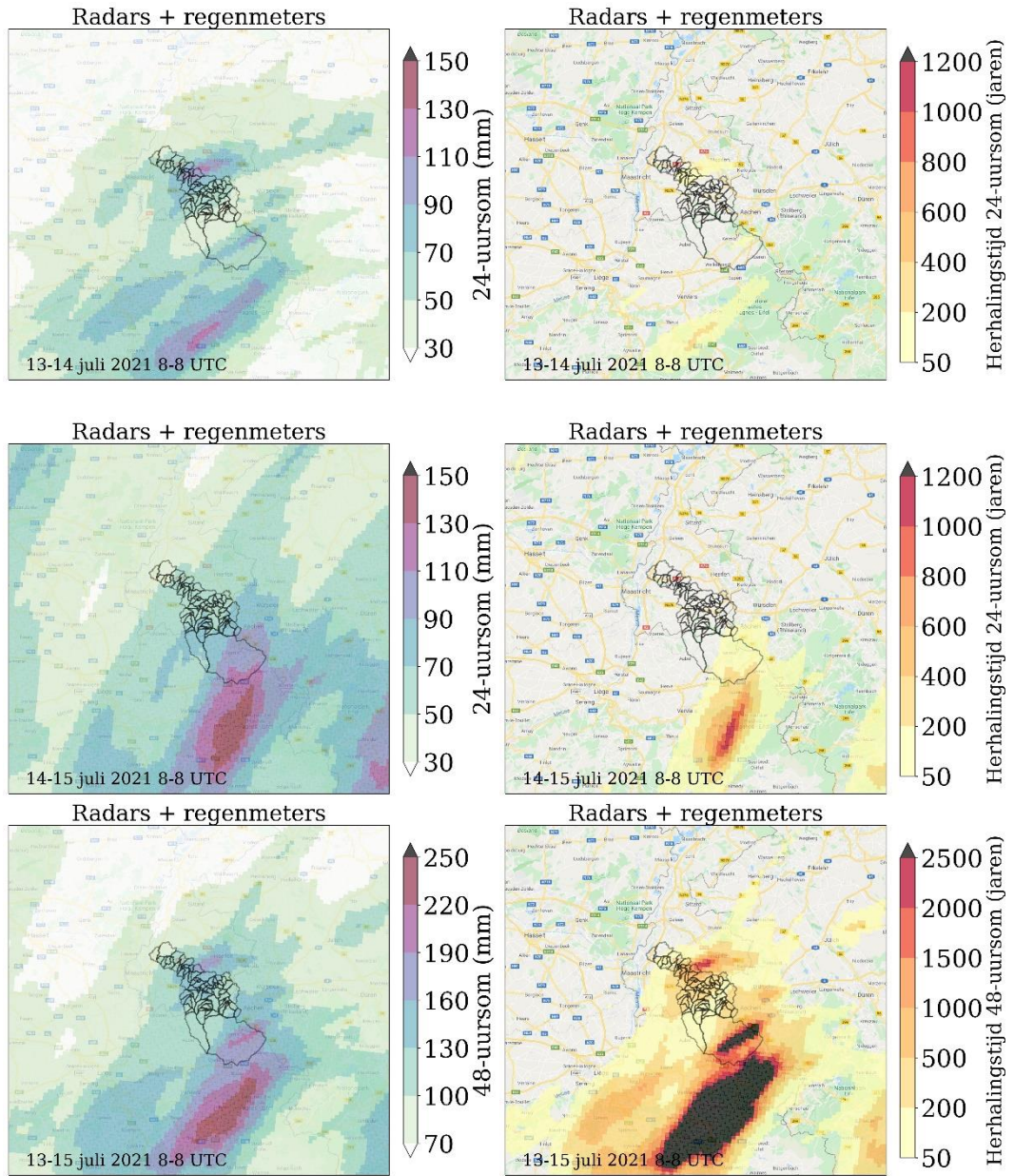
Extreme neerslag verschilt vaak sterk van plek tot plek en de kwaliteit van radarneerslagschattingen zou nog verder kunnen worden verbeterd door ook grondmetingen verkregen d.m.v. crowdsourcing te gebruiken (De Vos et al., 2019). Dit vereist het inwinnen van deze metingen en een grondige kwaliteitscontrole. Uiteraard kan het verder uitbreiden van automatische regenmeternetwerken van professionele gebruikers, zoals waterschappen, ook helpen. En door het ontwikkelen en toepassen van aanvullende algoritmes op radardata kan ook nog winst worden behaald, b.v. bij de omzetting van radarsignalen naar regenintensiteiten, wat mogelijk is met de gebruikte polarimetrische radardata.

Het realtimeradarproduct kan fors worden verbeterd door de genoemde algoritmes toe te passen op radardata en de lokale regenmeterdata te gebruiken en levert ook duidelijk betere final reanalysis uursommen op. Voor de final reanalysis dagsommen zijn de genoemde radarcorrecties en bijdrage van lokale regenmeters gewenst, maar kan een verbetering niet duidelijk worden aangetoond op de locaties van de KNMI-handregenmeters (Overeem en Leijnse, 2021). Dit komt waarschijnlijk omdat op dagbasis het dichte KNMI-handregenmeternetwerk al effectief is in het verbeteren van radardata. Wel zullen de dagsommen boven België en Duitsland een stuk beter zijn vanwege de lokaal meegenomen regenmeterdata.

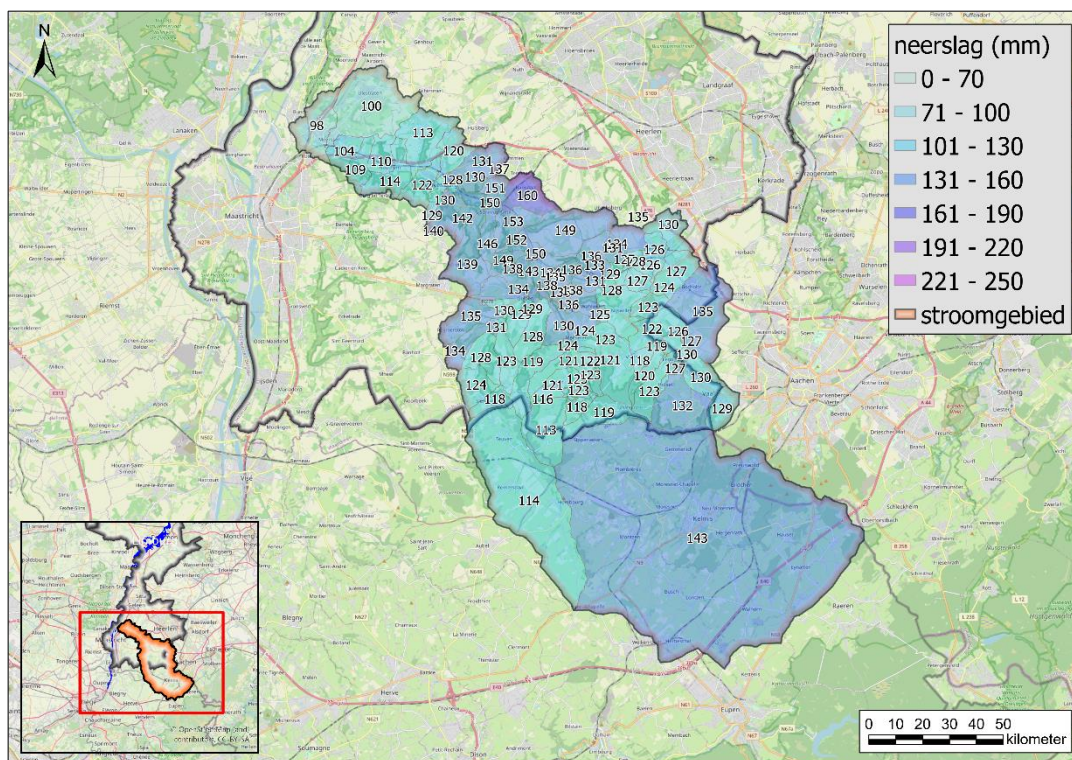
Een praktisch probleem is dat de meeste lokale regenmeterdata pas met een vertraging van 10-30 minuten beschikbaar zijn. Instituten zouden moeten investeren om regenmeterdata echt in real time ter beschikking te stellen. Een gezamenlijk of Europees dataportaal zou hierbij ook kunnen helpen. Alternatief is om een algoritme te ontwikkelen dat omgaat met data die vertraagd binnenkomen en deze een lagere weging te geven in de correctie van radardata. Ten slotte, zou een zo goed mogelijk realtimeradarproduct het ook mogelijk maken om extreme gebeurtenissen direct te evalueren.

Figuur 33 toont de dagsommen van 13 juli 10:00 - 14 juli 10:00 UTC en van 14 juli 10:00 - 15 juli 10:00 en de 48-uursom over 13 juli 10:00 - 15 juli 10:00 UTC en tevens de corresponderende herhalingstijdkaarten. Ondanks de uitgestrektheid van het weersysteem, is er een duidelijke ruimtelijke verdeling van de neerslag. Dat is ook goed te zien in Figuur 34 dat de neerslagsom toont per deelstroomgebied. Terwijl dieper in de Ardennen en de Eifel neerslagsommen van meer dan 200 mm zijn waargenomen, tot wel 245-250 mm in een radargridcel van 1 km², is de gebiedsgemiddelde neerslag voor de zuidelijke deelstroomgebieden van de Geul al veel minder. Het gebied bovenstrooms van Cottessen komt tot een neerslagsom van 143 mm terwijl in de buurt van Bunde (bij het uitstroompunt van de Geul in de Maas) een neerslagsom van 110 mm is bepaald.

Op het totaal van de hele Geul zorgt de ruimtelijke variatie voor het uitmiddelen van de neerslagsom tot 128 mm. Hiervan viel 58 mm van 13 juli 10:00 – 14 juli 10:00 en 70 mm op 14 juli 10:00 – 15 juli 10:00.



Figuur 33 Ruimtelijke verdeling van de neerslag: neerslagsom van 13 juli 10:00 tot 14 juli 10:00 (bovenste rij), van 14 juli 10:00 tot 15 juli 10:00 (middelste rij) en van 13 juli 10:00 - 15 juli 10:00 (onderste rij) en de corresponderende herhalingstijdkaarten. De (deel)stroomgebieden van de Geul zijn weergegeven als zwarte lijnen. © Google Maps



Figuur 34 Gemiddelde neerslagsom (van 13 juli 10:00 tot 15 juli 10:00) per deelstroomgebied van de Geul

B.1.2 Herhalingstijden op basis van radardata

Voor het afleiden van gemiddelde herhalingstijden van neerslagsommen is gebruik gemaakt van de neerslagstatistieken die STOWA heeft laten opstellen (STOWA, 2019) door KNMI. Volgens deze statistieken⁵ zou de herhalingstijd voor de waargenomen 2-daagse neerslagsom op KNMI station Ubachsberg circa 3000 jaar bedragen. Bij Valkenburg is dit al veel lager (~350 jaar), maar nog veel minder bij Epen (circa 90 jaar) en bij Beek (17 jaar).

Radardata bieden de mogelijkheid om voor alle gridcellen van $\sim 1 \text{ km}^2$ in een gebied de herhalingstijd te berekenen i.p.v. voor een klein aantal stations. Hierdoor kunnen herhalingstijdkaarten worden afgeleid (Figuur 8) en kan veel beter inzichtelijk worden gemaakt in welke mate de herhalingstijd varieert van plek tot plek. Hierbij worden de kwantilen van de gebiedsgemiddelde neerslag over radargridcellen van $\sim 1 \text{ km}^2$ berekend door de basisstatistiek in Deelrapport 1 van STOWA (2019) te vermenigvuldigen met een gebiedsreductiefactor uit de literatuur (tabel 5.2; NERC, 1975). Voor dagsommen is deze factor 0,99, voor 48-uursommen 1. De kwantilen van gebiedsgemiddelde neerslag worden berekend voor herhalingstijden van 0,5 jaar, 1 tot en met 100 jaar (met stapgrootte van

⁵ DISCLAIMER bij de afgeleide herhalingstijden.

Voor het gemak is zowel voor berekening van de herhalingstijden voor de neerslag gemeten op de neerslagstations (in de tabellen) als voor de neerslag van de neerslagradar (in de figuren) uitgegaan van de neerslagstatistiek voor het neerslagregime 'R'. Voor het uiterste zuiden van Limburg (stations en gebied ten zuiden van Valkenburg) is eigenlijk het 'H' regime van toepassing. Voor het 'H' regime zijn bij gelijke herhalingstijden de neerslaghoeveelheden gemiddeld 9% hoger dan voor het 'R' regime (zie Tabel 5 en Figuur 19 op pagina's 87-88 van het STOWA 2019-19 rapport). 9% meer betekent bij een zelfde hoeveelheid een kortere herhalingstijd. Uit de neerslagradarbeelden worden ook herhalingstijden geschat voor de neerslag in radarpixels buiten NL. Voor pixels ten zuiden van de Nederlands-Belgische grens en niet te ver van deze grens is het aannemelijk dat hier ook het 'H' regime van toepassing is (en dat de herhalingstijden dus wat korter zijn dan de figuren aangeven, maar minder dan een factor twee kleiner). Voor radarpixels verder naar het zuiden (verder verwijderd van Nederland) is onduidelijk wat voor neerslagregime daar zou passen (omdat daar geen gegevens over bekend zijn). De schattingen van de herhalingstijden voor de radarpixels buiten Nederland moeten daarom als een 1e orde schatting worden gezien.

1 jaar) en 100 tot en met 5000 jaar (met stapgrootte van 10 jaar). Vervolgens wordt voor elke radargridcel berekend voor welke herhalingsjijd het verschil tussen de kwantielen van gebiedsgemiddelde neerslag en de waarde van de gridcel minimaal is.

De meeste neerslag is gevallen op 14 juli 10:00 - 15 juli 10:00. De neerslaggebeurtenis van de twee afzonderlijke dagen is geeneens zo extreem, maar vooral het optreden van grote hoeveelheden op twee opeenvolgende dagen. Figuur 8 toont dat de 48-uursom vooral extreem was in het Belgische deel van de Geul, met herhalingsjijden langer dan 2500 jaar. Duidelijk blijkt hieruit ook een soort zuidwest – noordoost oriëntatie van de gebeurtenis. In dat licht bezien, is het stroomgebied van de Geul er met een oriëntatie van zuidoost naar noordwest er goed vanaf gekomen. De herhalingsjijden boven België en Duitsland, vaak in gebied met sterke orografie, zijn ook gebaseerd op STOWA (2019). Merk op dat de neerslagstatistiek minder geldig kan zijn voor die gebieden, omdat deze is afgeleid voor Nederland. In algemene zin geldt dat voor lange herhalingsjijden de onzekerheid t.g.v. de beperkte reekslengte van regenmeterdata groot wordt. Daarnaast zitten er onzekerheden in de gebruikte regenmeter- en radardata en in de keuze voor een kansverdeling.

Voor hydrologische evaluatie is het ook van belang om in te schatten hoe extreem de neerslaggebeurtenis over het stroomgebied van de Geul (340 km²) was. Dit vereist niet alleen het toepassen van een gebiedsreductiefactor uit de literatuur, maar ook op basis van radardata (NERC, 1975 en Deelrapport 4 in STOWA, 2019). Met zo'n reductiefactor wordt gecorrigeerd voor ruimtelijke effecten: Een zomerse hoosbui is doorgaans beperkt van omvang

De gebiedsgemiddelde neerslagsom uit de radardataset over het stroomgebied van de Geul is 128 mm (van 13 juli 10:00 – 15 juli 10:00). Vervolgens worden de kwantielen van gebiedsgemiddelde neerslag berekend door de basisstatistiek in Deelrapport 1 van STOWA (2019) te vermenigvuldigen met een gebiedsreductiefactor uit de literatuur (tabel 5.2; NERC, 1975; van punt naar 6 km²) en een gebiedsreductiefactor op basis van radardata (Deelrapport 4 in STOWA, 2019; van 6 naar 340 km²). De bijbehorende herhalingsjijd wordt gevonden door deze te variëren en het kwantiel van gebiedsgemiddelde neerslag telkens te vergelijken met de gebiedsgemiddelde neerslagsom. Deze neerslagsom heeft voor het huidige klimaat een herhalingsjijd van circa 900 jaar. Hiervan viel 58 mm op 13 juli (van 13 juli 10:00 – 14 juli 10:00) en 70 mm op 14 juli (van 14 juli 10:00 – 15 juli 10:00). De herhalingsjijd van de beide individuele dagen is veel lager: Respectievelijk 15 en 40 jaar. Juist de opeenvolging van beide dagen maakt de gebeurtenis een stuk zeldzamer.

Het schatten van de onzekerheid ten gevolge van de beperkte reekslengte voor de uiteindelijke statistiek van extreme gebiedsneerslag is achterwege gelaten. Hiervoor zou niet alleen de onzekerheid in de basisstatistiek moeten worden geschat, maar ook de onzekerheid in de gebiedsreductiefactor en de onzekerheid in de op radardata gebaseerde gebiedsreductiefactoren. En die onzekerheden zouden vervolgens moeten worden gecombineerd tot één onzekerheid, wat alles bij elkaar een te ingewikkeld vraagstuk is in het kader van dit onderzoek.

De situatie zou ook veel extremer zijn geweest als het weersysteem ook maar 50 km meer naar het noorden had gelegen. Nu is alleen het meest zuidelijke deel van het Belgische deelstroomgebied van de Geul extreem belast geweest, met herhalingsjijden langer dan 2500 jaar per gridcel, en (in Nederlands Limburg) in het gebied tussen Valkenburg en Heerlen een handvol gridcellen met herhalingsjijden van 1000-1500 jaar.

B.1.3 Herhalingstijden stationsdata

In deze sectie volgt een analyse van de neerslaghoeveelheden en bijbehorende herhalingstijden van de neerslag die in juli 2021 tot de overstromingen in Zuid Limburg heeft geleid, zowel voor het huidige klimaat als voor de toekomst. Voor het huidige klimaat op basis van de meest recente actuele neerslagstatistiek (STOWA, 2019) en voor de toekomst op basis van de statistiek voor het huidige klimaat gecombineerd met de KNMI'14 klimaatscenario's (beschreven in STOWA, 2015 en STOWA, 2019). Vanwege de extremititeit van de gebeurtenis zijn aanvullende berekeningen gedaan voor langere herhalingstijden dan die gepresenteerd in STOWA (2019), en ontsloten worden via Meteobase.nl. Ook voor deze herhalingstijden gelden dezelfde disclaimer als in de vorige paragraaf.

Tabel 2 geeft voor 9 stations in Zuid Limburg de 1-daagse (24 uur) neerslagsommen voor de 4 dagen van 12 t/m 15 juli 2021 en de bijbehorende herhalingstijden (T). De herhalingstijden zijn berekend op basis van de zogenoemde STOWA (2019) basisstatistiek voor het huidige klimaat^[1].

Tabel 2 1-daagse neerslagsommen in de periode 12 t/m 15 juli 2021, en bijbehorende herhalingstijden (T) voor 9 KNMI handregenmeterstations in Zuid Limburg

Station		12 juli		13 juli		14 juli		15 juli	
		som (mm)	T (jaar)	som (mm)	T (jaar)	som (mm)	T (jaar)	som (mm)	T (jaar)
966	Schinnen	2.2	veel kleiner dan 1	35.5	< 1	52.0	4	7.5	veel kleiner dan 1
973	Beek	3.6		36.2	< 1	46.2	2	5.7	
965	Schaesberg	3.5		86.2	50	71.9	20	7.3	
963	Valkenburg	3.0		80.2	35	53.8	5	9.3	
962	Ubachsberg	2.7		98.4	100	84.0	40	8.3	
981	Oost Maarland	1		54.7	5	50.3	4	5.4	
971	Noorbeek	1		88	55	59.3	8	12.4	
980	Epen	1.2		42	2	67.8	14	6.3	
968	Vaals	1.5		50.6	4	74	22	6.9	

* Dagelijkse aftappingen om 08 UTC (10 uur lokale tijd, bijv. neerslagsom 13 juli = neerslag opgevangen tussen 13 juli 08 UTC en 14 juli 08 UTC). Vetgedrukte getallen: station met de grootste 1-daagse (24 uur) neerslagsom op elk van de dagen 12 t/m 15 juli 2021. Lichtblauwe cellen corresponderen met de stations waarvoor de 1-daagse hoeveelheden op 13 juli groter waren dan op 14 juli (ongekleurde cellen andersom). Voor locatie van de stations zie Figuur 31.

Tabel 3 Maximale 2-, 3- en 4-daagse neerslagsom in de periode 12 t/m 15 juli 2021 en bijbehorende herhalingstijden (T) voor 9 KNMI handregenmeterstations in Zuid Limburg

Station		2 dagen (13-14 juli)		3 dagen (13-15 juli)		4 dagen (12-15 juli)	
		som (mm)	T (jaar)	som (mm)	T (jaar)	som (mm)	T (jaar)
966	Schinnen	87.5	23	95	21	97.2	15
973	Beek	82.4	17	88.1	13	91.7	10
965	Schaesberg	158.1	~1000	165.4	~1000	168.9	~1000
963	Valkenburg	134	~350	143.3	~350	146.3	~300
962	Ubachsberg	182.4	~3000	190.7	~3500	193.4	~3500
981	Oost Maarland	105	70	110.4	55	111.4	36
971	Noorbeek	147.3	~600	159.7	~800	160.7	~600
980	Epen	109.8	90	116.1	80	117.3	50
968	Vaals	124.6	200	131.5	190	133	130

Vetgedrukte getallen: station met de grootste 2-daagse, 3 daagse en 4-daagse neerslagsommen in de periode 12 t/m 15 juli 2021.

Beschouwen we de lokaal (op neerslagstations) gemeten neerslag in de periode 12 t/m 15 juli 2021 dan blijkt dat de neerslag in Zuid Limburg zich vooral geconcentreerd heeft in een 2-daagse periode (13-14 juli). Maximaal is 182 mm in 48 uur gemeten op station Ubachsberg (ten oosten van Valkenburg) en dat correspondeert met een herhalingstijd van ongeveer 3000 jaar (Tabel 3). Dit is een veel langere herhalingstijd dan de maximale herhalingstijden van 100 en 40 jaar voor de maximale 24-uur neerslag (respectievelijk voor de 98 en 84 mm op 13 en 14 juli eveneens voor station Ubachsberg, Tabel 2). In verhouding is de maximale 2-daagse neerslag dus veel extremer dan de individuele 1-daagse neerslaghoeveelheid (de 2-daagse hoeveelheden zijn veel extremer, in termen van herhalingstijd, omdat de kans op 2 achtereenvolgende dagen met veel regen klein(er) is). De herhalingstijden voor de 3- en 4-daagse hoeveelheden zijn afgerond (nog) iets hoger dan die voor de 2-daagse neerslag maar gezien de statistische onzekerheid in dergelijk lange herhalingstijden is een herhalingstijd van 3500 jaar statistisch niet wezenlijk verschillend van een herhalingstijd van 3000 jaar (zie 'Statistische onzekerheden'). Daarbij, op de 3e dag komt er, bovenop de 182 mm in 2 dagen, nog maar weinig bij; iets meer dan 8 mm en op de 4e dag nog geen 3 mm (Tabel 3).

Op basis van de radar metingen (speciaal hiervoor geconstrueerde hoge-resolutie radardata voor de periode 13 - 14 juli 2021 gecorrigeerd met extra (niet-KNMI) neerslagstations in het gebied) is voor het stroomgebied van de Geul (grootte 340 km²) een 48-uur gebiedsgemiddelde neerslag berekend van 128 mm. Gebruikmakend van zogenoemde gebiedsreductiefactoren (ARF's = Areal Reduction Factors) in STOWA (2019) wordt hiervoor een herhalingstijd van ongeveer 900 jaar berekend. Dit is wat minder dan de ongeveer 3000 jaar voor station Ubachsberg. Dit betekent dat het voor de Geul relatief wat minder extreem was dan je op grond van de lokale hoeveelheid en de gebiedsreductie zou mogen verwachten. Anderzijds kan dit verschil ook goed begrepen worden van wege het feit dat gebied met maximale neerslag in Zuid-Limburg hoofdzakelijk een west-oost oriëntatie heeft terwijl het Geulstroomgebied ruwweg zuid-noord ligt (zie Figuur 33 voor 48-uur radarneerslag 13-14 juli).

KNMI'14 klimaatscenario neerslagstatistieken

In STOWA (2019) zijn neerslagstatistieken gemaakt corresponderend met de KNMI'14 klimaatscenario's. Dit resulteert in tabellen met voor geselecteerde herhalingstijden (tussen 0.5 en 1000 jaar) en voor geselecteerde neerslagduren, de corresponderende neerslaghoeveelheden (de herhalingstijden) voor zowel het huidige klimaat (referentie "2014") als voor de toekomst 2050 en 2085. Daarnaast zijn er tabellen met voor elk scenario (en per herhalingstijd) de relatieve verandering (in %) ten opzichte van de referentiewaarden voor het huidige klimaat. In totaal kent KNMI'14 4 verschillende scenariovarianten, GL, GH, WL en WH (zowel voor 2050 als voor 2085) maar voor de neerslagstatistiek zijn er ook 3 ondervarianten relevant (die onder andere, de onzekerheid in verandering in de dagsom in de zomer die eens per 10 jaar overschreden wordt dekt) aangeduid met 'lower', 'centr' en 'upper'. Dit geeft effectief voor 2050 als 2085 $3 \times 4 = 12$ scenariovarianten. Deze zijn allemaal in STOWA (2015) en STOWA (2019) beschreven en worden ontsloten via Meteobase.nl. Voor de overzichtelijkheid worden hier niet alle 12 varianten beschouwd maar alleen de "laagste" en de "hoogste" van die 12 (in termen van neerslagveranderingen) en deze worden verder aangeduid met "lower" en "upper". Voor 2050 en 2085 geeft dit dus 4 in plaats van 24 scenario's. STOWA (2015, 2019) en Meteobase.nl geven de "klimaatscenario statistieken" echter niet voor herhalingstijden langer dan 1000 jaar. Omdat we al gezien hebben dat de lokale maximale 48-uursom (182 mm) correspondeert met een herhalingstijd van ~3000 jaar hebben we voor dit doeleind de herhalingstijden uitgebreid met 2000, 2500, 5000, en 10000 jaar. Hierbij wordt wel opgemerkt dat de statistische onzekerheid (in de herhalingstijden) sterk toeneemt met de herhalingstijd en dat gebruikers zich hiervan bewust moeten zijn (zie 'Statistische onzekerheden'). Hieronder is daarom een tabel gegeven met voor de (voor 13-14 juli 2021) relevante neerslagduren van 24- en 48 uur en voor de 2x2 geselecteerde (uiterste) klimaatscenario's voor geselecteerde herhalingstijden de relatieve verandering in de corresponderende neerslaghoeveelheid gegeven. Voor de "lower" klimaatscenario's zijn de relatieve veranderingen klein; rond 0% voor 2050 en ongeveer 2% voor 2085. Voor de "upper" klimaatscenario's zijn de veranderingen voor 2050 ruwweg 15 tot 18% en voor 2085 30-35%. De veranderingen nemen systematisch iets toe met de herhalingstijd^[2] en zijn systematisch iets groter voor 24-uur neerslagsommen dan voor 48-uur neerslagsommen.

Tabel 4 Relatieve veranderingen [in %] volgens de "laagste" en "hoogste" KNMI'14 neerslagscenario's (resp "lower" en "upper") voor 2050 en 2085 voor neerslagduren van 24- en 48 uur voor geselecteerde herhalingstijden obv STOWA (2019)

	2050_lower		2050_upper		2085_lower		2085_upper	
	24 uur	48 uur	24 uur	48 uur	24 uur	48 uur	24 uur	48 uur
1	0.5	1	13	13	1	2	26	24
10	0	0.5	16	15	2	2	31	28
100	0	0	17	16	2	2	33	31
200	0	0	17	16	2	2	34	31
250	0.5	0	17	16	2	2	34	31
500	0.5	0	18	17	2	2	34	32
1000	0.5	0	18	17	2	2	34	32
2000	0.5	0	18	17	2	2	35	32
2500	0.5	0	18	17	2	2	35	32
5000	0.5	0	18	17	2	2	35	32
10000	0.5	0	18	17	2	2	35	33
T ≤ 1000	0	0.5	16	15	2	2	31	29
T ≥ 1000	0.5	0	18	17	2	2	35	32

* Veranderingen ≤ 1% afgerond op 0.5%, rest afgerond op 1%. De een-na-laatste rij geeft de relatieve verandering gemiddeld over de herhalingstijden in de tabel t/m 1000 jaar en de laatste rij idem maar dan gemiddeld over de (vijf) herhalingstijden vanaf T=1000 jaar.

In Tabel 5 zijn de relatieve veranderingen uit Tabel 4 voor een neerslagduur van 24 uur toegepast op de referentie 24-uur neerslaghoeveelheden voor het huidige klimaat (kolom "2014"). In Tabel 6 is op basis van Tabel 4 het zelfde gedaan voor een neerslagduur van 48 uur. In deze tabel corresponderen de vetgedrukte getallen met (lokale) 48-uur neerslagsommen die zijn opgenomen in de "Stresstest Wateroverlast"^[3] gedefinieerd vanuit het Deltaprogramma Ruimtelijke Adaptatie (DPRA) in samenwerking met STOWA en RIONED. Voor de stresstest zijn herhalingstijden van 100, 250 en 1000 jaar geselecteerd en daarvoor de 48-uurs hoeveelheden voor het huidige klimaat maar ook die voor het "2050_upper" klimaatscenario (17% grotere hoeveelheden als voor het huidige klimaat). Voor het huidige klimaat corresponderen die herhalingstijden van 100, 250 en 1000 jaar respectievelijk met 48-uur sommen van 111, 129 en 158 mm. Voor het "2050_upper" klimaat worden dan resp. 129, 149 en 184 mm. Interessant is dat 129 mm in het huidige klimaat een herhalingstijd heeft van 250 jaar en in het "2050_upper" klimaat een herhalingstijd van (toevallig) precies 100 jaar (zie lichtblauwe cellen). M.a.w. deze hoeveelheid van 129 mm heeft in het 2050_upper klimaat een 2.5 keer zo grote kans van voorkomen (meer precies: om overschreden te worden).

Geheel toevallig ook zien we in deze tabel een 48-uur som van 184 mm (bij een herhalingstijd van 1000 jaar onder het "2050_upper" klimaat). Deze 184 mm komt heel dicht in de buurt van de 182 mm (48-uur som op 13-14 juli 2021 op station Ubachsberg) waarvoor een herhalingstijd van ~3000 jaar is berekend (consistent met de kolom "2014" in de tabel). 182 mm in 48 uur komt dus onder het "2050_upper" klimaatscenario ongeveer 3 keer zo vaak voor als nu en onder het "2085_upper" klimaatscenario zelfs ongeveer 6 keer zo vaak als nu (herhalingstijd is dan ongeveer 500 jaar, zie gele cellen in de tabel). Deze tabellen kunnen dus op 2 manieren gelezen worden: 1) hoeveel verandert/wordt bij een vaste herhalingstijd de hoeveelheid gegeven een bepaald klimaatscenario of 2) hoeveel verandert bij een vaste hoeveelheid de herhalingstijd gegeven een bepaald klimaatscenario.

Een zelfde berekening van de herhalingstijd onder de "2050_upper" en "2085_upper" klimaatscenario's kan ook gedaan worden voor de 128 mm in 48 uur gemiddeld over het Geulstroomgebied (340 km²) waarvoor hierboven een herhalingstijd van ~900 jaar is genoemd. Onder de "2050_upper" en "2085_upper" scenario's zou deze ~900 jaar reduceren tot een herhalingstijd van respectievelijk ~300 jaar en ~150 jaar. Ofwel 3 en 6 keer zo vaak onder deze twee toekomst-/klimaatscenario's als nu.

Onder de "2050_lower" en "2085_lower" klimaatscenario's zijn de veranderingen in de neerslag dus slechts ongeveer 0.5% (voor 2050) en 2% (voor 2085), de daarmee corresponderende veranderingen in herhalingstijden zijn daarmee ook klein (en niet berekend).

Tabel 5 Neerslaghoeveelheden [in mm] voor een duur van 24 uur bij geselecteerde herhalingstijden in het huidige klimaat ("2014") en in 2050 en 2085 voor de laagste ("lower") en hoogste "upper" KNMI'14 neerslagsscenario's. Obv STOWA (2019) maar uitgebreid met herhalingstijden > T = 1000 jaar

T	"2014"	2050		2085	
		"lower"	"upper"	"lower"	"upper"
1	36.8	36.9	41.7	37.1	46.2
10	63.0	62.9	72.9	64.0	82.2
100	99	99	116	101	132
200	112	112	132	114	150
250	117	116	137	119	156
500	132	131	155	135	177
1000	148	148	175	151	199
2000	166	166	196	170	224
2500	173	172	204	176	233
5000	193	193	228	198	261
10000	216	215	255	221	292

* Hoeveelheden vanaf T = 100 jaar afgerond op 1 mm. Voor herhalingstijden > 1000 jaar cursief van wege de grote statistische onzekerheid (zie 'Statistische onzekerheden').

Tabel 6 Als Tabel 5 maar voor een duur van 48 uur

T	"2014"	2050		2085	
		"lower"	"upper"	"lower"	"upper"
1	46.0	46.4	51.9	46.8	57.1
10	74.9	75.3	86.1	76.4	96.2
100	111	112	129	114	145
200	124	124	144	127	163
250	129	129	149	131	168
500	143	143	166	145	187
1000	158	158	184	161	208
2000	174	174	203	177	229
2500	179	179	209	183	237
5000	197	197	230	201	260
10000	216	216	252	220	286

* Hoeveelheden vanaf T = 100 jaar afgerond op 1 mm. Voor herhalingstijden > 1000 jaar cursief van wege de grote statistische onzekerheid (zie verder op). Vetgedrukte waarden corresponderen met 48-uurs hoeveelheden gebruikt in de "Stresstest Wateroverlast" opgesteld vanuit het Deltaprogramma Ruimtelijke Adaptatie in samenwerking met STOWA en RIONED (april 2020). Voor betekenis gekleurde cellen zie tekst.

DISCLAIMER ten aanzien van klimaatscenario's

De KNMI'14 klimaatscenario's worden in het najaar van 2023 opgevolgd door de KNMI'23 klimaatscenario's. Daarmee is de 'houdbaarheid' van de KNMI'14 klimaatscenario's en daarvan afgeleide producten/berekeningen beperkt. Dat de aanstaande KNMI'23 klimaatscenario's (op punten) anders zullen zijn dan de KNMI'14 klimaatscenario's is zeker maar wat dat precies voor de neerslagveranderingen in de klimaatscenario's gaat betekenen valt nu nog niet te zeggen en daarmee ook niet hoe dat gaat doorwerken in de neerslagstatistiek voor de toekomst.

Statistische onzekerheden

Hieronder wordt kort ingegaan op de inherente grote statistische onzekerheid bij lange herhalingstijden. De hier gepresenteerde resultaten zijn een uitbreiding/expert extrapolatie van de resultaten in STOWA (2019), Deelrapport 1, Tabel 7 (pag. 30).

Deze tabel laat zien dat de relatieve onzekerheid in de neerslagkwantielen (neerslaghoeveelheid bij een bepaalde neerslagduur en herhalingstijd) vooral afhangt van de herhalingstijd en slechts heel weinig van de neerslagduur. Die onzekerheid kan dan per herhalingstijd uitgedrukt worden in een (relatief) 95% betrouwbaarheidsinterval, aangeduid met [X, Y] waarbij de waarde van X correspondeert met het 2.5% percentiel en Y met het 97.5% percentiel en de range [X, Y] de 95% betrouwbaarheid opspant. X en Y zijn in principe factoren waarmee de neerslaghoeveelheid vermenigvuldigd dient te worden om het bijbehorende 95% betrouwbaarheidsinterval voor die neerslaghoeveelheid te krijgen. Bijv. bij een neerslaghoeveelheid van 100 mm en een relatief 95% interval van [0.9, 1.2] is het corresponderende (absolute) 95% betrouwbaarheidsinterval 90 – 120 mm. In STOWA (2019) worden de relatieve intervallen gegeven voor herhalingstijden t/m 1000 jaar, voor dit rapport zijn die in onderstaande tabel uitgebreid / geëxtrapoleerd naar herhalingstijden voor 2000, 5000 en 10000 jaar (cursief in de tabel).

Tabel 7 Statistische onzekerheden

T	Relatief 95% interval
	[X, Y]
10	[0.96, 1.05]
100	[0.91, 1.11]
200	[0.89, 1.13]
500	[0.86, 1.17]
1000	[0.84, 1.20]
2000	<i>[0.82, 1.23]</i>
5000	<i>[0.79, 1.27]</i>
10000	<i>[0.77, 1.30]</i>

Voor elke neerslagduur kan deze relatieve onzekerheid omgerekend worden naar een corresponderende onzekerheid in de herhalingstijd. Voor 24-uur of 48-uur neerslag maakt dat niet veel verschil. Daarom wordt hier voor de bepaling van de statistische onzekerheid in de herhalingstijd het gemiddelde voor 24- en 48 uur genomen. Ondanks de asymmetrie in de onder- en bovengrens van de 95%-intervallen, dat wil zeggen: de factor (het percentage) voor de 2.5%-grens (van het 95%-interval) is in verhouding kleiner dan die voor de 97.5%-grens, zijn voor de 95%-intervallen voor de herhalingstijd de factoren voor 2.5% en 97.5% grenzen vrijwel gelijk en daarom wordt maar 1 (de gemiddelde factor gegeven. Voor 24- en 48-uur neerslag is de onzekerheid in de herhalingstijd voor herhalingstijden van 10, 100, 1000, 2000, 5000, en 10000 jaar resp. een factor 1.25, 1.8, 3.2, 3.8, 4.9 en 6.2. Ofwel voor deze neerslagduren betekent een geschatte/berekende herhalingstijd van 10 jaar een 95%-interval voor de herhalingstijd van tussen de 8 en 13 jaar, een geschatte herhalingstijd van 1000 jaar een (95%-)interval voor de herhalingstijd van ongeveer 300 tot 3000 jaar en een geschatte herhalingstijd van 10000 jaar een interval voor de herhalingstijd van ongeveer 1500 tot 60000 jaar. Het is van belang dat gebruikers zich bewust zijn van de (enorme) statistische onzekerheid in de herhalingstijd bij lange herhalingstijden (herhalingstijden van boven de 1000 jaar). Deze onzekerheid is ook de onderbouwing voor het eerdere statement dat geschatte/berekende herhalingstijden van 3000 en 3500 jaar statistisch niet onderscheidbaar zijn.

Literatuur

STOWA, 2019: STOWA Rapport 2019-19, J. Beersma, H. Hakvoort, R. Jilderda, A. Overeem en R. Versteeg

STOWA, 2015: STOWA Rapport 2015-10, J. Beersma, J. Bessembinder, T. Brandsma, R. Versteegh en H. Hakvoort

STOWA, 2004: STOWA Rapport 2004 26, A. Smits, J.B. Wijngaard en M. Kok.

^[1] NB In de STOWA (2019) neerslagstatistiek is al rekening gehouden met de historische toename van de (extreme) neerslag in Nederland. Vergeleken met de voorgaande STOWA (2004) neerslagstatistiek zijn voor 24-uur en 48-uur neerslagsommen met herhalingstijden tussen 100 en 1000 jaar de kansen in STOWA (2019) gemiddeld met ongeveer een factor 5 toegenomen. Voor neerslagsommen met herhalingstijden tussen 10 en 100 jaar bedraagt die toename gemiddeld ongeveer een factor 3.

^[2] Dit komt omdat er onder de klimaatscenario's bij de onderliggende GEV verdelingen niet alleen een duidelijke toename van de locatieparameter is maar ook een lichte toename van de dispersie coëfficiënt (ongeveer 5% bij 2050_upper en 10% bij 2085_upper). Bij onveranderde dispersie coëfficiënt zijn de relatieve veranderingen per definitie voor alle herhalingstijden gelijk.

^[3] Naast 48-uur neerslaghoeveelheden (als maatgevend voor regionale neerslagstress/wateroverlast) zijn ook 1- en 2-uur neerslaghoeveelheden (als maatgevend voor lokale neerslagstress/wateroverlast) in de "Stresstest Wateroverlast" opgenomen.

B.2 Attributiestudie

Om het effect van klimaatverandering op dit soort neerslaggebeurtenissen te bestuderen is direct na de overstroming in juli 2021 in Nederland, Duitsland en België door een internationaal team van World Weather Attribution (WWA) een studie verricht (<https://www.worldweatherattribution.org/heavy-rainfall-which-led-to-severe-flooding-in-western-europe-made-more-likely-by-climate-change>). Deze sectie geeft een korte samenvatting van de WWA studie.

In de WWA attributiestudie is alleen de invloed van klimaatverandering op neerslag geanalyseerd, hoewel de overstromingen zijn beïnvloed door lokale hydrologische factoren en de neerslag van de weken ervoor. De focus lag op zowel 1- als 2-daagse neerslag. Vanwege de lage signaal-ruis verhouding van dit soort relatief kleinschalige neerslag ten opzichte van een veranderend klimaat, is naar een grotere regio gekeken, waarbij gebruik is gemaakt van zogenoemde pooling van sub-regio's van ca 130x130km. Resultaten geven dus de invloed van klimaatverandering op dit soort hevige neerslag weer als die ergens plaatsvindt in een vaste sub-regio in West-Europa, tussen Nederland en ten noorden van de Alpen. De resultaten zijn gemiddeld genomen geldig voor elk 130x130km gebiedje in West-Europa en zijn niet direct te vertalen naar een gebied zo klein als het zuiden van Zuid-Limburg alleen.

Voor de trenddetectie in observaties is gebruik gemaakt van de E-OBS gegridde dataset voor neerslag (Cornes et al., 2018). Voor de attributie naar klimaatverandering zijn zowel regionale klimaatmodellen als modellen die convectie direct simuleren (convection permitting models) gebruikt (<https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/Scientific-report-Western-Europe-floods-2021-attribution.pdf>). De maximum 1- en 2-daagse neerslag in april-september zijn geanalyseerd met GEV-distributies die exponentieel schalen met de wereldgemiddelde temperatuur. De einduitkomst is gegeven door resultaten van observaties en modellen te combineren in een attributie resultaat voor 1- en 2-daagse neerslag. De analyses gelden voor het huidige klimaat en zijn ten opzichte van een door klimaatverandering met 1,2 °C gestegen wereldgemiddelde temperatuur.

Uit observaties blijkt dat in het huidige klimaat deze hoeveelheid 1-daagse neerslag van 64 mm/dag gemiddeld ongeveer eens in de 400 jaar voorkomt in een vaste regio in West-Europa. Op een willekeurige plek van dezelfde schaal in West-Europa zal dit iets vaker zijn. Voor de 2-daagse neerslag van 45 mm/dag geldt een herhalingstijd van ongeveer 300 jaar. Door klimaatverandering is de intensiteit van zulke 1-daagse neerslag met zo'n 3-19% toegenomen. Voor 2-daagse neerslag is dit zo'n 2-17%. De kans op zulke 1-daagse neerslag is door klimaatverandering met een factor 1.2 tot 9 toegenomen. Voor 2-daagse neerslag is dit een factor 1.5 tot 7. Over het algemeen laten de observaties iets grotere toename zien

dan de modellen. Hoewel de onzekerheden in deze waarden redelijk groot zijn, zijn de kans op en de intensiteit van zulke neerslaghoeveelheden wel duidelijk toegenomen. Modellen laten zien dat de kans op en de intensiteit van zulke hoeveelheden neerslag nog verder toenemen in een toekomstig klimaat waarin de wereld 2 °C warmer is door door mensen geïnduceerde klimaatverandering.

B.3 Dankwoord

Wij bedanken de volgende instituten en personen voor datalevering:

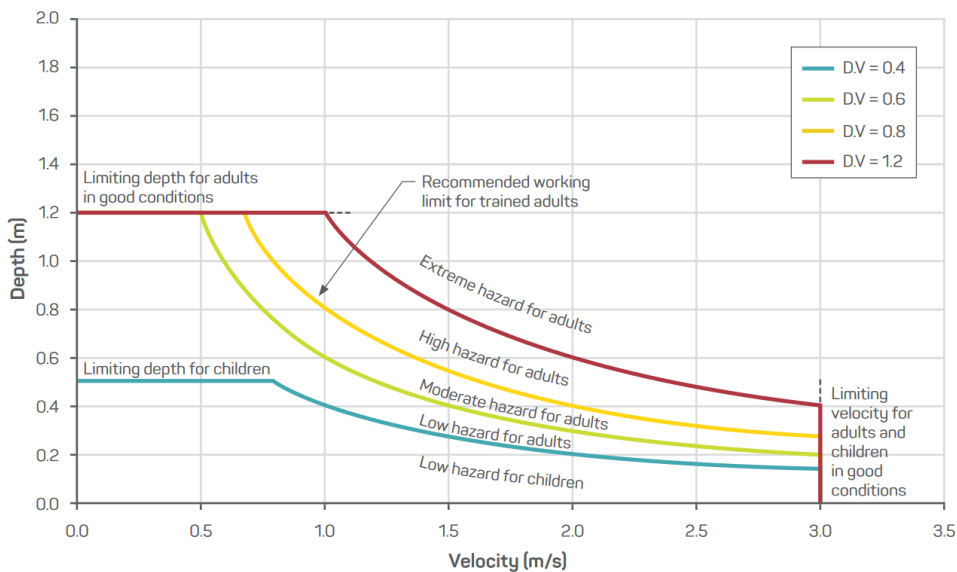
- DWD (Carsten Bruns, Susanne Sanchez-Penzo, Kathleen Helmert en collega's): regenmeter- en radardata (o.a. http://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/1_minute/precipitation/) en de regenmeterdata van Wasserverband Eifel-Rur.
- KMI (Michel Journée, Christophe Ferauge en collega's): regenmeter- en radardata.
- VMM/HIC: regenmeterdata (<https://www.waterinfo.be/Meetreeksen?KL=nl>).
- Waterschap Limburg (Peter Hulst): regenmeterdata.
- SPW (Delphine Pontégnie): regenmeterdata. Bron:
Service public de Wallonie - Mobilité et Infrastructures
Direction de la Gestion hydrologique
Rue Del' Grête, 22
5020 NAMUR (Daussoulx)

C Afleiding “gevaar” bij overstromingen

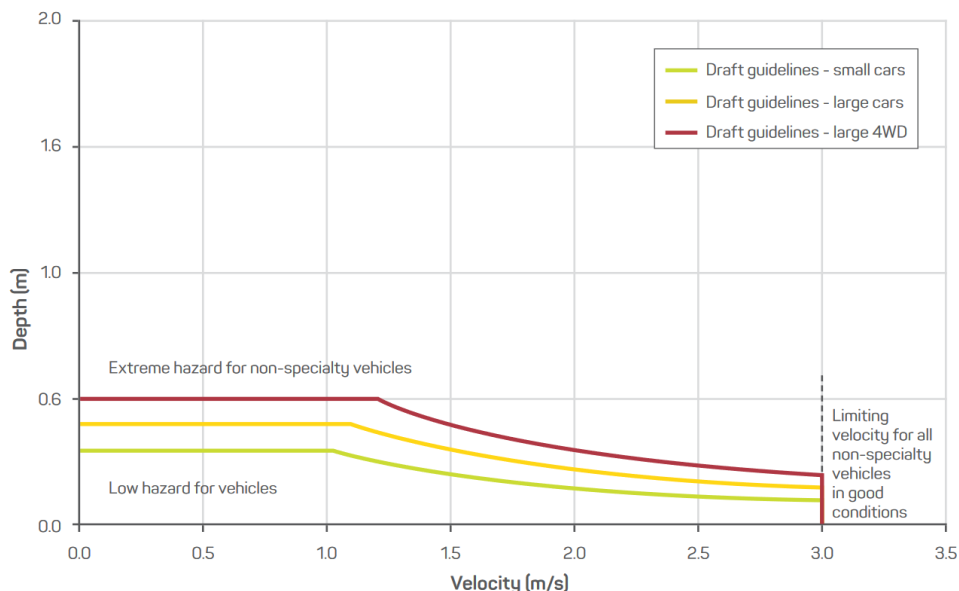
Overgenomen uit: <https://knowledge.aidr.org.au/media/3518/adr-guideline-7-3.pdf>

AUSTRALIAN DISASTER RESILIENCE HANDBOOK COLLECTION
 Flood Hazard, Guideline 7-3
 Supporting document for the implementation of Australian Disaster Resilience Handbook 7
 Managing the Floodplain: A Guide to Best Practice in Flood Risk Management in Australia
 (AIDR 2017)

Figuren tonen “gevaar” op basis van overstromingsdiepte (D) en stroomsnelheid (V).



DV = depth × velocity
 Source: Modelled after Cox et al. (2010)



Source: Modelled after Shand et al. (2011)

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