

Analyse functioneren klimaatbuffers in het Geul stroomgebied tijdens extreme neerslag in juli 2021



juni 2022



Natuurmonumenten



Inhoud

1.	Inleiding.....	3
2.	Werkwijze.....	3
3.	Theoretisch kader.....	5
4.	Systeemanalyse stroomgebied Geul.....	10
4.1	Hoogtekaart en deelstroomgebieden.....	10
4.2	Geologie, bodem en reliëf.....	15
4.3	Oppervlaktewatersysteem.....	18
4.4	Landgebruik.....	20
4.4.1	Bebouwd oppervlak en wegen.....	22
4.4.2	Drainage.....	24
4.4.3	Maïsakkers.....	25
4.4.4	Vergelijking landgebruik bij verdere onderverdeling van de stroomgebieden.....	26
4.5	Samenvatting karakteristieken deelstroomgebieden.....	28
5.	Beschrijving van ontstaan en verloop hoogwatergolf.....	31
5.1	De situatie van dag tot dag.....	31
5.2	Neerslaggegevens.....	33
5.2.1	Neerslag per deelstroomgebied.....	36
5.2.2	Neerslaghoeveelheden per uur.....	36
5.2.3	Analyse van de neerslaghoeveelheden per uur.....	38
5.3	Afvoeren en waterstanden tijdens de hoogwatervent.....	41
5.3.1	Afvoerverloop door het stroomgebied van boven- naar benedenstrooms.....	43
5.3.2	Totale hoeveelheid afvoer afgevoerd & opbouw van de hoogwatergolf.....	51
5.3.3	Totale hoeveelheid afvoer afgevoerd & opbouw van de hoogwatergolf.....	52
5.3.4	Herkomst van het water in de hoogwatergolf.....	56
6.	Kwalitatieve analyse effectiviteit Nature Based Solutions.....	65
6.1	Natuurlijke oplossingen op plateaus & hellingen.....	66
6.2	Natuurlijke oplossingen in bovenstroomse en benedenstroomse dalvlaktes.....	69
6.3	Natuurlijke oplossingen per deelstroomgebied.....	72
7	Conclusies studie Geulhoogwater.....	77
	Bijlagen 1.....	81
	Bijlagen 2.....	82

1. Inleiding

Natuurmonumenten is vele jaren actief in het Geuldal en werkt daar volop aan natuurbescherming en -herstel. Eén van de overkoepelende initiatieven van Natuurmonumenten en andere natuurorganisaties is om het stroomgebied in te richten als klimaatbuffer om de gevolgen van klimaatverandering (wateroverlast én droogte) beter het hoofd te kunnen bieden. In de 'Visie op een klimaatrobuust Geuldal' heeft Natuurmonumenten in samenwerking met ARK Natuurontwikkeling, Limburgs Landschap en Staatsbosbeheer hun visie beschreven en een maatregelenoverzicht gepresenteerd. Het gaat hierbij om het zo substantieel mogelijk ontwikkelen van 'Nature-Based Solutions' in het hele internationale stroomgebied van de Geul. Dit geldt voor maatregelen in zowel de haarvaten van de Geul en zijbeken als in de meer benedenstrooms gelegen dalvlaktes. Vanwege het recente hoogwater van medio juli 2021 is het vraagstuk rondom een klimaatrobuuste inrichting in een stroomversnelling gekomen.

Natuurmonumenten heeft daarom aan Stroming gevraagd om de maatregelenlijst uit de visie te analyseren op hun bijdragen aan de reductie van de hoogte en omvang van deze zomer hoogwaterpiek. Hiervoor is het nodig een analyse te maken van dit hoogwater event in het Geuldal en de werking van deze oplossingen te analyseren, waarna een, in eerste instantie, kwalitatieve inschatting gegeven kan worden van de effecten. Uiteindelijk is het de wens van natuurmonumenten dat deze voorstellen ook ingebracht kunnen worden bij de Beleidstafel Wateroverlast Limburg die recent is opgezet.

2. Werkwijze

In overleg met Natuurmonumenten heeft Stroming de volgende aanpak gehanteerd om te komen tot een onderbouwde analyse van de bijdragen van natuurlijke oplossingen aan het verminderen van piekafvoeren in extreme neerslagevents in het Geuldal.

1. **Systeemanalyse stroomgebied Geul:** Het vervaardigen van kaarten met betrekking tot hoogte en hellinggraad, hydrologie, bodemopbouw, landgebruik en mate verhard oppervlak. Dit is nodig om de ontwikkeling van extreme piekevents te kunnen ontrafelen. Vaak houden kaarten nu nog op bij de grens; voor dit onderzoek maken we kaarten die het hele stroomgebied (NL en Be) in beeld brengen.
2. **Analyse van het functioneren van het stroomgebied tijdens extreme neerslagevents.** Dit geeft antwoord op de vraag welk deel van het stroomgebied op welk moment en in welke mate bijdraagt aan piekafvoeren. Er wordt hierbij gefocust op de neerslagevent van 14/15 juli 2021, die ontstond door langdurige zware regenval in een groot deel van het stroomgebied. Dit type events kan door klimaatverandering in de toekomst vaker voorkomen. Behalve dit extreme event wordt ter vergelijking ook aandacht gegeven aan 2 andere typen neerslagsituaties die van belang zijn voor hoogwater:
 - A. Een extreme zomerse bui. Deze bui heeft een hogere intensiteit dan op 14/15 juli, maar is lokaal en van korte duur. Soms treedt op die plaatsen dan nog meer overlast op (vgl. Gulpdal in juli 2012 en Meerssen in juni 2021). Het is dit type events waar de bergbekkens van het waterschap voor zijn aangelegd.

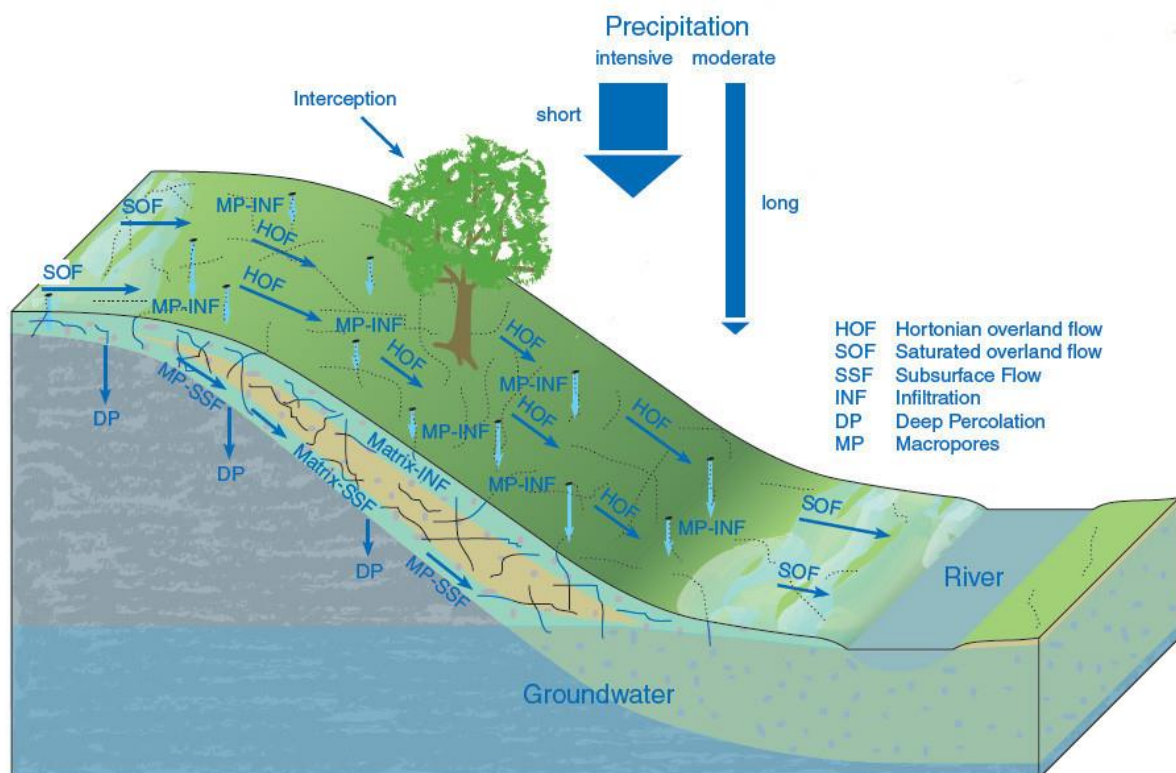
B. Een winterse langdurige regensituatie. Voor het Geuldal is dit zelden een bedreiging omdat de neerslagintensiteit kleiner is, maar deze neerslag is wel belangrijk omdat de Geulafvoer dan een bijdrage levert aan een hoogwater in de Maas en voor het vullen van het grondwatersysteem en daarmee voor het bestrijden van droogte.

3. Verkenning van mogelijke Nature Based Solutions in het gehele stroomgebied. Dit levert een kwalitatief overzicht, waarbij per maatregel nagegaan wordt hoe ze inwerken op de werking van het systeem tijdens een periode van wateroverlast. De kwalitatieve analyse kan in een vervolgstap worden uitgewerkt in een (gemodelleerde) kwantitatieve analyse.
4. De gegevens verkregen uit het onderzoek worden gebruikt om een advies te formuleren die zich richt op inhoudelijke onderbouwing van maatregelen en de context waarbinnen maatregelen moeten worden genomen. De context is van belang omdat veel maatregelen betrekking zullen hebben op belangen en gronden die zich buiten de invloedssfeer van natuurorganisaties bevinden.

3. Theoretisch kader

Om het verloop van een piekgolf tijdens een extreme neerslagevent te begrijpen, is het nodig de verschillende waterstromen te onderscheiden waaruit de golf is opgebouwd. Wanneer we dit snappen kunnen we vervolgens met gerichte Nature Based Solutions proberen de hoogte van de golf af te vlakken.

In dit theoretische kader geven we een beknopte uitleg van de hydrologische processen die zich afspelen bij het tot afvoer komen van grote hoeveelheden neerslag. Deze processen komen later in het rapport terug in de analyse.



Figuur 1: Weergave van de processen die tot rivierafvoer benedenstrooms leiden. Tijdens de extreme neerslagevent van juli 2021 viel de oppervlakkige afstroming (snelle component) samen met (uittredende) bodemafvoer (sub surface flow). (bron: Hydroconsult)

1. Oppervlakkige afstroming (Overland flow)

Overland flow, oftewel oppervlakkige afstroming, is een belangrijk proces om te doorgronden bij intense en langdurige neerslagevents. Oppervlakkige afstroming resulteert namelijk in een versnelde afvoer van de neerslag in vergelijking met afvoer door de bodem.

De regenintensiteit, bodemopbouw, hellingsgraad, het landgebruik en de mate van verhard oppervlak spelen een belangrijke rol bij het optreden van oppervlakkige afstroming. We onderscheiden voor deze studie verschillende vormen van oppervlakkige afstroming.

a. Oppervlakkige afstroming over verhard oppervlak

Dit proces vindt plaats bij neerslag in stedelijke gebieden en op wegen in hellend terrein. Er is geen opnamecapaciteit in de bodem mogelijk, waardoor alle gevallen neerslag oppervlakkig afstroomt. Ook onverharde (bos)wegen zijn zo verdicht dat ze in de praktijk op dezelfde manier functioneren als verharde wegen¹. Tijdens langdurige neerslag events is dit een continue stroom van water die snel tot afvoer komt.



Figuur 2: Oppervlakkige afstroming van verhard oppervlak in het Geuldal stroomt dal in tijdens event in juli 2021 (foto Hettie Meertens, ARK Natuurontwikkeling)



Figuur 3: Oppervlakkige afstroming van verhard oppervlak verzamelt zich in het Pesakerdal en vormt een kleine beek in het droogdal. (foto Hettie Meertens, ARK Natuurontwikkeling)

¹ Impact of Forest Roads on Hydrological Processes, Aristeidis Kastridis, 2020

b. Oppervlakkige afvoer: hoge neerslagintensiteit overtreft de infiltratiecapaciteit van de bodem

Dit type oppervlakkige afvoer komt vaak voor bij kortdurende en lokale zomerse neerslagevents met een extreem hoge intensiteit en bij bodems met een geringe infiltratiecapaciteit. In dat geval verloopt de infiltratie van regenwater in de bodem langzamer dan het aanbod en stroomt een deel van de neerslag kortdurend oppervlakkig af over de hellingen. Dit is de traditionele Hortonian overland flow uit figuur 1. Tijdens de neerslagevent van juli 2021 was de neerslagintensiteit niet dusdanig hoog dat deze de infiltratiecapaciteit van de bodem oversteeg, een uitzondering waren de (kale) akkers met zomergewassen (c).

c. Oppervlakkige afvoer op kale akkers

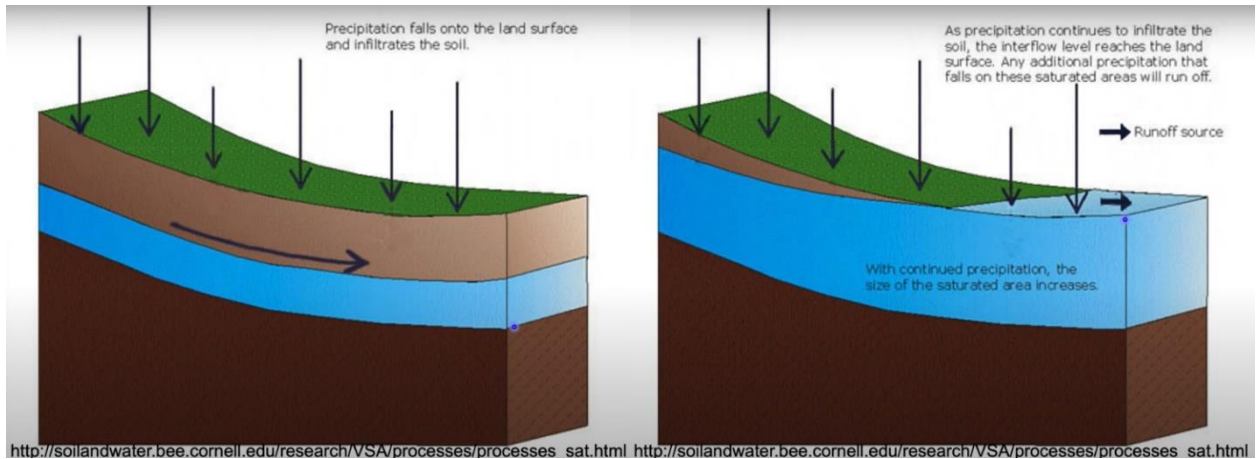
Bij bepaalde bodemsamenstelling en onder invloed van regen kan verslemping of slomp van de bodem optreden. Slomp is een vorm van structuurbederf waarbij bodemdeeltjes ontmengenen en de toplaag wordt dichtgesmeerd met kleinere gronddeeltjes (klei en silt). Onder invloed van de zon vormen de fijne deeltjes een dichte harde laag, de slompkorst. Deze laag is nagenoeg ondoordringbaar voor neerslag waardoor in hellend terrein al bij een lage intensiteit oppervlakkige afstroming en bodemerosie ontstaan. Verslemping kan alleen plaatsvinden als de bodem onbegroeid is. Dit is het geval op akkers met gewassen die laat kiemen, waarvan maïs de meest voorkomende is. Bestrijdingsmiddelen zorgen ervoor dat grassen en kruiden niet kunnen groeien waardoor bodems er in het begin van de zomer nagenoeg kaal bijliggen. Oppervlakkige afvoer en bodemerosie krijgen vrij spel.



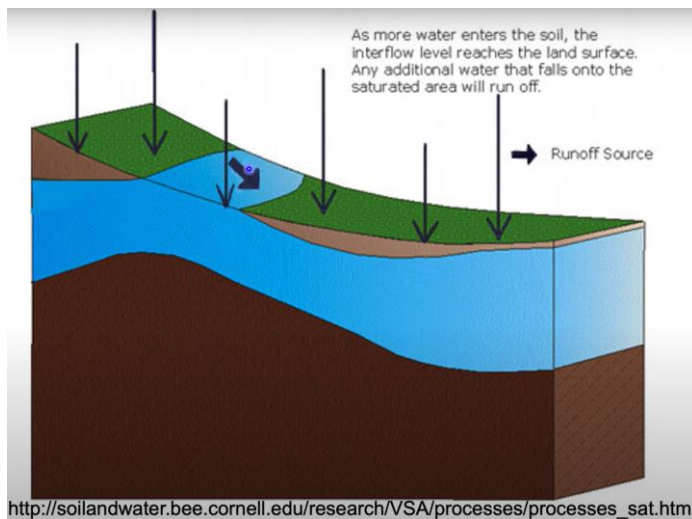
Figuur 4: Sporen van oppervlakkige afvoer en erosie in een maïsakker in de Eifel, twee maanden na de overstromingen van 2021. De maïs op de achtergrond was tijdens de overstromingen pas net ontkiemd waardoor een groot deel van de bodem er kaal bij lag.

d. Verzadigde oppervlakkige afvoer & water op water (Saturation overland flow)

Bij langdurige neerslag op hellend terrein ontstaat een stijgende grondwaterspiegel, die vervolgens kan uittreden en oppervlakkig afstroomt. Dit kan zowel bij dickere bodems als dunnere bodems optreden. De afvoer start door de bodem als ondiep grondwater (Sub Surface Flow), maar wordt versneld indien deze uittreedt door de stijgende grondwaterspiegel en oppervlakkig verder gaat. Op de plekken waar dit gebeurt ontstaat tevens de water op water component. Neerslag die hier valt zal oppervlakkig afstromen en draagt bij aan de snelle afvoer.



Figuur 5 a en b: Dwarsdoorsnede van verzadigde oppervlakkige afstroming. Het water wat eerst door de bodem afstroomt (sub surface flow) treedt uit door een stijgende grondwaterspiegel en stroomt oppervlakkig verder. De neerslag die vervolgens op het uittredende grondwater valt stroomt direct oppervlakkig af (water op water) (bron: Anne Jefferson).



5c: Verzadigde oppervlakkige afstroming kan door de geologische ondergrond ook hoger op de helling voorkomen. Wanneer er geen drainage aanwezig is kan een deel van het water wat oppervlakkig afstroomt re-infiltreren in de bodem en daarmee weer worden vertraagd

2. Ondergrondse afstroming (Sub surface flow)

Op hellende terreinen met gesteentelagen dicht bij het oppervlak ontstaat bij langdurige neerslag ondergrondse afstroming (figuur 5a). Infiltrerend regenwater stuit op een ondoordringbare laag en stroomt over deze laag de helling af. Aan het einde van de helling, in het dal, treed het water uit en voedt de beek die daar stroomt. In het Waalse deel van het Geul stroomgebied is dit vanwege de geologie een belangrijk proces in de afvoer van regenwater. Onderzoek² in een bosrijk Luxemburgs stroomgebied wijst uit dat 40 – 65 % van de gevallen neerslag na 72 uur de beek heeft bereikt en het catchment heeft verlaten. Sub surface flow is het dominante proces hierbij.

a. Onderschepte ondergrondse afstroming door wegen en drainage

Ondergrondse afstroming kan sneller verlopen indien deze wordt onderschept en vervolgens oppervlakkig afstroomt. Dit gebeurt door wegen in hellingen en door ondergrondse en bovengrondse drainage systemen.



Figuur 6: Wegen in hellingen en drainage systemen onderscheppen sub surface flow, waarna het oppervlakkig afstroomt en versnelt het gebied verlaat. Deze drainagegeul ligt in de Hohnbach bovenstrooms in het Geul stroomgebied.

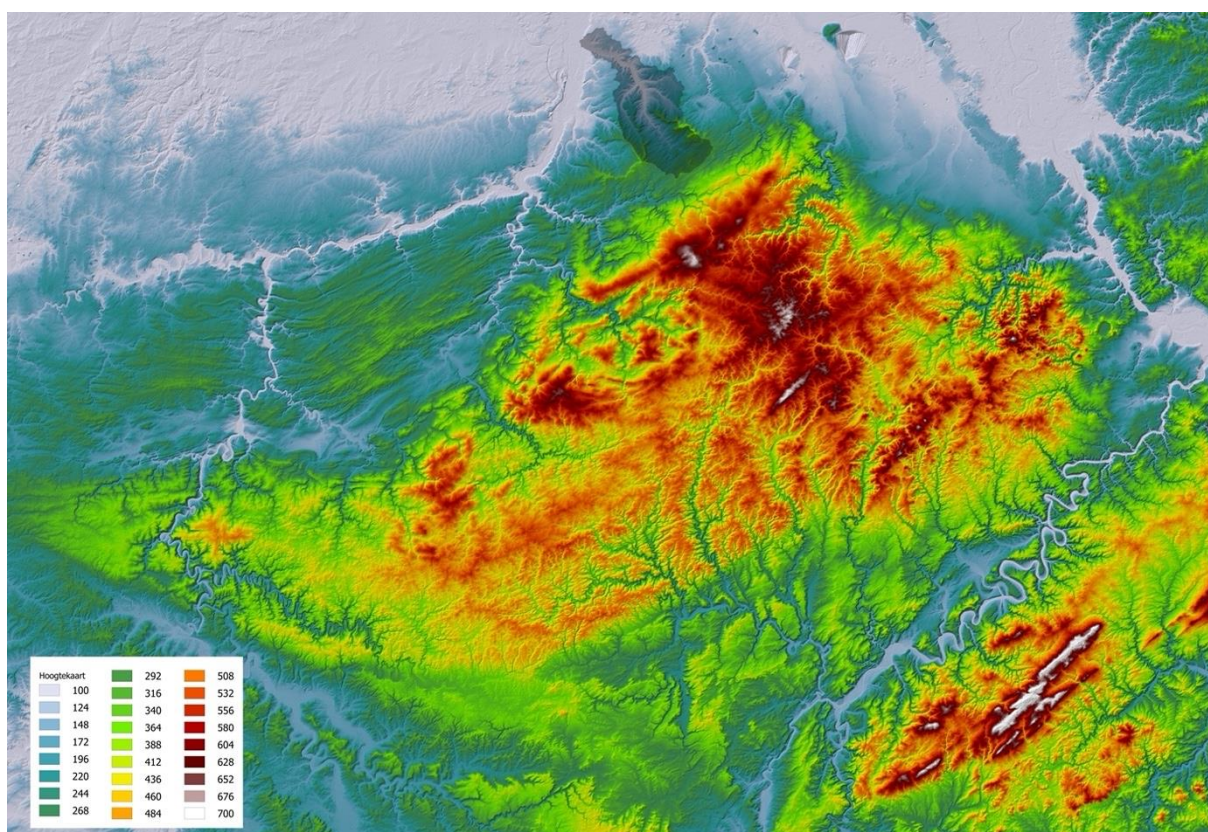
De 3e component in de afvoer van regenwater zijn de diepere grondwaterstromen. Deze vormen de baseflow van de beeksystemen. Omdat deze component geen rol speelt bij de opbouw van de piekafvoer wordt deze in dit rapport buiten beschouwing gelaten.

² Form and function in hillslope hydrology: characterization of subsurface flow based on response observations (Lisa Angermann, 2017)

4. Systeemanalyse stroomgebied Geul

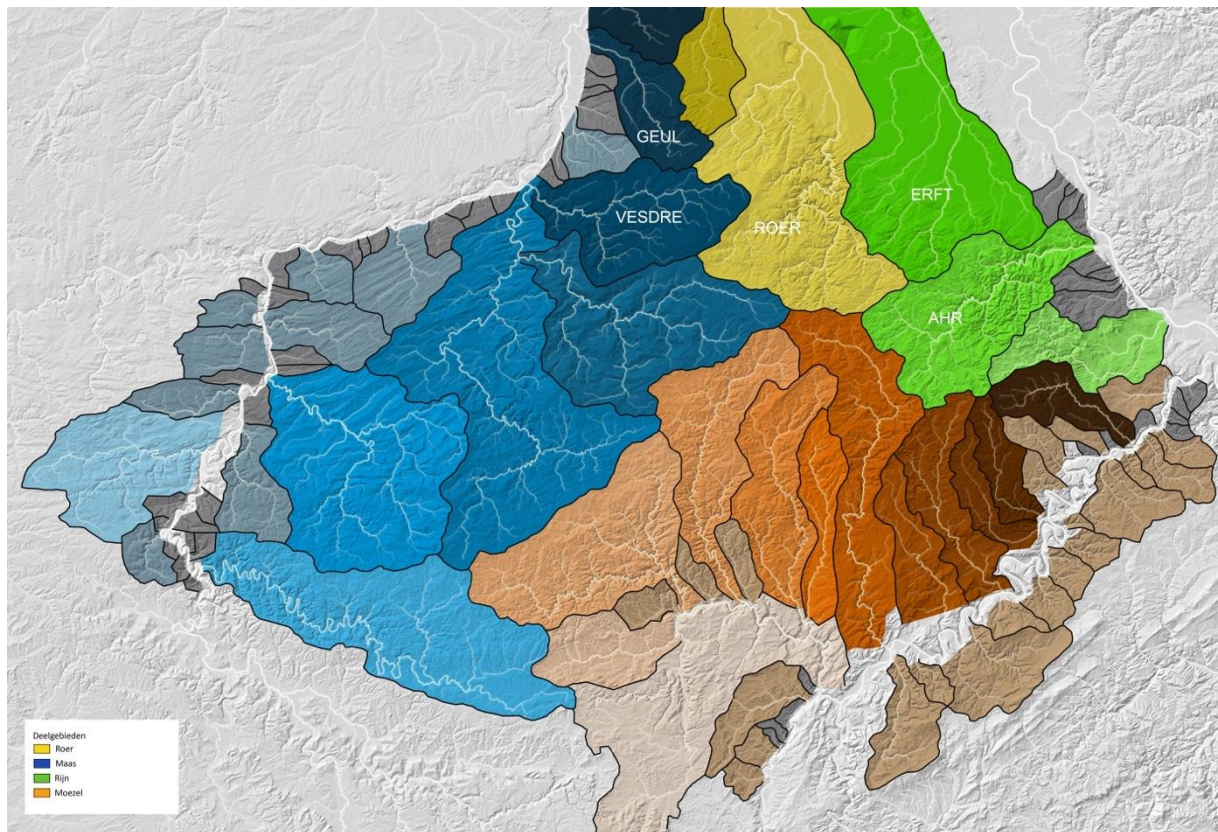
4.1 Hoogtekaart en deelstroomgebieden

De Geul ontspringt aan de noordflank van een van de Midden-Europese Middelgebergten. In de kaart van figuur 7 is dit gebergte, die Ardennen en Eifel omvatten, in zijn volle omvang weergegeven. De hoogwaterevent van juli 2021 had zijn oorsprong vooral in dit gebied en de neerslag was hier vooral afkomstig van de noordflank van het gebergte.



Figuur 7. Het Limburgse heuvelland met daarin het stroomgebied van de Geul ligt aan de noordzijde van een groot gebergtemassief waar Ardennen en Eifel ook deel van uitmaken. Aan de westkant watert de Maas dit gebergte af, in het zuiden de Moezel en in het oosten de Rijn.

De Geul is een van de noordelijke stroomgebieden die het gebergte ontwateren en het waren vooral deze stroomgebieden waar de hoogwaterproblemen het grootst waren. In figuur 8 zijn de stroomgebieden weergegeven van de beken die in het Middelgebergte ontspringen. Het waren de stroomgebieden van Vesdre, Geul, Ruhr, Erft en Ahr waar de grootste hoeveelheden water tot afstroom kwamen.



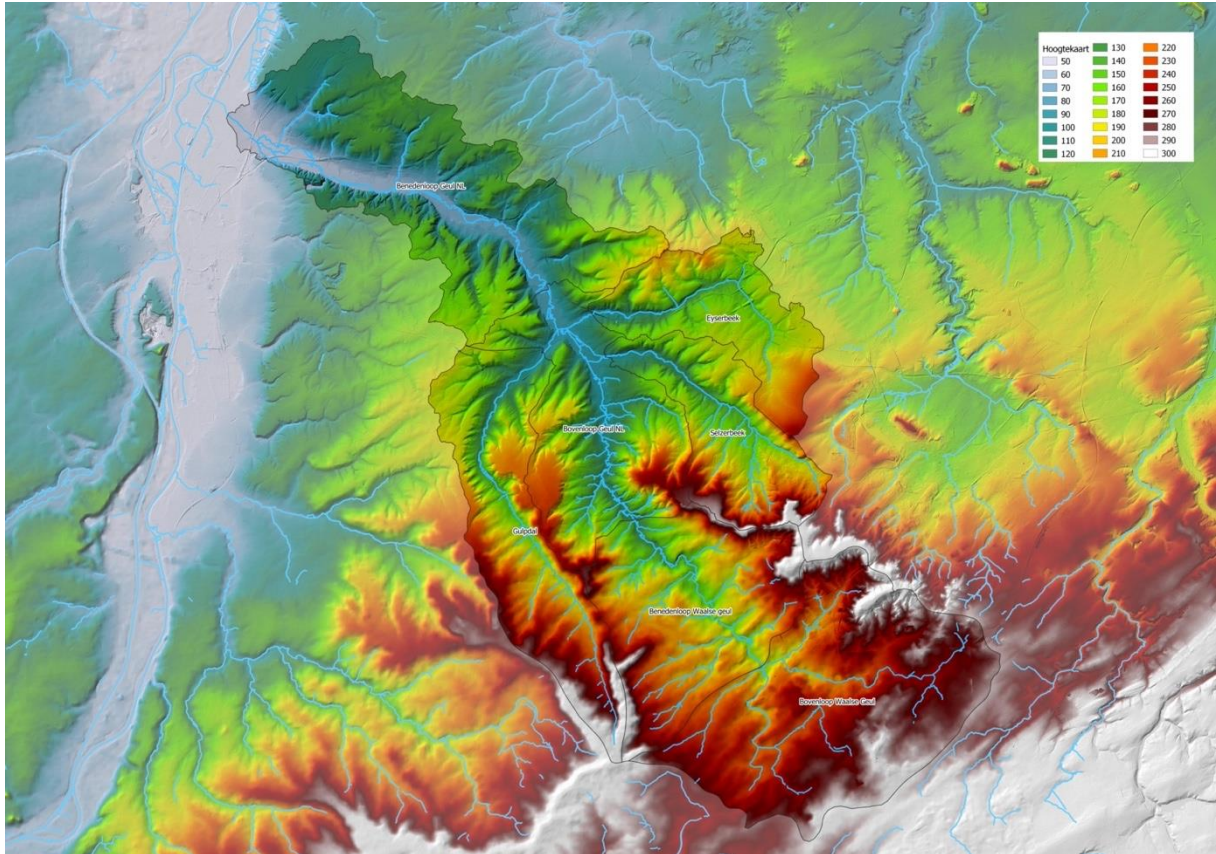
Figuur 8. Stroomgebieden van beken die in het Middengebergte ontspringen waar ook de Geul deel van uitmaakt. De kleur laat het onderscheid zien naar het riviersysteem waar de beken op afwateren.

Als we inzoomen op het stroomgebied van de Geul dan zien we dat het meest zuidelijke deel raakt aan de meer hoge delen verder in het zuiden. Daarnaast zijn er twee relatief hoge heuvelruggen die het stroomgebied in delen opdelen. Deze reiken tot tussen de 250 en 300 m +NAP en hier vinden we ook het hoogste punt binnen het stroomgebied. De heuvelruggen vormen ook de grenzen van de deelstroomgebieden waar het Geulsysteem uit is opgebouwd.

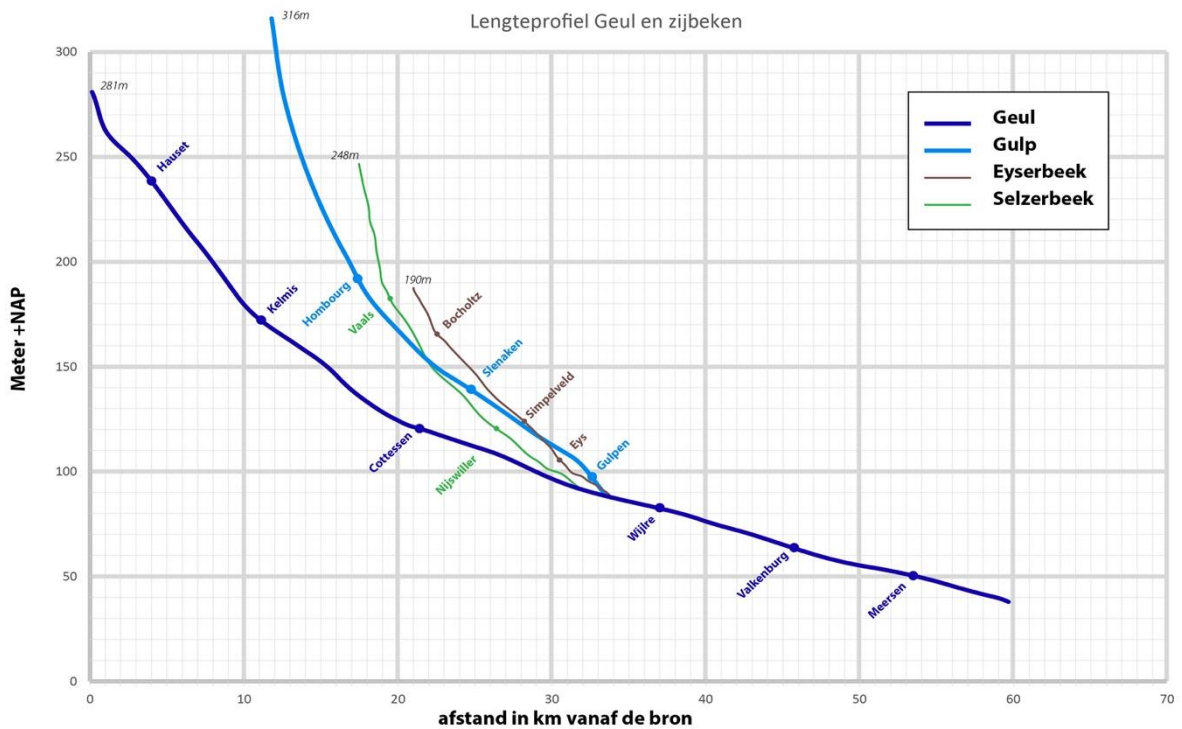
Van de bron bij de Duits-Waalse grens tot aan de monding in de Maas bij Itteren is de Geul ca 45,5 km lang. De studie beperkt zich tot aan de sifon onder het Julianakanaal (ca 44,5 km). In figuur 9 is het lengteprofiel door het dal weergegeven van de Geul en van de 3 grootste zijbeken. De Gulp is hiervan de langste met een lengte van 17,5 km, de Selzerbeek en Eyserbeek zijn ongeveer 10 km lang. In tabel 1 is de omvang van de deelstroomgebieden en beeklopen weergegeven. In figuur 10 is een lengteprofiel door het dal gelegd vanaf de bron tot aan de monding in de Maas. De Geul overbrugt het grootste hoogteverschil, maar het verschil met de Gulp is klein.

Tabel 1. Deelstroomgebieden onderscheiden in deze studie. De lengte betreft de lengte door het dal; de werkelijke lengte is groter vanwege meandering en kan tot 50% groter zijn.

deelstroomgebied	lengte traject	oppervlakte	percentage
Boven Geuldal Wallonië	10,0	7.265	22%
Beneden Geuldal Wallonië	8,5	4.755	14%
Boven Geuldal Nederland	8,0	4.286	13%
Gulpdal	17,6	4.362	13%
Selzerbeek	10,0	2.845	9%
Eyserbeek	10,0	2.795	8%
Beneden Geuldal Nederland	17,0	7.072	21%
totaal	44,5 (Geul)	33.380	



Figuur 9. Het stroomgebied van de Geul weergegeven op de hoogtekart. Hierin zijn ook de 7 deelgebieden weergegeven die in deze studie zijn onderscheiden. Dit is de Geul zelf, opgedeeld in 4 gedeelten, de Gulp, de Selzerbeek en de Eyserbeek.



Figuur 10. Lengteprofiel van de Geul en de drie belangrijkste zijbeken die voor Wijre in de Geul uitmonden.

Voor de analyse van de neerslag en afvoergegevens is het stroomgebied in 8 deelgebieden opgedeeld (zie tabel 1), waarvan we de eerste zeven in dit rapport beschouwen. In de systeemanalyse is aantal deelgebieden verder uitgebreid en zijn de grotere deelgebieden in kleinere opgedeeld (zie tabel 2).

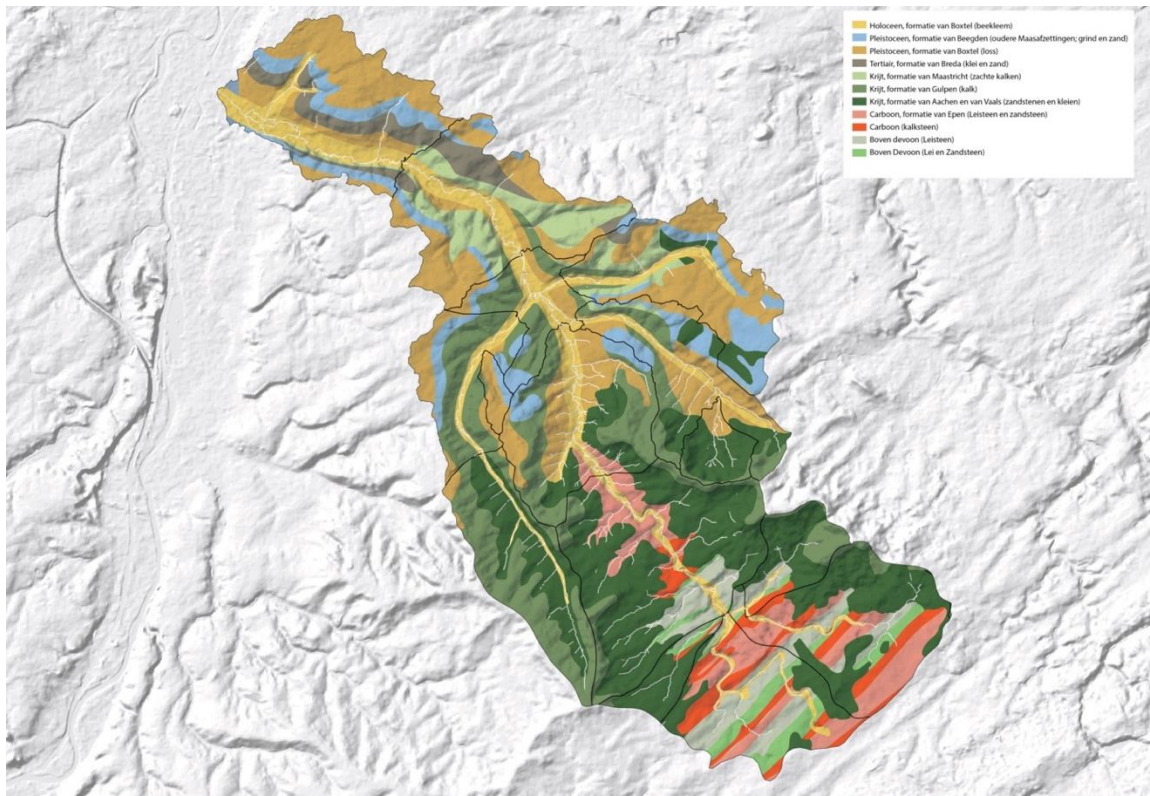
Tabel 2. Onderscheiden deelstroomgebieden, waarbij we in deze studie

Nr	Deelstroomgebied	plaatsen in het traject	oppervlakte totaal	Perc.
1	Boven-Geul België	Kelmis	7265	22%
	<i>Boven-Geul hoofdloop</i>	<i>Eynatten-Kelmis</i>	<i>3117</i>	<i>9%</i>
	<i>Tüljebach</i>	<i>Du Grens-Kelmis</i>	<i>965</i>	<i>3%</i>
	<i>Hohnbach</i>	<i>Walhorn-Kelmis</i>	<i>2621</i>	<i>8%</i>
	<i>Grunstrasse-bach</i>	<i>H-Chapelle-Kelmis</i>	<i>562</i>	<i>2%</i>
2	Beneden Geul België	Plombières-Sippenaecken	4755	14%
3	Boven-Geul Nederland	Cotessen-Gulpen	4286	13%
	<i>Boven-Geul tot Hommerich</i>	<i>Cotessen-Hommerich</i>	<i>3098</i>	<i>9%</i>
	<i>Boven-Geul vanaf Hommerich</i>	<i>Hommerich-Gulpen</i>	<i>1188</i>	<i>4%</i>
4	Selzerbeek	Vaals-Gulpen	2845	9%
	<i>Selzerbeek hoofdloop</i>	<i>Vaals-Gulpen</i>	<i>2228</i>	<i>7%</i>
	<i>Wolfhager-beek</i>	<i>Wolfhaag-Vaals</i>	<i>617</i>	<i>2%</i>
5	Eyserbeek	Simpelveld-Gulpen	2795	8%
6	Gulpdal	H-Chapelle-Gulpen	4362	13%
	<i>Boven Gulp</i>	<i>H-Chapelle-Slenaken</i>	<i>2503</i>	<i>7%</i>
	<i>Beneden Gulp</i>	<i>Stenaken-Gulpen</i>	<i>1626</i>	<i>5%</i>
	<i>Pesakendal</i>	<i>Heijenraat-Pesaken</i>	<i>233</i>	<i>1%</i>
7	Beneden-Geuldal Nederland	Wijlre-Meerssen	7072	21%
	<i>Beneden Geul tot Valkenburg</i>	<i>Wijlre-Valkenburg</i>	<i>3462</i>	<i>10%</i>
	<i>Beneden Geul na Valkenburg</i>	<i>Valkenburg-Bunde</i>	<i>3610</i>	<i>11%</i>
8	Vlakte naast Juliana-kanaal	Bunde-Brommelen	65	0%
	Totaal (excl vlakte Juliana-kanaal)		33380	

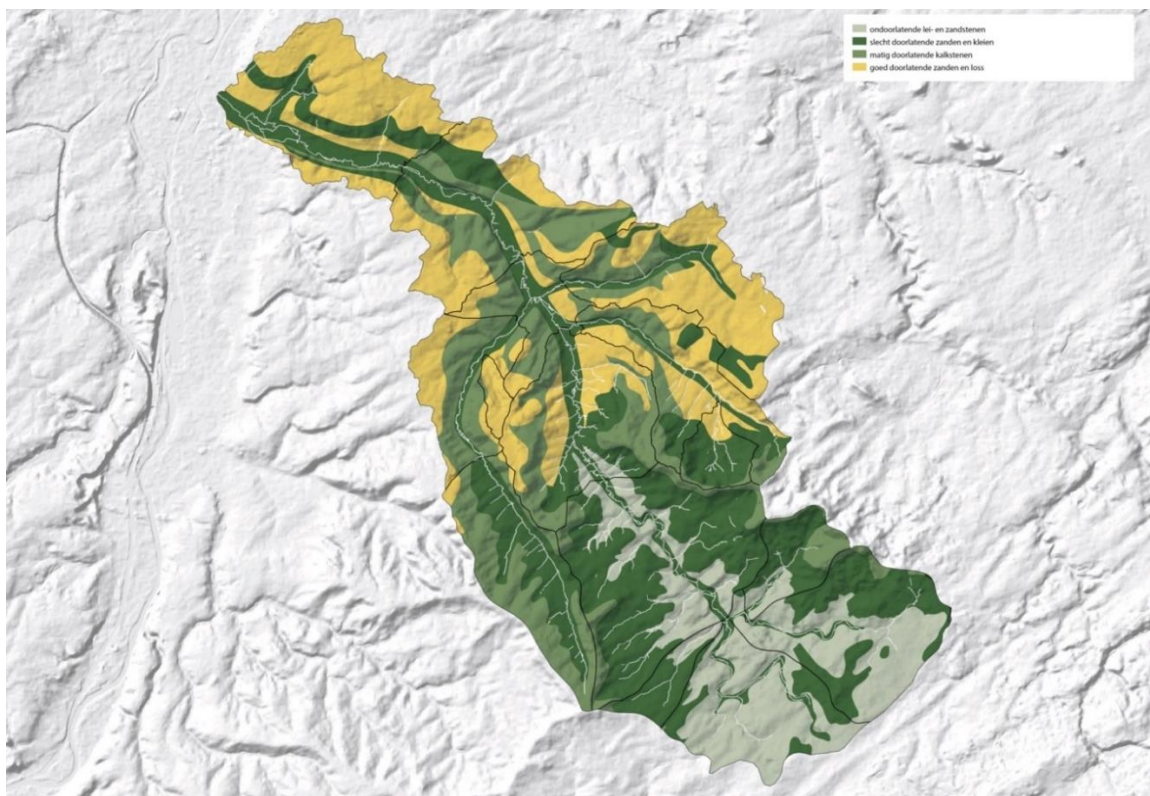
4.2 Geologie, bodem en reliëf

De geologische ondergrond van het Geuldal kent een grote variatie en zoals uit de verdere analyse zal blijken is hier veel uit af te leiden over de mate waarin delen van het gebied al dan niet bijdragen aan de hoogwatergolf. Ruwweg zijn er drie typen geologische afzettingen te herkennen in de ondergrond:

- Zeer oude paleozoïsche gesteenten uit het devoon en carboon. Het meest stroomopwaartse deel van het stroomgebied bestaat vrijwel geheel uit deze gesteenten (zie figuur 12). In het benedenstroomse deel van het Waalse Geuldal komen ze ook nog voor, maar zijn ze beperkt tot het Geuldal en ook in het meest bovenstroomse deel van het Nederlandse Geuldal dagzomen deze gesteenten ook nog over een klein oppervlak in het Geuldal zelf. Het gaat hierbij vooral om compacte gesteenten (schalie, zandsteen en harde kalksteen) met een slechte doorlatendheid. De doorlatendheid van de ondergrond is weergegeven in figuur 13.
- Oude mesozoïsche gesteenten uit het krijt-tijdperk. Hier gaat het om zachtere kalkstenen en zandstenen en soms ook kleiige zandsteen. De bekende zachte mergelkalk van Maastricht die langs de beneden Geuldal in de flanken van het dal te vinden is, behoort hiertoe. Maar ook de meer compacte en hardere Gulpense kalk en het zogenaamde Aker Groenzand. De doorlatendheid van deze afzettingen wisselt tussen deze verschillende gesteenten. Deze gesteenten uit het krijttijdperk (groen in de kaart) vinden we aan de oppervlakte in een groot deel van het Waalse en Vlaamse deel van het stroomgebied. In Nederland vinden we ze vooral in de flanken van de dalen; hogerop op de plateaus zijn ze wel aanwezig maar liggen ze onder meters dikke jongere lagen.
- Jongere afzettingen uit het Tertiair en Pleistoceen. Dit zijn vooral zanden en kleien, waarbij de afzettingen uit het Tertiair nog wel compact zijn, maar de Pleistocene afzettingen hebben een losse opbouw. Tot de Pleistocene lagen behoren ook de grindlagen die door de oer-maas zijn afgezet en de löss die door de wind op de plateaus en in de flanken van het Nederlandse Geuldal is aangevoerd. De afzettingen uit deze periode vinden we vrijwel uitsluitend in het Nederlandse deel van het stroomgebied, in het zuiden vooral op de plateaus, maar stroomafwaarts van Valkenburg ook in de flanken. De doorlatendheid van deze bodems is over het algemeen goed tot zeer goed. Wel ontstaan in löss op enige diepte zogenaamde briklagen, die compacter zijn, waardoor de doorlatendheid afneemt.
- De jongste afzettingen in het gebied zijn de lemige beekafzettingen die in de dalvlaktes liggen. Ze zijn vaak enkele meters dik en door de Geul afgezet in de loop van de afgelopen duizenden jaren. We vinden ze overal waar de Geul en haar zijrivieren door brede dalvlakte stroomt; dit is vrijwel in het hele Nederlandse deel van het stroomgebied en in een deel van het Vlaamse Gulpdal en het Waalse Geuldal stroomafwaarts van Moresnet. Verder stroomopwaarts zijn soms ook leemlagen te vinden, maar gaat het steeds om kleine oppervlakten, vlak naast de beek. Deze lemige bodems zijn slecht doorlatend.



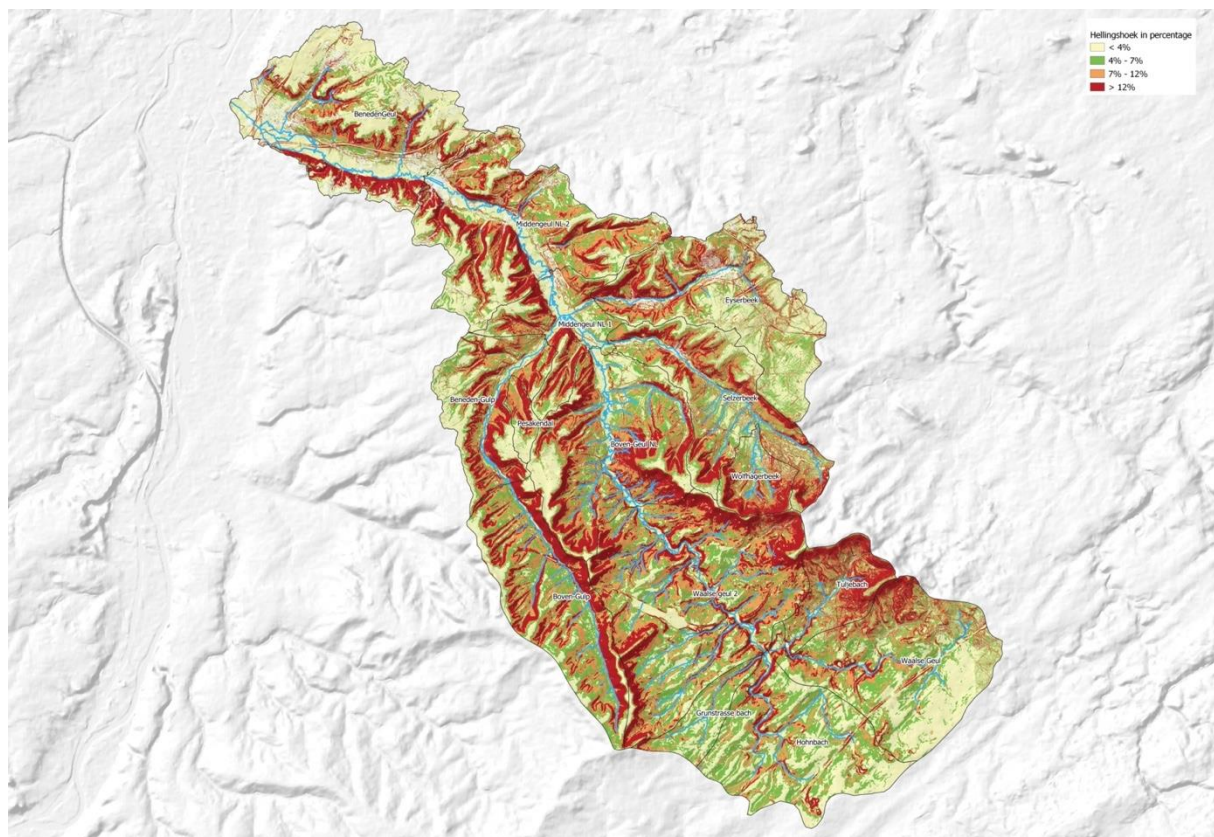
Figuur 12. Geologische ondergrond van het Geuldal, waarbij onderscheid is gemaakt in de afzettingen uit de verschillende geologische tijdperken. In de legenda is in grote lijnen ook het materiaal aangegeven waar de ondergrond uit bestaat.



Figuur 13. Grove indeling van het type ondergrond in mate van doorlatendheid. NB. Het gaat hier om de geologische ondergrond en niet om de meer of minder dikke bodemlagen die daar vaak nog bovenop liggen.

Door erosie en/of verwerking van het ondergrondmateriaal is bovenop de geologische afzettingen vrijwel altijd een bodem ontstaan. Deze bodem kan bestaan uit losse stenen, zand en leem of een mengsel daarvan. De bodems in het gebied variëren in dikte van enkele decimeters tot een meter of meer. Op de oude paleozoïsche gesteenten in het zuiden van het stroomgebied zijn de bodems vaak niet dikker dan 20 tot 40 cm, terwijl ze op de mesozoïsche gesteenten vaak wel dikker zijn. In deze situaties is er een groot verschil tussen de doorlatendheid van de bodems (goed) en de ondergrond (slecht tot zeer slecht). In de Pleistocene afzettingen (oa grind en löss) is het onderscheid tussen de bodem en de ondergrond minder scherp; beide bestaan uit los materiaal en hebben een goede doorlatendheid.

In figuur 14 is het reliëf in het terrein aangegeven. Er blijkt een duidelijk verband te zijn met de geologische ondergrond. In de oude, paleozoïsche gesteenten zijn de dalen niet diep ingesleten en is de hellingsgraad in de flanken vaak gering. Alleen in het onderste deel van het dal vinden we hier steile taluds, maar al op enige hoogte boven het dal gaan deze over in flauwe hellingen. Het areaal met een hellingsgraad tussen 4 en 7% is hier groot. Flauwe hellingen komen alleen helemaal in het zuiden voor, op de stroomscheiding naar het dal van de Vesdre en Roer. Waar de ondergrond uit mesozoïsche en tertiaire gesteenten bestaat vinden we veel steile overgangen vanaf het plateau naar het dal die ook grote hoogtes overbruggen (de rode kleuren bestaan hier een groot oppervlak en strekken zich vaak over de hele flank uit. Bij de dalen in dit gesteente (o.a. Gulp, Boven-Geul en Selzerbeek) valt op dat de op het zuid(west)en geëxponeerde flanken de hellingen veel steiler zijn dan op de tegenoverliggende hellingen. Waar de Pleistocene afzettingen aan de oppervlakte liggen is er vaak nauwelijks reliëf, als het om de plateaus gaat, of een gering verhang, als het om flanken gaat.



Figuur 14. Het reliëf van het gebied weergegeven in verschillende hellingsgraden.

4.3 Oppervlaktewatersysteem

Ook in het oppervlaktewatersysteem is de kwaliteit van de ondergrond min of meer herkenbaar (zie figuur 15). In het Waalse deel van het stroomgebied waar de massieve Devonische en Carbonische leien, zandstenen en harde kalkstenen dicht onder de oppervlakte liggen is er naast de Geul een uitgebreid netwerk van zijbeekjes. Ditzelfde beeld zien we in de gebieden waar de slecht doorlatende lagen van het Aker groenzand de ondergrond vormt; ook hier zijn veel beken te vinden in de zijdalen, waarvan een deel door menselijke ingrepen zijn aangelegd of verlengd met drainage om landbouw mogelijk te maken. Daar waar de ondergrond uit de andere gesteenten uit het krijttijdperk bestaat, dan is het aantal beken al veel geringer en vinden we ze alleen in de dalen die relatief diep in de omgeving zijn ingesneden. Waar Pleistocene afzettingen liggen zijn er nergens zijbeken te vinden.

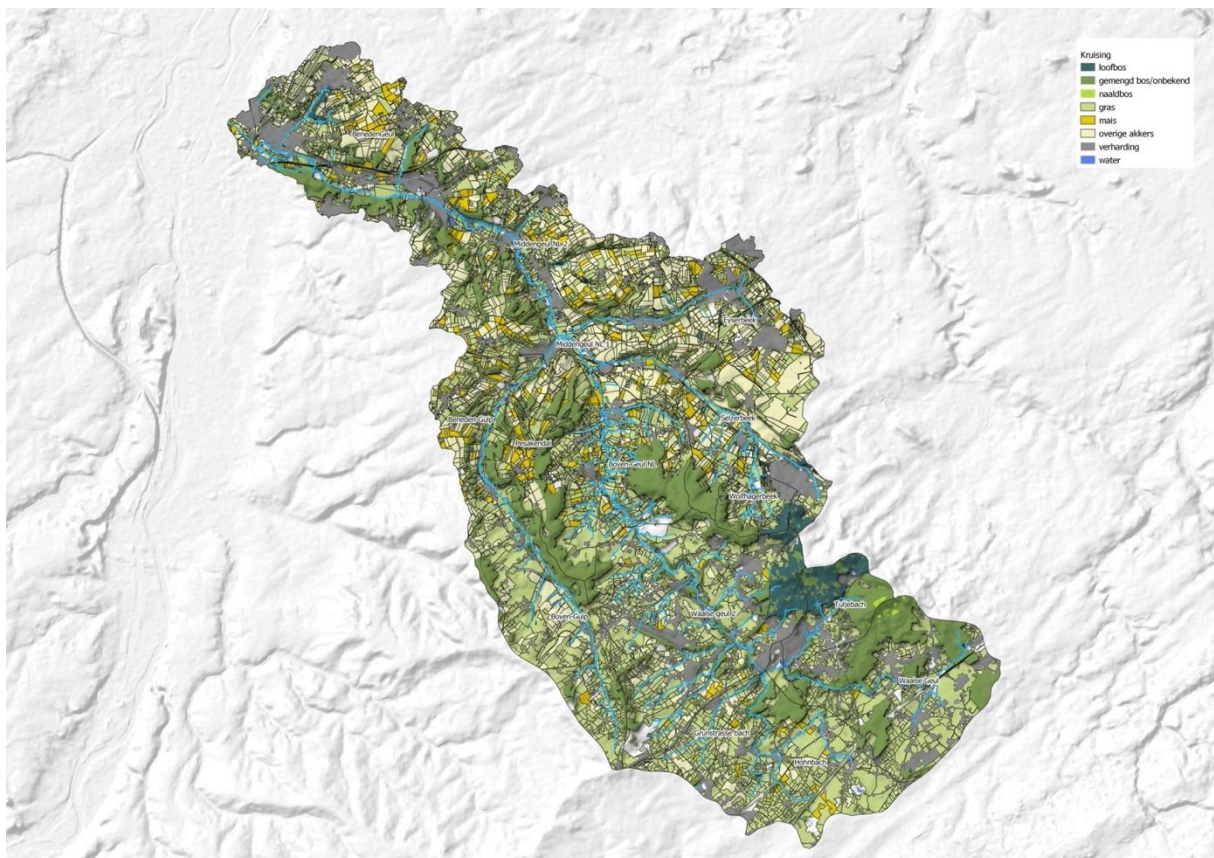
In tabel 5 en figuur 15 is per deelstroomgebied het areaal en de lengte van het watersysteem weergegeven. Per hectare verschilt de lengte aan oppervlaktewater van respectievelijk 12,5 m/ha en 14 m/ha in het Waalse beneden Geuldal en het Nederlandse Boven Geuldal tot minder dan 4 m in het watersysteem van de Eyserbeek. Ook het Nederlandse Beneden Geuldal kent een geringe lengte van slechts 5,6 m/ha. De lengte aan permanente waterlopen per ha is een maat waaruit kan worden afgeleid welk aandeel van het neerslagwater doorgaans vrij snel vanuit een gebied wordt afgevoerd. Als er weinig permanente waterlopen zijn, betekent dit dat een groter aandeel ondergronds, en dus trager afgevoerd wordt, dan bij een stroomgebied met een grote lengte aan waterlopen.

Ondanks dat er in de gebieden met beter doorlatende kalken, zanden en löss in de ondergrond geen beken voorkomen, zijn er wel dalen. Ze zijn ontstaan in een periode dat er een ander klimaat heerste en er in deze dalen wel water stroomde. In figuur 16 zijn deze droogdalen weergegeven. We vinden ze vooral in de gebieden waarvan hierboven al is beschreven dat zijbeken ontbreken. In de gebieden met een andere ondergrond komen ze minder frequent voor en zijn het veelal de meer bovenstroomse delen van de dalen, waar stroomafwaarts in het dal wel een beekje begint.

4.4 Landgebruik

In figuur 17 is het landgebruik van het stroomgebied weergegeven. Hierbij is onderscheid gemaakt, in bossen, grasland, akkerland, oppervlaktewater en verhard oppervlak. Bij het akkerland is speciaal onderscheid gemaakt in de maïsvelden en andere gewassen. Bij het verhard oppervlak is onderscheid gemaakt in bebouwde gebieden en gebieden buiten de stad. Bij de eerste gaat het dan om woningen, wegen en andere verharde oppervlakken; buitende bebouwde gebieden gaat het alleen om wegen en paden. In het areaal wegen en paden zijn ook onverharde (bos)paden meegenomen omdat de ervaring laat zien dat deze paden een zodanige verdichte bodemstructuur hebben dat het water er tijdens meer intensieve neerslag niet in de bodem kan dringen. In de tabel waar de lengte van de wegen is weergegeven (tabel 5) zijn de paden niet meegenomen en ligt de focus op alleen de verharde wegen.

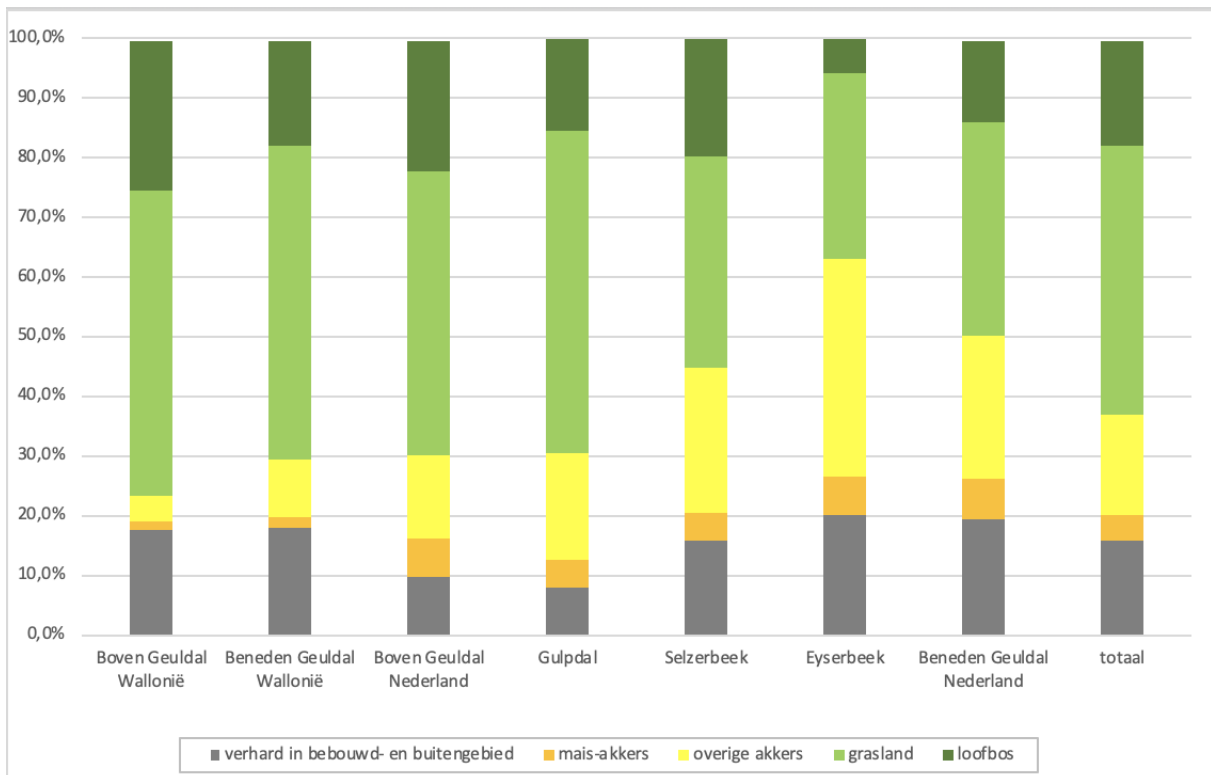
De oppervlakten van de verschillende grondgebruiksvormen zijn in tabel 3 en figuur 18 per deelstroomgebied weergegeven. In de opvolgende paragrafen zullen de verschillende eenheden nader worden beschouwd. In tabel 4 is van de eenheden met de geringste infiltratiecapaciteit; het verhard oppervlak, de wegen en de maïsakkers, het percentage van het totaal aangegeven.



Figuur 17. Landgebruik in het Geuldal. Zie tabel 2 en 3 voor de arealen.

Tabel 3. Arealen verschillende landgebruiksvormen in het Geuldal, per deelstroomgebied.

	Boven Geuldal Wallonië	Beneden Geuldal Wallonië	Boven Geuldal Nederland	Gulpdal	Selzerbeek	Eyserbeek	Beneden Geuldal Nederland	totaal
oppervlakte totaal	7.265	4.755	4.286	4.362	2.845	2.795	7.072	33.380
percentage van het stroomgebied	21,8%	14,2%	12,8%	13,1%	8,5%	8,4%	21,2%	
Landgebruik								
verhard oppervlak in bebouwd gebied	1.098	770	310	257	360	457	1.111	4.361
maïs	99	76	279	216	135	179	476	1.461
overige akkers	327	470	598	767	691	1.017	1.695	5.565
grasland	3.707	2.487	2.039	2.362	1.007	872	2.523	14.998
naaldbos	25	-	-	-	0	-	0	26
loofbos	1.809	841	932	670	552	161	959	5.923
oppervlaktewater	20	11	5	7	5	3	16	67
Infrastructuur								
wegen 1 m	35	15	24	15	18	9	28	145
wegen 3 m	27	12	32	26	32	34	75	238
wegen 4 m	-	-	-	-	-	-	-	-
wegen 6 m	36	18	20	15	27	22	40	178
wegen 8 m	26	12	22	17	8	23	45	153
wegen 10 m	7	6	5	9	4	-	24	56
snelwegen 25 m	38	24	-	-	-	17	54	133
waterlopen (alle)	10	13	20	10	4	2	26	86
Totaal	7.265	4.755	4.286	4.372	2.845	2.795	7.072	33.390



Figuur 18. Grafische weergave van de grootste arealen uit tabel 2.

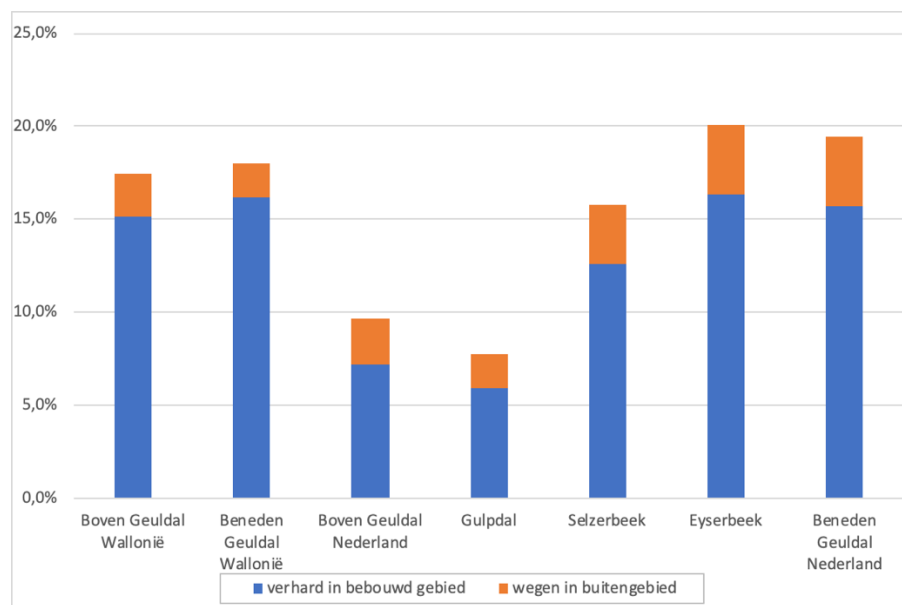
Het areaal verhard oppervlak (Incl. de wegen) beslaat in veel deelstroomgebieden tot 20% van het areaal. Het Belgische deel van het stroomgebied herbergt relatief weinig akkerland (geel en oranje in figuur 18), het Nederlandse ongeveer twee keer zoveel, met het grootste percentage in het stroomgebied van de Selzerbeek en vooral van de Eyserbeek. Grasland komt overal veel voor, vooral in de Belgische delen van het stroomgebied, maar ook in de bovenloop van de Geul en het Gulpdal in Nederland. Het areaal bos is in het Waalse Boven Geuldal het grootst, met 25%. In de overige deelstroomgebieden varieert het van 15 tot 20%; alleen bij de Eyserbeek bedraagt het areaal slechts 5%.

Tabel 4. Arealen van de landgebruiksvormen in het Geuldal met een geringe infiltratiecapaciteit, per deelstroomgebied.

	Boven Geuldal Wallonië	Beneden Geuldal Wallonië	Boven Geuldal Nederland	Gulpdal	Selzerbeek	Eyserbeek	Beneden Geuldal Nederland	totaal
verhard in bebouwd gebied	15,1%	16,2%	7,2%	5,9%	12,6%	16,3%	15,7%	13,1%
wegen in buitengebied	2,3%	1,9%	2,4%	1,9%	3,1%	3,7%	3,8%	2,7%
verhard in bebouwd- en buitengebied	17,5%	18,0%	9,6%	7,8%	15,8%	20,1%	19,5%	15,8%
mais-akkers	1,4%	1,6%	6,5%	4,9%	4,8%	6,4%	6,7%	4,4%

4.4.1 Bebouwd oppervlak en wegen

De verschillende vormen van landgebruik variëren in de mate waarin regenwater er in de bodem kan dringen. Hoe geringer deze infiltratiecapaciteit, hoe eerder water bij een oplopende neerslagintensiteit oppervlakkig zal gaan afstromen. Het is dit oppervlakkig afstromende water dat vervolgens het eerst in de beek aankomt en vaak een grote bijdrage levert aan de opbouw van de hoogwatergolf. Water dat wel in de bodem infiltreert kan na een weg via de ondergrond wel weer ergens uittreden (zie theoretisch kader). Het is dan afhankelijk van de stroomsnelheid via de ondergrond of dit water nog 'op tijd' is om een bijdrage te leveren aan de hoogwatergolf of (veel) later pas in de beek of rivier aan komt.



Figuur 19. Onderscheid binnen de deelstroomgebieden in de mate waarin het areaal ingenomen wordt door verhard oppervlak (grafische weergave van tabel 3).

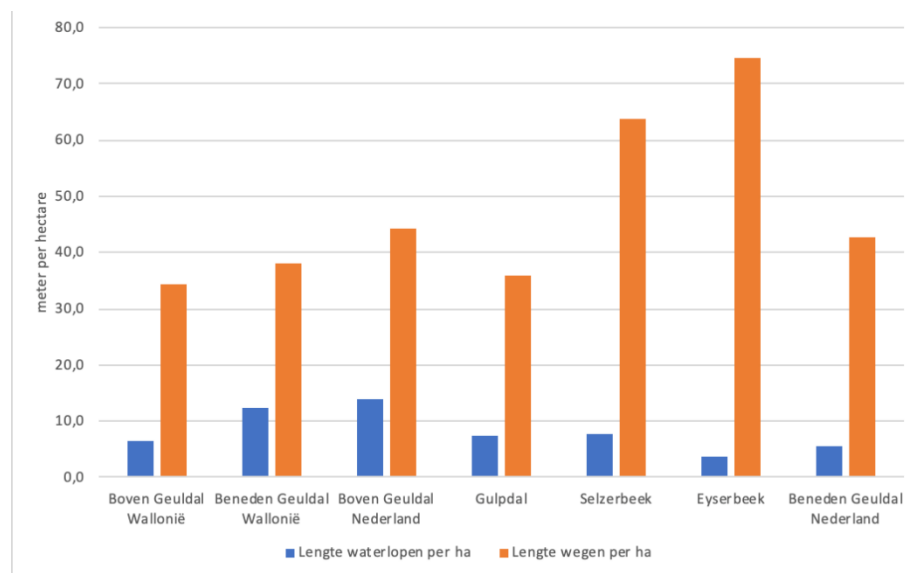
In figuur 19 zijn de getallen uit tabel 3 in grafiekvorm weergegeven. In een groot deel van het Geuldal bestaat de bodem voor 15 tot 20% uit verhard oppervlak. Alleen het Geuldal in Nederland stroomopwaarts van Mechelen en het Gulpdal hebben in vergelijking met de overige gebieden een relatief gering aandeel.

Het areaal dat wegen en paden³ in het buitengebied innemen van het verhard oppervlak bedraagt in Wallonië, het Nederlandse boven Geuldal en het Gulpdal circa 2 tot 2,5%. In de overige gebieden is het areaal groter dan 3%, tot maximaal bijna 4% in het Beneden Geuldal.

Als we naar de lengte² van de wegen kijken (tabel 4 en figuur 20) dan is deze relatief hoger in het Nederlandse deel van het stroomgebied, dan het Belgische. De grootste lengte per hectare ligt in de dalen van Selzerbeek en Eyserbeek. In figuur 21 is het totale netwerk van wegen en waterwegen weergegeven. De wegen fungeren tijdens een periode met intensieve neerslag als een verlengstuk van de waterwegen, omdat het water dat er op valt direct over de weg omlaag wordt gevoerd. Daarbij kunnen wegen ook water onderscheppen dat ondergronds afstroomt en in de zijkant van de weg uittreedt. Dit verschijnsel van langs de weg uittredend water zal vooral optreden in gebieden met een dunne bodem. De kaart laat zien dat er geen grote concentraties van wegen zijn in het Geuldal, zoals wel bijvoorbeeld direct over de grens van het stroomgebied aan de oostzijde.

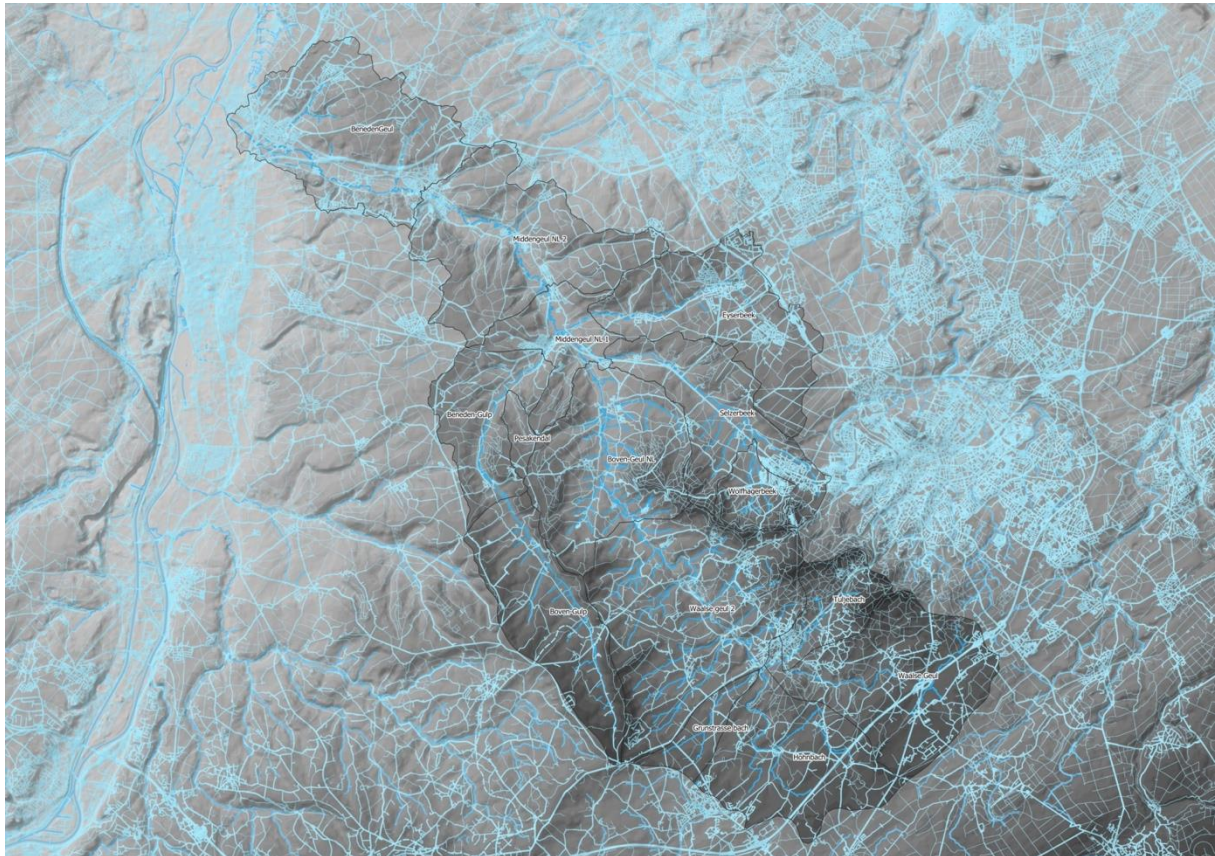
Tabel 5. Lengte waterlopen en wegen in het gebied, in totaal aantal meters en meters per ha

lengte wegen en waterlopen	Boven Geuldal Wallonië	Beneden Geuldal Wallonië	Boven Geuldal Nederland	Gulpdal	Selzerbeek	Eyserbeek	Beneden Geuldal Nederland	totaal
Lengte waterlopen (breed) in m	11.380	10.727	18.618	20.578			20.038	81.341
Lengte waterlopen (smal) in m	35.325	48.115	41.522	11.689	21.777	10.453	19.741	188.623
Lengte waterlopen per ha	6,4	12,4	14,0	7,4	7,7	3,7	5,6	8,1
Lengte wegen in m	249.144	181.273	189.252	157.197	181.249	208.323	302.840	1.469.277
Lengte wegen per ha	34	38	44	36	64	75	43	44
lengte wegen en water per ha	41	50	58	43	71	78	48	52



Figuur 20. Lengte van de wegen en waterwegen in de deelstroomgebieden (grafische weergave van tabel 4).

³ Hierin zijn ook onverharde bospaden meegenomen omdat de ervaring laat zien dat deze paden een zodanige verdichte bodemstructuur hebben dat het water er niet in de bodem kan dringen. Bij de lengte van de wegen zijn de paden niet meegenomen en ligt de focus op alleen de verharde wegen.



Figuur 21. Netwerk van alle wegen en paden in het gebied, die een verhard oppervlak hebben en waar water niet in de bodem kan treden en oppervlakkig wordt afgevoerd. Zie tabel 5 en figuur 14 voor de lengtes per deelstroomgebied.

4.4.2 Drainage

Een belangrijke factor die sterk bepalend kan zijn voor de mate waarin water tot afstroom komt is de drainage. Dit kunnen zowel greppels zijn als ondergrondse drainage. Over het areaal waar ondergrondse drainage is toegepast is alleen anekdotisch het een en ander bekend. Zo heeft stichting ARK Natuurontwikkeling bij het inrichten van natuurgebieden in enkele percelen drainage aangetroffen. Het gaat om percelen in het dal van de Wolfhagerbeek. De ondergrond in dit gebied bestaat voor een groot deel uit Aker Groenzand, wat bekend is om zijn slechte doorlatendheid. De kans is groot dat er in vergelijkbare gebieden ook drainage is aangebracht.

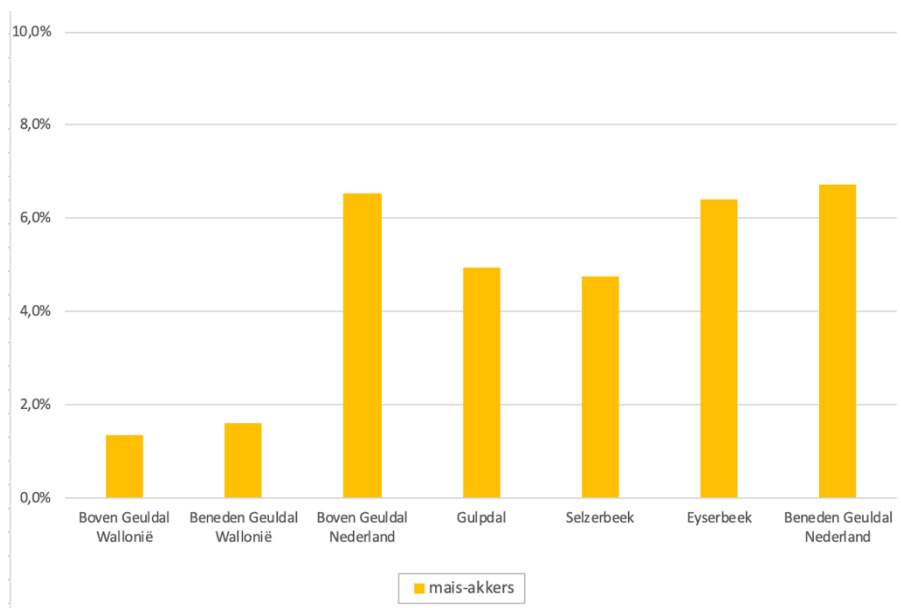
Een ander voorbeeld is bovenstrooms in het Waalse deel van het stroomgebied. Tijdens een veldbezoek bleek dat in een aantal graslandpercelen de beek geheel ontbrak en dat het water er via greppels en deels via een duiker ondergronds werd afgevoerd (figuur 6). De kans is groot dat de percelen (grasland) grenzend aan de duiker ook zijn gedraineerd, wat dan afvoert op de duiker / greppel. Het gaat hier om gebieden waar de ondergrond uit paleozoïsche leisteen en zandsteen bestaat met een slechte doorlatendheid. De bodem zijn hier ook erg dun. Het is niet onwaarschijnlijk dat hier op veel grotere schaal drainage is toegepast in de graslandpercelen.

Het gaat hier om gebieden die bekend zijn om hun slecht doorlatende bodem. Wellicht dat dit op grotere schaal is toegepast en dat zou dan betekenen dat in deze gebieden die hun water al relatief snel afgeven, de drainage nog voor een verdere versnelling heeft gezorgd.

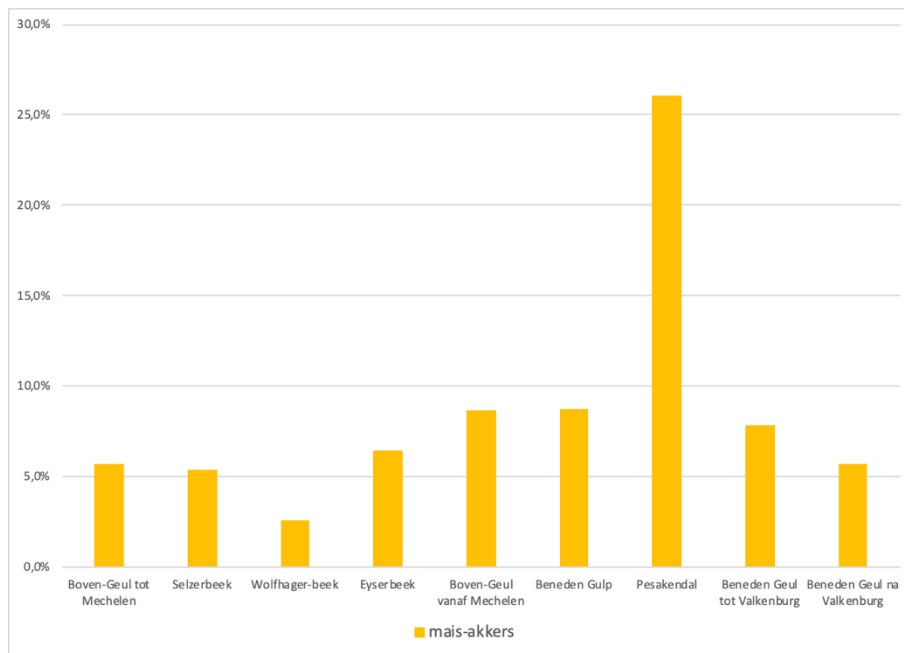
4.4.3 Maïsakkers

De akkers met maïs zijn apart in de tabel met arealen weergegeven. Maïsakkers staan erom bekend dat er bij zware regenval eerder overland flow optreedt dan bij andere gewassen. Dit wordt niet direct door het gewas veroorzaakt, maar door het feit dat maïs pas laat kiemt en de akkers in mei nog vrijwel geheel en in juni nog deels open liggen. Als dan in die maanden zwaardere buien vallen, kan dat tot verslemping van de bodem leiden, waarbij fijnere deeltjes zich ophopen in de bovenste bodemlaag. Als dan vervolgens de zon schijnt kan deze laag ook als het ware opbakken tot een pleisterlaag, die de infiltratiecapaciteit sterk vermindert. Tijdens de neerslagevent is op verschillende locaties overland flow waargenomen.

In de grafiek van figuur 22 valt het verschil op tussen het Nederlandse en het Waalse deel van het stroomgebied; in Nederland is het areaal maïs circa vier keer zo groot. De maïsakkers liggen er vooral op de plateaus en de licht hellende flanken op plaatsen waar de bodem uit löss bestaat. Als het Nederlandse deel van het stroomgebied wat verder wordt opgedeeld (zie figuur 22), dan veranderen de verschillen in areaal maïs nog niet zo sterk. Pas op nog meer detailniveau ontstaan er wel verschillen. Zo herbergt het ca 600 ha grote stroomgebied van de Wolfhagerbeek aan de voet van de Vaalserberg, met een ondergrond van Aker Groenzand, slechts 2,5% maïsakker, terwijl het ca 250 ha grote Pesakerdal, dat een bodem heeft die grotendeels uit löss bestaat, voor ca 25% uit maïsakkers bestaat.



Figuur 22. Percentage van het areaal dat ingenomen wordt door maïsakkers in de deelstroomgebieden.



Figuur 23. Als figuur 22, met een verdere detaillering van het Nederlandse deel van het stroomgebied.

4.4.4 Vergelijking landgebruik bij verdere onderverdeling van de stroomgebieden

In figuur 24 is het landgebruik weergegeven in een verdere detaillering van de stroomgebieden. Ook is onderscheid gemaakt in het Belgische deel van het stroomgebied (linkerdeel) en het Nederlandse deel (rechterdeel). Bij het verhard oppervlak zijn er 3 deelgebieden met een boven gemiddeld areaal, dat zijn twee delen van het bovenstroomse Waalse deel van het stroomgebied en het meest stroomafwaartse deel waar Valkenburg en Meerssen liggen.

Met name de Tüljebach valt op in het meeste zuidelijke deel van het stroomgebied; op deze beek watert de plaats Kelmis af. Ook de bovenloop van de Geul heeft in Wallonië een hoog areaal, mede omdat hier bedrijfsterreinen liggen en ook een snelweg. De andere deelstroomgebieden in het meest zuidelijke deel hebben evenals het grootste deel van het Nederlandse deel van het stroomgebied een relatief wat lager areaal verhard oppervlak, met ca 10 tot 15%. Het areaal wegen (buiten de bebouwde kom) is in Nederland in alle deelgebieden vrij hoog, vooral in het stroomafwaartse deel van het beneden Geuldal. Het Gulpdal valt zowel in Nederland als België op door een laag areaal verhard oppervlak (ca 5%) en het geringe areaal wegen.

Bij het akkerland (maïs en overige akkers) is het areaal in bijna alle Nederlands deelgebieden hoger dan in de Belgische, alleen in het meest stroomopwaartse deel en rondom de Wolfhagerbeek. Bij het grasland valt op dat op het relatief kleine stroomgebied van de Tüljebach de Belgische gebieden in vergelijking met Nederland relatief veel grasland herbergen. In Nederland is het areaal ook vrij groot in het meest stroomopwaartse deel en rondom de Wolfhagerbeek, waar we al zagen dat het areaal akkerland vrij gering was.

Bij het areaal bos vallen twee deelgebieden in Wallonië duidelijk op. Onder andere het stroomgebied van de Tüljebach dat ook al relatief veel verhard oppervlak omvatte. De overige deelgebieden in het meest bovenstroomse deel van Wallonië zijn juist arm aan bos. Verder stroomafwaarts is het benedenstroomse deel van de Waalse Geul en het bovenstroomse deel van de Nederlandse Geul weer relatief rijk aan bos, met arealen van 20% en meer. In stroomafwaartse richting neemt het areaal bos af tot tussen de 10 en 15%. De Eyserbeek herbergt slechts 5% bosareaal.



Figuur 24. Arealen landgebruik in de verschillende deelstroomgebieden. Van boven naar beneden: verhard oppervlak (rood = stedelijk, grijs = wegen), maïsakkers (geel), overige akkers (oranje), weiland (lichtgroen) en bos (donkergroen).

4.5 Samenvatting karakteristieken deelstroomgebieden

In de vorige paragrafen zijn een aantal aspecten van het stroomgebied beschreven. Deze aspecten zijn voor een groot bepalend in welke mate regenwater er direct tot afstroom komt of eerst nog enige tijd wordt vastgehouden. In deze paragraaf komen we tot een samenvatting waarin de deelstroomgebieden met elkaar worden vergeleken.

Van de hierboven beschreven aspecten is globaal aangegeven in welke mate ze de afstroom afremmen of juist niet. In de tabel hieronder (tabel 6) is aangegeven hoe deze indeling tot stand gekomen is. Het gaat hierbij om een kwalitatieve vergelijking per aspect. Een rood vlakje bij de lengte van het areaal wegen zal anders meewegen dan een rood vlakje bij de doorlatendheid van de bodem.

De volgorde van boven naar beneden is wel zo gekozen dat de parameters die het meeste mee zullen tellen boven aan staan. Zo is het te verwachten dat de doorlatendheid van de ondergrond een belangrijke parameter is, evenals de dikte van de bodems, terwijl de lengte van het aantal watergangen minder zwaar zal wegen, mede omdat de verschillen tussen de gebieden daarin niet heel groot zijn. De gebieden zijn opgedeeld in 3 clusters: het Waalse deel van het Boven Geuldal, het Nederlandse Geuldal en de zijbeken die in Nederland in de Geul uitmonden.

Tabel 6. Kwalitatieve weging van de mate waarin een aspect van het gebied de afvoer van het neerslagwater bepaalt. Rood betekent weinig vertragende werking, groen een grote vertragende werking.

	doorlatendheid ondergrond	dikte bodem	areaal verhard oppervlak	areaal wegen	lengte wegen	maïs-akkers	loofbos	overige akkers	steile hellingen	lengte watersysteem
	slecht	dun	>20	>3,4	80-100	>10	<10	>25	veel	>12,5
			15-20	2,8-3,4	60-79	7,5-10	10-15	20-25		10-12,5
	matig	gemiddeld	10-15	2,2-2,7	40-59	5-7,5	15-20	15-20	gemiddeld	7,5-10
			5-10	1,5-2,1	20-39	2,5-5	20-25	10-15		5-7,5
	goed	dik	<5	<1,5	<20	<2,5	>25	<10	weinig	<5

Tabel 7. Weging van de aspecten van het stroomgebied in hoeverre regenwater wordt vertraagd in het Waalse deel van het stroomgebied.

	Boven Geul Wallonië	Tüljebach	Hohnbach	Grun-strasse-bach	Beneden Geul Wallonië
doorlatendheid ondergrond					
dikte bodem					
areaal verhard opp					
areaal wegen					
lengte wegen					
maïs-akkers					
loofbos					
overige akkers					
Aandeel steile hellingen					
lengte watersysteem					

Het hele Waalse deel van het stroomgebied heeft een ondoorlatende ondergrond en daarbovenop bijna overal een dunne bodem (zie tabel 7). In drie deelstroomgebieden, die samen 75% van het areaal uitmaken, is er ook een groot of zeer groot areaal verhard oppervlak en in twee daarvan zijn er veel tot vrij veel wegen. Voor het overige zijn de parameters relatief gunstig: maïsakkers ontbreken vrijwel geheel, akkerland is schaars en er zijn weinig steile hellingen. De twee deelstroomgebieden met het grootste verharde areaal herbergen ook het grootste areaal bos, wat de snelle afstroom vanuit dit gebied weer wat zal compenseren omdat bossen relatief het meeste water vast kunnen houden.

De deelstroomgebieden van de Hohnbach en Grunstrassebach zijn duidelijk anders dan de Bovengeul en de Tüljebach, minder dicht bebouwd en veel minder wegen. Niet zichtbaar in de figuur is dat deze gebieden relatief het grootste areaal grasland bezitten. Op zich hoeft dat voor de afvoer van neerslag geen bezwaar te zijn, omdat grasland niet snel water afgeeft. De mogelijkheid bestaat echter dat deze graslanden vaak gedraineerd zullen zijn. Hierover is niet veel bekend, maar als dat zo is, dan zullen ook deze gebieden sneller water afgeven dan alleen op grond van hun landgebruik in eerste instantie vermoed zou worden.

In de flanken van de hoofd- en zijdalen bevinden zich relatief weinig gedeelten met een hoge hellingsgraad.

Tabel 8 Weging van de aspecten van het stroomgebied in hoeverre regenwater wordt vertraagd in de drie beekdalen die in het Nederlandse deel van het Geuldal uitmonden.

	Selzerbeek	Wolfhagerbeek	Eyserbeek	Boven Gulp	Beneden Gulp	Pesakendal
doorlatendheid ondergrond	light green	orange	dark green	orange	light green	dark green
dikte bodem	dark green	yellow	dark green	yellow	dark green	dark green
areaal verhard opp	yellow	yellow	orange	light green	light green	light green
areaal wegen	orange	red	red	dark green	yellow	dark green
lengte wegen	orange	orange	orange	light green	yellow	light green
maïs-akkers	yellow	dark green	yellow	dark green	orange	red
loofbos	yellow	light green	red	yellow	yellow	orange
overige akkers	red	dark green	red	yellow	orange	light green
Aandeel steile hellingen	orange	orange	yellow	red	red	orange
lengte watersysteem	yellow	orange	dark green	yellow	light green	dark green

De stroomgebieden van de drie zijbeken van de Geul laten een gevarieerd beeld zien (zie tabel 8). Over het algemeen is de doorlatendheid van de bodem veel beter dan in het Waalse deel van het stroomgebied alleen bij de Wolfhagerbeek en het Boven Gulpdal waar het Aker Groenzand aan de dag treedt. De dikte van de bodem is daar ook minder gunstig, maar overal elders komen dikke bodems voor die veel water kunnen opvangen, mits de neerslagintensiteit niet te hoog zal zijn.

Verhard oppervlak komt alleen bij de Eyserbeek veel voor, in ander gebieden gemiddeld of vrij weinig. Wegen zijn in de kleinere stroomgebieden van Selzerbeek en Eyserbeek wel veel aanwezig. In alle deelstroomgebieden is het landgebruik voornamelijk agrarisch. In Nederland is dat, in vergelijking met België, relatief veel akkerland en lokaal veel maïsakkers. Loofbos is overal schaars tot vrij schaars, behalve in het stroomgebied van de Wolfhagerbeek. In de flanken van de hoofd- en zijdalen bevinden zich veel tot zeer veel gedeelten met een hoge hellingsgraad.

Tabel 9. Weging van de aspecten van het stroomgebied in hoeverre regenwater wordt vertraagd in het Nederlandse Geuldal vanaf de grens tot aan het Julianakanaal.

	Boven-Geul tot Mechelen	Boven-Geul vanaf Mechelen	Beneden Geul tot Valkenburg	Beneden Geul na Valkenburg
doorlatendheid ondergrond	Yellow	Light Green	Light Green	Dark Green
dikte bodem	Yellow	Dark Green	Dark Green	Dark Green
areaal verhard opp	Light Green	Yellow	Yellow	Red
areaal wegen	Light Green	Orange	Yellow	Red
lengte wegen	Light Green	Orange	Yellow	Red
maïs-akkers	Yellow	Orange	Orange	Yellow
loofbos	Light Green	Orange	Orange	Yellow
overige akkers	Light Green	Orange	Red	Orange
Aandeel steile hellingen	Orange	Orange	Red	Red
lengte watersysteem	Red	Orange	Dark Green	Yellow

In het Nederlandse deel van het Geuldal (zie tabel 9) is de ondergrond over het algemeen goed tot zeer goed doorlatend en zijn de bodem bovenop de eventueel vastere ondergrond ook altijd dik. Alleen in het Boven Geuldal komen in een gedeelte nog de paleozoïsche gesteenten aan de oppervlakte en ligt lokaal ook slecht doorlatend Aker Groenzand. Verhard oppervlak neemt van boven naar benedenstrooms gaandeweg toe, evenals het areaal en de lengte van de wegen. Buiten het bebouwde gebied is er veel agrarisch gebied met relatief veel akkers en lokaal ook maïsakkers, met uitzondering van het Boven Geuldal, waar relatief veel grasland ligt. Loofbos is alleen in het Boven Geuldal vrij veel aanwezig, elders schaars tot vrij schaars. In de flanken van de hoofd- en zijdalen bevinden zich veel tot zeer veel gedeelten met een hoge hellingsgraad.

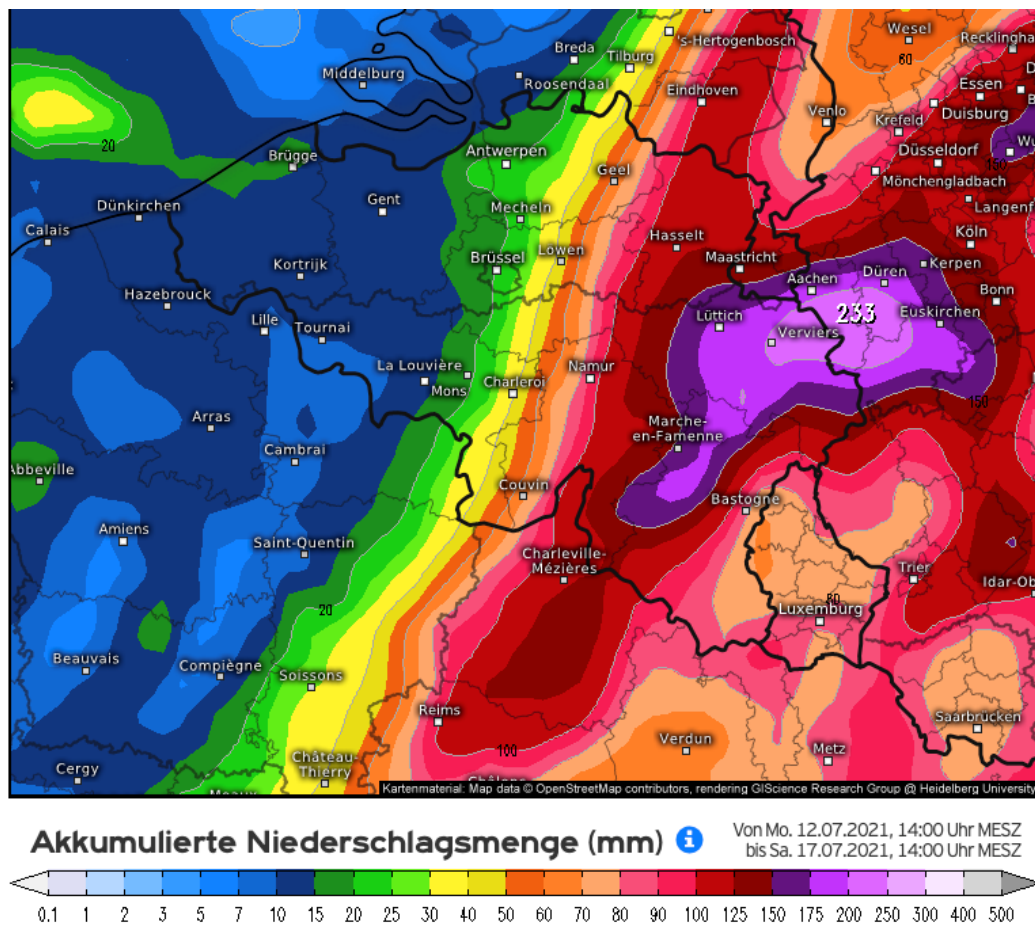
5. Beschrijving van ontstaan en verloop hoogwatergolf

De hoogwatergolf in de Geul volgde op een uitzonderlijke hoeveelheid neerslag die in enkele dagen tijd in Zuid-Limburg en het aangrenzende deel van België en Duitsland viel. Hieronder wordt eerst van dag tot dag een korte samenvatting gegeven van het verloop van de neerslagevent en de overstromingen die dit veroorzaakte.

5.1 De situatie van dag tot dag

10 juli

Voorafgaand aan deze datum gaven verschillende weermodellen al aan dat er grote kans was dat er in een omvangrijk gebied rondom de Noordelijke Ardennen en Eiffel zeer veel regen kon gaan vallen. Deze verwachting houdt de dagen daarna stand en vanaf 10 juli (zie figuur 25) met de verwachting van 11 juli 00 uur is duidelijk dat er iets bijzonder kan gaan gebeuren. De impact ervan op de waterstanden is dan nog niet duidelijk. Zomerhoogwaters komen in de rivieren en beken vrijwel nooit voor en de gevolgen van deze neerslaghoeveelheden op het afvoerverloop zijn op voorhand niet in te schatten.



Figuur 25 Verwachting van 11 juli met de neerslagprognose voor de week van 12 tot 17 juli.

13 juli

Vanaf ongeveer 12 uur begint het te regenen in de het stroomgebied van de Geul. De regen houdt, met slechts korte droge tussenpozen, aan tot en met 15 juli. Op 13/7 valt er ca 20 tot 50 mm, maar zijn er ook al enkele plaatsen waar meer dan 50 mm valt; zoals rond Ubachsberg en Wijlre waar zelfs 75 mm valt.

14 juli

Dit wordt de natste dag uit de reeks van drie en er valt bijna in het hele stroomgebied tussen de 80 en 110 mm. Alleen in het westen nabij Meerssen blijft het bij ca 50 mm. De regenval op 13/7 zorgt al in de nacht van 13 op 14 juli voor een eerste sterke stijging van de Geul en als gevolg van de regen op de 14^e zet de stijging door naar een eerste hoogtepunt in de loop van de middag. De dalvlakte van de Geul is in het zuiden in de loop van de nacht al gaan overstromen en later op de dag gebeurt dat ook verder stroomafwaarts; het laatst in het westen tussen Valkenburg en Meerssen. Tegen de avond gaat ook beekwater voor het Julianakanaal naar het noorden stromen en zorgt daar voor een overstroming van het historische Maas dal, dat na aanleg van het Julianakanaal niet meer door de Maas kan overstromen.

De neerslaghoeveelheden per uur waren variërend en vooral in de middag zijn er enkele uitschieters naar boven tot >10 mm in een uur. Dit zijn de uren dat ook via droogdalen water tot afstromen komt. In het begin van de avond wordt het enige uren later droger, maar vanaf 21 uur keert de regen terug en vooral in de Waalse Geul met een hoge intensiteit.

15 juli

De intensive regenval in het Waalse deel van het stroomgebied zorgt voor een nieuwe stijging in dit beektraject; deze bereikt in de nanacht ook Nederland. De dalvlakte die in de uren daarvoor een klein beetje leeg was gaan stromen, vult zich opnieuw en de standen worden in het traject tot Gulpen nog iets hoger dan 12 uur eerder. Verder stroomafwaarts lopen de beide pieken vrijwel in elkaar over en is er van een daling nauwelijks meer sprake. Op 15 juli vallen de neerslaghoeveelheden in het Nederlandse deel van het stroomgebied mee, op de Selzerbeek na en het is dan vooral water uit Wallonië dat de peilen in de Geul nog de hele dag op een zeer hoog niveau houdt.

Vanaf 8 uur is ook daar de meest intensieve neerslag gestopt. Tot in het begin van de avond valt er nog wel wat, maar met een lage intensiteit. Na 20 uur wordt het overal droog. In Wallonië zet de daling snel in zodra de intensiteit afneemt.

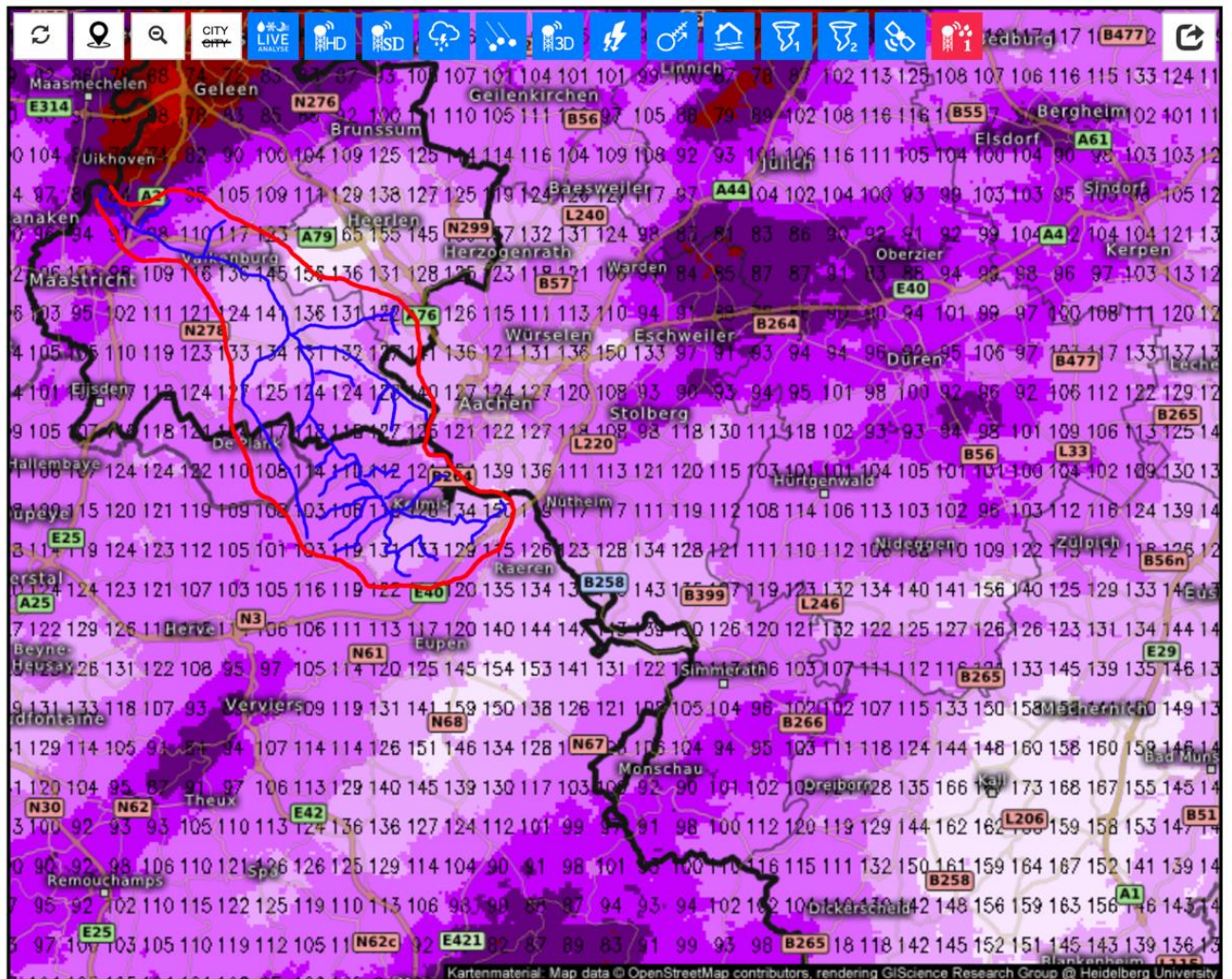
16 juli

In Nederland is aanvankelijk nog weinig van te merken van de daling omdat de dalvlakte eerst weer leeg moet stromen en dit vult het peil van de Geul stroomafwaarts nog lange tijd aan. Nabij Gulpen zet de daling rond middernacht in, bij Meerssen pas halverwege de volgende dag. Ondertussen is ook de Maas op 14 en 15 juli sterk gestegen en het buitendijkse gebied langs de Grensmaas overstromt volledig in de loop van 15 juli. In de nacht van 15 op 16 juli wordt bij Maastricht de hoogste stand bereikt en ter hoogte van de Geulmonding passeert de piek om ca 4 uur 's nachts. De stand loopt daar zover op dat het Geulwater weinig verval meer heeft onder het kanaal door en de doorstroming wordt belemmerd. Dit is mede de oorzaak dat het Geulwater in noordelijke richting af buigt. Het zou nog enkele dagen duren voordat de dalvlakte van de Geul weer is leeggestroomd.

5.2 Neerslaggegevens

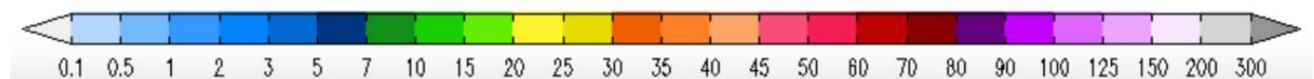
Verschillende bronnen zijn geraadpleegd om de hoeveelheid neerslag te kunnen bepalen. Deze verschillende bronnen komen niet altijd overeen, maar zoals we later zullen zien maakt het voor de conclusies niet zo heel veel uit of er nu 14 of 16 cm neerslag viel.

In figuur 26 is de hoeveelheid neerslag weergegeven die gedurende de periode van 13/7 08 uur t/m 16/7 08.00 viel. Het beeld is samengesteld uit radarbeelden waaruit de gevallen hoeveelheden kunnen worden berekend. In de volgende 3 figuren (figuur 27) zijn ook de neerslaghoeveelheden van de 3 afzonderlijke data afgebeeld. Hierin is goed te zien dat de 15/7 de meest extreme dag was. Op 14 juli valt het buiencomplex op dat ten noorden van het Geuldal langs trok en in Ubachsberg en Wijlre die nacht al veel regen bracht.

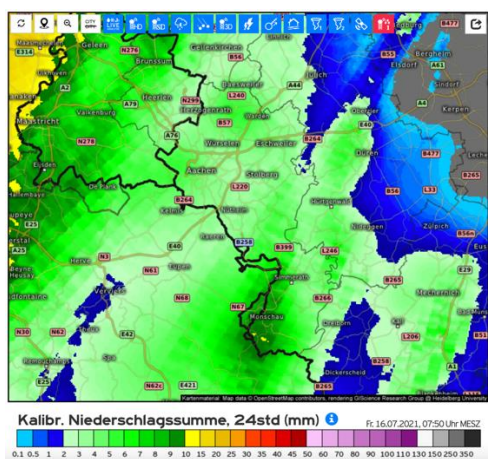
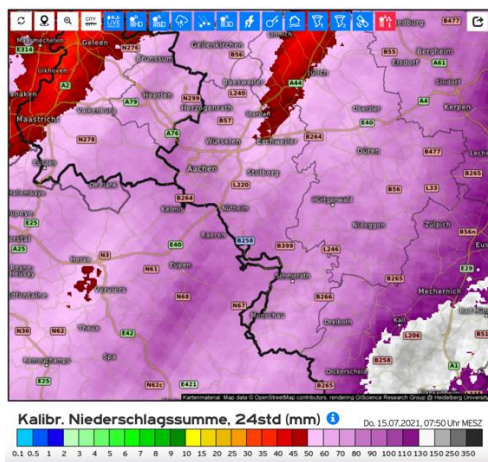
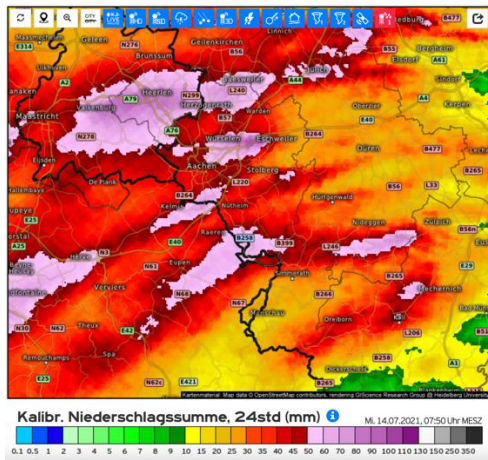


Kalibr. Niederschlagssumme, 72std (mm) i

Fr. 16.07.2021, 07:50 Uhr MESZ

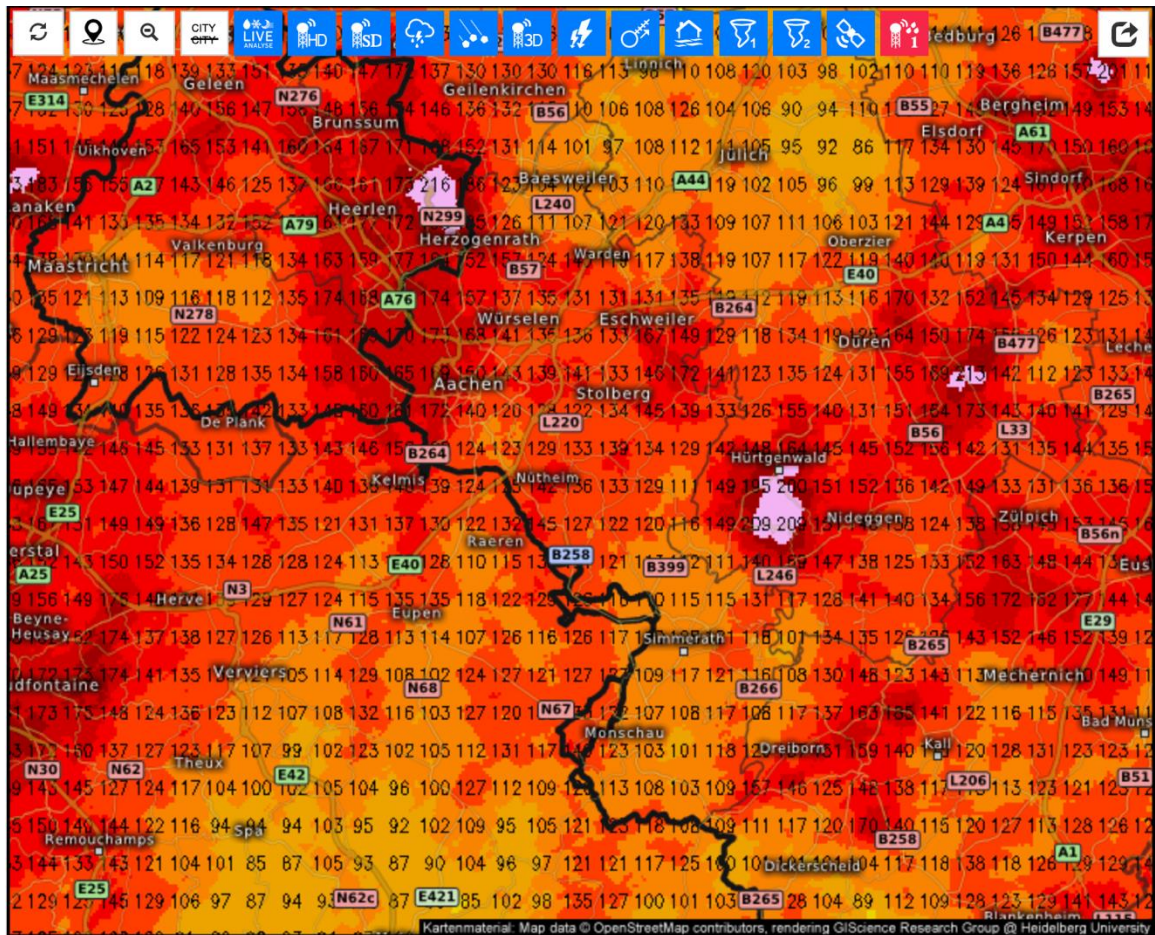


Figuur 26. Neerslaghoeveelheden gedurende de 3 dagen met de meeste regen (13 tot 16 juli) afgeleid uit radarbeelden.



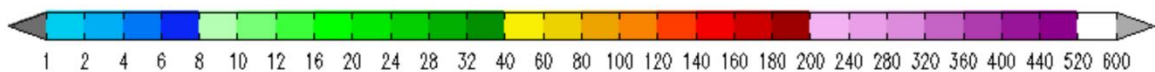
Figuur 27: Figuur 26 onderverdeeld naar de 3 afzonderlijke dagen.

Ook de periode voorafgaand aan 13 juli was het al vrij nat geweest. In figuur 28 is de totale neerslagsom weergegeven van de maand voorafgaand aan de regenevent. In het hele stroomgebied van de Geul was in die periode al zo'n 11 tot 15 cm regen gevallen, wat zo'n 25 tot 50% meer is dan er normaal in een maand valt. Het gevolg daarvan zal zijn geweest dat bodems deels al verzadigd zullen zijn geweest.



Kalibrierte Summe, letzte 30 Tage (mm) i

Di. 13.07.2021, 07:50 Uhr MESZ



Figuur 28. Neerslaghoeveelheden in de maand voorafgaand aan de 3-daagse neerslagevent.

De figuren hierboven geven, omdat ze vlakdekkend zijn, een goed beeld van de omvang van de neerslagevent. Als we ze nader bestuderen dan blijkt echter dat de hoeveelheden veelal toch nog onderschatting zijn geweest. Uit neerslagmetingen van individuele stations blijkt dat. Zo geven 3 van de 5 KNMI stations in de regio waar de neerslag handmatig wordt gemeten hogere waarden en 2 Duitse station en 3 Belgische stations ook (zie tabel 10).

Tabel 10. Dagwaarden van de neerslagmeetstations vergeleken met de som die uit de radarmeting blijkt. De verschillen zijn soms aanzienlijk, behalve bij Epen en Vaals waar ze ongeveer kloppen.

	Valkenburg	Noorbeek	Ubachsberg	Epen	Vaals	Aachen	Gemmenich	Pieters Voeren	Batice	Simmerath
14-jul	80	88	98	42	51	55	19	25	52	50
15-jul	54	59	84	68	74	99	87	81	88	94
16-jul	9	12	8	6	7	6	29	22	24	14
totaal	143	159	190	116	132	160	135	128	164	158
volgens radar	125	121	155	124	130	140	120	110	119	126
verschil	14%	31%	23%	-6%	2%	14%	13%	16%	38%	25%

Naast de gegevens van de officiële meetstations zijn ook waarnemingen verzameld van enkele particuliere weerstations. Deze geven hun waarnemingen door aan Wunderground. De kwaliteit van deze waarnemingen kon niet gecontroleerd worden, maar ze geven een goede aanvulling op de officiële weerstations. Hierbij zijn alleen die stations meegenomen die vergelijkbare hoeveelheden lieten zien als officiële stations in de nabijheid. Daarbij worden de gegevens van deze particuliere stations per 5 minuten geregistreerd zodat ook het verloop van de neerslaghoeveelheden per uur uit deze stations kan worden afgeleid. Dat is sowieso informatie die van pas komt voor de analyse, maar het maakte het ook mogelijk om vreemde uitbijters in de registratie op te sporen en als dat het geval is het station niet mee te nemen.

Uiteindelijk is gekozen voor een set van meetstations zodat er per deelstroomgebied ongeveer één per 1000 ha ligt. In tabel 10 is een overzicht gegeven van de verschillende meetstations die in de analyse zijn meegenomen. Indien van de radargegevens zou zijn uitgegaan, dan zijn de neerslaghoeveelheden ongeveer 10 tot 15% lager, in het meest zuidelijke Waalse deel van het stroomgebied ca. 20%.

5.2.1 Neerslag per deelstroomgebied

Op grond van de metingen van de diverse stations is van de 7 deelstroomgebieden bepaald hoeveel neerslag er gevallen is (zie tabel 11). In totaal viel er ca 53 miljoen m³ in het hele stroomgebied. In het meest bovenstrooms deel van het stroomgebied viel relatief de meeste neerslag. Omgerekend viel hier 180 mm, wat neer komt op 180 liter per m². Dat zijn 18 volle emmers water. De andere delen van het stroomgebied deden hier overigens maar weinig voor onder, want overal viel 150 liter of meer. Dit komt er op neer dat in een periode van 3 dagen ongeveer tweemaal de maandsom viel.

Het Belgische deel van het stroomgebied (dat ca 43% van het oppervalk beslaat) viel relatief iets meer neerslag (46%) dan in het Nederlandse deel. Dit komt vooral op conto van het meest stroomafwaartse deel.

Tabel 11. Totale hoeveelheid neerslag gevallen van 13 t/m 15 juli in de 7 onderscheiden deelstroomgebieden en het volume per ha en per m².

Deelstroomgebieden	oppervlakte	neerslag in m3	m3/ha	in l/m2
Boven Geuldal Wallonië	7265	13.200.000	1817	180
Beneden Geuldal Wallonië	4755	7.200.000	1514	150
Boven Geuldal Nederland	4286	6.500.000	1517	150
Gulpdal	4363	6.500.000	1490	150
Selzerbeek	2845	4.700.000	1652	165
Eyserbeek	2795	4.800.000	1717	170
Beneden Geuldal Nederland	7072	10.500.000	1485	150
Totaal	33381	53.400.000	1600	160

5.2.2 Neerslaghoeveelheden per uur

De vele uur-metingen van de neerslag maken het mogelijk om de intensiteit (het aantal mm per uur) te bepalen. Dit is een belangrijke parameter omdat het een beeld verschaft van de mate waarin regenwater nog wel of niet in de bodem kan worden opgenomen. Bij een lage intensiteit (< 1 mm/uur) komt nog maar weinig regen tot afstroom, zeker in het zomerhalfjaar omdat er dan ook

water verdampst; zelfs als het regent. Naarmate de intensiteit toeneemt is het de bodemgesteldheid en het landgebruik dat bepaalt of water in de bodem kan infiltreren of oppervlakkig gaat afstromen. Verharde oppervlakken zoals bebouwing en wegen hebben in het geheel geen capaciteit om water op te slaan en zodra er meer valt dan er verdampst komt hier een oppervlakkige afstroom op gang. Voor agrarische gebieden is de infiltratiecapaciteit groter en voor natuurlijke vegetaties en bos is deze nog hoger. Bij bossen speelt mee dat een deel van het water in het kronen dak blijft hangen, maar naarmate de regen langer aanhoudt zal een steeds groter deel van de neerslag uiteindelijk toch de bodem bereiken.

Date	MAAS					BENEDEN GEULDAL					GULP				SELZERBEEK			EYSERBEEK			BOVEN GEUL NL			WAALE GEUL BENEDEN			WAALE GEUL BOVEN			
	Maastick	Meesen	Houtem	Valkenburg	Utschberg	Wijte	Galpen	Stenick	Ramsendaal	Battice	Vaals	Vijen	Aachen	Bachtitz	Eys	Galpen	Mechelen	Epen	Hamburg	Grunnisch	Morsant	Kolms	Lonzen	Hauset	Eyanttes					
13/07/2021 00:00																														
13/07/2021 01:00																														
13/07/2021 02:00				0,2																										
13/07/2021 03:00																														
13/07/2021 04:00																														
13/07/2021 05:00																														
13/07/2021 06:00																														
13/07/2021 07:00						0,2				0,5	0,5	0,7			0,3	0,2	0,1						0,3							
13/07/2021 08:00	0,6	0,5	0,8	0,5	0,8	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2	0,5	0,3	0,6	0,7								0,3	0,2	0,5	0,5	0,3	0,1	0,5		
13/07/2021 09:00	0,2	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5	0,7	0,5	0,3	0,5	0,7	1,0	0,7	0,5	1,8							0,5	0,5	0,8	0,3	0,3	1,4	1,0		
13/07/2021 10:00	0,2	0,3	0,5	0,3																										
13/07/2021 11:00	0,1	0,2	0,2	0,5	1,5	0,8	0,8								0,5	0,5	0,7	1,8	2	0,8	0,5	0,2			0,1	0,3	0,8	0,7	1,3	
13/07/2021 12:00	2,0	1,5	2,8	1,5	1,5	0,7	1,0	1,3	0,2		2,8	3,5	2,6	2,5	1	1,0	2,0	1,8	1,1	1,3	1	1,1	1,3	1	1,1	1,5	1,3	1,0		
13/07/2021 13:00	0,3	0,8	0,5	0,3	0,6	0,8	0,3	0,7	1,3	1,3	0,8	0,6	0,3	0,6	0,3	0,6	0,3	0,6	0,3	0,5	0,5	1,0	0,8	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5		
13/07/2021 14:00	2,0	2,0	0,7	0,5	1,5	3,8	4,0	2,0	1,2	1,2	0,5	1,0	0,3	0,2	1	4,0	1,2	1,0	1,0	0,9	0,5	0,2					0,3	0,5		
13/07/2021 15:00	0,2				0,3	0,2	0,5	0,8	1,0	0,5	1,2	0,5	0,2	0,3	0,31	0,31	0,8	0,6	0,6	0,5	0,9	0,2	0,3	0,5	0,2	0,3	0,5	0,2	0,3	
13/07/2021 16:00																														
13/07/2021 17:00	2,0	2,8	2,8	3,3	11,0	7,1	2,8								1,2	6,1	2,8	1,0	0,3											
13/07/2021 18:00	6,0	6,9	7,9	9,7	25,1	16,3	15,2	2,8							0,2	0,2	0,2	0,2	0,81	11,6	13,7	1,1				0,1	0,3	0,2	0,5	0,3
13/07/2021 19:00	4,0	1,1	16,5	17,3	2,6	19,8	14,7	1,7	0,5	0,2	6,1	9,2	12,3	14	21,9	14,0	11,7	4,8				1,1	2,5	0,5	0,8	0,5	2,0	1,6		
13/07/2021 20:00	2,0	4,4	8,4	1,2	13,9	2,8	18,5	15,7	5,1	0,2	12,5	23,1	2,2	21,6	18,8	18,8	21,8	12,0	4,3	4,8	3	3,0	1,5	2,8	1,8	1,8	1,8	1,8		
13/07/2021 21:00	0,6	0,5	1,5	0,3		2,8	5,1	14,8	11,0	2,8	1,8	0,2			1	5,1	6,9	11,4	9,6	3,9	1,1	2,3	1,1	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7		
13/07/2021 22:00	0,1	0,2	0,3																											
13/07/2021 23:00																														
14/07/2021 00:00					0,8	0,5	0,5	0,7	1,7	3,3	3,3	2,3	1,1	2,2	1	0,5	1,0	1,3	2,0	2,0	2,5	3,1	4,1	5,3	6,8	6,8	6,8	6,8		
14/07/2021 01:00	2,0	2,8	3,3	3,5	3,8	3,6	2,8	3,1	4,3	6,0	6,1	4,1	4,7	6,6	3,6	2,8	3,8	3,0	4,3	3,8	7,9	7,6	9,1	9,9	15,3	15,3	15,3	15,3		
14/07/2021 02:00	3,0	3,3	5,1	5,3	3,6	4,8	3,8	4,0	5,6	4,8	5,3	5,6	6,3	4,3	4,5	3,8	5,4	5,6	5,6	3,8	5,6	5,3	3,0	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9		
14/07/2021 03:00	3,0	4,8	5,4	3,8	2,5	1,3		0,3	0,8	1,2	1,6	0,7	1,2	1,6	0,8		0,2	0,3	0,5	1,1	0,7	1,8	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2		
14/07/2021 04:00	1,0	3,1	4,3	3,6	2,6	2,2	0,8	0,5	1,0	0,8	0,5	0,3	0,2	0,5	0,5	0,8	0,8	0,5	1,8	2,3	0,9	0,3	0,2	0,8	0,3	0,3	0,3	0,3		
14/07/2021 05:00	0,1			0,5	0,3	0,5	0,8	1,2	2,3	2,0	1,0	1,7	1,0	1,0	0,5	3,6	1,2	2,8	2,0	1,5	1,0	1,9	3,3	4,8	2,0	2,3	2,3	2,3		
14/07/2021 06:00	0,1	0,2	0,5	0,8	0,2	0,3		0,2	0,6	1,7	1,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,8	0,8	1,8	2,5	2,6	1,8	1,5	1,5	1,5	1,5		
14/07/2021 07:00	0,8	1,9	1,8	2,3	1,0	1,0	0,8	0,3	3,5	4,9	3,8	1,1	1,2	0,8	1,3	0,8	1,5	0,5	4,1	3,0	4,1	2,6	5,6	6,3	6,4	6,4	6,4	6,4		
14/07/2021 08:00	2,0	2,1	2,3	2,3	3,8	6,3	4,8	3,3	0,3	2,8	1,3	2,5	1,4	3,3	3,8	4,8	3,0	1,5	0,2	0,4	1	0,7	2,0	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2		
14/07/2021 09:00	2,0	2,3	2,8	2,5	8,4	7,9	4,1	3,8	3,2	1,7	5,3	4,6	3,9	4	5,3	4,1	5,1	3,9	4,3	4,9	8,3	6,4	7,4	5,3	3,8	3,8	3,8	3,8		
14/07/2021 10:00	4,0	3,5	4,3	4,9	11,1	16,3	12,1	11,2	4,5	5,7	4,9	6,6	5,0	5,9	7,6	10,2	8,9	7,4	6,6	4,0	4,4	2,5	2,5	1,3	1,6	1,6	1,6	1,6		
14/07/2021 11:00	2,0	2,8	3,5	4,8	9,4	6,6	5,3	1,1	6,6	5,0	11,1	9,6	9,2	8,9	9,7	5,3	9,7	8,1	9,9	9,5	1,6	8,1	7,6	8,8	8,3	8,3	8,3	8,3		
14/07/2021 12:00	2,0	1,8	2,8	2,5	5,3	5,3	4,3	7,3	1,7	6,4	5,6	5,4	5,6	3,3	7,1	4,3	8,3	7,9	7,4	5,6	6,1	6,1	6,8	7,0	5,9	5,9	5,9	5,9		
14/07/2021 13:00	2,0	1,5	1,1	0,6	0,8	0,8	0,8	1,8	2,5	2,8	2,0	1,2	1,9	1,3	1	0,8	1,3	1,5	2,3	1,7	1,5	1,8	1,6	1,5	1,8	1,8	1,8	1,8		
14/07/2021 14:00	4,0	2,3	7,6	7,6	9,1	6,3	5,3	7,4	8,5	2,5	12,2	9,7	7,8	12,1	9,4	5,3	1,4	7,4	7,9	6,7	6,9	7,6	6,1	8,1	8,6	8,6	8,6	8,6		
14/07/2021 15:00	2,0	1,5	3,1	4,6	18,3	14,0	12,3	1,4	9,6	1,2	19,3	12,9	16,0	12,1	16,8	11,5	16,0	15,0	17,2	14,7	16,5	8,1	9,4	8,9	7,1	7,1	7,1	7,1		
14/07/2021 16:00	5,0	3,8	17,0	1,7	5,0	5,8	6,3	7,0	9,1	14,0	6,6	7,4	5,2	3,9	5,8	6,3	8,4	6,0	7,9	5,5	6,1	5,1	6,1	4,7	4,6	4,6	4,6	4,6		
14/07/2021 17:00	0,6	0,8	0,5	0,3	0,2	0,3	0,3	0,5	0,3	1,2	0,3	0,3	0,5					0,3	0,3	0,3	0,3									
14/07/2021 18:00																														
14/07/2021 19:00						1,0		0,1	0,2	0,1	0,5	0,5	0,3	0,2								0,5	0,7	0,8	0,8	0,2	1,0	1,0		
14/07/2021 20:00	0,3	0,6	0,8	1,2	1,3		1,2		0,5	0,6	3,0	1,2	1,2	1,5	1,9	1,2	1,2	1,3	0,7	1,3	1,6	1,3	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0		
14/07/2021 21:00	1,0	1,3	2,3	2,3	3,1	2,6	2,1	2,0	2,3	2,0	8,0	5,0	4,6	5,9	2,8	2,1	2,6	2,8	3,1	3,9	4	6,3	4,1	5,9	5,6	5,6	5,6	5,6		
14/07/2021 22:00	5,0	2,0	9,2	8,9	7,6	8,3	8,9	7,0	7,6	6,8	8,3	9,0	7,4	6,6	8,8	8,9	9,6	8,9	9,9	7,6	7,4	8,4	8,4	9,5	14,7	14,7	14,7	14,7		
14/07/2021 23:00	2,0	1,0	3,3	2,3	0,5	1,3	0,7	2,5	4,6	4,5	4,9	2,1	3,4	2,3	1,3	0,7	2,1	1,5	3,3	3,0	4	3,3	5,6	7,9	4,3	4,3	4,3	4,3		
15/07/2021 00:00	0,1			0,2	0,5	0,5	0,5	0,3	0,5	1,0	0,6	1,2	1,5	1,3	1,2	0,8	0,3	0,5	1,5	1,5	1,8	1,8	1,5	2,5	3,5	3,5	3,5	3,5		
15/07/2021 01:00	0,6	0,5	0,5	0,3	4,6	1,3	1,0	1,0	1,1	0,9	6,6	2,8	4,4	4,3	1,8	1,0	1,2	1,3	3,3	3,5	7,8	7,6	8,4	3,6	1,3	1,3	1,3	1,3		
15/07/2021 02:00	2,0	1,3	1,6	0,5	1,2	2,7	2,6	2,0	3,0	4,0	3,3	2,0	2,3	1,8	3,8	2,6	5,6	0,5	1,5	2,6	1,8	3,3	3,8	2,0	0,2	0,2	0,2	0,2		
15/07/2021 03:00	0,2		1,5	1,3	0,8	0,8	0,2	0,5	1,8	1,6	1,5	2,8	1,3	1,5	1,2	0,2	1,6	4,8	2,1	2,0	2,6	1,5	2,0	4,6	9,4	9,4	9,4	9,4		
15/07/2021 04:00	0,5		3,0	2,3	2,3	1,3	0,8	1,0	0,7	0,9	7,4	2,8	5,9	4,6	1,8	0,8	1,2	1,3	1,9	4,7	7,6	5,3	6,1	1,6	7,6	7,6	7,6	7,6		
15/07/2021 05:00	0,8	0,8	0,8	0,5	2,0	0,8	0,3	1,5	3,9	1,8	2,5	1,8	2,3	2,5	2	0,3	3,3	3,5	3,4	3,0	2,5	3,3	6,4	7,4	8,7	8,7	8,7	8,7		
15/07/2021 06:00	2,0	1,2	1,5																											

In de 4 uur daarna worden overal de hoogste intensiteiten waargenomen, soms tot meer dan 15 mm per uur. De regen schuift enigszins van zuid naar noord en in het Waalse deel van het stroomgebied (zowel bij Gulp als Geul) arriveert de regenzone enkele uren later.

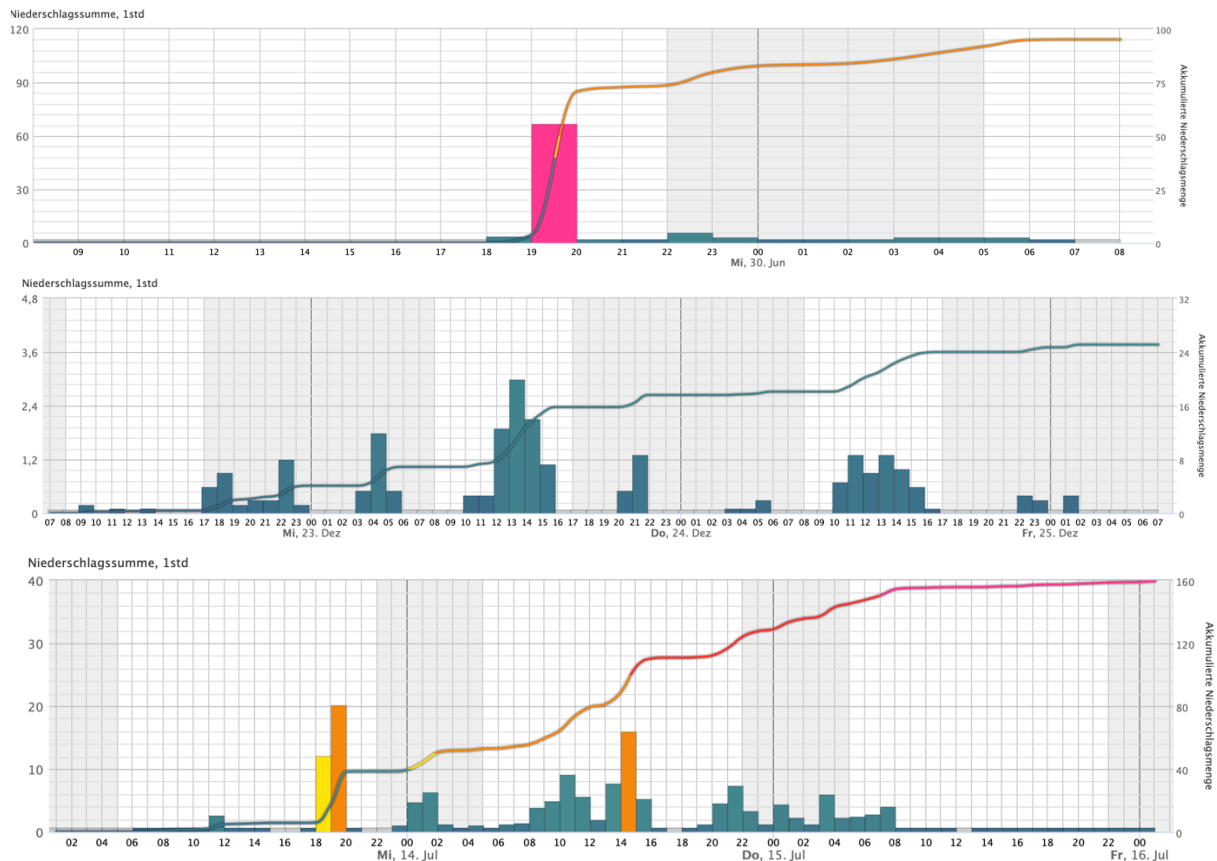
Na deze extreme periode wordt het een paar uur droog, maar vanaf middernacht zet overal een periode van matige regen in met een intensiteit tussen 3 en 6 mm. In de tweede helft van de nacht wordt het minder, maar niet helemaal droog. Vanaf 8 uur neemt de intensiteit weer toe en tussen 10 en 17 uur is de intensiteit langdurig hoger dan 6 mm en soms even meer dan 10 of 15 mm. Tussen 14 en 15 uur is de neerslag een uur lang bijna overal tegelijk zwaar. Alleen in het Waalse deel wordt de 10 mm/uur net niet overschreden.

Na deze periode met zware neerslag wordt het vanaf 17 uur overal 1 of 2 uur droog, maar vanaf 20 uur keert de neerslagzone terug en regent het overal nog 1 of 2 uur matig. In het oosten (Vaals) en zuiden (groot deel Wallonië) blijft het in de uren daarna ook nog matig regenen. In de rest van het, overwegend Nederlandse deel van het, stroomgebied blijft het wel regenen, maar is de intensiteit duidelijk minder groot. De 3 mm wordt nog maar op enkele plaatsen overschreden.

Vanaf een uur of 7 neemt de intensiteit overal af tot onder de 3 mm/uur, maar het regent nog wel de hele dag tot rond middernacht met een lagere intensiteit. Ook na middernacht valt er nog wat regen, maar de intensiteit blijft dan overal onder de 0,5 mm/uur.

5.2.3 Analyse van de neerslaghoeveelheden per uur

Een intensiteit van 15 mm/uur of meer is voor zomerse weersituaties niet uitzonderlijk. Tijdens zomerse buien worden soms zelfs intensiteiten gemeten van 100 mm/uur of meer. Het zijn deze zomerse buien waar men in het heuvelland vooral beducht op is omdat bij dergelijke omstandigheden de bodem het water niet of nauwelijks kan opvangen en veel water direct tot afstroom komt, met veel wateroverlast en modderstromen tot gevolg. De intensiteit was nu veel lager, maar hield wel veel langer aan. Een extreme zomerse bui duurt zelden langer dan een half uur en is vaak lokaal van aard. Dit jaar was er eind juni nog zo'n situatie opgetreden, waarbij er in Meerssen ruim 60 mm was gevallen in minder dan een uur, terwijl er in Valkenburg, ca 5 km verderop, veel minder regen was gevallen.



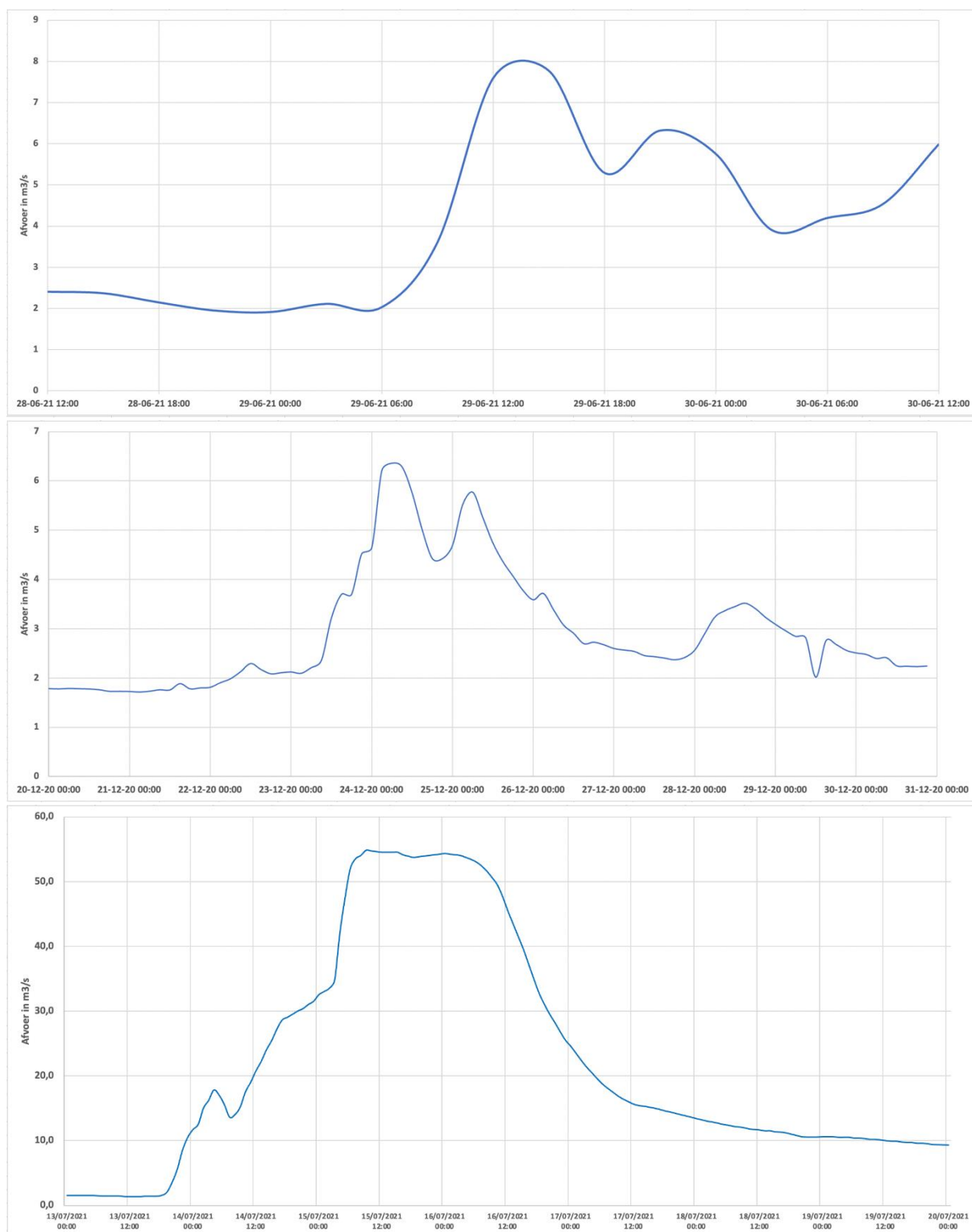
Figuur 30a. Uiteenlopende neerslagintensiteiten die tijdens regenval kunnen optreden.

Boven: zware zomerse regenval op meetstation Maastricht, waarbij er binnen 1 uur ruim 65 mm viel. Tijdens dat uur zal de intensiteit tijdelijk nog hoger zijn geweest.

Midden: winterse regenval, met perioden van langer aanhoudende regenval met een relatief lage intensiteit. Een dergelijke situatie kan vele dagen tot enkele weken aanhouden, waarbij dagen met aanhoudende regen en soms een droge dag elkaar afwisselen.

Onder: situatie tijdens de extreme regenval van 13 t/m 15 juli 2021. De intensiteit ligt langdurig rond de 5 mm en loopt soms een uur op tot 20 mm, maar bereikt nooit het kaliber van een zware zomerse bui.

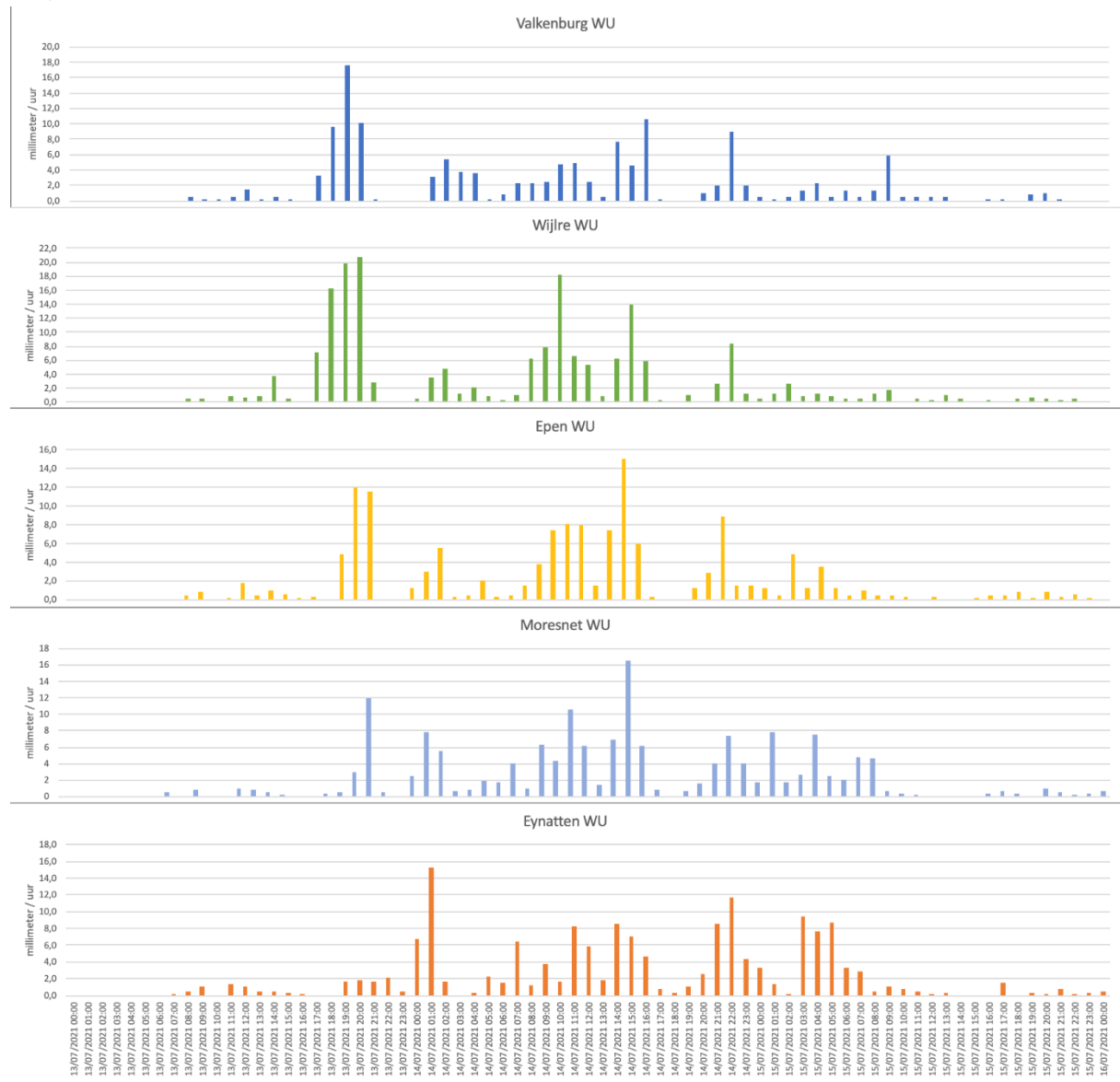
Langdurige neerslag is vooral een situatie die van de winter bekend is; het kan dan soms urenlang regenen, maar de intensiteit is dan veel lager en veelal valt er dan niet meer dan 1 of 2 mm/uur. In figuur 30a zijn de 3 verschillende situaties onder elkaar weergegeven. De neerslaghoeveelheden per uur tijdens de event van juli 2021 waren voor een zomerse situatie niet uitzonderlijk, maar voor een duur-regen wel. In vergelijking met een winterse situatie, wanneer vaak langdurige regen optreedt, was de intensiteit nu een factor 3 tot 4 hoger. In figuur 30b is deze 3 type neerslagsituatie het afvoerverloop in de Geul weergegeven bij Meerssen. Het event met de extreme neerslagsituatie leverde slechts een kleine opleving op van ca 1 m³/s aan het einde van de 29^e juni. Er waren eerder die dag elders in het stroomgebied ook zware buien en deze veroorzaakten samen de eerder golf van die dag. In de tweede grafiek is de afvoer weergegeven van een langere natte periode in december waar de neerslag van enkele niet zo intensieve neerslagperioden leidt tot een piek van ca 6 m³/s. Tenslotte de afvoergolf van juli 2021 die een orde groter is dan tijdens de beide andere neerslagsituaties. In paragraaf 5.3 wordt verder toegelicht waarom deze golf zo veel hoger kon worden.



Figuur 30.b. Afvoerverloop bij Meerssen van de drie neerslagperioden genoemd in figuur 30a. Toelichting zie tekst.

In figuur 31 is van 5 stations verdeeld over het stroomgebied de intensiteit afgebeeld in een grafiek. Goed zichtbaar is hoe de eerste neerslagband met de meest zware neerslag langzaam van

stroomafwaarts naar stroomopwaarts trok. De zwaarste neerslag viel daarbij in het stroomafwaarts deel. De tweede periode was de intensiteit overal kleiner, maar nu regende het langdurig met een matig hoge intensiteit. Aan het eind van de regenperiode blijft het stroomopwaarts nog langer regenen met een matige intensiteit. In het Nederlandse deel van het stroomgebied regent het nog wel, maar minder zwaar.

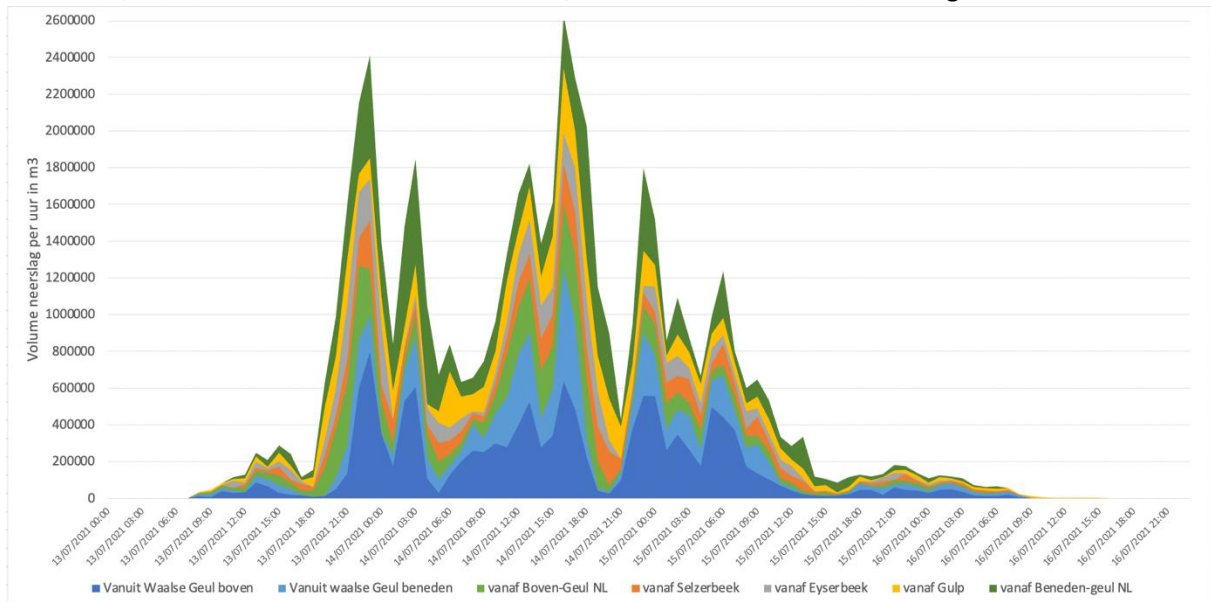


Figuur 31. Verloop van de neerslaghoeveelheden per uur op 5 locaties van stroomafwaarts (boven) naar stroomopwaarts (onder). NB. De schaal van de verticale as is verschillend.

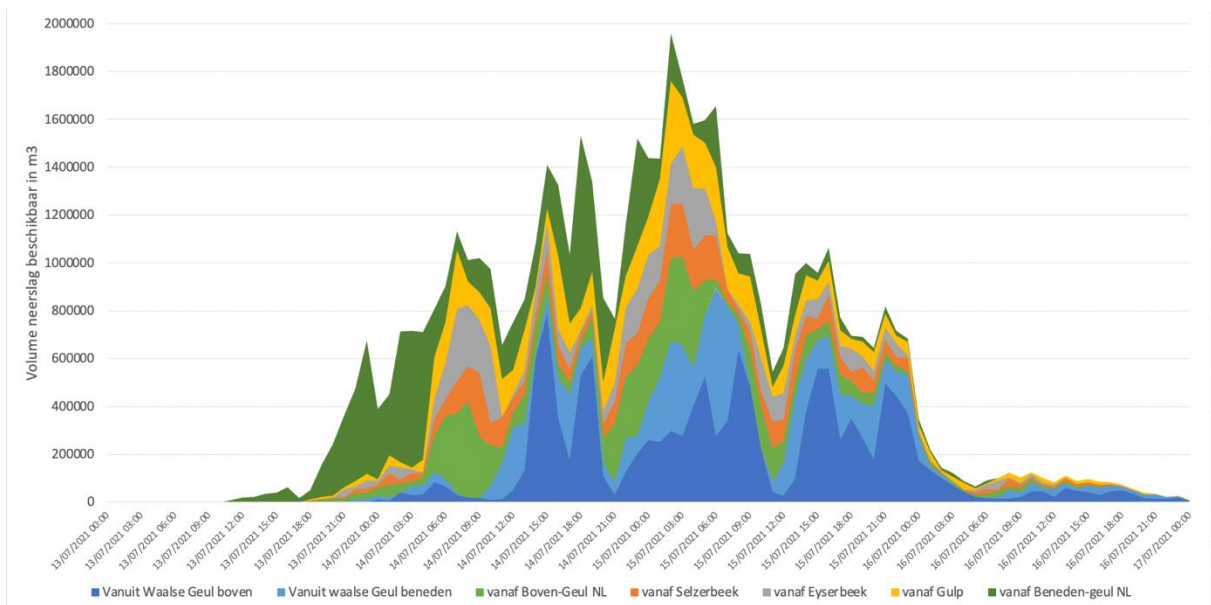
5.3 Afvoeren en waterstanden tijdens de hoogwatervent

Aan de hand van de afvoergegevens kan een beeld gekregen worden van de hoeveelheid water die door de Geul is afgevoerd en, door deze gegevens te vergelijken met de neerslaghoeveelheden, te kunnen bepalen hoeveel water er op enig moment nog in het stroomgebied aanwezig was. Dit leert ons iets over het huidige karakter van het gebied, kan het nu al veel water vasthouden of juist niet en aan de hand daarvan kunnen we op zoek gaan naar mogelijkheden om dat te verbeteren.

In figuur 32a is weergegeven hoeveel water er per uur beschikbaar kwam in het stroomgebied. Hierbij is onderscheid gemaakt naar de verschillende deelstroomgebieden. Tijdens het maximum in de middag van 14 juli viel er ca 2,5 miljoen m³ neerslag in één uur. In het hypothetische geval dat dit allemaal tot afvoer was gekomen dan had dit een afvoer opgeleverd van bijna 700 m³/s in de Geul. Het water dan in het stroomgebied valt is echter enige tijd onderweg voordat het een bepaald punt bereikt. Als rekening wordt gehouden met de looptijd van het water vanuit het stroomgebied tot aan Meerssen, waar de Geul in de Maas uitstroomt, dan verandert de vorm van de grafiek.



Figuur 32a. Beschikbare hoeveelheid water in m³ per uur die potentieel beschikbaar was voor afvoer via de Geul.



Figuur 32b. Beschikbare hoeveelheid water in m³ per uur die potentieel beschikbaar was voor afvoer via de Geul, rekening houdend met de looptijd van het water via het oppervlaktewater tot aan Meerssen.

In figuur 32b is uitgegaan van een looptijd van 16 uur vanuit het meer bovenstroomse deel tot aan Meerssen. De piek in het begin valt nu weg, omdat het water van verder bovenstrooms daar niet meer in terecht kan zijn gekomen. Alleen het water uit het benedenstroomse deel (donkerblauw) bevindt zich nu nog in het eerste gedeelte van het water dat bij Meerssen arriveert. Het water bovenstrooms uit Wallonië (midden-blauw) arriveert pas na enige tijd en domineert in het tweede deel van de periode. Ook als rekening wordt gehouden met de looptijd blijkt dat het maximaal beschikbare volume nog steeds erg hoog is. Als al het water in de Geul was terecht gekomen, dan zou de afvoer tijdens het maximum in de nacht van 14 op 15 juli zijn opgelopen tot ruim 500 m³/s.

Het gaat hier, ook als rekening wordt gehouden met de looptijd, nog altijd om een theoretische benadering. Binnen een deelgebied zijn er namelijk ook weer grote verschillen en lang niet al het water vanuit een deelgebied stroomt even snel naar de Geul. Deze analyse is vooral van belang om te laten zien hoeveel water er onderweg had kunnen zijn in het stroomgebied. Als we de werkelijk gemeten afvoeren hiernaast zetten, dan krijgen we een idee van de hoeveelheid water die in het stroomgebied daadwerkelijk tot afstroom is gekomen en welk deel langere tijd achtergebleven zal zijn. Dit geeft dan op zijn beurt weer aanwijzingen voor de maatregelen die genomen kunnen worden om de afvoer naar de Geul verder te vertragen.

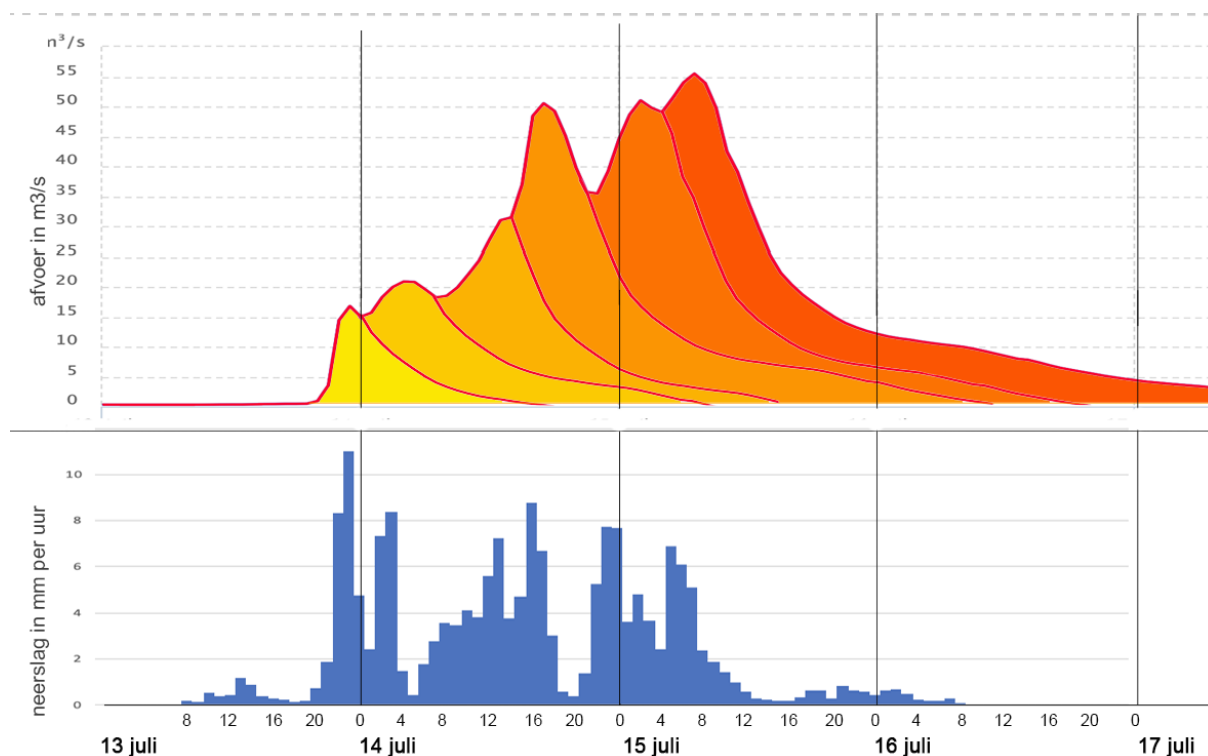
De hierboven beschreven volumes neerslagwater zijn uitzonderlijk groot en in het Geuldal is de theoretische afvoer die dat op zou kunnen leveren bij lange na niet gehaald; naar schatting bleef het bij ca 70 tot 75 m³/s als maximum. Als we echter over de landsgrens kijken, in het deels aangrenzende stroomgebied van de Vesdre, dan blijkt dat de theoretische afvoer wel meer benadert kan worden. Het stroomgebied van de Vesdre is ongeveer tweemaal zo groot is als de Geul en er viel hier een ongeveer vergelijkbare hoeveelheid neerslag, maar de afvoer liep er op tot zelfs ruim 550 m³/s. En ook in het Duitse Ahrdal, dat nog iets groter is, liep de afvoer op tot 650 m³/s. Als we dit vertalen naar de Geul dan zou de afvoer in het Geuldal zijn opgelopen tot 250 à 300 m³/s. Het is te danken aan het vermogen van het stroomgebied van de Geul om water vast te houden en te bergen waardoor dergelijke volumes hier niet bereikt zijn.

5.3.1 Afvoerverloop door het stroomgebied van boven- naar benedenstrooms

Boven-Geul Wallonië

In Wallonië zijn er twee meetstations die gedurende de hele hoogwatergolf hebben gefunctioneerd. Ze hebben daarom waardevolle informatie kunnen geven over het functioneren in dit deel van het stroomgebied. In figuur 33 is de afvoergolf van het meetstation Kelmis, op ca 10 km vanaf de bron afgebeeld. In het afvoerverloop is de afwisselend stijgende en dalende lijn in het afvoerverloop goed zichtbaar. Dit maakt het mogelijk om de afvoergolf in 6 delen op te delen. Het verloop van de neerslaghoeveelheden per uur blijkt hier duidelijk mee samen te hangen. De piek in een subgolf volgt steeds korte tijd na een periode met intensieve neerslag.

Ruwweg zijn er in de neerslaghoeveelheden per uur waren ook 6 perioden te onderscheiden, die per tweetal samenvallen in een eerste, middelste en laatste periode. In de intensiteit in andere deelstroomgebieden zullen we deze 3 hoofdperioden ook steeds in meer of mindere terug zien. Verder valt op dat de pieken nog een duidelijk top hebben; verder stroomafwaarts vakt de piek sterk af en krijgt deze meer en meer het beeld van een afvoerplateau. Ook valt op dat de afvoer steeds weer snel na de intensive neerslag inzakt, zeker als het even droog wordt.

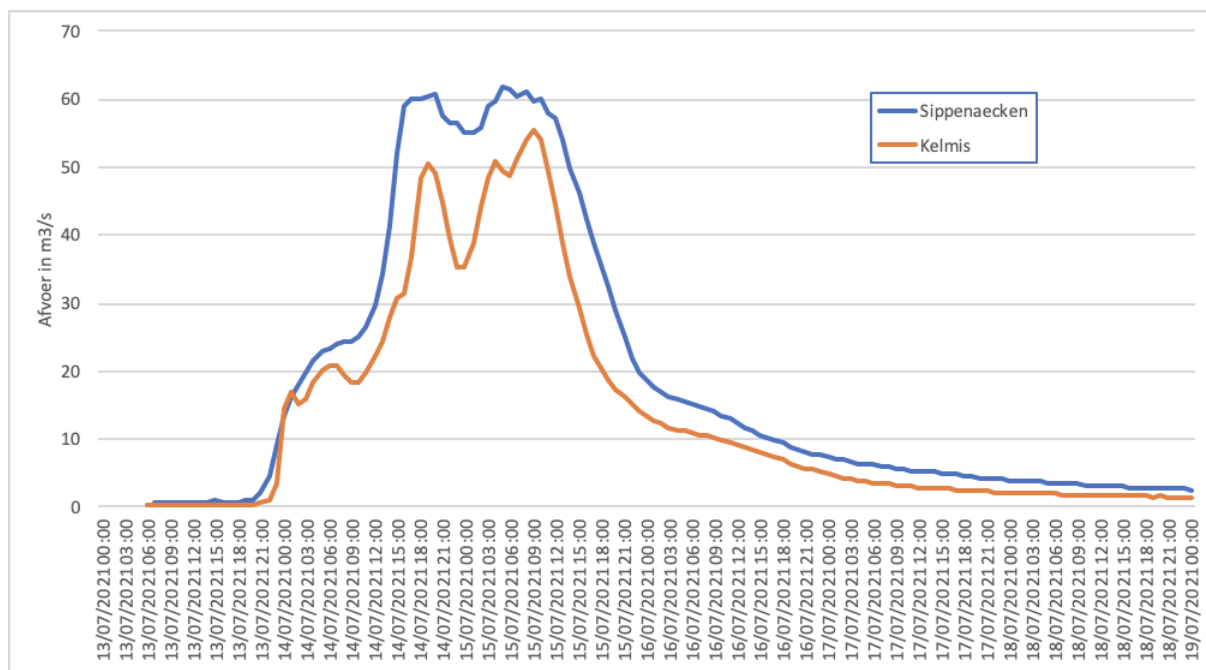


Figuur 33. Afvoerverloop bij Kelmis en de neerslaghoeveelheden per uur waren van dit deel van het stroomgebied bepaald uit het gemiddelde van vijf neerslagstations.

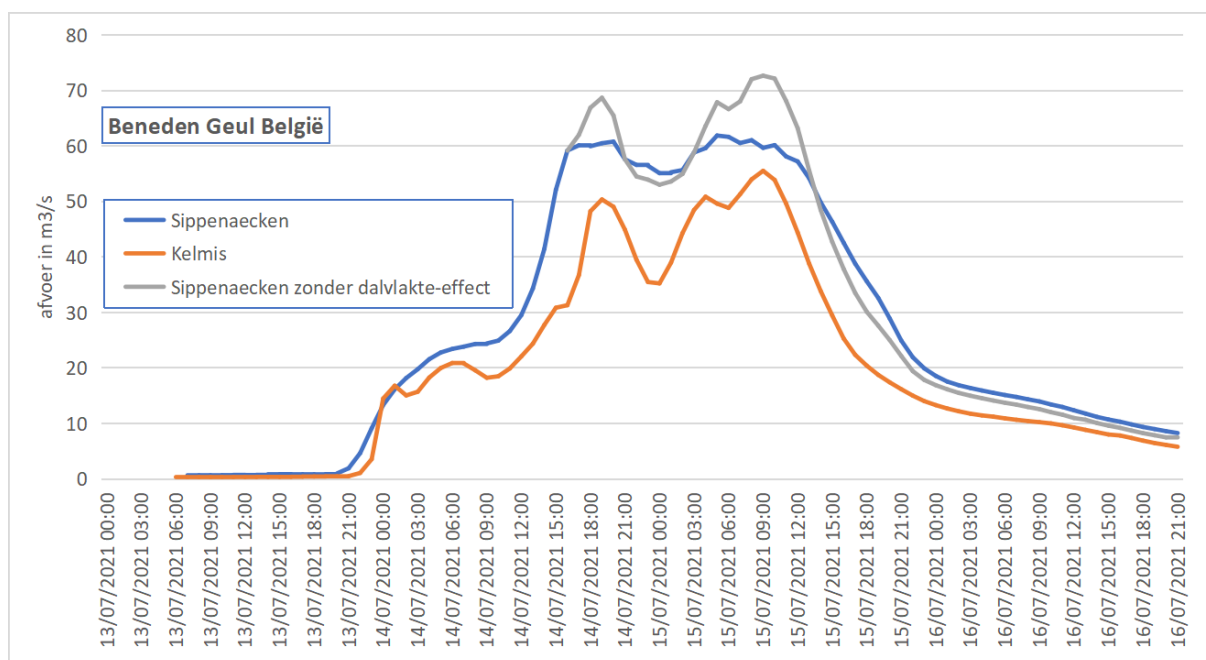
Beneden-Geul Wallonië

Het tweede meetstation ligt ruim 7,5 km verder stroomafwaarts bij Sippenaecken, juist voor de Waals-Nederlandse grens. In figuur 34 is de afvoer van beide stations in dezelfde grafiek geplot. De afvoeren liepen hier nog iets hoger op dan in Kelmis, maar relatief valt de toename mee, zeker als in beschouwing wordt genomen dat het totale bovenstrooms gelegen stroomgebied bij Sippenaecken 65% groter is dan bij Kelmis. Het stroomgebied bij Sippenaecken heeft dus relatief minder water geleverd aan de Geul dan het meest bovenstroomse deel. Hier zal later uitgebreider op ingegaan worden.

In de figuur valt op dat de pieken bij Sippenaecken zijn afgeplat wat erop wijst dat tussen Kelmis en Sippenaecken de dalvlakte is overstroomd. Een deel van het water is daarom niet direct doorgestroomd, maar als het ware geparkeerd. Het stroomt wel door de vlakte, maar de stroomsnelheden zijn er veel lager dan in de Geul zelf en het water komt pas veel later in Sippenaecken aan. Wanneer de afvoer vanuit Kelmis weer afneemt, stroomt het water langzaam terug en vult zo de afvoer in stroomafwaartse richting weer aan. Per uur is aan de hand van de oppervlakte van de dalvlakte en de waterstand een inschatting gemaakt hoeveel water er ongeveer vanuit de snelstromende bedding naar de dalvlakte is gestroomd. Vervolgens is bepaald hoeveel water er per uur daardoor minder in Sippenaecken is aangekomen en – zodra de vlakte weer leegstroomt – meer. De grijze lijn in figuur 35 geeft die situatie weer. Het gaat om een ruwe inschatting omdat geen exacte gegevens bekend zijn. Het laat zien dat het invangen van water in de vlakte voor een flinke reductie kan zorgen van de piekafvoer. Tegelijk zorgt het ervoor dat de piek langer aanhoudt als de regenval eenmaal is gestopt.



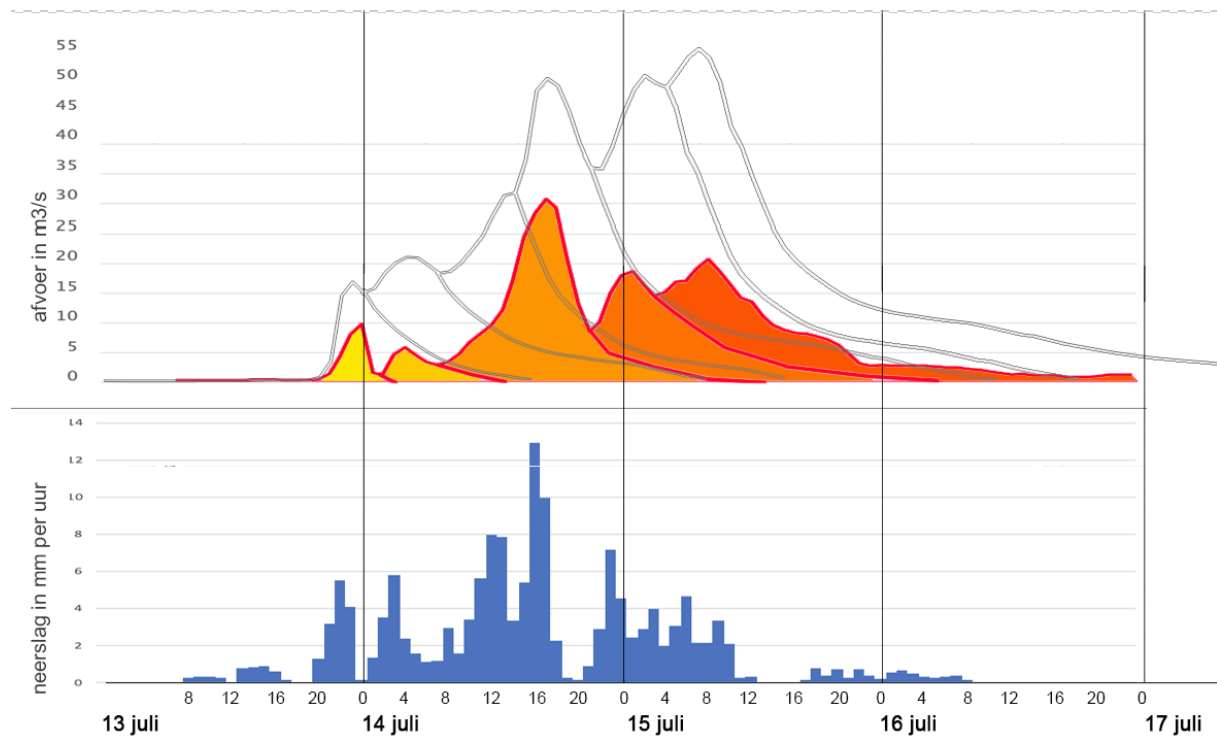
Figuur 34. Afvoer bij de beide meetstations in Wallonië. De waarden van Kelmis zijn 2 uur verschoven in verband met de looptijd van het water.



Figuur 35. Afvoer bij de beide meetstations in Wallonië. Met de grijze lijn is de afvoer van Sippenaecken aangegeven indien de dalvlakte niet overstromd zou zijn geweest. De waarden van Kelmis zijn 2 uur verschoven in verband met de looptijd van het water.

In figuur 36 is de afvoer bij Sippenaecken weergegeven die sinds Kelmis in de Geul is gestroomd. Deze is bepaald door de afvoer van Kelmis van uur tot uur van die van Sippenaecken af te trekken. De gegevens die dit oplevert zijn niet helemaal betrouwbaar omdat het water niet gedurende de hele golf even snel stroomt. In grote lijnen geeft het echter een goed beeld en op deze manier is het ook weer mogelijk om de golf in subgolven te verdelen en deze te linken aan de neerslaggegevens. De subgolven zijn grotendeels vergelijkbaar met die bovenstrooms in de Waalse Geul; alleen zijn golf

3 en 4 hier niet te onderscheiden. Golf 5 en 6 zijn, anders dan bovenstrooms, een stuk lager dan de gecombineerde golf 3&4 bij Sippenaecken.

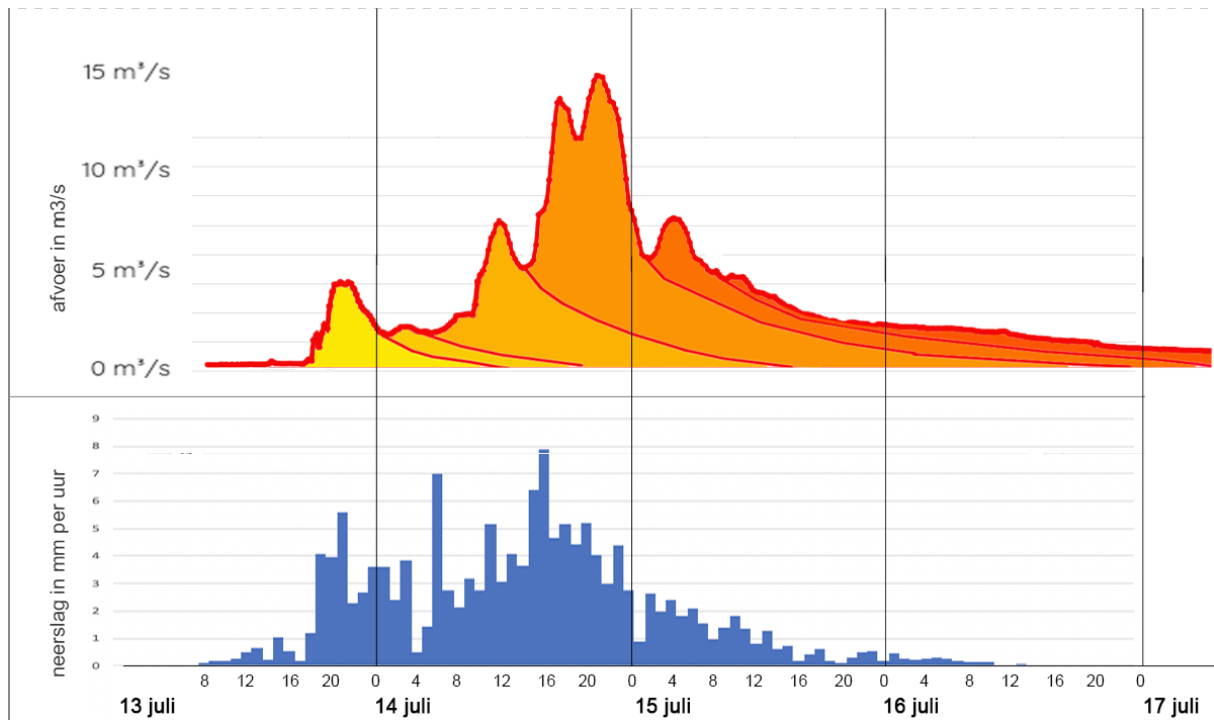


Figuur 36. Afvoerverloop bij Sippenaecken van het aandeel dat in de Waalse Beneden-Geul in de beek is gestroomd (dus exclusief wat bij Kelmis is doorgevoerd) en de neerslaghoeveelheden per uur van dit deel van het stroomgebied, bepaald uit het gemiddelde van drie neerslagstations. De afvoer bij Kelmis is met een grijze lijn weergegeven.

Net als bij Kelmis zien we een duidelijk toename van de afvoer gedurende de uren met een hoge intensiteit en steeds kort nadat de intensiteit weer terugvalt passeert ook de (sub)piek. In grafiek 12 is met een grijze lijn ook de afvoer bij Kelmis weergegeven. De verschillende deelgolven zijn in beide meetlocaties terug te zien. Verder valt op dat de pieken die in het gebied stroomopwaarts van Kelmis worden gegenereerd duidelijk groter zijn dan in het stroomgebied tussen Kelmis en Sippenaecken. Voor een deel is dat te verwachten omdat het stroomgebied ca 50% groter is, maar de afvoerpieken vanuit het bovenstroomse gebied zijn wel 100 tot 150% groter. Later wordt nog op de oorzaak voor dit verschil ingegaan.

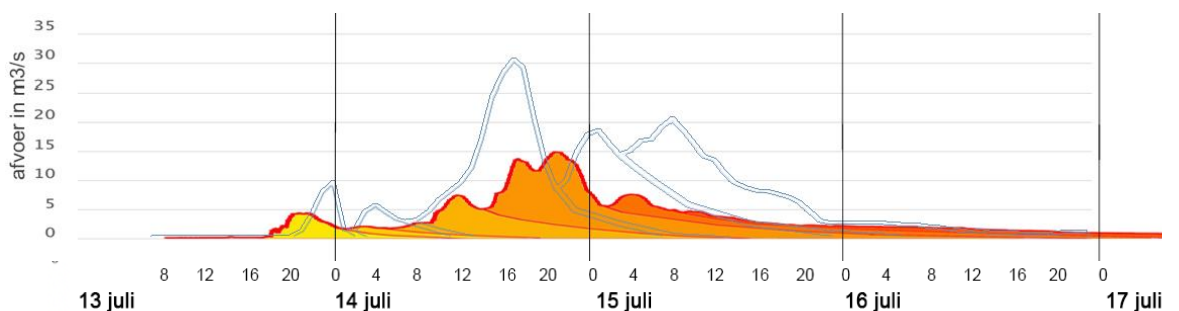
Gulpdal

In figuur 37 is de afvoer bij Gulpen weergegeven van de Gulp, op ca 1 km voordat deze in de Geul uitmondt. De afvoergolf is evenals de golf vanuit de Bovengeul opgedeeld in subgolven en gelinkt aan de neerslaggegevens. Aan de hand van de subgolven is te zien dat de 4^e golf hier net als in de Waalse Geul de belangrijkste was. De 5^e en 6^e golf zijn hier echter veel geringer; de Gulp heeft dus vooral aan het begin van de hoogwaterperiode veel water geleverd.



Figuur 37. Afvoerverloop van de Gulp bij Gulpen en de neerslaghoeveelheden per uur over het stroomgebied bepaald uit het gemiddelde van vijf neerslagstations.

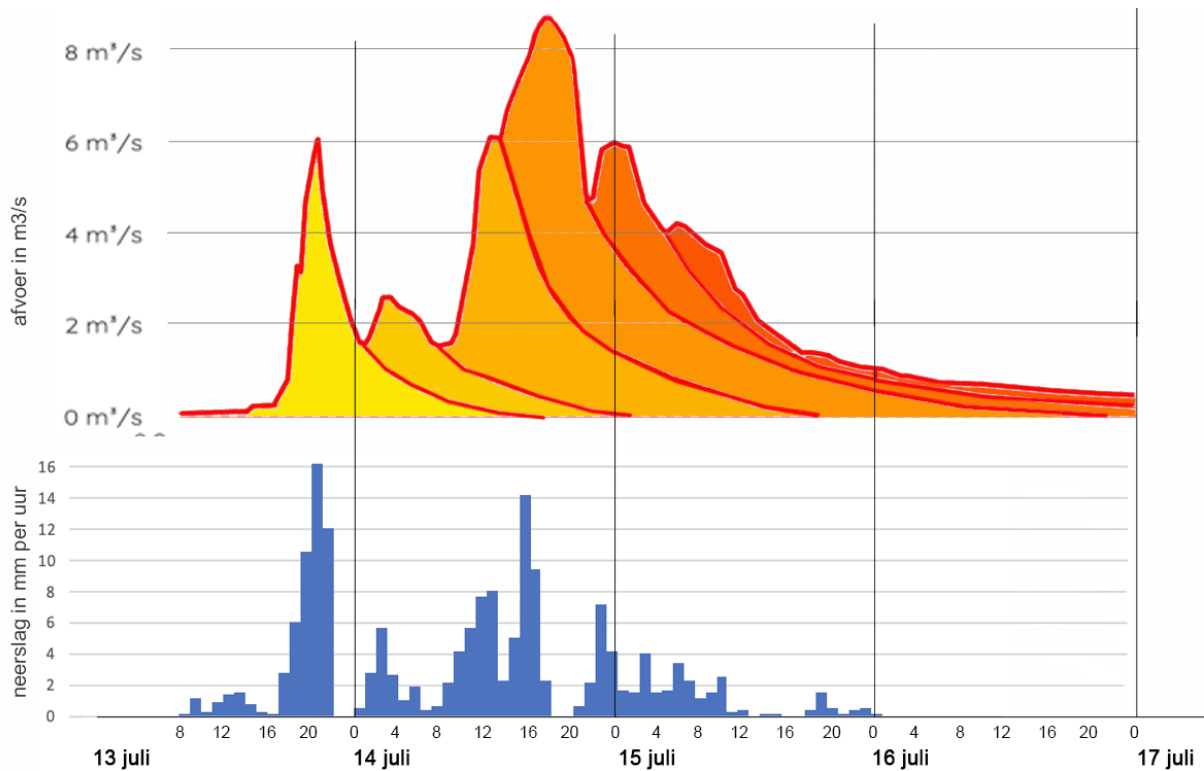
In figuur 38 is vervolgens ook de Geulafvoer bij Sippeneacken, afkomstig uit alleen het beneden Geuldal met een grijze lijn weergegeven. Waar we eerder zagen dat de hoeveelheid water vanuit het Waalse Beneden-Geuldal al flink lager was dan die vanuit het Waalse Boven-Geuldal, is het aandeel dat de Gulp heeft afgevoerd weer een orde kleiner terwijl het stroomgebied ongeveer dezelfde afmetingen heeft.



Figuur 38. Afvoerverloop in de Gulp vergeleken met de afvoer uit de Beneden-Geul bij Sippeneacken (in grijs). Deze stroomgebieden zijn vergelijkbaar van omvang, maar leveren een verschillende hoeveelheid water.

Eyserbeek

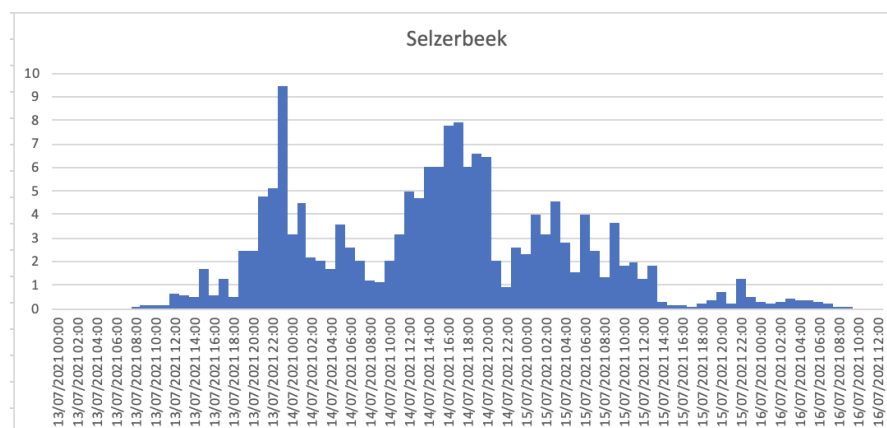
In figuur 39 is tenslotte het afvoerverloop van de Eyserbeek weergegeven, op ca 1 km voordat deze in de Geul uitmondt. Ook deze afvoergolf is opgedeeld in subgolven en gelinkt aan de neerslaggegevens. Ook hier was de 4^e golf net als in de Waalse Geul en de Gulp de belangrijkste en de 5^e en 6^e golf zijn hier echter veel geringer van omvang. Het afvoerverloop lijkt daarmee sterk op dat van de Gulp.



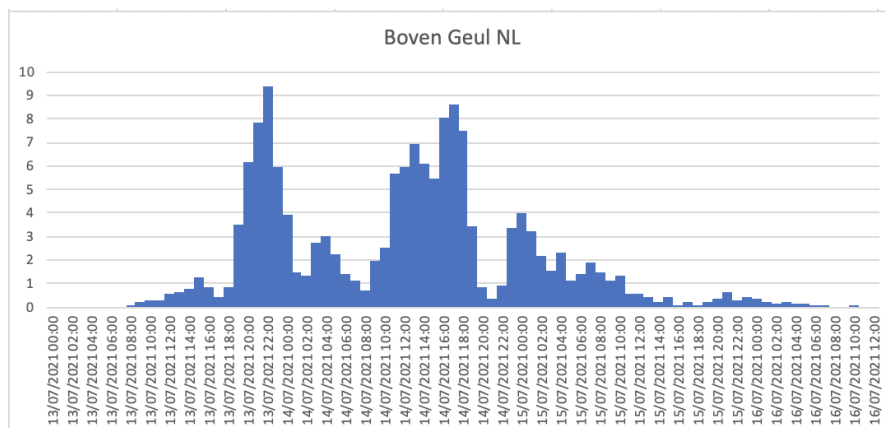
Figuur 39. Afvoerverloop van de Eyserbeek bij Eys en de neerslaghoeveelheden per uur over het stroomgebied bepaald uit het gemiddelde van drie neerslagstations.

Overige deelstroomgebieden in het Nederland deel van het Geuldal

Van de overige afvoermee stations in de Nederlandse Geul zijn slechts beperkt gegevens beschikbaar, omdat ze tijdens de hoogwatergolf zijn uitgevallen. Het meetstation in de Selzerbeek heeft nog gefunctioneerd tot nabij de hoogste piek en aan de hand van het verloop tot op dat moment valt op te maken dat de afvoergolf hier ongeveer vergelijkbaar kan zijn geweest met het verloop van de ernaast gelegen Eyserbeek. Het verloop van de neerslaghoeveelheden per uur waren (zie figuur 40) is ook vergelijkbaar, met een hoge piek in het begin en na een kort droger intermezzo een periode met langdurig intensieve neerslag in de middag van de 14^e. Dit leverde hier ook de hoogste piek op, in de avond die hierop volgde. Op de 15^e was de intensiteit al veel minder en de verwachting is dat de afvoer op die dag net als bij de Eyserbeek en de Gulp alweer flink gedaald zal zijn.



Figuur 40. Neerslaghoeveelheden per uur in het stroomgebied van de Selzerbeek bepaald uit het gemiddelde van drie neerslagstations.

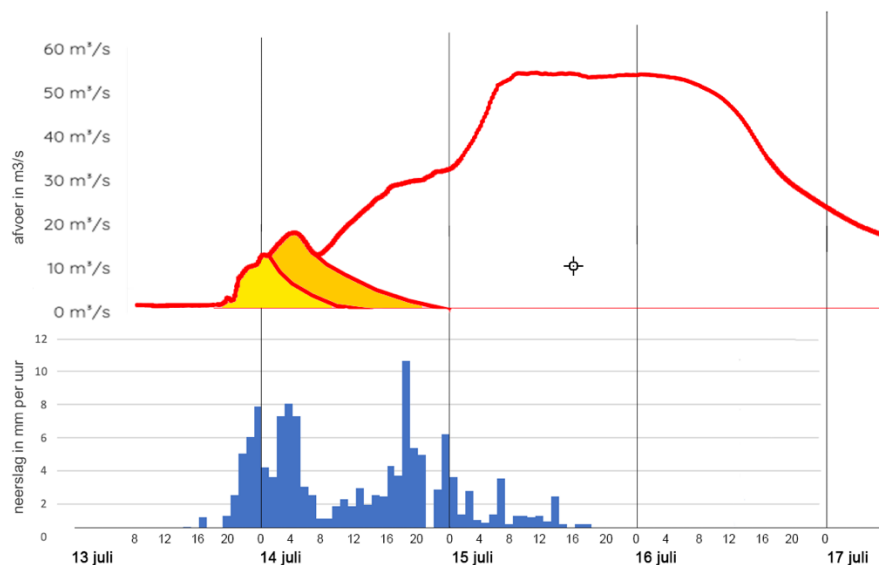


Figuur 41. Neerslaghoeveelheden per uur in het stroomgebied van het Boven-Geuldal bepaald uit het gemiddelde van drie neerslagstations.

Van het Nederlandse Boven-Geuldal zijn geen goede afvoergegevens beschikbaar. Aan de hand van de neerslaghoeveelheden per uur waren (figuur 41) valt op te maken dat ook hier de grootste toevoer van water in het begin en het midden van de hoogwatergolf optrad.

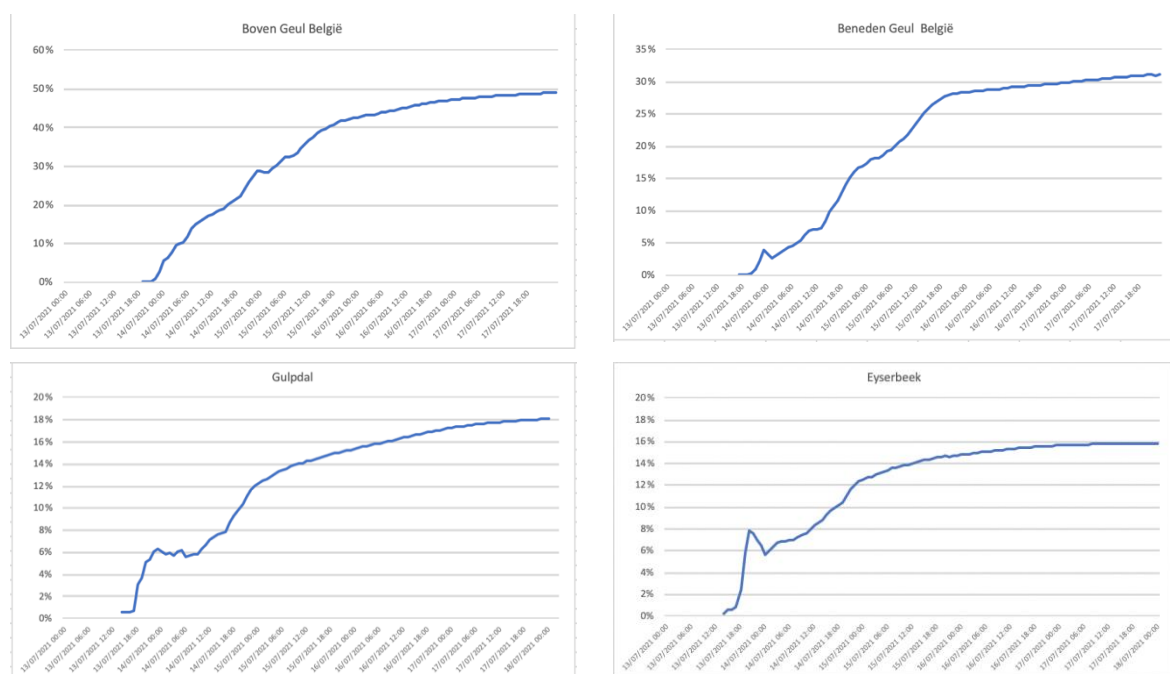
Bij het Beneden-Geuldal zijn beperkte afvoergegevens beschikbaar. De neerslaghoeveelheden per uur waren (zie figuur 42) in dit traject ook enigszins afwijkend van de andere trajecten in Nederland. In de eerste neerslagperiode op 13 juli viel hier namelijk relatief meer, waar dat in de andere gebieden de middelste periode op 14 juli was. In de laatste periode in de nacht van 14 op 15 juli viel hier zelfs bijna helemaal geen neerslag meer.

De grote hoeveelheid neerslag in de beginperiode maakt het mogelijk om voor dat deel nog wel een inschatting te maken van het percentage van de neerslag dat werd afgevoerd. Het duurde immers circa 10 uur voordat het water uit het gebied stroomopwaarts van Wijlre bij Meerssen aankwam. In figuur 42 is voor die tijdsperiode aangegeven hoe de Geul bij Meerssen reageerde op de neerslag uit die beginperiode. Het leverde twee subgolven op, die dus al grotendeels waren afgevoerd toen het overige water van bovenstrooms hier aan kwam.



Figuur 42. Neerslaghoeveelheden per uur in het stroomgebied van het Beneden-Geuldal bepaald uit het gemiddelde van vijf neerslagstations.

In de grafieken van figuur 43 is het percentage van de hoeveelheid gevallen neerslag weergegeven die afgevoerd is gedurende de tijd vanuit de 4 deelstroomgebieden met enigszins betrouwbare afvoergegevens. Vanuit het Boven-Geuldal was aan het eind van 17/7 al bijna 50% afgevoerd, vanuit het Beneden-Geuldal in Wallonië ruim 30%, vanuit het Gulpdal 18% en vanuit het stroomgebied van de Eyserbeek 16%. Er is dus een groot verschil in hoeveelheid afgevoerde neerslag, wat impliceert dat in het Nederlandse deel van het stroomgebied veel meer water werd vastgehouden.



Figuur 43. Verloop van het percentage gevallen neerslag dat per deelstroomgebied is afgevoerd gedurende de periode van de hoogwatergolf.

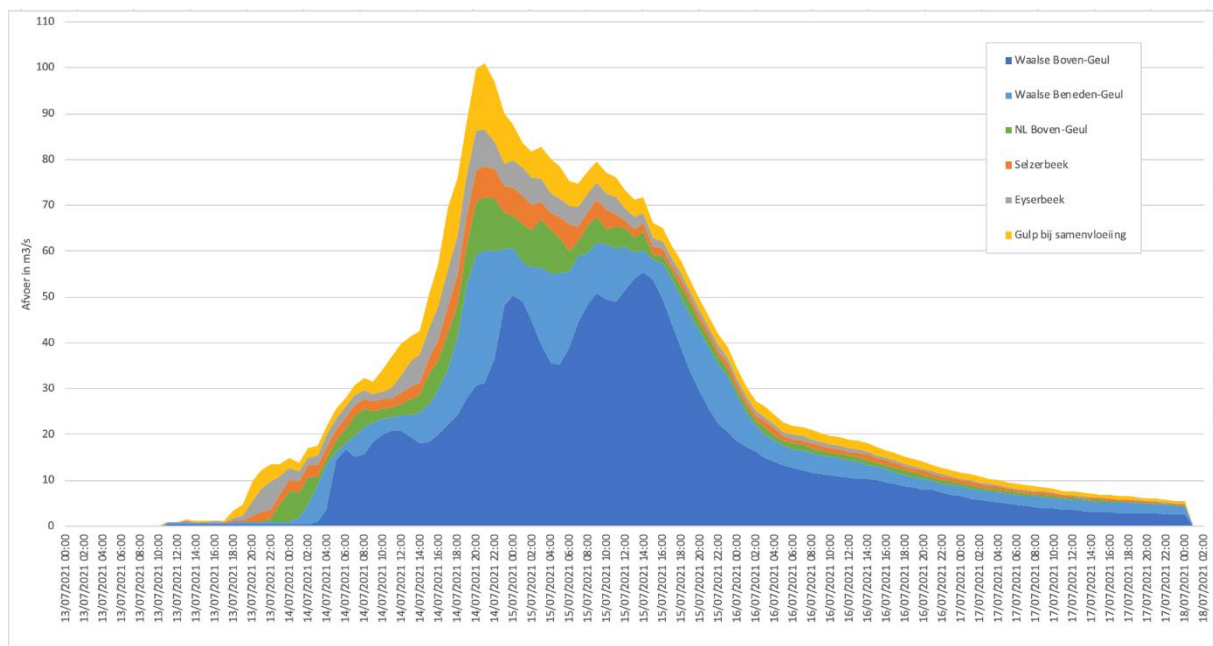
Ten tijde van het passeren van de piek in de verschillende deelstroomgebieden was respectievelijk 35, 22, 10 en 10% van de hoeveelheid water pas gepasseerd. Het laat zien dat er nog zeer veel water in het stroomgebied aanwezig was (waarvan een deel nog onderweg in het watersysteem) toen de hoogwatersituatie de piek bereikte. Verder laten deze percentages duidelijk het grote verschil zien tussen het meest bovenstroomse Waalse deel van het stroomgebied en vrijwel het hele Nederlandse stroomgebied. De capaciteit om water vast te houden is in het Nederlandse deel veel groter.

5.3.2 Totale hoeveelheid afvoer afgevoerd & opbouw van de hoogwatergolf

Ter hoogte van Gulpen komt het water samen vanuit het hele Waalse en Nederlandse Geuldal, de Gulp, de Selzerbeek en de Eyserbeek. Aan de hand van de afvoergegevens die hierboven zijn gepresenteerd en een inschatting van de hoeveelheid afvoer die in het Nederlandse Boven-Geuldal werd gegenereerd is een grafiek gemaakt van de hoeveelheid water die vanuit al deze gedeelten van het stroomgebied in dit gebied tussen Gulpen en Wijlre samen is gekomen (zie figuur 43).

Het is een optelling van alle afvoergegevens en de hoogste waarden zijn met zekerheid te hoog omdat het water dat van bovenstrooms onderweg was al deels in de dalvlakte stroomde en daar sterk vertraagde. Er kwam daarom vooral in de periode rondom de piek minder water aan ter hoogte van Wijlre dan in figuur 44 is aangegeven. Deze optelling van afvoeren laat ook zien dat op dit punt verreweg het meeste water uit Wallonië afkomstig was; naar schatting circa 60% ten tijde van de hoogste afvoer.

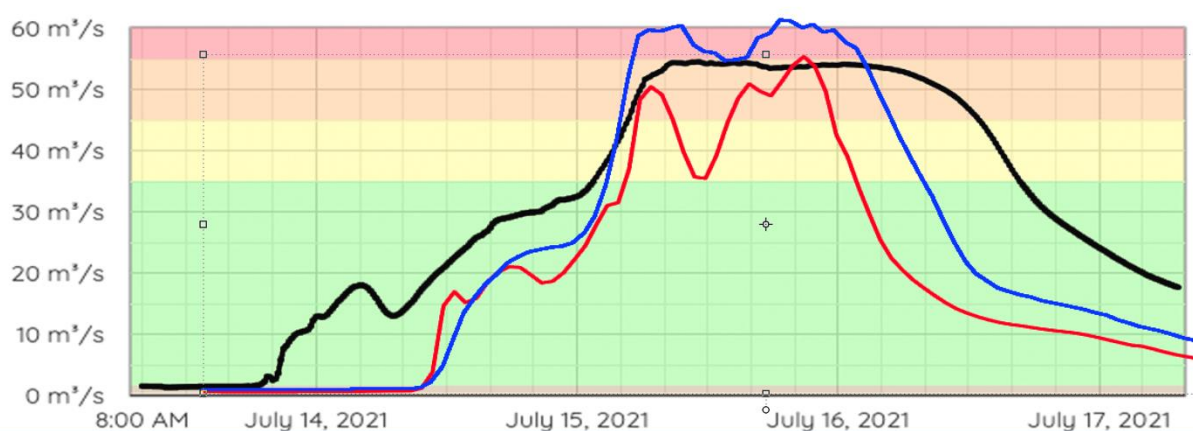
Wat verder opvalt is dat ten tijde van de tweede golf die vanuit Wallonië aangevoerd werd, de aanvoer vanuit Nederlandse deel van het stroomgebied veel kleiner was. Het gaat dan om de subgolven 5 en 6 zoals we hierboven al zagen die vanuit Wallonië nog heel groot waren en in Nederland, omdat er minder regen viel, veel kleiner. Het aandeel water uit Wallonië liep gedurende die periode zelfs op tot 75%.



Figuur 44. Optelling van de afvoeren vanuit de verschillende deelstroomgebieden ter hoogte van Gulpen waar dit water samen komt. NB. Omdat een deel van het uit de Boven-Geul aangevoerde water onderweg al was geborgen in de dalvlakte zal de werkelijke piekafvoer op dit punt aanzienlijk lager zijn geweest.

5.3.3 Totale hoeveelheid afvoer afgevoerd & opbouw van de hoogwatergolf

Zoals hierboven al werd aangegeven, stroomde vanaf het moment dat de Geul buiten zijn oevers trad een steeds groter deel van het water buiten de Geul de dalvlakte in. Het effect daarvan is goed zichtbaar bij Meerssen. Van Meerssen zijn ook afvoermetingen beschikbaar (zwarte lijn in figuur 44). Wat hierbij opvalt is dat de maximale afvoer hier niet hoger is geweest dan $55 \text{ m}^3/\text{s}$. Mogelijk is dit een onderschatting omdat een deel van het water wellicht buiten het meetstation om is gestroomd, maar de sterk afgeplatte vorm van de hoogwatergolf is wel correct omdat de waterstand bij Meerssen en nabijgelegen meetpunten eenzelfde verloop laten zien.



Figuur 45. Afvoermeting bij Meerssen (zwarte lijn) juist voor de passage van de Geul onder het Julianakanaal. In rood de afvoermeting bij Kelmis en in blauw die bij Sippenaecken. Deze twee lijnen zijn respectievelijk 11 en 14 uur naar rechts geschoven; wat bij benadering de looptijd tussen deze stations en Meerssen.

In figuur 45 zijn ook de afvoergegevens van Kelmis en Sippenaecken weergegeven, die ten tijde van de piek ongeveer net zo hoog, of nog hoger waren. Dit past bij het beeld dat we hierboven ook al zagen dat de extra hoeveelheid afvoer die in het hele Nederlandse stroomgebied is gegenereerd relatief gering is geweest. De golf bij Meerssen is wel veel langer en een relatief groot deel van het water werd dus pas later afgevoerd.

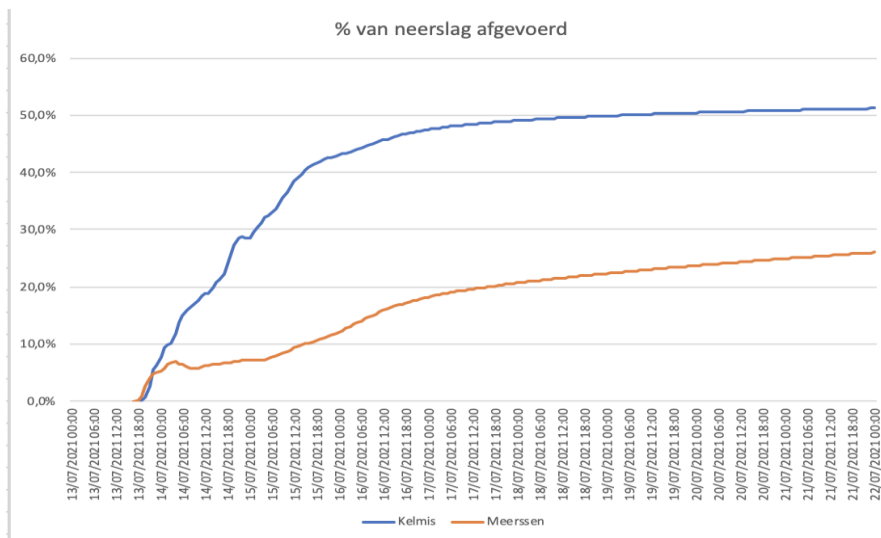
In figuur 46 is het percentage weergegeven van de hoeveelheid gevallen neerslag in het stroomgebied bovenstrooms van het meetpunt. Voor Kelmis is het dezelfde grafiek als in figuur 17, alleen loopt deze nu door t/m 22/7.

In de grafiek vallen een aantal zaken op.

- Het percentage van de totale hoeveelheid neerslag die werd afgevoerd bij Kelmis was veel groter dan bij Meerssen. In figuur 17 zagen we al dat dit percentage voor Nederlandse deelstroomgebieden veel kleiner was dan voor de Waalse. De situatie bij Meerssen bevestigt dat dit voor het hele Nederlandse stroomgebied geldt.
- Na het passeren van de piek op 15 juli neemt het percentage bij Kelmis relatief nog maar weinig toe en vanaf 20/7 is de lijn vrijwel stabiel. Bij Meerssen blijft de lijn duidelijk oplopen. De afvoer bij Meerssen zou uiteindelijk tot het einde van de maand juli relatief veel hoger

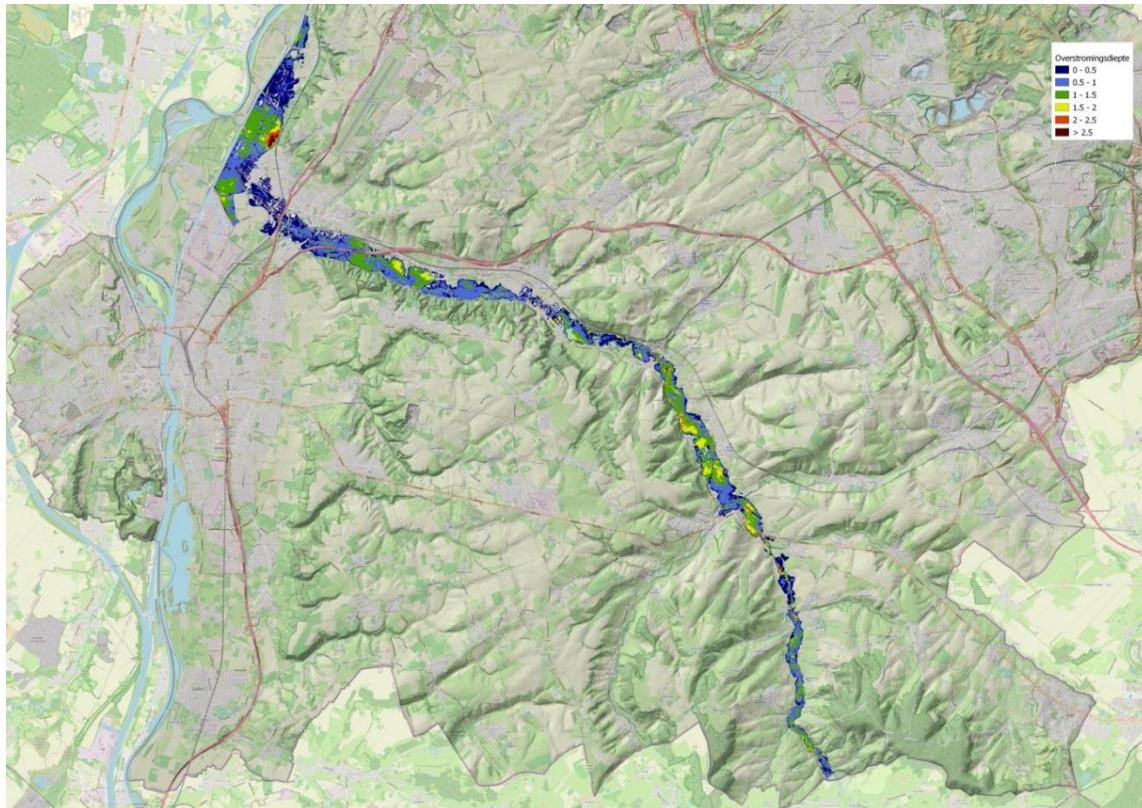
blijven dan bij Kelmis en ook bij Sippenacken. Op 31/7 (niet afgebeeld in fig 46) was bij Meerssen uiteindelijk bijna 35% van de hoeveelheid gevallen neerslag afgevoerd. Tussen 20 en 31/7 is bij Meerssen dus nog 10% van de gevallen hoeveelheid neerslag gepasseerd, terwijl dat bij Kelmis nog maar ca. 1% was. De verklaring hiervoor is dat in het Nederlandse deel van het stroomgebied een veel groter deel van het water veel langer onderweg is geweest dan in het Belgische deel. Er is veel meer water vastgehouden in de bodem en dat is traag naar de Geul gestroomd.

- Bij Meerssen valt op dat het percentage vanaf 14/7 in de ochtend bijna 24 uur maar weinig toeneemt, terwijl bij Kelmis de groei toen maximaal was. Vanaf 16 juli neemt het percentage wel sneller toe. Deze geringe toename is goed te verklaren aan de hand van de overstroming van de dalvlakte van de Geul.



Figuur 46. Verloop van het percentage gevallen neerslag dat bij Kelmis en Meerssen is afgevoerd gedurende de periode van de hoogwatergolf en de dagen daarna.

In figuur 47. Is het gebied weergegeven dat ten tijde van de maximale waterstand was overstroomd in het Geuldal. Exclusief de vlakte ten noorden van Bunde ging het om ca 850 ha. Deze oppervlakte is bepaald door aan de hand van de maximale waterstanden van de meetstations een verhanglijn te trekken door het hele dal. Op plaatsen waar de meetstations ver uit elkaar lagen is de lijn aangevuld met waarnemingen van de luchtfoto's die het waterschap heeft gemaakt.



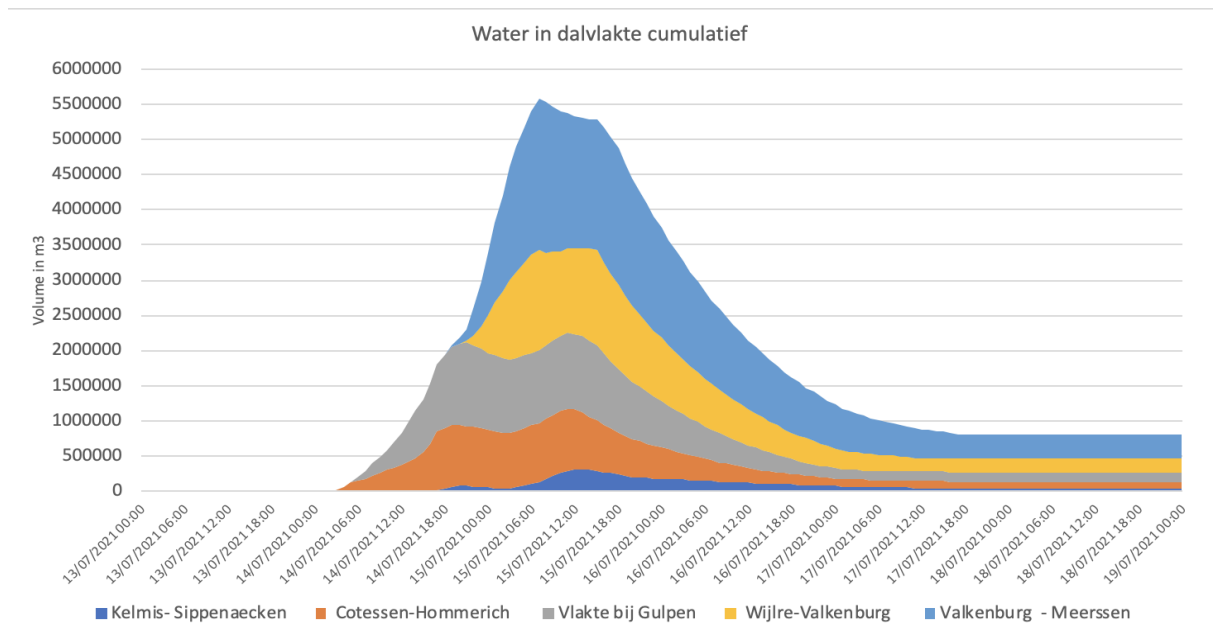
Figuur 47. Maximale overstromingsdiepte dalvlakte Geuldal. Het Waalse traject is niet afgebeeld; hier heeft ook een traject onder water gestaan.

In tabel 12 is per deelgebied het areaal en het volume weergegeven in de dalvlakte en de gemiddelde waterdiepte. Aan de hand van de waterstandsgegevens kon ook het vullen van de dalvlakte worden bepaald. Voor het legen bleek dat niet mogelijk omdat het water langzamer terugstroomde vanuit de dalvlakte. Hiervoor is een schatting gemaakt. Ook bleef een deel van het water achter in de vlakte, waarvoor ook een schatting is gemaakt, waarbij is ingeschat dat ca 10 cm waterdiepte uiteindelijk niet teruggestroomd zal zijn.

Tabel 12. Gegevens van de overstroming van de dalvlakte.

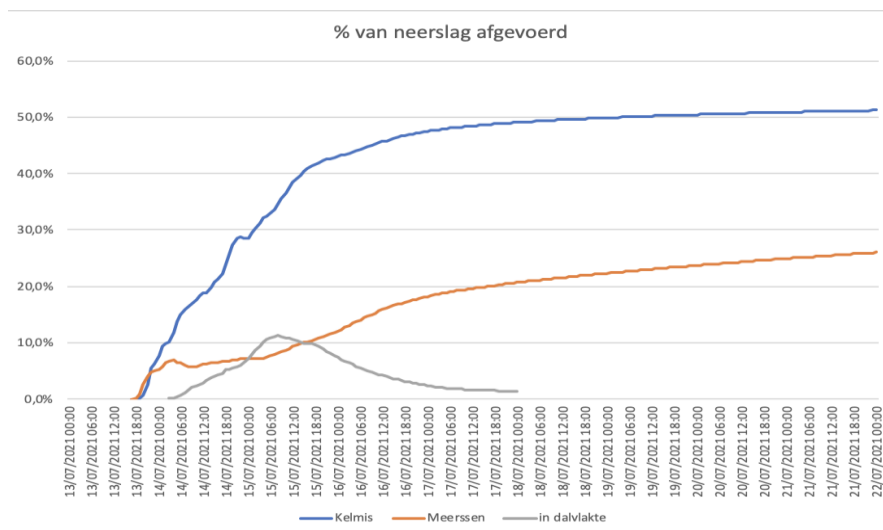
	Beneden Geul Wallonië	Boven-Geul Nederlnd	Midden-Geul Nederland	Beneden Geul tot Valkenburg	Beneden Geul na Valkenburg	Vlakte naast Juliana-kanaal	Totaal (excl vlakte Juliana-kanaal)
areaal in ha (excl Geul)	65	120	125	200	340	65	850
max volume in overstromingsvlakte	325.000	900.000	1.200.000	1.750.000	2.400.000	325.000	6.500.000
gemiddelde waterdiepte	0,5	0,7	1,0	0,9	0,7	0,5	0,8

In figuur 48 is de opbouw van het volume in de dalvlakte weergegeven door per deelgebied de opbouw per uur bij elkaar te tellen. Tijdens het hoogtepunt van de golf was er ca 5.500.000 m³ water in de vlakte geborgen. Nadat de aanvoer van water van bovenstrooms verminderde, stroomde de dalvlakte weer snel leeg. Het vullen zorgde stroomafwaarts voor een verminderde toename van de afvoer en toen de vlakte weer leegstroomde werd de afvoer weer enige tijd aangevuld en bleef daardoor benedenstrooms langer hoog.

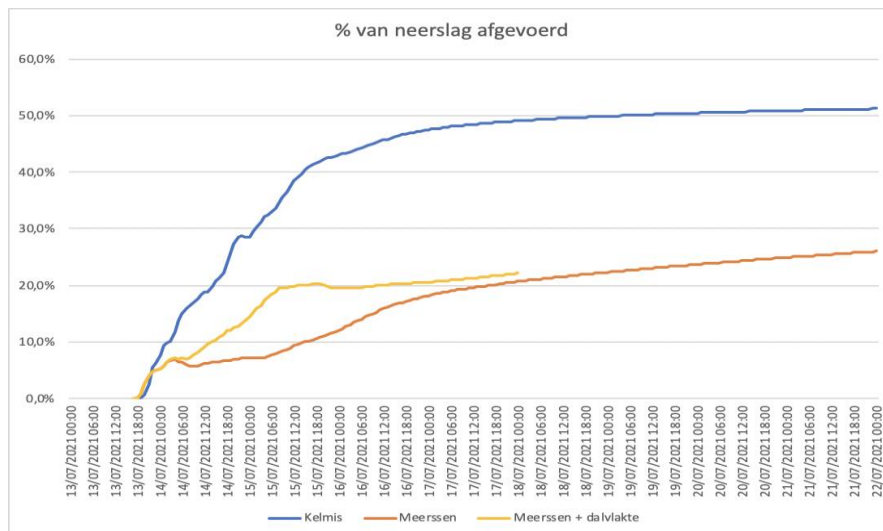


Figuur 48. Water geborgen in de dalvlakte ten tijde van de hoogwatergolf.

In figuur 49 is het percentage gevallen neerslagwater dat in de vlakte was geborgen weergegeven met een grijze lijn. Het moment van vullen van de vlakte blijkt vrijwel precies samen te vallen met het moment dat in Meerssen het percentage van de gevallen neerslag dat werd afgevoerd stakte. De hoeveelheid water die in de vlakte werd opgeslagen nam zelfs veel sneller toe dan de hoeveelheid water die bij Meerssen passeerde. Het laat zien dat de systeemwerking van het Geuldal nog grotendeels intact is. In figuur 50 is tenslotte het water dat in de dalvlakte werd geborgen opgeteld bij de afvoer die bij Meerssen passeerde. Dit geeft een beeld van de hoeveelheid afvoer die bij Meerssen zou zijn gepasseerd als er geen water geborgen had geworden. De gele lijn sluit niet helemaal aan bij de oranje lijn, omdat ervan uit is gegaan dat niet al het water is teruggestroomd.



Figuur 49. Als figuur 46 met daarbij het percentage van de gevallen neerslag dat in de dalvlakte was geborgen.



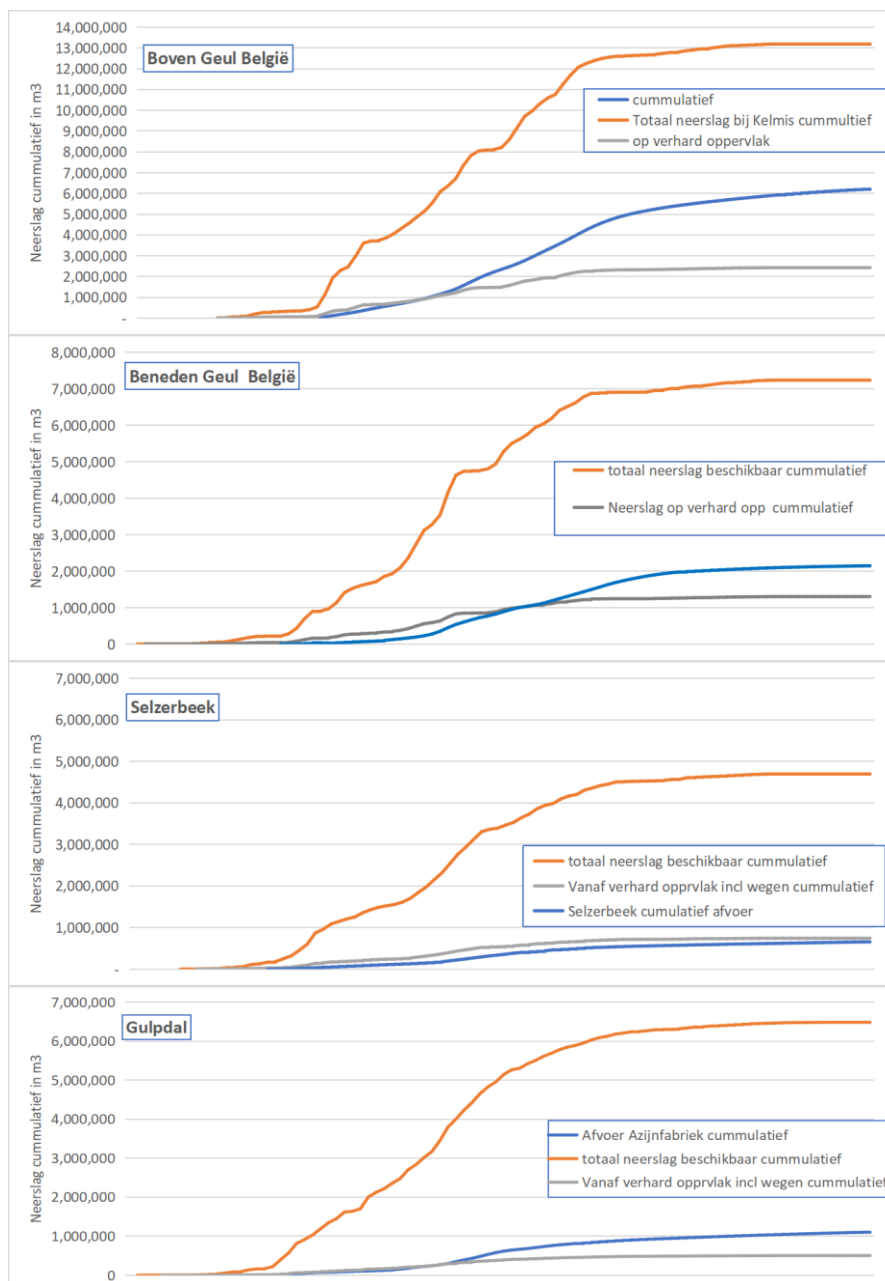
Figuur 50. Als figuur 49 waarbij het in de vlakte geborgen water is opgeteld bij de afvoer van Meerssen.

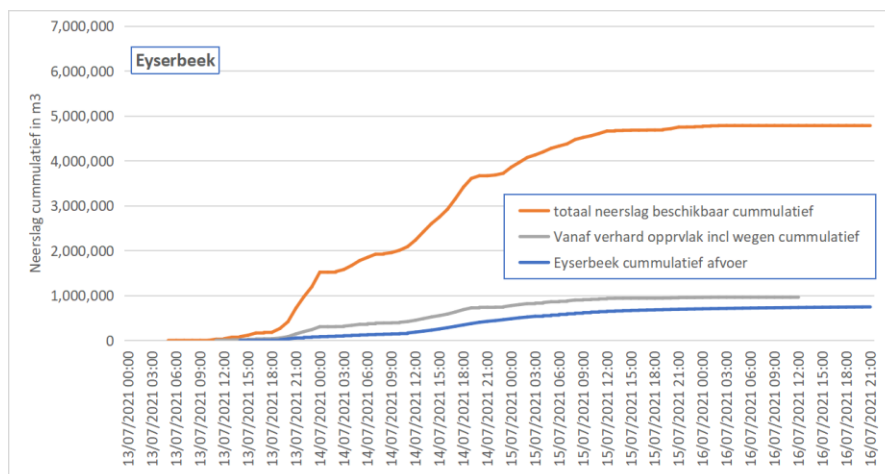
5.3.4 Herkomst van het water in de hoogwatergolf

Hierboven zagen we al dat het Waalse deel; van het stroomgebied relatief veel meer water genereerde dan het Nederlandse. Per oppervlakte-eenheid werd er vanuit het meest bovenstroomse deel 2,5 tot 3,5 keer meer water afgevoerd dan vanuit het Nederlandse deel. De vraag die we nu nog willen proberen te beantwoorden is waar vanuit het landschap het meeste water vandaan kwam. Aan de hand hiervan kunnen dan keuzes gemaakt worden welke maatregelen in die gebieden het meeste effect kunnen garanderen. We hebben ons hierbij vooral gefocust op deze hoogwatersituatie die voortkwam uit een lange vrijwel aaneengesloten neerslagperiode waarbij per uur veelal 5-10 mm viel en soms wat meer, maar zelden meer dan 15 mm. Bij zware zomerse buien kan de intensiteit veel hoger zijn en zal dat ook invloed hebben op de hoeveelheid water die oppervlakkig afstroomt. Het verschil zit hem in het feit dat bij een intensiteit van 5 tot 10 mm de infiltratiecapaciteit van veel bodems nog niet wordt overschreden, terwijl dat bij zware zomerse buien vaak wel gebeurt.

Achtereenvolgens zullen hierna eerst het verhard oppervlak en daarna de maïsakkers en tenslotte het andere landgebruik worden geanalyseerd. In de systeemanalyse zagen we al dat het verhard oppervlak in een aantal deelstroomgebieden tot ca. 20% van het areaal uitmaakt. Neerslag die op verhard oppervlak valt, komt voor een groot deel tot afstromen. De eerste 1 mm, mits die over een periode van een uur of langer valt blijft vaak nog wel op het verharde terrein liggen, maar zodra de intensiteit hoger wordt of het langer blijft regenen gaat eens steeds groter deel afstromen. De neerslag valt dan op een nat wegdek en voegt zich bij het afstromende water (water valt op water). Naarmate de intensiteit groter wordt gaan wegen in deze gebieden steeds meer fungeren als een verlengstuk van het watersysteem. In veel gevallen wordt dit water beneden aan de helling afgevoerd op de beek. In Nederland zijn op veel plaatsen buffers aangelegd, die dit water opvangen, maar deze zijn vooral ingericht om hoge afvoeren af te remmen tijdens zware zomerse neerslagperiodes. Nu was de instroom, uitzonderingen daargelaten, vaak niet eens zo groot dat de buffer zich helemaal vulde. En gedurende fasen in het event dat het even minder hard regende zullen de buffers ook weer leeggestroomd zijn; ze zorgden dus steeds maar voor een korte tijd van buffering. In Wallonië hebben we tijdens een excursie nergens gezien dat water vanaf wegen ingevangen wordt om de afvoer naar de beek te vertragen. We gaan er daarom van uit dat een groot deel van het water dat op wegen is terecht gekomen, snel naar de beken zal zijn afgevoerd.

In de grafieken van figuur 51 is voor 5 deelstroomgebieden weergegeven hoeveel neerslagwater er in totaal beschikbaar was gedurende de periode dat het regende (oranje lijn) en tot ca 24 uur daarna. Met de blauwe lijn is de hoeveelheid water weergegeven die werd afgevoerd en met een grijze lijn de hoeveelheid die op het verharde oppervlak was gevallen. Hierbij zijn het oppervlak bebouwde kom en de wegen in het buitengebied bij elkaar genomen. De grafiek van het Waalse Boven-Geuldal laat zien dat het volume water dat op verhard oppervlak is gevallen aanvankelijk gelijk oploopt met het volume dat is afgevoerd, maar na verloop van tijd wijken beide lijnen steeds verder uiteen. Het Waalse Beneden-Geuldal laat een enigszins vergelijkbaar verloop zien, al duurt het langer tot de lijnen uiteenwijken. Het Gulpdal lijkt weer meer op het bovenstroomse deel in Wallonië. Bij de Selzerbeek lopen de beide lijnen de hele periode gelijk op en bij de Eyserbeek is het afgevoerde volume tijdens de hele periode zelfs lager dan het volume dat op verhard oppervlak is gevallen.





Figuur 51. Grafieken van 5 deelstroomgebieden waarin het totale volume neerslagwater, het volume afgevoerd en het volume op verhard oppervlak is weergegeven.

Het is niet bekend welk deel van de neerslag die op het verharde oppervlak is gevallen werkelijk de beek heeft bereikt. Een deel van het bebouwde gebied bestaat namelijk ook uit tuinen, berm en parken, waar het water wel zal zijn geïnfiltreerd in de bodem. We kunnen er echter wel vanuit gaan dat het percentage van de gevallen neerslag, dat vanaf verhard oppervlak naar de Geul stroomde, gedurende de hele periode ongeveer even groot zal zijn geweest. Alleen bij heel lage neerslagintensiteit (< 1 mm/uur) is de opbouw van water op het oppervlak veelal nog te klein om tot afstromen te komen. Water vanaf verhard terrein zal deels direct, over de wegen, naar de beek zijn gegaan. Een ander deel zal via putten naar het riool zijn afgevoerd, waarlangs het, getuige de vele resten van toiletpapier in het hoogwaterafval, ook snel naar de beek is afgevoerd.

In de 5 grafieken van figuur 52 is de hoeveelheid neerslag die in één uur op verhard oppervlak viel met blauwe kolommen aangegeven, en het in datzelfde uur bij Kelmis gepasseerde volume afvoer met de oranje lijn. Bij het afgevoerde volume is er rekening mee gehouden dat het water vanuit de verschillende delen van het stroomgebied 1 tot 2 uur onderweg zal zijn geweest. In het Waalse Boven Geuldal zien we dat het aanbod vanaf verhard terrein in de eerste periode ruim voldoende kan zijn geweest om de afvoer te genereren (de blauwe kolommen zijn hoger dan de oranje lijn). Het ligt daarom voor de hand dat dit water ook vooral daarvandaan afkomstig zal zijn geweest. Een andere mogelijkheid, dat in gebieden met een ander landgebruik (bv grasland) ook water oppervlakkig is gaan afstromen, is minder waarschijnlijk. Het areaal grasland op hellende ondergrond is veel groter dan van verstedelijkt gebied en mocht dat gebeurd zijn, dan zou de toevoer van water naar de beek in de eerste uren al snel nog veel groter zijn geweest (de oranje lijn was dan veel hoger geweest dan de blauwe kolommen). Nog een derde mogelijkheid, dat water dat is geïnfiltreerd in de bodem al na 1 of 2 uur bij Kelmis aan komt, is nog onwaarschijnlijker. Het is daarom zeer waarschijnlijk dat de snelle toename van de afvoer in de avond van 13 juli vooral veroorzaakt zal zijn door water dat vanaf verhard oppervlak werd aangevoerd.

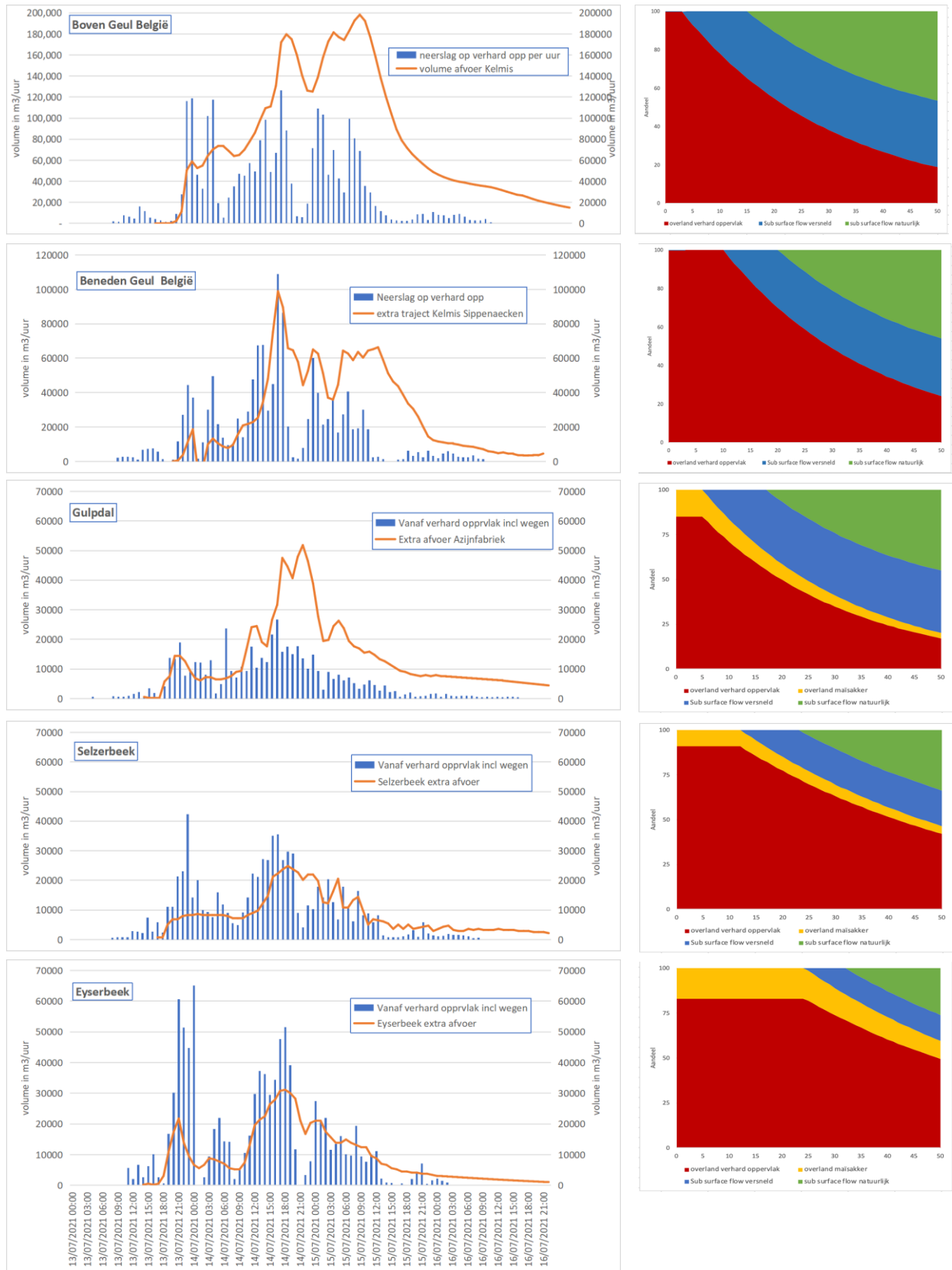
In de volgende neerslagperiode, die in de middag van 14 juli zijn hoogtepunt bereikte, stijgt de afvoer snel en ook het potentiële aanbod vanaf verhard oppervlak loopt weer op. Nu is de afvoer echter niet alleen absoluut, maar ook relatief groter dan in de eerste periode. Omdat we ervan uit kunnen gaan dat het verhard oppervlak een vergelijkbaar percentage van het regenwater heeft geleverd, moet er nu dus een nieuwe waterstroom bijgekomen zijn, waardoor de afvoer bij dezelfde hoeveelheid regen die er per uur valt relatief groter is geworden. We vermoeden dat het om water gaat dat in eerste instantie is geïnfiltreerd (waarschijnlijk in de eerste neerslagperiode of het begin

van de tweede), maar al vrij snel weer naar de oppervlakte is gekomen. Dit gebeurt bijvoorbeeld op plaatsen waar in het terrein greppels zijn aangelegd of drainage die het water onderscheppen. Maar ook wegen die in de helling zijn ingesneden, kunnen eerder geïnfiltreerd water onderscheppen en vervolgens over het wegoppervlak snel afvoeren. In de uren die volgen zal dit aandeel steeds groter worden en procentueel een belangrijker gedeelte van het totale aanbod van water gaan innemen.

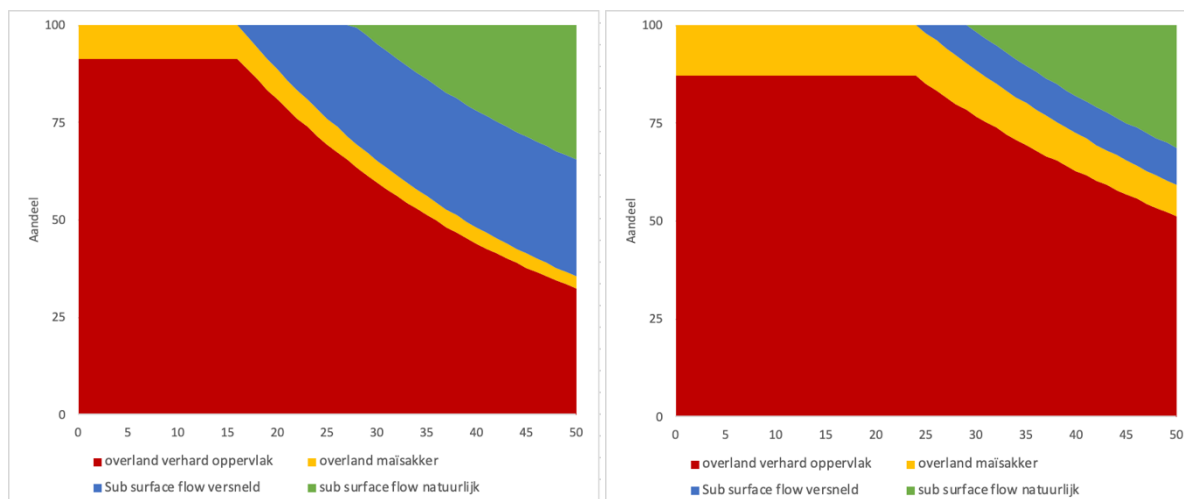
In het laatste deel van de meer intensieve neerslagperiode wordt het aandeel vanaf verhard oppervlak nog kleiner, om uiteindelijk als het droog is, snel daarna naar nul te gaan. Het aandeel water dat niet vanaf verhard oppervlak is gekomen neemt gedurende de regenperiode dus steeds verder toe. Blijkbaar voegen zich steeds meer, dwz tragere waterstromen bij het totaal. Het zal daarbij ook gaan om water dat is geïnfiltreerd en tijdelijk ondergronds is afgestroomd, maar niet alweer snel door wegen of greppels is onderschept. Dit water volgt dus langer de natuurlijke weg en zal uiteindelijk onder in het dal pas aan de oppervlakte zijn getreden. Vanaf daar kan het dan over het maaiveld zijn afgestroomd of meteen in de beek zijn terechtgekomen. Het percentage van de totale hoeveelheid neerslag van het totaal dat vanaf verhard oppervlak tot afstroom komt, blijft de hele neerslagperiode even groot, maar als aandeel van de afvoer neemt het af omdat de andere waterstromen erbij zijn gekomen.

Dit proces is gevisualiseerd in de gekleurde figuur naast de grafiek van het Boven-Geuldal. De bijdrage van de verschillende componenten aan de opbouw van watergolf gedurende de hoogwaterperiode is hier indicatief weergegeven. De figuur start links vanuit de de plausibele aanname dat in het begin van de hoogwatergolf het aandeel vanaf verhard 100% zal zijn geweest kan. Vervolgens blijft, zolang het blijft regenen, de verhouding tussen hoeveelheid op verhard terrein gevallen neerslag en de hoeveelheid afgevoerd water, hetzelfde, waarmee een ruwe schatting gemaakt worden van het aandeel tijdens de rest van de hoogwatergolf. De rest van de afvoer wordt dan gaandeweg meer en meer ingenomen door de andere twee hierboven genoemde componenten: 1). onderschept tijdelijk ondergronds afgevoerd water en 2). natuurlijk uitgetreden tijdelijk ondergronds afgevoerd water. Bij de eerste hiervan gaat het om in greppels, drains ed. onderschepte waterstromen en bij de tweede om waterstromen die via natuurlijke afstroom de dalen heeft bereikt en daarna de beek bereikt. Het totaal van deze twee componenten kan afgeleid worden uit het deel dat niet vanaf verhard gekomen kan zijn. Wanneer de tweede component begint en hoe de verhouding zich ontwikkelt tussen beide in de loop van de afvoergolf is niet bekend. In de figuur rechts gaat het daarom om een ruwe inschatting.

NB De hier toegepaste methode om de componenten van de afvoergolf te ontrafelen is speciaal voor deze studie ontwikkeld. Een belangrijk aanname hierbij is de hoeveelheid water die in de eerste uren vanaf verhard oppervlak is afgestroomd. Ook is ervan uitgegaan dat de component oppervlakkige afvoer vanaf niet- verhard oppervlak klein is. Met uitzondering waarschijnlijk vanaf maïsakkers, waar in enkele Nederlandse deelstroomgebieden wel vanuit is gegaan (zie hierna). Het is aan te bevelen om verspreid over het stroomgebied de komende jaren deze methode te toetsen en meer onderzoek te doen naar het al dan niet infiltreren van water in de bodem bij verschillende neerslagintensiteiten. Vaak lag de focus bij dergelijk onderzoek juist op de hoge intensiteiten, omdat die lokaal de meeste problemen opleveren; maar zoals het hoogwater van juli laat zien, is het ook nodig om bij lagere intensiteiten te weten hoe het water zich gedraagt op de hellingen. Ook is extra onderzoek nodig in gebieden met een grote kans op versneld uittredend sub-surface water. DE beste mogelijkheden daarvoor liggen in Wallonië



Figuur 52. Hoeveelheid neerslag per uur in de vijf deelgebieden op verhard oppervlak gevallen (blauwe kolommen) en het in dat uur via de beek afgevoerde volume (oranje lijn). De rechterfiguren laten een ruwe inschatting zien van het aandeel dat verschillende landschapcomponenten hebben bijgedragen aan de hoogwatergolf tijdens de regenperiode.



Figuur 53. Bijdrage van verschillende componenten in het landschap aan de afvoergolf in het Nederlandse Boven-Geuldal (links) en Beneden-Geuldal (rechts). Van deze gebieden zijn geen afvoergegevens bekend.

In de bovenste grafiek van Wallonië valt op dat ten tijde van de hoogste afvoer het water van de andere componenten van het landschap, buiten het water vanaf verhard oppervlak, een groot aandeel vormde. Dit is te verklaren omdat het gebied een ondoorlatende bodem heeft en het water via de dunne bodems snel zal zijn afgestroomd om dan benedenstrooms weer te zijn uitgetreden. Dit kan na korte tijd als het water in greppels of drainage wordt onderschep, of het kan na langere tijd als het water een lange helling ondergronds heeft afgelegd zonder te zijn onderschept en op natuurlijke wijze onder in het dal uit treedt.

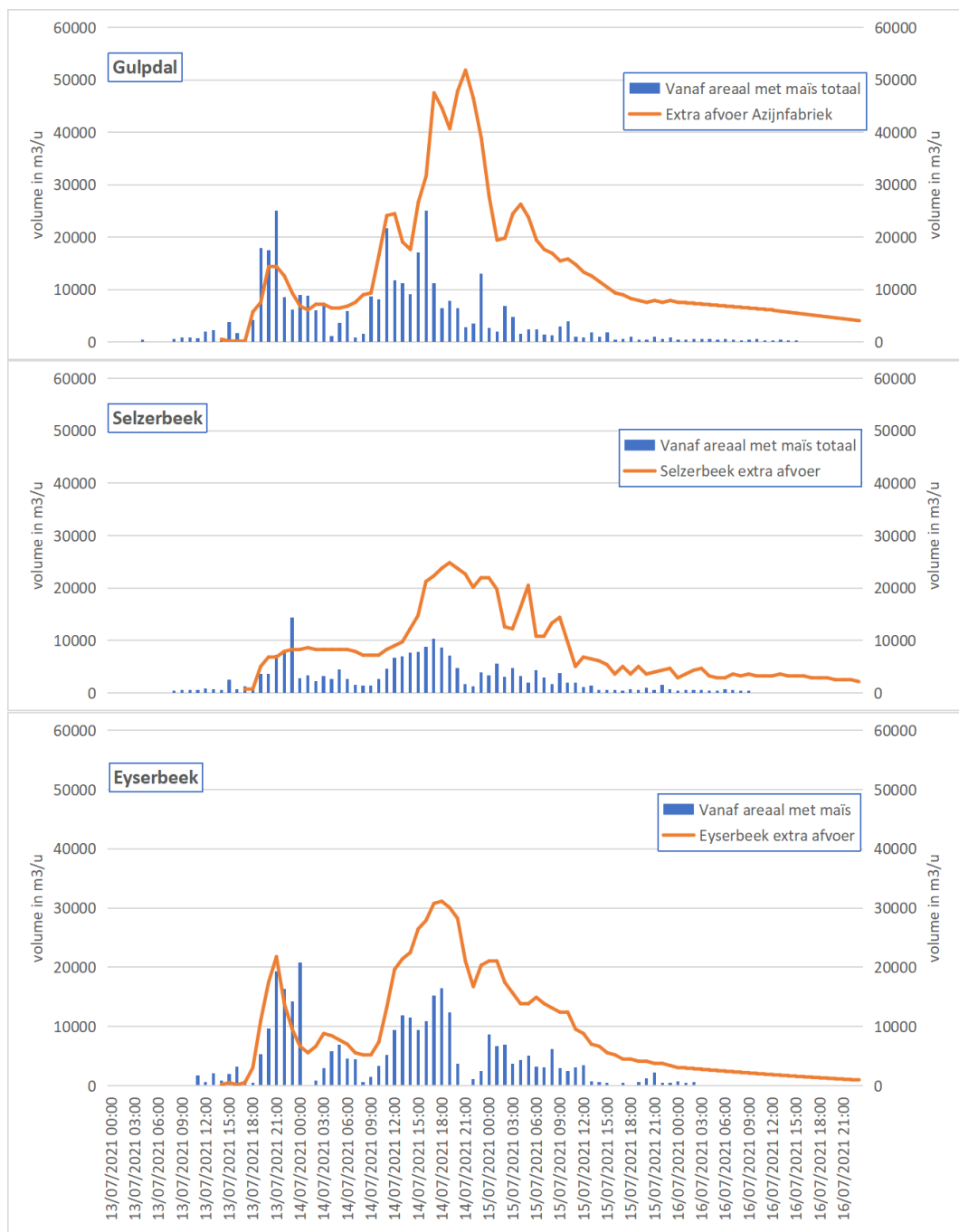
De tweede grafiek van boven in figuur 51 betreft het deelstroomgebied van de Waalse Beneden-Geul. Hier laat de afvoergrafiek zien dat het langer duurt dan in het Boven-Geuldal voordat andere componenten van het landschap een bijdrage gaan leveren aan de afvoergolf. Ook al is het areaal verhard oppervlak er relatief kleiner dan in het bovenstroomse deel in Wallonië, toch vormt het langer de hoofdmoot van het water dat naar de beek afstroomt. In figuur 50 zagen we ook al dat de grijze en de blauwe lijn langer samen op liepen. We hebben dit geïnterpreteerd als dat het langer duurt voordat andere, langzamere, componenten een bijdrage gaan leveren. De ondoorlatende paleozoïsche ondergrond is hier ook op veel plaatsen aanwezig, maar vooral hogerop de hellingen vormen juist zachtere mesozoïsche gesteenten (kalk en groenzand) de ondergrond. Belangrijk is ook dat de bodems hier dikker zijn, zodat water langer ondergronds zal blijven. Gedurende de tweede helft van de hoogwatergolf, dat is al na het moment dat dit gebied het meeste water heeft geleverd, neemt het aandeel van water dat enige tijd ondergronds heeft gestroomd duidelijk toe en neemt het aandeel vanaf verhard oppervlak af. Naar verwachting zal het dan eerst, evenals in het stroomopwaartse gebied, gaan om water dat versneld is door onderschepping in greppels, drainage en langs wegen, maar na verloop van tijd zal ook de bijdrage van water uit niet verstoorte routes een bijdrage zijn gaan leveren.

De derde grafiek van boven is van het Gulpdal. In dit gebied is het areaal verhard oppervlak relatief klein en dat is waarschijnlijk mede de oorzaak dat de afvoer vanuit dit stroomgebied in vergelijking met het Waalse Geuldal relatief klein is. Het aandeel water op verhard oppervlak is echter ook hier voldoende groot om in de eerste fase van de afvoergolf de afvoer te verklaren, maar het verschil tussen beide is wel kleiner dan in het Waalse Boven-Geuldal. In Het Gulpdal is er echter nog een

andere component die een bijdrage kan hebben geleverd en dat is het water dat op maïsakkers is gevallen. Tijdens het neerslagevent was de maïs vaak nog maar laag en omdat de bodems als gevolg van eerdere zware buien verslempt was is de kans groot dat met name vanaf maïsakkers water ook oppervlakkig is gaan afstromen. Tijdens de excursie die we gemaakt hebben naar het stroomgebied troffen we in maïsakkers ook vaak erosiegeultjes aan, wat er op wijst dat water hier met enige kracht heeft gestroomd. In de bovenste grafiek van figuur 54 is voor het Gulpdal met blauwe kolommen de hoeveelheid neerslag aangegeven die op het areaal maïsakkers is gevallen. De oranje lijn is wederom het volume water dat per uur is afgevoerd (dit is hetzelfde als in figuur 52).

De bodem in een maïsakker zal altijd beter doorlatend zijn dan van een verhard oppervlak, maar het percentage dat tot afvoer komt hoeft niet eens zo heel groot te zien, om de afvoergolf in de Gulp al mee te kunnen verklaren. Als bv 25% van de op maïsakkers gevallen neerslag oppervlakkig tot afstroom zou komen, dan is hiermee in het Gulpdal, samen met het water van verhard oppervlak, de eerste afvoergolf al geheel te verklaren. Gedurende de tweede langdurige regenperiode kan in het begin ook nog het water vanaf verhard oppervlak en vanaf maïsakkers de hoogte van de afvoer verklaren, maar naarmate de tijd vordert komt er hier, ook een andere waterstroom bij. Net als in het Waalse Beneden-Geuldal neemt het aandeel van deze stroom snel toe, want de afvoer in de hoogwatergolf neemt veel sneller toe dan het aandeel water dat potentieel afkomstig is vanaf verhard oppervlak en maïsakkers. Deze volgende waterstroom zal vooral bestaan uit water dat enige tijd ondergronds is geweest en daarna is uitgetreden. De geologische ondergrond bestaat voor een groot deel uit weinig doorlatende Aker Groenzand. Het gebied lijkt daarin op het Waalse Beneden-Geuldal en het tijdstip waarop en de mate waarin de volgende waterstromen op gang komen lijken ook op elkaar.

Het vierde stroomgebied in figuur 52 van de Selzerbeek ligt nog maar deels in een gebied met een ondergrond die bestaat uit Aker Groenzand. Het grootste deel van het gebied bestaat uit bodems met löss en zand of grind. De bodem en ondergrond kunnen hier veel water opnemen en de toestroom van water dat enige tijd ondergronds heeft afgelegd zal minder groot zijn dan de hierboven beschreven deelstroomgebieden. Het aandeel water vanaf verhard oppervlak is groot genoeg om de afvoergolf te verklaren. Het aandeel dat vanaf maïsakkers zal zijn afgestroomd (zie figuur 54) is niet zo groot, omdat het areaal niet groot is, maar samen met het water vanaf verhard oppervlak kan het gedurende de hele afvoergolf een groot deel van de afvoer verklaren. Pas in de tweede helft van het event zal ook water dat ondergronds is afgestroomd een bijdrage zijn gaan leveren, maar naar verwachting is dat aandeel niet zo groot geworden als bij de hierboven beschreven deelstroomgebieden. Een aandachtspunt is dat er in het stroomgebied van de Selzerbeek ook een grote buffer ligt, die waarschijnlijk ook voor afvlakking van de golf zal hebben gezorgd. Gegevens over de capaciteit van de buffers en de vulgraad tijdens de hoogwatergolf zijn in het kader van deze studie niet onderzocht. Het zou en waardevolle aanvulling kunnen zijn om dat in een vervolgstudie alsnog te doen.



Figuur 54. Hoeveelheid neerslag per uur in drie Nederlandse deelgebieden op maïsackers gevallen (blauwe kolommen) en het in dat uur via de beek afgevoerde volume (oranje lijn).

Het laatste stroomgebied in figuur 51 waar afvoergegevens van bekend zijn is van de Eyserbeek. Deze lijkt veel op die van het aangrenzende stroomgebied van de Selzerbeek. Het areaal verhard oppervlak is er echter groter en vooral zijn er veel wegen. De hoeveelheid water die daar vandaan tot afstroom komt zal daarom ook groter zijn. Tegelijkertijd is een groot deel van het stroomgebied relatief vlak, zodat de kans dat water kan infiltreren weer groter wordt. Al met al vertaalt dit zich in een hogere afvoer dan bij de Selzerbeek, vooral in de eerste uren toen de neerslagintensiteit hier ook groter was. In de langdurige, tweede regenperiode blijft het volume water op verhard oppervlak steeds ruim groter dan de hoeveelheid die tot afstroom komt. De verhouding tussen wat wel en niet in de beek belandt is onbekend, maar samen met water van het relatief grote maïsareaal dan bij de Selzerbeek (zie figuur 53) is het waarschijnlijk dat deze twee componenten nog lange tijd de afvoer

hebben bepaald in de Eyserbeek. Vanwege de dikke bodems en relatief goed doorlatende ondergrond in een groot deel van het stroomgebied zal het daarnaast ook lang geduurd hebben voordat de andere waterstromen op gang zijn gekomen. In de gekleurde figuur rechts in figuur 52 blijft dit aandeel daarom relatief klein en verschijnt het pas in de tweede helft van de afvoergolf.

In figuur 53 tenslotte zijn voor de nog resterende deelstroomgebieden (Boven- en Beneden-Geul in Nederland) de aandelen weergegeven die de landschapscomponenten kunnen hebben bijgedragen. Van deze deelstroomgebieden zijn geen afvoergegevens bekend en daarom is ook niet duidelijk hoe het afvoerloop gereageerd heeft op de neerslag. Voor het Boven-Geuldal is aangenomen dat het lijkt op zowel de situatie in het Waalse Beneden-Geuldal als het Gulpdal. De bodem bestaat er namelijk nog deels uit ondoorlatende gesteenten, maar er zijn ook gedeelten met een löss of grind/zand bodem. En zoals in andere Nederlandse deelstroomgebieden is er een areaal maïs. Figuur 53 is daarom voor het Boven-Geuldal een combinatie van deze twee andere deelstroomgebieden.

Van het Nederlandse Beneden-Geuldal is van de eerste ca. 10 uur wel bekend hoeveel afvoer vanuit dit deelstroomgebied afkomstig was, omdat het water van verder bovenstrooms toen nog niet aangekomen was in Meerssen. Als voor die periode de hoeveelheid water op verhard oppervlak wordt berekend (niet afgebeeld) dan blijkt dat ook hier dat dit areaal de afvoer ruimschoots kan verklaren. Daarbovenop is ook het aandeel maïsakkers hier in een deel van het stroomgebied (de plateaus en hellingen naast het Geuldal) relatief groot en vanwege de hoge neerslagintensiteit in de eerste uren is de kans groot dat ook daar water vandaan gekomen is. Het is daarom aannemelijk dat al het water in de eerste uren van deze twee componenten afkomstig was. De intensiteit in de eerste uren van het neerslagevent was overigens zo hoog dat mogelijk ook graslanden en overige akkers op steile hellingen zijn gaan bijdragen aan de afvoergolf. Dit aandeel schatten we echter niet heel groot in, want als dat veel was geweest zou de afvoergolf al snel nog veel groter zijn geweest. We nemen daarom aan dat in deze gebieden een groot deel van de neerslag toch nog in de bodem zal zijn geïnfiltreerd. Voor de periode na de eerste 10 uur voor het samenstellen van de figuur 54 vooral gekeken naar het stroomgebied van de Eyserbeek. De omstandigheden lijken namelijk veel op elkaar: relatief dikke bodems, veel verhard oppervlak en veel wegen (zie ook de systeemanalyse). Het aandeel water dat in de ondergrond is gezakt en na enige tijd, al dan niet door greppels ed., weer uittreedt, zal daarom niet groot zijn geweest en pas laat op gang zijn gekomen.

6. Kwalitatieve analyse effectiviteit Nature Based Solutions

In het visiedocument: Een klimaatrobuust Geuldal (2019) zet een coalitie van natuurorganisaties uiteen hoe het Geuldal zich kan ontwikkelen tot een klimaatrobuust stroomgebied in 2050. Er worden inrichtingsmaatregelen voorgesteld die zowel de waterkwaliteit, de biodiversiteit en de sponswerking in het Geuldal vergroten.

In paragraaf 6.1 en 6.2 beschouwen we maatregelen kwalitatief op hun effectiviteit door ze te koppelen aan uitgangspunten en processen die de hoogte van de piekafvoer benedenstrooms kunnen afvlakken bij extreme neerslagevents.

In paragraaf 6.3 koppelen we de maatregelen aan de neerslag - afvoer karakteristieken van de verschillende deelstroom gebieden.

Maatregelen (NBS) zijn effectief als ze bijdragen aan de vertraging van waterstromen op plateaus, hellingen, bovenstroomse en benedenstroomse dalvlaktes. We vertragen daarbij de reis van een regendruppel van bron tot monding.

1. *Opnamecapaciteit van de bodem wordt optimaal benut*
2. *Water dat afstroomt door de bodem moet zo lang mogelijk in de bodem blijven*
3. *Water dat oppervlakkig afstroomt op hellingen wordt vertraagd waardoor re-infiltratie mogelijk wordt*
4. *Water wat zich onder aan de helling verzamelt en oppervlakkig afstroomt wordt zoveel mogelijk vertraagd*
5. *Water wat zich eenmaal in de beek bevindt krijgt ruimte om de dalvlaktes te inunderen*

Nb. In deze studie wordt gefocust op natuurlijke oplossing voor events vergelijkbaar met die van juli 2021. Bij andere type regenevents kunnen de meest effectieve natuurlijke maatregelen anders zijn.

- Zo hebben doorstroommoerassen in bovenstroomse dalvlaktes een grote effectiviteit voor het voorkomen van piekafvoeren in winterse neerslagevents en in langdurige zomerse regenevents zoals in juli 2021. Maar zijn ze minder effectief in het voorkomen van overlast bij kortstondige, lokale, intense zomerse neerslag.
- Maisakkers functioneren anders in de zomer dan in winter. Juist in zomer treed verslemping op. Verhard oppervlak is door het jaar heen hetzelfde, maar heeft een groter aandeel in de piekafvoer bij langdurige zomerse (en dus intensere) neerslagevents, dan bij winterse neerslagevents met een lage intensiteit.

In een eventuele vervolgstudie kunnen de natuurlijke maatregelen nader worden onderbouwd op effectiviteit per type regenevent.

6.1 Natuurlijke oplossingen op plateaus & hellingen

1. Opnamecapaciteit van de bodem wordt optimaal benut

Het beste medium om regenwater tijdelijk op te slaan en de afvoer te vertragen is de bodem. Maatregelen die bijdragen aan het vergroten van de opnamecapaciteit van bodems zijn een bronmaatregel en daarmee uitermate effectief in het verminderen van de piekafvoer benedenstrooms.

Maatregelen uit de visie 'klimaatrobuust Geuldal' die bijdragen aan het vergroten van de opnamecapaciteit van de bodem:

Nummer visie	Maatregel	Toelichting
10, 18, 19	Akkers op hellingen omzetten in kruidige (struweelrijke) graslanden	Akkers (waarvan maïs de minst gunstige) liggen geruime tijd braak, worden bespoten en geploegd, waardoor opname capaciteit van de bodem vermindert en erosie optreedt. Akkers omzetten in natuurlijk grasland is een effectieve maatregel op hellingen om opnamecapaciteit in de bodem te vergroten.
13	Kleinere percelen, permanent begroeid en zonder bodemverstoring	Het werkt positief voor het bodemleven als de bodem niet verstoord wordt. Gezond bodemleven en permanente begroeiing vergroot de sponswerking. Perceelranden zorgen voor het afremmen en laten re-infiltreren van oppervlakkig afstromend water.
16	Uitbereiding areaal (loof)bossen met ondergroei	Goed ontwikkelde bosgebieden met ondergroei en een rijke strooisel laag kennen een hoge opnamecapaciteit in de bodem ⁴ en vormen daarmee ideale sponsgebieden.

2. Water dat afstroomt door de bodem moet zo lang mogelijk in de bodem blijven

Water wat éénmaal door de bodem afstroomt dient zo lang mogelijk in de bodem te blijven. Dit geldt zowel voor de dunne bodems in het Waalse deel van het stroomgebied als ook de dikkere bodems op hellingen in het Nederlandse deel van het stroomgebied. Drainagesystemen en wegen op hellingen brengen (traag afstromend) ondiep grondwater aan het oppervlak waarna het versneld wordt afgevoerd. Maatregelen die bijdragen om deze interceptie van ondiep grondwater te voorkomen zijn effectief in het verlagen van de piekafvoer en zijn in onderstaande tabel weergegeven.

⁴ Rainfall infiltration and soil hydrological characteristics below ancient forest, planted forest and grassland in a temperate northern climate, Archer et al., 2015

Nummer	Maatregel	Toelichting
11	Drainage verwijderen uit grasland (en bosgebieden) op hellingen	Door ondergrondse drainagebuizen (vaak aanwezig in dikke bodems) en bovengrondse drainerende geulen (vaak aanwezig in dunne bodems) te verwijderen doet water er langer over om het dal te bereiken. De vertragende werking van afvoer door de bodem wordt op deze manier optimaal benut.
Nieuw	Door wegen onderschepte ondiepe grondwaterstromen opnieuw laten infiltreren in de bodem	Wegen in helling brengen bodemafvoer aan de oppervlakte, door deze op te vangen en weer te laten infiltreren kan het water zijn reis door de bodem vervolgen.



Figuur 55: Natuurlijk grasland met dichtgegroeide drainagegeul in Wolfhaag. Ondiepe grondwaterstromen worden nu niet onderschept, blijven langer in de bodem en daarmee een trage waterstroom.

3. Water dat oppervlakkig afstroomt vertragen waardoor kans op re-infiltratie zo groot mogelijk is

Het vertragen van oppervlakkige afstroming op hellingen zorgt ervoor dat water minder snel het stroomgebied verlaat en de kans krijgt te re-infiltreren in de bodem. Uit de afvoeranalyse blijkt dat met name het water vertragen wat van het verhard oppervlak en stedelijke gebieden afstroomt enorm belangrijk is om te komen tot piekreductie.

Nummer	Maatregel	Toelichting
1	Bronherstel in hellingbossen & graslanden (verwijderen drainage bij natuurlijke bronnen)	Vertraagd oppervlakkige afstroming van uittredend grondwater en maakt re-infiltratie in de bodem mogelijk
2	Bosontwikkeling in brongebieden	Uittredend bronwater stroomt vertraagd door bossen met ondergroei af en maakt re-infiltratie in de bodem mogelijk
12	Herstel bosranden en graften	Een goed ontwikkelde bosrand met struweel en kruiden, of een graft in grasland of akker zorgt voor vertraging van oppervlakkige afstroom van water, en de mogelijkheid voor re-infiltratie.
15	Afvoer van (holle) wegen remmen door het geleidelijk te laten afstromen over boshelling of natuurlijk grasland	Oppervlakkige afstroming op wegen is een snelle afvoercomponent die vaak direct op de beek afwatert. Door deze geleidelijk af te laten stromen over beboste of grasland hellingen wordt de afvoer vertraagd en re-infiltratie mogelijk.
Nieuw	Water uit stedelijke gebieden vertraagd afvoeren via natuurlijke terreinen	De enorme hoeveelheden water uit stedelijke conglomeraties op een zo natuurlijk mogelijke manier vertragen. Hoe gaan we dat doen? Nodig



Figuur 56: Bosontwikkeling in brongebied in het Waalse deel van het Geuldal. Uittredend bronwater stroomt traag af en krijgt weer de kans om te re-infiltreren.

6.2 Natuurlijke oplossingen in bovenstroomse en benedenstroomse dalvlaktes

4. Water wat zich onder aan de helling verzamelt en oppervlakkig afstroomt wordt zoveel mogelijk vertraagd

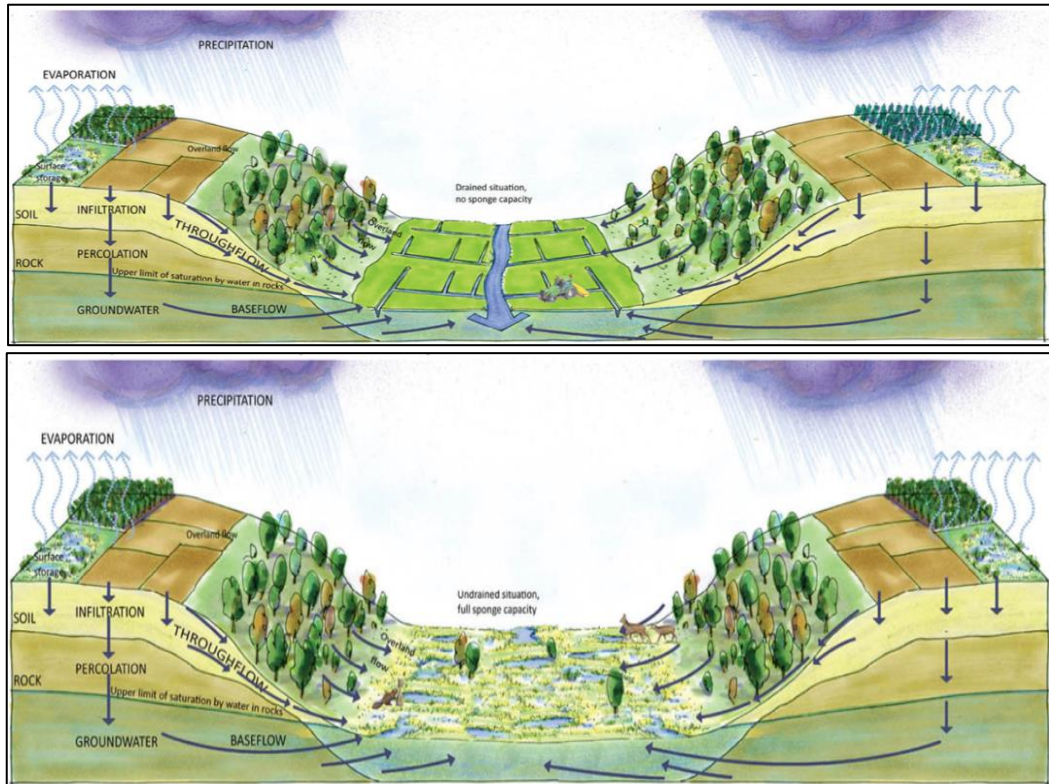
De bovenstroomse dalvlaktes definiëren we hier als de haarvaten van de beeksystemen. De locaties waar het water zich onder aan de hellingen verzamelt, maar nog niet genoeg kracht heeft om een permanente bedding uit te slijten (groen gearceerde gebieden in onderstaande schets).



Figuur 57: Bovenstroomse dalvlaktes waar het water zich verzamelt van de omliggende hellingen en vertraagd kan worden

Nummer	Maatregel	Toelichting
Nieuw	Bovenstroomse dalvlaktes omvormen tot doorstroom moeras door artificiële rivierlopen en drainage te verwijderen	Het water vertragen daar waar het zich verzamelt onderaan de hellingen blijkt een effectieve maatregel om het water te vertragen. Onderzoek van Stroming & Acacia Water toont aan dat de piekafvoer bovenstrooms met 35% kan afnemen bij deze maatregel ⁵ . Ruige vegetatie zorgt voor trage afvoer en 'ponding', het vormen van kleine poeltjes die water tijdelijk bergen.
nieuw	Ruwe vegetatie in droogdalen	Droogdalen met ruwe begroeiing vertragen tijdens extreme neerslagevents oppervlakkig afstromend water,

⁵ <https://europe.wetlands.org/publications/sponge-restoration/>



Figuur 58: Door het verwijderen van artificiële rivierlopen en drainagesystemen ontstaat doorstroommoerassen aan de voet van hellingen. Deze vertragen de afvoer van oppervlakkig afstromende water.



Figuur 59: Op de foto links een referentiebeeld uit het bovenstroomse deel van de Ruhr. Op de foto rechts uit de hoge venen is goed te zien hoeveel water aan de voet van de helling tijdelijk opgeslagen wordt in 'ponds', kleine poeltjes gecreëerd door ruige vegetatie. Alle kleine ponds opgeteld zorgen voor het tijdelijk parkeren van significante hoeveelheden oppervlaktewater.

5. Water wat zich eenmaal in de beek bevindt krijgt ruimte om de dalvlaktes te inunderen

Alle bovenstaande maatregelen zijn erop gericht om te voorkomen dat waterstromen snel de beek bereiken. Is de waterdruppel éénmaal in de beek aangekomen dan is het optimaal functioneren van dalvlaktes essentieel om de piekafvoer benedenstrooms te verlagen. Ruimte voor de hoofdgeul om zijn water opzij af te zetten is zeer effectief om waterstanden benedenstrooms te verlagen. Uit deze studie blijkt dat tijdens het hoogtepunt van de golf ca 5.500.000 m³ water in de vlakte geborgen is. Lokaal kunnen verbeteringen mogelijk zijn om de dalvlakte nog beter te laten functioneren, bijvoorbeeld door het verwijderen of aanpassen van obstakels als dammen en duikers. Dat is een onderwerp voor nader onderzoek.

Nummer	Maatregel	Toelichting
3	Beekbodem verondiepen	Diep ingesneden beken voeren water snel af. Wanneer de beekbodem minder diep gemaakt wordt en water door een bredere bedding afstroomt, stromen dalvlaktes eerder onder en vermindert de hoogte.
4	Ruimte voor meanderen	Meanderen zorgt ervoor dat de snelheid van het water wordt afgeremd. Wanneer het water langzamer stroomt wordt erosie van de beekbodem beperkt en snijdt de beek minder diep in. Meanders zorgen ook voor meer beeklengte en daarmee meer volume voor waterberging.
5	Boomstammen en takken in het water	Waar mogelijk laten liggen van stammen en takken in het water. Deze remmen de doorstroom van de beek en dat vertraagt de piekafvoer benedenstrooms. Fijner materiaal dat zich ophoopt remt de afstroom nog meer.
6	Moerassige zone of ruige begroeiing langs oevers van beken (en in de gehele dalvlakte)	Ontwikkeling van een ruige begroeiing in dalvlaktes remt de snelheid van het water en zorgt voor lagere waterstanden benedenstrooms
Nieuw	Analyse knelpunten inzet dalvlaktes	Knelpunten die zijn opgetreden bij de inzet van dalvlaktes tijdens de piekafvoer kunnen met maatwerk worden aangepakt.
Nieuw	Dalvlakte planologisch beschermen	Dalvlaktes vrijwaren van bebouwing geeft garantie op toekomstige inzet tijdens hoogwater



Figuur 60: Ruig begroeide dalvlakte tussen Valkenburg en Meerssen heeft optimaal gefunctioneerd om piekafvoer in Meerssen te verlagen

6.3 Natuurlijke oplossingen per deelstroomgebied

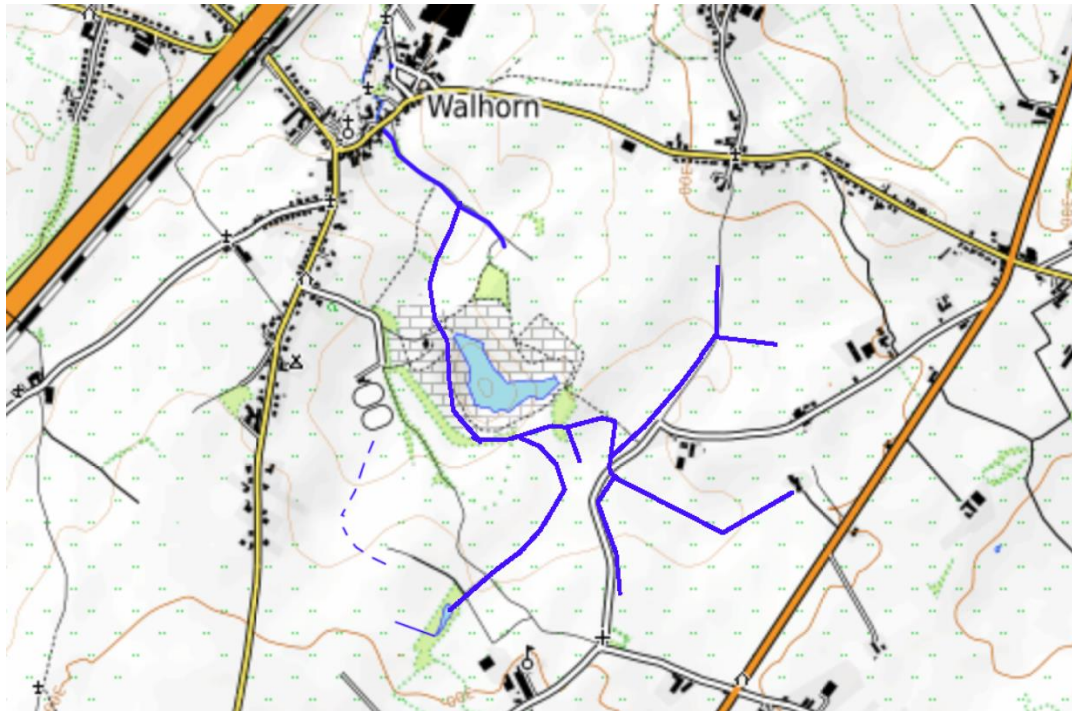
Aan de hand van de herkomstanalyse van de piekafvoer (figuur 51) en de stroomgebied karakteristieken (tabel 7 en 8) kunnen we per deelstroomgebied effectieve natuurlijke maatregelen benoemen om het water vertraagd te laten afstromen. Dit is een eerste analyse op hoofdlijnen. Met vervolgonderzoek kan per deelgebied hier een kwantitatieve onderbouwing op worden gegeven. In het hoofdstuk conclusies zijn in tabel 13 zijn de maatregelen per deelgebied in één tabel weergegeven.

Boven Geul België

In de Boven Geul in België moet volledig worden ingezet op a. het vertragen of re-infiltreren van water uit stedelijke gebieden en wegen en b. op het voorkomen dat water wat in de dunnen bodems afstroomt versnelt aan het oppervlakte komt.

De natuurlijke klimaatadaptieve maatregelen die effectief zijn in dit deel van het stroomgebied:

1. Water uit stedelijke gebieden vertragen en infiltreren in de bodem met natuurlijke oplossingen. Bij voorkeur met oplossingen die het probleem bij de bron aanpakken, zoals ontsteden en water laten infiltreren in tuinen met ondoorlatende bodems (nader uit te werken)
2. Water op wegen en onderschept door wegen geleidelijk laten afstromen over natuurlijke hellingen
3. Bovenstroomse dalvlaktes omvormen tot doorstroom moeras door artificiële rivierlopen en drainage te verwijderen (figuur 60)
4. Bronherstel in hellingbossen & graslanden (verwijderen drainage bij natuurlijke bronnen op hellingen en verondiepen van bronbeekjes)
5. Uitbereiding areaal (loof)bossen met ondergroei (vooral in de deelstroomgebieden Hohnbach en Grun Strasse Bach.
6. Ruimte voor meanderen
7. Boomstammen en takken in het water



Figuur 61: Gegraven rivierlopen bovenstrooms van Walhorn in de haarvaten van de Geul in Wallonië. Het omvormen van deze gebieden in doorstroommoerassen voorkomt dat het uittredende water versnelt wordt afgevoerd.

Beneden Geul België

Voor de Beneden Geul in België geldt in grote lijnen hetzelfde als voor het bovenstroomse deel. Ook hier moet volledig worden ingezet op a. het vertragen of re-infiltreren van water uit stedelijke gebieden en wegen en b. op het voorkomen dat water wat in bodems afstroomt versnelt aan het oppervlakte komt. Vanwege verschillen in geologie en landgebruik zijn er wel accentverschillen met de Boven Geul.

De top 5 van natuurlijke klimaatadaptieve maatregelen die effectief zijn in dit deel van het stroomgebied:

1. Water uit stedelijke gebieden vertragen en infiltreren in de bodem met natuurlijke oplossingen. Bij voorkeur met oplossingen die het probleem bij de bron aanpakken, zoals ontsteden en water laten infiltreren in tuinen met ondoorlatende bodems (nader uit te werken)
2. Water op wegen en onderschept door wegen geleidelijk laten afstromen over natuurlijke hellingen
3. Bovenstroomse dalvlaktes omvormen tot doorstroom moeras door artificiële rivierlopen en drainage te verwijderen
4. Uitbereiding areaal (loof)bossen met ondergroei op hellingen
5. Bronherstel in hellingbossen & graslanden (verwijderen drainage bij natuurlijke bronnen op hellingen en verondiepen van bronbeekjes)
6. Ruimte voor meanderen
7. Boomstammen en takken in het water



Figuur 62: Voorbeeld van boomstammen in bovenstroomse beeklopen die het water vertraagd laten afstromen

Gulpdal

Het Gulpdal moeten we voor prioritaire maatregelen opdelen in de Boven Gulp en Beneden Gulp. Beide delen worden gekarakteriseerd door steile hellingen, alleen is de geologische ondergrond, het areaal verhard oppervlak en het huidige landgebruik anders in beide delen (zie tabel 8). Qua landgebruik zijn in het beneden Gulpdal maïsakkers op hellingen een factor van betekenis. Ook al is het areaal verhard oppervlak en wegen in de Boven Gulp gering, toch blijkt de uit de herkomstanalyse van het water (figuur 51) dat het zeer effectief is dit water te vertragen.

Voor de Boven Gulp zijn de volgende maatregelen effectief:

1. Verwijderen drainage & bronherstel in hellingbossen & graslanden
2. Uitbereiding areaal loofbossen met ondergroei op hellingen
3. Water op wegen en onderschept door wegen geleidelijk laten afstromen over natuurlijke hellingen
4. Water uit bebouwde gebieden vertragen met natuurlijke oplossingen (nader uit te werken)
5. Bovenstroomse dalvlaktes omvormen tot doorstroom moeras door artificiële rivierlopen en drainage te verwijderen
6. Ruimte voor meanderen
7. Boomstammen en takken in het water
8. Moerassige zone of ruige begroeiing langs oevers van beken (en in de gehele dalvlakte)

Voor de Beneden Gulp zijn de volgende maatregelen effectief:

1. Verwijderen drainage & bronherstel in hellingbossen & graslanden
2. (Maïs)akkers op hellingen omzetten in kruidige (struweelrijke) graslanden of loofbossen met ondergroei
3. Water op wegen en onderschept door wegen geleidelijk laten afstromen over natuurlijke hellingen
4. Water uit bebouwde gebieden vertragen met natuurlijke oplossingen (nader uit te werken)
5. Ruwe vegetatie in droogdalen

6. Ruimte voor meanderen
7. Boomstammen en takken in het water
8. Moerassige zone of ruige begroeiing langs oevers van beken (en in de gehele dalvlakte)

Selzerbeek

Net als in alle deelstroomgebieden is het ook in de Selzerbeek van belang het water van verhard oppervlak te vertragen. De volgende maatregelen zijn effectief voor het stroomgebied van de Selzerbeek

1. Water op wegen en onderschept door wegen geleidelijk laten afstromen over natuurlijke hellingen
2. Water uit bebouwde gebieden vertragen met natuurlijke oplossingen (nader uit te werken)
3. Verwijderen drainage & bronherstel in hellingbossen & graslanden
4. (Maïs)akkers op hellingen omzetten in kruidige (struweelrijke) graslanden of loofbossen met ondergroei
5. Bovenstroomse dalvlaktes omvormen tot doorstroom moeras door artificiële rivierlopen en drainage te verwijderen. Benedenstrooms ruige vegetatie in droogdalen.
6. Ruimte voor meanderen
7. Moerassige zone of ruige begroeiing langs oevers van beken (en in de gehele dalvlakte)

Eyserbeek

Voor de Eyserbeek zijn in grote lijnen dezelfde maatregelen effectief als in de Selzerbeek, waarbij het omzetten van maïsakkers in een ander landgebruik een groter effect zal hebben op het verminderen van de piekafvoer

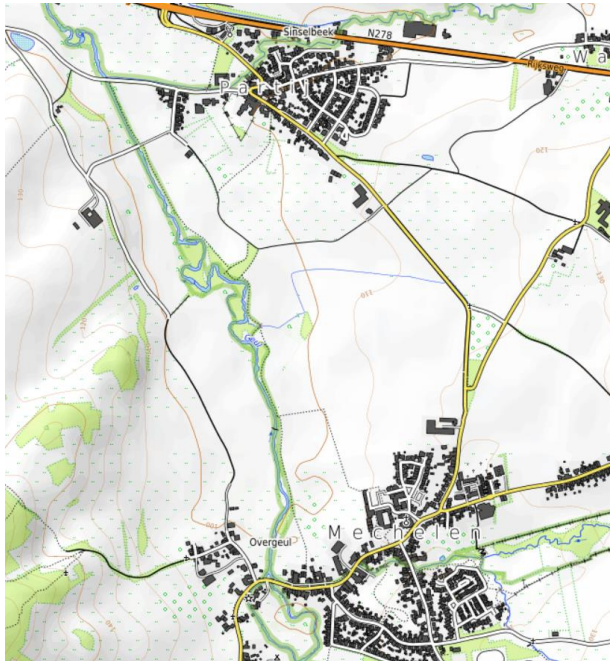
1. Water op wegen en onderschept door wegen geleidelijk laten afstromen over natuurlijke hellingen
2. Water uit stedelijke gebieden vertragen met natuurlijke oplossingen (nader uit te werken)
3. (Maïs)akkers op hellingen omzetten in kruidige (struweelrijke) graslanden of loofbossen met ondergroei
4. Verwijderen drainage & bronherstel in hellingbossen & graslanden
5. Bovenstroomse dalvlaktes omvormen tot doorstroom moeras door artificiële rivierlopen en drainage te verwijderen. Benedenstrooms ruige vegetatie in droogdalen.
6. Ruimte voor meanderen
7. Moerassige zone of ruige begroeiing langs oevers van beken (en in de gehele dalvlakte)

Boven Geul Nederland

In het boven Geuldal in Nederland worden de dalvlaktes uitermate belangrijk, naast het verharde oppervlak en de maïspcelen. De volgende natuurlijke maatregelen zijn effectief

1. Maatwerk om knelpunten bij inzet dalvlakte aan te pakken. Denk hierbij aan kades verwijderen en hermeandering.
2. Verwijderen drainage & bronherstel in hellingbossen & graslanden
3. Water uit stedelijke gebieden vertragen met natuurlijke oplossingen (nader uit te werken)
4. Water op wegen en onderschept door wegen geleidelijk laten afstromen over natuurlijke hellingen
5. (Maïs)akkers op hellingen omzetten in kruidige (struweelrijke) graslanden of loofbossen met ondergroei

6. Dalvlakte planologisch beschermen
7. Water vertragen door bomen in dalvlaktes



Figuur 63: Tussen Mechelen en Partij is een traject waar de Geul is rechtgetrokken. Hermeandering en een betere ontwikkeling van de dalvlaktes op dit traject lijken kansrijke maatregelen.

Beneden Geul Nederland

In het beneden Geuldal in Nederland zijn de dalvlaktes uitermate belangrijk. De volgende natuurlijke maatregelen zijn effectief

1. Maatwerk om knelpunten bij inzet dalvlakte aan te pakken. Denk hierbij aan obstructies verwijderen zoals dammen.
2. Verruwing dalvlaktes, zorgen dat de dalvlakte het water zo lang mogelijk vasthoudt
3. Dalvlakte planologisch beschermen
4. Water uit stedelijke gebieden vertragen met natuurlijke oplossingen (nader uit te werken)
5. Water op wegen en onderschept door wegen geleidelijk laten afstromen over natuurlijke hellingen
6. (Maïs)akkers op hellingen omzetten in kruidige (struweelrijke) graslanden of loofbossen met ondergroei

7 Conclusies studie Geulhoogwater

- 1) Belangrijke oorzaak voor de extreme hoogwatersituatie is de combinatie van:
 - a) De lange duur van de neerslagperiode: hierdoor vielen steeds meer waterstromen (langzame en snelle) samen.
 - b) De grote hoeveelheden neerslag in het hele stroomgebied. Vrijwel overal viel ca 15 cm en er was weinig verschil tussen de deelstroomgebieden.
 - c) De relatief hoge intensiteit (5 – 10 mm/u), waardoor gebieden met een geringe infiltratiecapaciteit veel water leverden.

Belangrijk verschil met andere situaties van wateroverlast in het Heuvelland is dat die meestal veroorzaakt worden door extreme buien waarbij de neerslagintensiteit op kan lopen tot 100 mm/uur, gedurende een veel kortere tijd.

- 2) Het Waalse deel van het stroomgebied is hoofdleverancier van het water. 65 - 75% van het water in de golf was afkomstig van bovenstrooms van Cottessen. Binnen het Waalse traject is dan weer het meest bovenstroomse deel (bovenstrooms van Kelmis) de leverancier van het meeste water. Het areaal van dit deel is slechts 20% van het totale areaal, maar het leverde 50% van het water tijdens de golf.
- 3) De mate waarin water wordt vastgehouden wordt sterk bepaald door het karakter van de ondergrond en bodem. Daar waar de geologische ondoorgrond uit ondoorlatende zand- en leistenen (carboon en devoon) bestaat, met daarop dunne bodems, zoals in het Waalse Boven-Geuldal, wordt weinig water vastgehouden. Gebieden met een ondergrond uit het krijt-tijdperk, waar de Aker groenzanden liggen, hebben een iets betere, maar nog steeds geen goed doorlatende ondergrond; maar vaak wel een dikkere bodem. Tenslotte zijn het de meer recente grind- zand en löss-afzettingen die goed tot zeer goed doorlatend zijn en in staat zijn om veel water vast te houden.
- 4) Zelfs tijdens deze voor Nederlandse begrippen extreme neerslagperiode bereikte nog altijd een fors deel van het regenwater niet de beek omdat het in het terrein en vooral ondergronds werd vastgehouden. Dit is vooral in het Nederlandse deel van het stroomgebied het geval: 80 – 85% van de gevallen neerslag is daar niet afgestroomd. In het Waalse gedeelte is dit percentage lager, maar ook daar werd nog altijd 50 - 65% geborgen.
- 5) De mate waarin neerslag wordt vastgehouden in de bodem blijkt in grote delen van het stroomgebied, zelfs tijdens deze event, nog altijd erg groot te zijn. De vaak gehoorde stelling dat de bodem verzadigd was en dat daardoor het hoogwater kon ontstaan, is daarom ook niet van toepassing. Tot het eind van de neerslagperiode toe bleef de bodem vrijwel overal veel water opnemen en van oppervlakkige afstroom over een verzadigd geraakte bodem is waarschijnlijk op maar weinig plaatsen sprake geweest. Dit betekent dat de sponswerking van de meeste bodems voldoende groot was en ook dat er nog voldoende ruimte zal zijn geweest om water dat wel oppervlakkig afstroomde (vanaf verhard oppervlak en maïsakkers) lokaal te laten infiltreren.
- 6) Een belangrijke voorwaarde bij conclusie 5 is wel dat het water de tijd krijgt om in de bodem weg te zakken. Verhard oppervlak (wegen, bebouwd oppervlak etc) voldoet daar niet aan en ook akkers met gewassen die pas laat kiemen (maïs) kunnen het water niet of slechts ten dele onderscheppen, omdat de bodem er eerder in de zomer verslemt kan raken. In deze gebieden gaat, naarmate de intensiteit toeneemt, een steeds groter deel over het land afstromen en het is dan binnen korte tijd (minder dan een uur) in het dal en in de beek. Terwijl water dat wel in de bodem kan dringen er veel langer (dagen tot weken) over zal doen.
- 7) Uit de neerslag-afvoer-analyse blijkt dat het verhard oppervlak een groot deel van het water in de hoogwatergolf geleverd kan hebben. In het eerste deel van de golf was dit waarschijnlijk zelfs vrijwel al het water. Naarmate de tijd vorderde nam het aandeel van andere waterstromen, die

langer onderweg zijn, toe, maar zolang het intensief bleef regenen bleef het aandeel vanaf verhard oppervlak erg groot. Dit blijkt o.a. ook uit het feit dat de hoogste stand vrijwel direct werd bereikt zodra het stopte met regenen en de aanvoer vanaf verhard oppervlak stilviel.

- 8) Deelstroomgebieden met een relatief hoog aandeel vanaf verhard oppervlak zijn: het Beneden-Geuldal vanaf Wijlre tot aan Meerssen en de Eyserbeek. Deelstroomgebieden waar andere waterstromen na verloop van tijd belangrijker worden zijn steeds gebieden met een slecht doorlatende ondergrond. Het water is hier naar verwachting nog wel relatief ondiep geïnfilteerd in de bodem en vervolgens ondergronds afgevoerd, maar vervolgens door verzadiging onder aan de helling uitgetreden en naar de beek gestroomd. Gebieden die gevoelig zijn voor deze snelle ondergrondse afvoer en uittredende subsurface flow zijn: vooral het bovenstroomse deel van de Waalse Geul en iets mindere mate het benedenstroomse deel van de Waalse Geul, het Boven-Gulpdal en delen van het Nederlandse deel van het Boven-Geuldal en de Selzerbeek.
- 9) De verwachting is dat ook maïsakkers voor oppervlakkige afstroom en een snelle wateraanvoer naar de beek hebben gezorgd. We leiden dit af uit filmbeelden van tijdens de event en uit erosiesporen in de akkers. Maïs vinden we vrijwel alleen in het Nederlandse deel van het stroomgebied. Het areaal van de onderzochte deelstroomgebieden is nooit groter dan ca 5%, maar in kleinere sub-stroomgebieden (bv het Pesakendal) kan het oplopen tot 25% van het grondgebruik. Dergelijke gebieden vinden we vooral in het Beneden-Gulpdal, het Beneden-Geuldal en langs de Eyserbeek
- 10) De verwachting is dat tijdens het event de neerslagintensiteit zelden zo hoog is geweest dat in graslanden en dichtbegroeide akkers het water oppervlakkig is gaan afstromen. Als dat wel het geval was geweest was de afvoer (zeker in de Nederlandse deelstroomgebieden) nog veel verder opgelopen. Ditzelfde geldt voor bossen. De opnamecapaciteit van de combinatie van: het bebladerde kronen dak, eventuele ondergroei, de strooisellaag en de bodem, was waarschijnlijk ruim voldoende om de neerslag zover te vertragen dat het niet aan de hoogwatergolf heeft bijgedragen. Het areaal bos is in het Geuldal echter relatief klein en het verminderende effect is daarom niet vast te stellen.
- 11) Een bijzondere effectieve reductie van de hoogwatergolf is vooral in Nederland veroorzaakt door de dalvlakte van de Geul. Deze vlakte is relatief erg breed en daarom kon een groot areaal overstromen, wat de hoogte van de piek sterk heeft gereduceerd. Iedere m³ extra die van bovenstrooms werd aangevoerd, stroomde de vlakte in en zorgde er zo voor dat de waterstand stroomafwaarts niet verder steeg. Uit de waterstandsgegevens blijkt dat ten tijde van het passeren van de piek er zoveel water in de dalvlakte werd geborgen dat de hoogwatergolf daarom vrijwel niet meer is toegenomen in de hoogte, maar alleen nog in de duur. Zonder deze bufferende werking van het Geuldal was waterstand in Valkenburg en Meerssen nog veel hoger geworden. Verder bovenstrooms in België is het effect van de bufferende werking van de dalvlakte veel minder groot omdat de dalvlakte er vrijwel ontbreekt (bovenstrooms van Kelmis) of minder breed is (tussen Kelmis en Sippenaecken). De verwachting is overigens wel dat met name in het traject tussen Kelmis en Sippenaecken de bufferende werking kan worden vergroot door de dalvlakte eerder te laten inunderen.
- 12) Het verlagen van de dalvlakte om daarmee meer water te kunnen bufferen is geen effectieve maatregel om de hoogwatergolf te reduceren. Deze gebieden zouden dan namelijk aan het begin van de golf al volstromen en voor reductie is juist extra ruimte nodig rond het moment dat de piek passeert. Alleen verlaging op plaatsen waar de dalvlakte niet is overstroomd zal wel bijdragen, maar dit kan ook worden bereikt door de bedding op te hogen zodat het water eerder uit treedt.

Waar te beginnen met maatregelen:

Maatregelen (NBS) zijn effectief als ze bijdragen aan de onderstaande uitgangspunten op plateaus, hellingen, bovenstroomse en benedenstroomse dalvlaktes. We vertragen daarbij de reis van een regendruppel van bron tot monding.

1. *Opnamecapaciteit van de bodem wordt optimaal benut*
2. *Water dat afstroomt door de bodem moet zo lang mogelijk in de bodem blijven*
3. *Water dat oppervlakkig afstroomt op hellingen wordt vertraagd waardoor re-infiltratie mogelijk wordt*
4. *Water wat zich onder aan de helling verzamelt en oppervlakkig afstroomt wordt zoveel mogelijk vertraagd*
5. *Water wat zich eenmaal in de beek bevindt krijgt ruimte om de dalvlaktes te inunderen*

Speciale aandacht hierbij verdienen de onderstaande punten:

- Verhard oppervlak (steden en wegen) leverde een groot deel van het water, zorg dat dit kan re-infiltreren voordat het de beek bereikt
- Zorg ervoor dat het water wat in de dunne Belgische bodems is geïnfiltreerd niet door artificiële maatregelen (drainage) weer aan het oppervlak komt.
- Water wat in bovenstroomse dalvlaktes aan het oppervlak komt kan worden vertraagd in moerasgebieden (zonder drainage)
- Maak beter gebruik van de sponswerking van het Nederlandse deel van het stroomgebied
- Maïsvelden op hellend terrein zijn in Nederland een belangrijke bron van water omdat daar ook oppervlakkige afstroom optreedt.
- De absorberende kwaliteiten van bos(bodems) en (natuurlijke) graslanden beter benutten (nog nader te onderzoeken)
- De dalvlakte heeft boven verwachting gewerkt, zorg ervoor dat dat zo blijft.
- Iedere liter die vertraagd wordt helpt. Het is de optelsom van veel kleine beetjes (die het probleem mede zo groot hebben gemaakt.
- In beeld brengen wat natuurlijke maatregelen doen om het water te vertragen kan helpen bij bewustwording en draagvlak.
- Meer metingen verrichten in natuurlijkgebieden om te onderbouwen hoeveel water vertraagd wordt

In de onderstaande tabel is een overzicht weergegeven van effectieve natuurlijke maatregelen per deelstroomgebied. Deze kunnen in een vervolgfase kwantitatief onderbouwd worden zodat we gericht natuurlijke maatregelen kunnen inbrengen als oplossing voor toekomstige hoogwaterproblemen.

Kansrijke natuurlijke maatregelen	Boven Geul Wallonië	Tüljebach	Hohnbach	Grun-strassebach	Beneden Geul Wallonië	Boven-Geul tot Mechelen	Selzerbeek	Wolfhagerbeek	Eyserbeek	Boven-Geul vanaf Mechelen	Boven Geul
Water uit stedelijke gebieden vertragen met natuurlijke oplossingen											
Water op wegen onderscheppen en geleidelijk laten afstromen over natuurlijk begroeide hellingen											
Bronherstel in hellingbossen & graslanden (verwijderen drainage bij natuurlijke bronnen op hellingen)											
Bovenstroomse dalvlaktes omvormen tot doorstroom moeras door artificiële rivierlopen en drainage te verwijderen											
Uitbereiding areaal (loof)bossen met ondergroei											
(Mais)akkers op hellingen omzetten in kruidige (struweelrijke) graslanden of loofbossen met ondergroei											
Ruwe vegetatie droogdalen											
Moerassige zone of ruige begroeiing langs oevers van beken (en in de gehele dalvlakte)											
Ruimte voor meanderen											
Boomstammen in het water											
Maatwerk om knelpunten bij inzet dalvlakte aan te pakken											
Dalvlakte planologisch beschermen											

Tabel 13: Kansrijke natuurlijke maatregelen per deelstroomgebied

Bijlagen 1

Neerslagmetingen van de verschillende afvoerstations (mm)

Date	type		13-jul	14-jul	15-jul	Totaal (mm)
Meerssen	Wu	Beneden-Geul	31	42	11	84
Houthem	Wu	Beneden-Geul	43	81	17	140
Valkenburg	Wu	Beneden-Geul	45	74	18	137
Valkenburg	KNMI ⁶	Beneden-Geul	80	54	9	143
Ubachsberg	Wu	Beneden-Geul	78	98	22	198
Ubachsberg	KNMI	Beneden-Geul	98	84	8	190
Wijlre	Wu	Beneden-Geul	75	99	16	190
Gulpen	Wu	Gulp & boven Geul	48	81	12	141
Gulpen	Wu	Gulp & boven Geul	64	85	13	162
Noorbeek	KNMI	Gulp	88	59	12	159
Slenaken	Wu	Gulp	51	85	14	150
Remersdaal	Wu	Gulp	23	89	22	135
St Pieters Voeren	België	Gulp	25	81	22	129
Battice	België	Gup	52	88	24	164
Hombourg	Wu	Gulp & Waalse-Geul ben.	22	101	24	147
Moresnet	Wu	Waalse Geul beneden	23	103	39	164
Gemmenich	Wu	Waalse Geul beneden	19	87	29	135
Lonzen	Wu	Waalse Geul boven	51	100	44	195
Hauset	Wu	Waalse Geul boven	45	112	42	199
Eynatten	Wu	Waalse Geul boven	20	103	40	163
Kelmis	Wu	Waalse Geul boven	23	92	28	143
Epen	radar	Boven Geul	30	78	12	120
Epen	KNMI	Boven Geul	42	68	6	116
Epen	Wu	Boven Geul	36	87	20	143
Mechelen	Wu	Boven Geul & Selzerbeek	57	102	23	183
Vaals	Wu	Selzerbeek	32	114	42	187
Vaals	KNMI	Selzerbeek	51	74	7	132
Vijlen	Wu	Selzerbeek	45	91	25	160
Aachen	Duitsland	Selzerbeek	40	90	30	159
Bocholtz	Wu	Eyserbeek	47	88	25	160
Eys	Wu	Eyserbeek	67	96	22	185

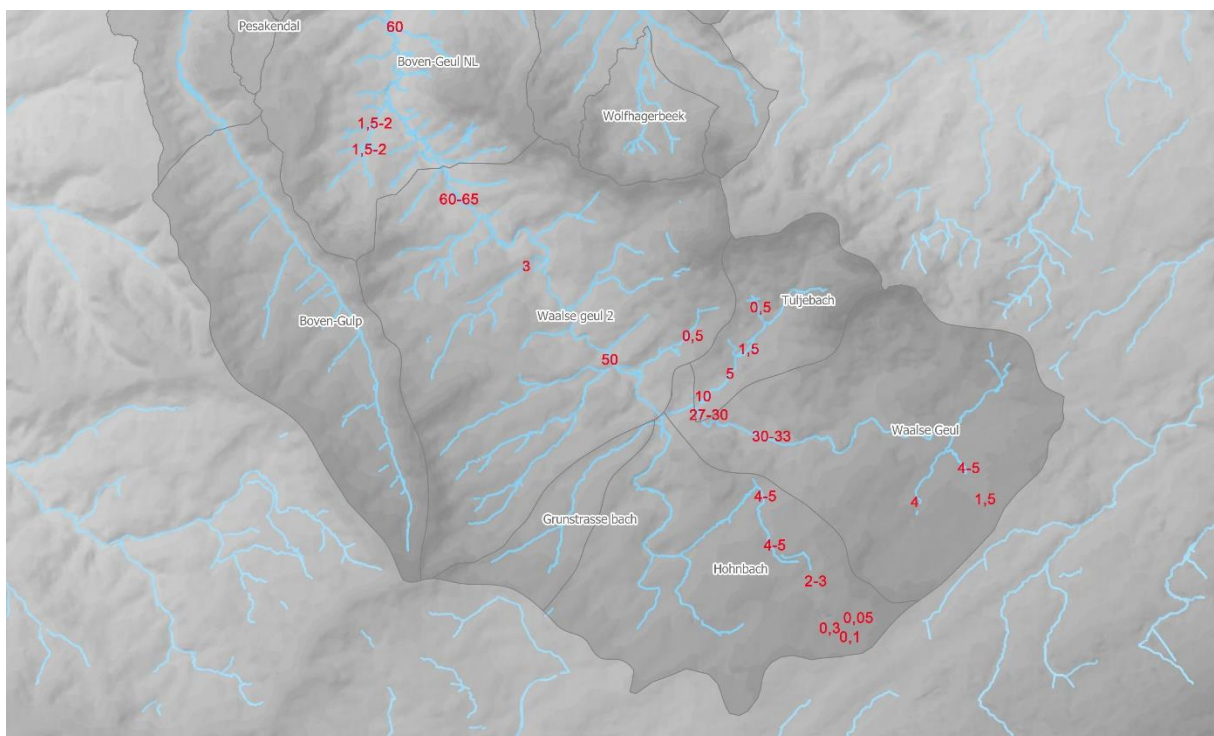
⁶ Van de KNMI stations wordt de neerslag afgetapt om 10 uur 's morgens. De dagwaarden zijn daarom niet vergelijkbaar met de waarden van de andere stations die van 1 uur tot 24 uur meten.

Bijlagen 2

In het bijgevoegde kaart zijn de gereconstrueerde afvoeren zichtbaar naar aanleiding van het veldbezoek van 29 september 2021. Aan de hand van vloed markeringen kon de waterstand worden afgeleid. De waarden liggen in de lijn van de dichtstbijzijnde afvoerstations.



Figuur 63: Vloedmarkeringen waaruit de afvoer is geschat tijdens een veldbezoek in september 2021



Figuur 64: Geschatte afvoeren naar aanleiding van veldbezoek. Waarden liggen in de lijn van de verwachting met de afvoerstations die daar benedenstrooms van liggen