

Sponswerking van Landschappen in Nederland



Sponswerking van Landschappen in Nederland

Auteur(s)

Ellis Penning
Angela Klein
Nathalie Asselman
Perry de Louw
Vince Kaandorp
Gerben van Geest
Vera Kingma
Eva Schoonderwoerd

Sponswerking van Landschappen in Nederland

Opdrachtgever	SITO-PS 2023 KAM 13 Kennisprogramma Wateroverlast
Contactpersoon	
Referenties	
Trefwoorden	Sponswerking, Wateroverlast, Watertekort, Hydrologie, Systeemfunctioneren

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	29-01-2024
Projectnummer	11209224-003
Document ID	11209224-003-ZWS-0001
Pagina's	112
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Ellis Penning	
	Angela Klein	
	Nathalie Asselman	
	Perry van der Louw	
	Vince Kaandorp	
	Gerben van Geest	
	Vera Kingma	
	Eva Schoonderwoerd	

Samenvatting

Doel van deze studie

Sponswerking is het vermogen van het landschap om water vast te houden tijdens perioden van neerslagoverschot, om als buffer te dienen voor droge periodes. Als klimaatadaptatiemaatregel is er tegenwoordig veel aandacht voor het herstel van de 'sponswerking' van het Nederlandse landschap.

In deze studie is een overzicht gegeven van de huidige en mogelijke sponswerking in karakteristieke Nederlandse landschappen, waarbij is aangegeven hoe de sponswerking zou kunnen worden vergroot, zodat dit ook als 'maatregel' daadwerkelijk kan worden ingezet.

Werkwijze

Dit rapport beschrijft de sponswerking voor 6 karakteristieke landschappen in Nederland:

- 1 Het heuvellandschap in Limburg
- 2 De hoge zandgronden
- 3 De peilgestuurde klei- en veengebieden/polders
- 4 De stroomgebieden van de Rijn en Maas
- 5 De grote meren en plassen als reservoirs
- 6 Het stedelijk gebied

Daarnaast is voor 2 casestudies een kwantitatieve uitwerking gemaakt van sponswerking, zijnde de Geul in het heuvelland – met een focus op wateroverlast – en de Chaamse beken op de hoge zandgronden – met een focus op droogte. In beide gevallen is gekeken hoe stroomgebied-brede inzet van maatregelen de sponswerking beïnvloeden, en hoe dit uitwerkt onder zowel natte als droge omstandigheden. Daarbij zijn ook verschillende type neerslaggebeurtenissen doorgerekend.

Resultaten

Het Nederlandse landschap werkt op veel locaties al als een spons. Daar waar dit sponswerkende vermogen verloren of verminderd is door historische veranderingen in het landschap, zijn maatregelen nodig om deze sponswerking weer af te stemmen met de huidige en toekomstige diverse gebruiksfuncties van het landschap. In het ideale geval leidt vergroting van de sponswerking tot een vermindering van zowel wateroverlast als droogte, maar dit is niet vanzelfsprekend.

Per karakteristiek deelgebied in Nederland zijn verschillende hoofdconclusies te trekken met betrekking tot de huidige en potentiële sponswerking:

- In het Limburgse heuvellandschap is de natuurlijke sponsfunctie om pieken op te vangen al relatief groot, mede ook door het vermogen van de ondergrond om snel water op te nemen. Zo is gebleken dat in juli 2021 in het stroomgebied van de Geul 'maar' 30% van de neerslag direct is afgevoerd. De rest is opgeslagen in de bodem en het vaak diepe grondwater.
- Vooral op de hoge zandgronden is er door de historische ingrepen in het landschap om drainage te vergroten, veel sponswerking verloren gegaan. Er is gelukkig ook potentieel om de sponsfunctie te herstellen vooral voor het verminderen van droogteproblematiek. Zo kan in de Chaamse beken (Noord-Brabant) het verwijderen van de drainage in een bufferzone rond de beken resulteren in een grondwaterstandsverhoging van ongeveer 20 cm. Tegelijkertijd moeten de neveneffecten van dit soort droogte-maatregelen tijdens extreme regenbuien onderzocht worden. In het voorbeeld van de Chaamse beken

resulteren de doorgerekende droogtmaatregelen in vergrote kans op extra water op het maaiveld en een geschatte toename van de afvoer van zo'n 33% bij een T=100 neerslaggebeurtenis (de spons is eerder 'vol').

- Voor de grote rivieren geldt dat een goed begrip over de werking van het systeem in onze bovenstroomse buurlanden belangrijk is om te begrijpen hoe afvoeren in de toekomst verder zullen wijzigen. Ook in die gebieden zal worden nagedacht of het verder vasthouden van water voor zomerdroogte mogelijk is, wat mogelijk invloed heeft op de afvoeren richting Nederland. Een goede internationale dialoog hierover is essentieel.
- In de peilgestuurde veenweide- en kleipolders is het gereguleerde peil de belangrijkste sleutelfactor in het functioneren van het systeem. Bewuste keuzes in het al dan niet opzetten of wijzigen van deze peilen kan ook voortkomen uit andere doelen zoals het verminderen van CO₂ uitstoot of de wensen van de gebruiksfuncties in het gebied. Het is lastig om in dit kunstmatige systeem de sponswerking voor zowel wateroverlast als droogte te vergroten, want meer water vasthouden in de winter ten behoeve van levering in de zomer, zal de kans op wateroverlast vergroten.
- De grote meren en plassen zijn onderhevig aan gebruiks-gerelateerde keuzes in de zomerse en winterse streefpeilen. De sponswerking van deze waterlichamen is daarmee vaak ingericht op het kunnen opvangen van te veel water in de winter en het beschikbaar stellen van water voor de droge zomerperiode naar het achterland. Dat is goed voor zowel droogte- als wateroverlastproblematiek, maar hierdoor ontstaat wel een tegennatuurlijk peil, wat voor natuurdoelen ongunstig is. Een goede afweging is hierin dus nodig
- In het stedelijk gebied zijn veel mogelijkheden voor kleinschalige aanpassingen in de inrichting om vooral regenwater op te kunnen vangen en te laten infiltreren in het grondwater. De aard van deze maatregelen is vaak veel technischer dan buiten de bebouwde kom, als gevolg van het gebrek aan ruimte.

Afwegingen voor inzet op sponswerking voor gecombineerde doelen

De afweging van maatregelen ter bevordering van de sponswerking dient het functioneren onder verschillende omstandigheden en in alle jaargetijden te beschouwen, zodat de werking van de beoogde maatregelen zowel in perioden met extreme neerslag als tijdens langdurige droogte duidelijk wordt. Naast waterkwantiteitsbeheer spelen er in een gebied ook nog andere beleidsopgaven zoals het halen van doelen op het gebied van terrestrische en aquatische natuur en waterkwaliteit. Dit pleit voor het opzetten van een integraal afwegingskader waarin niet alleen verschillende type waterkwantiteitsopgaven (wateroverlast en droogte), maar ook waterkwaliteits- en biodiversiteitsopgaven gezamenlijk worden beschouwd.

Kwantificering van sponswerking

Er zijn veel verschillende modellen en technieken beschikbaar om sponswerking in gebieden te kwantificeren. Deze variëren van landelijke modellen (Landelijk Hydrologisch Model, Landelijk Sobek Model) tot regionale modellen en lokale modellen beschikbaar voor specifieke deelgebieden van individuele waterbeheerders. Het detailniveau van deze modellen varieert, zowel in ruimtelijke resolutie, de tijdstappen waarmee wordt gerekend en de fysische processen waarop wordt gefocust (grondwater/bodem/oppervlaktewater). Modellen zijn veelal ontstaan uit de noodzaak om één type fenomeen goed te kunnen beschouwen, en zijn ofwel op langzamere (droogte-grondwater) of snelle processen (wateroverlast-oppervlaktewaterdynamiek) gericht. De online danwel offline koppeling tussen modellen voor verschillende domeinen en verschillende schalen is een onderwerp waar momenteel veel aandacht voor is. Zeker voor het goed kwantificeren van combinaties van verschillende type gebeurtenissen en specifieke kleinschalige maatregelen zijn nog verdere modelontwikkelingen nodig. Het verschil in tijdstappen tussen modellen voor piekbuien (uurbasis of minuutbasis) en modellen voor grondwaterrespons (dagbasis) maken deze koppeling geen sinecure.

Kwantificering van sponswerking in twee casestudies

Uit de twee casestudies (de Geul en de Chaamse Beken) blijkt dat het belangrijk is duidelijk te zijn over het type neerslaggebeurtenis dat wordt beschouwd en dat het nodig is om meerdere gebeurtenissen van verschillend karakter mee te nemen in de evaluatie van het effect van sponswerkingsmaatregelen. Er is berekend dat het vasthouden van water in het landschap voor droogte kan ertoe leiden dat er tijdens perioden met extreme neerslag meer wateroverlast kan optreden. Dit is het gevolg van de hogere grondwaterstanden, waardoor er minder ruimte over is om water in de bodem te bergen (de spons is al gedeeltelijk gevuld). Ook wanneer door eerdere neerslag de bodem al gedeeltelijk verzadigd is, zal er minder ruimte zijn om extra water te bergen en zal een groter deel van de neerslag afstromen. Zeker voor extreme neerslaggebeurtenissen kan gelden dat het alleen vertrouwen op natuurlijke sponswerking van het landschap niet voldoende is en aanvullende technische maatregelen of regelingen nodig zullen zijn. Tijdens dit soort gebeurtenissen is de kans immers groot dat de bodem op een zeker moment verzadigd raakt en een deel van de neerslag oppervlakkig afstroomt.

Met simulatiemodellen zijn de effecten van grootschalige veranderingen in landgebruik op de sponswerking in het landschap inzichtelijk te maken. Deze gevoeligheidsanalyse van het landschap voor verschillende type maatregelen geeft inzicht in de maximaal haalbare effecten als maatregelen op grote schaal worden geïmplementeerd. De twee casestudies tonen dat grootschalige veranderingen in drainagesystemen en herbebossing inderdaad bij kunnen dragen aan de verhoging van sponswerking in een gebied. Echter, sommige maatregelen kunnen een positief effect hebben voor het ene doel (droogte of reductie in piekafvoer), maar negatief uitwerken voor het andere doel (wateroverlast/basisafvoer). Herbebossing leidt bijvoorbeeld niet alleen tot vertraagde afvoer van regenwater, ze verdampen ook meer in de zomerperiode. Dit maakt dat herbebossing kan leiden tot een verlaging van de basisafvoer in de zomer, wat weer invloed kan hebben op het aquatisch ecosysteem in de beek, zeker als de dimensies van de beek niet in lijn zijn met deze verwachte afvoer. Het verwijderen van drainage helpt grondwaterstanden te verhogen, maar dit kan in het natte seizoen ook betekenen dat er meer wateroverlast optreedt omdat de bodem (de spons) al deels gevuld is met water.

De twee casestudies tonen aan dat het nodig is om de effecten van maatregelen te beschouwen in dit bredere denken van natte en droge periodes, en suggereert ook een doorvertaling te gaan maken naar de invloed hiervan op waterkwaliteit en ecologie (in deze studie nog niet gedaan). In het voorbeeld van de Geul geeft de kwantificering ook aan waar mogelijke grenzen van de sponswerking liggen: bij minder extreme buien leidt herbebossing tot lagere piekafvoeren. Echter, bij zeer extreme buien valt er zo veel neerslag dat zelfs als het hele gebied van de Geul bebost zou zijn, er toch sprake blijft van een hoge piekafvoer die kan leiden tot wateroverlast en overstromingen.

Aanbevelingen voor vervolg

Uit deze studie komt een drietal kern-aanbevelingen naar voren:

- 1 Maak een **richtlijn voor waterschappen** die stimuleert dat waterbeheermaatregelen worden geëvalueerd op droogte, wateroverlast en biodiversiteit/waterkwaliteit en definieer een **overkoepelend afwegingskader**, zodat verschillende doelen evenwichtig kunnen worden afgewogen. Systeemkennis en modelkennis zijn daarbij de belangrijkste ingrediënten, die op deelaspecten nog verdere verbetering behoeven.

- 2 Verbeter de **kwantitatieve evaluatie van de verschillende type maatregelen** die de sponswerking van landschappen kunnen vergroten. In deze studie zijn enkele typen maatregelen doorgerekend, maar nog lang niet alle mogelijke type maatregelen zijn gekwantificeerd. Dit komt mede doordat de nu gebruikte modellen kleinschalige maatregelen niet eenvoudig kunnen doorrekenen.
- 3 Start met het maken van een **gezamenlijke database om succesverhalen, lessons-learned en bewijslast** bijeen te brengen van verschillende type maatregelen en hun impact op sponswerking. Monitor geïmplementeerde maatregelen en evalueer hun effect zowel lokaal als in samenhang met andere maatregelen op landschapsschaal op droogte, wateroverlast, waterkwaliteit en biodiversiteit en vertaal dit ook naar socio-economische kosten en baten.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	10
1.1	Probleemschets	10
1.2	Doel	11
1.3	Kennisvragen	12
1.4	Leeswijzer	12
2	Algemene aspecten sponswerking	13
2.1	Algemene definitie van sponswerking	13
2.2	Opmerkingen bij de definitie	13
2.3	Type maatregelen horende bij vergroten sponswerking	14
2.4	Sponswerking in verschillende karakteristieke deelgebieden in NL	16
2.4.1	Het Nederlandse landschap als geheel	16
2.4.2	Deelgebieden	18
2.4.3	Verschillende type neerslaggebeurtenissen	19
2.5	Type sponsmaatregelen	20
2.5.1	Categorieën van sponsmaatregelen	20
2.5.2	Ervaringen uit het buitenland	26
3	Deelgebieden	30
3.1	Heuvelland Limburg	30
3.1.1	Algemene landschapskenmerken (bodem, geologie, landgebruik, topografie)	30
3.1.2	Belangrijkste hydrologische processen en watersysteemkenmerken	33
3.1.3	Sponswerking	34
3.1.3.1	Natuurlijke sponswerking	34
3.1.3.2	Veranderingen in sponswerking	34
3.1.3.3	Mogelijke maatregelen om sponswerking te herstellen of te vergroten	35
3.1.3.4	Voorbeeldproject(en) in het heuvellandschap	36
3.2	Hoge Zandgronden	38
3.2.1	Algemene landschapskenmerken (bodem, geologie, landgebruik, topografie)	38
3.2.2	Belangrijkste hydrologische processen en watersysteemkenmerken	38
3.2.3	Sponswerking	39
3.2.3.1	Natuurlijke sponswerking	39
3.2.3.2	Veranderingen in sponswerking	41
3.2.3.3	Mogelijke maatregelen om sponswerking te herstellen of te vergroten	41
3.2.3.4	Voorbeeldprojecten	43
3.3	De stroomgebieden van de Rijn en de Maas	45
3.3.1	Algemene landschapskenmerken (bodem, geologie, landgebruik, topografie)	45
3.3.2	Belangrijkste hydrologische processen en watersysteemkenmerken	49
3.3.3	Sponswerking	50
3.3.3.1	Natuurlijke sponswerking	50
3.3.3.2	Veranderingen in sponswerking	53

3.3.3.3	Mogelijke maatregelen om sponswerking te herstellen of te vergroten	53
3.4	Peil gestuurde klei- en veengebieden/polders	54
3.4.1	Algemene landschapskenmerken (bodem, geologie, landgebruik, topografie)	54
3.4.2	Belangrijkste hydrologische processen en watersysteemkenmerken	55
3.4.3	Sponswerking	56
3.4.3.1	Voorbeeldprojecten	57
3.5	Meren/plassen als reservoirs	59
3.5.1	Algemene landschapskenmerken (bodem, geologie, landgebruik, topografie)	59
3.5.2	Sponswerking	61
3.5.2.1	Natuurlijke sponswerking	61
3.5.2.2	Veranderingen in sponswerking en mogelijke maatregelen om sponswerking te herstellen of te vergroten	62
3.6	Stedelijk gebied	63
3.6.1	Algemene landschapskenmerken (bodem, geologie, landgebruik, topografie)	63
3.6.2	Belangrijkste hydrologische processen en watersysteemkenmerken	64
3.6.3	Sponswerking	65
3.6.3.1	Mogelijke maatregelen om sponswerking te herstellen of te vergroten	65
3.6.3.2	Voorbeeldprojecten	66
4	Detail-uitwerking sponswerking voor 2 cases	68
4.1	Geul – focus op wateroverlast	68
4.1.1	Landschapskenmerken	68
4.1.2	Sponswerking (gebaseerd op de data van Juli 2021)	70
4.1.3	Aanpak	73
4.1.4	Gebruikte modellen	75
4.1.4.1	Wflow –SBM	75
4.1.4.2	SOBEK	76
4.1.4.3	Gekoppeld Wflow-sbm – SOBEK	77
4.1.5	Scenario's	78
4.1.5.1	Landgebruik scenario's	78
4.1.5.2	Andere Scenario's	80
4.1.6	Resultaten	80
4.1.6.1	Vergelijking Wflow-sbm standalone en WFLOW-sbm gekoppeld met SOBEK	80
4.1.6.2	Wateroverlast Scenario's in Wflow_sbm	81
4.1.6.3	Wateroverlast scenario's in gekoppeld Wflow_SBM – SOBEK model	88
4.1.6.4	Droogte scenario's	90
4.1.6.5	Model beperkingen	92
4.1.6.6	Koppeling wateroverlast, droogte en biodiversiteit	93
4.1.7	Samenvatting Wflow-SOBEK analyse voor de Geul	93
4.2	Chaamse beken – focus op watertekort	94
5	Conclusies en aanbevelingen voor werkwijze kwantificeren sponswerking	98
5.1	Conclusies uit deze studie	98
5.2	Aanvullende beschouwingen	102
5.3	Aanbevelingen voor vervolg	103
6	Referenties	106

1 Introductie

1.1 Probleemschets

Veel watersystemen in Nederland zijn ingericht met het oog op een snelle afvoer van water. Deze inrichting kent verschillende nadelen. Een versnelde waterafvoer in bovenstroomse gebieden vergroot namelijk de kans op wateroverlast in benedenstroomse gebieden. Dit gebeurt met name wanneer piekafvoeren vanuit verschillende deelgebieden gelijktijdig samenkomen op een benedenstroomse locatie, en kan daar tot extra hoge waterpeilen leiden. De versnelde afvoer zorgt er ook voor dat de grondwatervoorraden minder worden aangevuld. Hierdoor daalt de grondwaterstand, wat tot een lagere waterbeschikbaarheid tijdens droge periodes leidt. Dit probleem wordt mede versterkt door de onttrekking van grond- en oppervlaktewater door verschillende sectoren, die tijdens droge periodes juist hun grootste watervraag hebben. Dit vergroot het risico op watertekort.

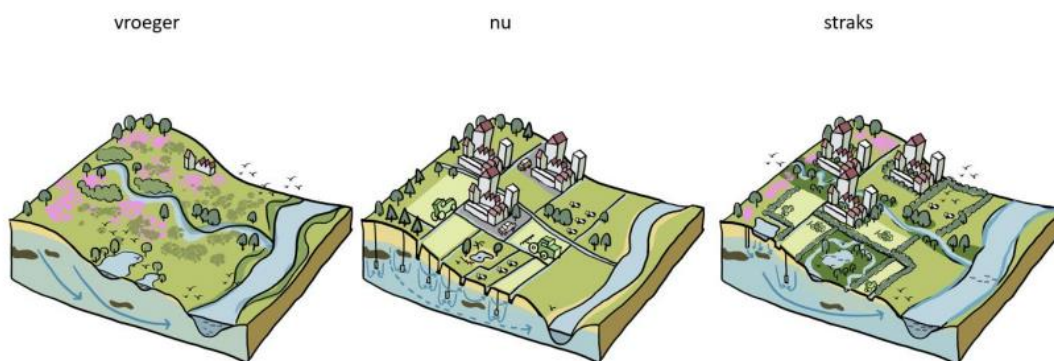
Naar verwachting zullen de komende decennia de problemen met wateroverlast en droogte sterk toenemen. Door klimaatverandering neemt de hoeveelheid neerslag tijdens de wintermaanden toe, terwijl in het groeiseizoen juist meer droogte zal optreden. Tegelijkertijd neemt zomers ook de kans op lokale hoosbuien duidelijk toe (KNMI, 2021), waardoor er lokaal binnen korte tijd zeer veel neerslag kan vallen. De afgelopen jaren hebben we hiervan verschillende voorbeelden gezien. De zomers van 2019, 2020 en 2022 waren zeer droog, waardoor er een groot watertekort ontstond. Daarentegen waren de zomers van 2016 en 2021 juist heel nat en in juni 2021 viel zeer veel neerslag in Zuid-Limburg en omgeving, wat daar tot veel wateroverlast leidde.

Om deze reden is er tegenwoordig veel aandacht voor het herstel van de 'sponswerking' van het Nederlandse landschap. Deze sponswerking is het vermogen van het landschap om water vast te houden tijdens perioden van neerslagoverschot. Tijdens droge periodes kan dit opgeslagen water vervolgens weer gebruik gemaakt worden voor andere functies.

Dit water kan hierbij worden vastgehouden in het grondwater, de bodem of het oppervlaktewater. Een goede sponswerking van het landschap heeft verschillende voordelen:

- Het vergroot de beschikbaarheid van grondwater, waar tijdens droge perioden weer gebruik van kan worden gemaakt;
- Het verhoogt de vochtigheid van de bodem en de waterbeschikbaarheid van de vegetatie;
- Het voorkomt versnelde afvoer van oppervlaktewater, waardoor minder snel wateroverlast optreedt;
- Het vermindert bodemerosie en afvoer van nutriënten, wat ten goede komt aan de kwaliteit van zowel grond- als oppervlaktewater;
- Versterkt het ecologisch functioneren en de biologische diversiteit van het beschouwde gebied.

De afgelopen anderhalve eeuw zijn er vele ingrepen in het Nederlandse landschap uitgevoerd, waardoor de sponswerking van het landschap vaak voor een (groot) deel verloren is gegaan. Bij het herstel van de sponswerking is het belangrijk om te weten hoe het landschap hydrologisch gezien van oorsprong functioneerde, en welke gevolgen deze ingrepen hebben gehad. In het ideale geval leidt herstel van een goede sponswerking tot een vermindering van zowel wateroverlast als droogte. Dit hoeft echter niet altijd het geval te zijn, bijvoorbeeld omdat deze veranderingen maar ten dele kunnen worden teruggedraaid (Figuur 1.1). Hoewel er in meerdere gebieden projecten zijn gestart om de sponswerking te vergroten, is er tot nu nog weinig bekend over de detailwerking. Er wordt vaak aangegeven dat door de natuurlijke sponswerking van het landschap te optimaliseren, minder water (direct) en oppervlakkig tot afstroming zal komen, waardoor mogelijk wateroverlast of overstromingen minder ernstig zullen worden. Deze effecten kunnen vaak nog niet goed gekwantificeerd worden, en zijn in de praktijk veelal ook nog niet goed getoetst. Hiernaast hangen de effecten van bepaalde herstelmaatregelen ook nauw samen met de kenmerken van het landschap. Immers, het herstel van de sponswerking van het Zuid-Limburgse heuvellandschap vraagt een andere aanpak dan herstel van de sponswerking van laagveengebieden. In dit rapport geven we een overzicht van de sponswerking van verschillende landschapstypen in Nederland. Per landschapstype gaan we in op de vraag hoe het landschap van oorsprong hydrologisch werkte, op welke manier de sponswerking is aangetast, en welke vragen nog openstaan voor de keuze van de juiste maatregelen voor herstel van de sponswerking.



Figuur 1.1 Veranderingen van het landgebruik in Hoog Nederland door de tijd en het effect daarvan op het grondwater en natuur. Links: natuurlijke situatie (tot 200 jaar geleden): midden: huidige situatie (nu): rechts: mogelijke toekomstige situatie waarin met een aantal maatregelen grondwaterstanden te verhogen en kwelstromen te versterken. Het gaat daarbij om de volgende type maatregelen: minder ontwateren, minder onttrekken, infiltreren oppervlaktewater. Voor deze maatregelen is aanpassing van het landgebruik nodig (Hendriks et al., 2023).

1.2 Doel

Deze rapportage beoogt het volgende:

- Een definitie geven van en toelichting te geven op het concept 'sponswerking van het landschap';
- Aangeven wat de mogelijkheden zijn om de sponswerking in verschillende delen van Nederland beter te benutten om wateroverlast en droogterisico's te verminderen;
- Inzicht te geven voor welke gebeurtenissen de sponswerking wel en niet relevant is en welke factoren hiervoor bepalend zijn. Voorbeelden hiervan zijn het type landschap, landgebruik, ecologie en bodem;
- Aangeven hoe deze kennis in hydrologische modellen meegenomen kan worden, en – omgekeerd – hoe modellen ingezet kunnen worden voor kwantificering van de effecten;
- Aangeven waar aanvullende kennis nodig is om relevante processen op een juiste manier te kwantificeren.

1.3 Kennisvragen

De kennisvragen die deze rapportage wil beantwoorden zijn:

- 1 Wat is de natuurlijke sponswerking van verschillende landschapstypen in Nederland en wat is het relatieve belang van processen die hiervoor verantwoordelijk zijn?
- 2 Zijn er gebieden waar van nature weinig sponswerking is, maar die wel natuurlijk zijn, dus wat is de rol van geologie, topografie en bodem?
- 3 In hoeverre werken bepaalde landschapstypes in de huidige situatie al als spons?
- 4 Hoe heeft de aangepaste inrichting en land- en watergebruik van een gebied de sponswerking in het verleden beïnvloed?
- 5 Kan sponswerking vergroot worden? Helpt dat dan voor wateroverlast en wat zijn effecten op droogte en biodiversiteit?
- 6 Waar of in wat voor landschapstypes kan het verder vergroten van sponswerking wel en niet?
- 7 Hoe beïnvloeden tijdschaal en ruimteschaal de beoordeling van de effectiviteit van maatregelen (op oppervlaktewater vs. grondwatervolumes);
- 8 Wat is de effectiviteit van kleinschalige/grootschalige maatregelen en het type gebied?
- 9 Kunnen we sponswerking al goed analyseren en modelleren en zo niet, hoe kan dat dan wel?
- 10 Hoe hebben verschillende typen vegetatie en landgebruik invloed op hoe de bodem als spons kan werken?

1.4 Leeswijzer

Dit rapport begint met het geven van een brede definitie van sponswerking en een algemeen overzicht van de belangrijkste aspecten hiervan (Hoofdstuk 2), daarna wordt in Hoofdstuk 3 een overzicht gegeven van de sponswerking in verschillende type gebieden binnen Nederland:

- 1 Het heuvellandschap in Limburg
- 2 De hoge zandgronden
- 3 De peilgestuurde klei- en veengebieden/polders
- 4 De stroomgebieden van de Rijn en Maas
- 5 De grote meren en plassen als reservoirs
- 6 Het stedelijk gebied

In Hoofdstuk 4 wordt voor 2 cases een kwantitatieve uitwerking gemaakt van sponswerking, zijnde de Geul in het heuvelland – met een focus op wateroverlast – en de Chaamse beken op de hoge zandgronden – met een focus op droogte.

Het rapport eindigt met een algemene conclusie en aanbevelingen in Hoofdstuk 5.

2 Algemene aspecten sponswerking

In dit hoofdstuk geven we een algemene definitie van sponswerking en plaatsen deze definitie in een bredere context, gekoppeld aan de mogelijke maatregelen die sponswerking in een gebied kunnen herstellen of vergroten.

2.1 Algemene definitie van sponswerking

Een goede sponswerking van een bodem-watersysteem betekent dat een landschap het vermogen heeft te functioneren als een spons die zich vol laat lopen in tijden van veel water, dit water vasthoudt en kan leveren in tijden van droogte wanneer dit water nodig is. Hierbij kijken we naar het grondwater-, bodem- en oppervlaktewatersysteem. Het relatieve belang van deze deelsystemen varieert met de tijdschaal die in beschouwing wordt genomen (van uren tot maanden) en verschilt ook tussen landschapstypen. De focus ligt op het vasthouden en bergen van neerslag tijdens het natte seizoen, waardoor de beschikbare hoeveelheid (grond)water groter is tijdens het droge seizoen ten opzichte van een landschap dat dit water niet vasthoudt. Idealiter draagt de sponswerking op deze manier bij aan zowel het beperken van de kans op overstromingen (inclusief wateroverlast) als het beperken van de kans op (extreme) droogte.

Het Nederlandse landschap werkt op veel locaties als een spons. Daar waar dit vermogen verloren of verminderd is, kunnen maatregelen nodig zijn om deze sponswerking weer te herstellen of te versterken. Deze maatregelen vergroten dus de natuurlijke sponswerking van het landschap. Kortdurende sponswerking (uren/dagen/weken) werkt nuttig ter voorkoming of vermindering van wateroverlastsituaties of gevolg van intensieve buien en focust vooral op retentie in het oppervlaktewater. Langdurige sponswerking (seizoensmatige invloed) werkt nuttig ter voorkoming of vermindering van droogte en focust vooral op retentie in het grondwater. Daarnaast kunnen technisch aangelegde/gestuurde locaties (bijv. (stuw-)meren, regenwaterbuffers en waterretentiebekkens) als aanvullende opslag in het oppervlaktewater dienen, dit laatste noemen we 'kunstmatige sponswerking'.

2.2 Opmerkingen bij de definitie

Uitgangspunten in dit rapport

- Uitgangspunt is dat 'sponsmaatregelen' streven naar een natuurlijker functioneren van het hydrologisch systeem/watersysteem op landschapsschaal, waardoor dit minder afhankelijk is van regulatie, voor zover mogelijk.
- Een landschap heeft een natuurlijke capaciteit voor sponswerking: is dit verminderd of kwijt, dan moet worden nagedacht over het herstellen van deze functie als dit nodig is om wateroverlast of droogteproblematiek in een landschap te verminderen.
- Naast herstel van natuurlijke capaciteit kan in sommige situaties de sponscapaciteit nog verder worden verhoogd boven op de natuurlijke capaciteit. Dat is dan een kunstmatige sponscapaciteit, en geen herstel.
- Het vergroten van de sponswerking is in lijn met de WB21 filosofie 'vasthouden (natuurlijke sponswerking herstellen), bergen (kunstmatige sponswerking versterken), afvoeren' (WB21 – Min V&W, 2000).
- Elk landschap heeft ook onder huidige inrichting een bepaalde mate sponswerking, maar door optimalisatie voor functies is deze mogelijk verminderd.

- Dit rapport beschrijft de huidige sponswerking van het systeem zowel de natuurlijke (landschapselementen zoals beekdalen, uiterwaarden, natte natuurgebieden, landbouwgronden en onverharde gronden) als kunstmatige sponswerking (aangelegde reservoirs, bekkens, kunstmatig aangelegde opslag en infiltratiewerken bijv. in de stad).

Randvoorwaarden

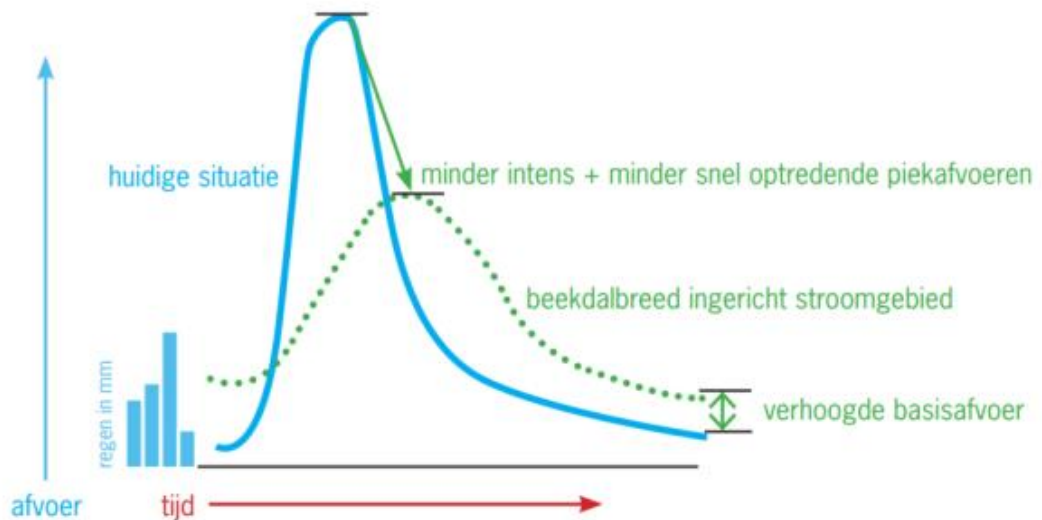
- Het vergroten van sponswerking kan een potentieel negatief effect hebben op huidige gebruiksfuncties. Het is de uitdaging om dit inzichtelijk te maken en te zoeken naar een balans tussen functies en het herstellen en/of vergroten van de sponswerking. Hiervoor moet in kaart worden gebracht wat de potentiële keerzijdes zijn van herstel van sponswerking, plus in hoeverre is dit herstel mogelijk gegeven de huidige functie-invulling en inrichting van het landschap. Er zullen grenzen zijn aan de mate waarin sponswerking kan worden teruggebracht of vergroot als gevolg van mogelijke randvoorwaarden, zoals bijvoorbeeld bestaande bebouwing en infrastructuur.
- De spons kan vol zitten als er nog meer water aankomt – actief beheer van reservoirs/(grond)waterpeil voor enkele weken vooruit is soms noodzakelijk.
- Maatregelen kunnen een focus hebben op ofwel wateroverlast of droogte en er is potentieel behoefte aan aanvullende maatregelen om eventuele negatieve effecten te 'bufferen' (bijv. middels overeenkomsten over groenblauwe diensten of compensatieregelingen bij schade).

Buiten beschouwing gelaten aspecten

- Sponswerking kan zowel voor gebruiksgroepen als natuur worden ingezet. Deze benuttingsvraag is niet de focus van dit rapport.

2.3 Type maatregelen horende bij vergroten sponswerking

In Figuur 2.1 is de ideale werking van een sponsmaatregel geïllustreerd. Door de maatregel wordt tijdens een situatie met te veel water (hier: hoge debiet in een beek b.v. door een hevige regenbui) de afvoer vertraagd en verminderd door een herstel van de sponswerking in het hele stroomgebied. Omdat het water minder snel door de beek wordt afgevoerd, blijft het water langer in het systeem. Tijdens drogere periodes vergroot het vastgehouden water de basisafvoer van de beek. Het landschap werkt zoals een natuurlijke spons met een positief effect op wateroverlast, droogte en biodiversiteit. Dit is het ideaalbeeld van een sponsmaatregel, in de realiteit kan een maatregel die voordelig is voor wateroverlast mogelijk nadelige gevolgen hebben voor droogte of vice versa. Dit moet per locatie worden beschouwd.



Figuur 2.1 Ideale werking van sponsmaatregelen (STOWA, Verdonschot et al 2017)

Het verbeteren van de sponswerking kan met zowel natuurlijk waterretentie maatregelen (NWRM) en kunstmatige 'engineering' maatregelen.

Natuurlijke waterretentiemaatregelen (NWRM) zijn multifunctionele maatregelen die tot doel hebben watervorraden te beschermen en te beheren en watergerelateerde uitdagingen aan te pakken door ecosystemen en natuurlijke kenmerken van waterlichamen te herstellen of te behouden met behulp van natuurlijke middelen en processen. In de website www.nwrm.eu zijn 53 verschillende veel voorkomende maatregelen opgenomen verdeeld over 4 sectoren (landbouw, bos, hydrologisch en morfologisch systeem en stedelijke gebieden) en 140 voorbeelden waarin deze zijn toegepast. De belangrijkste focus van deze maatregelen is het verbeteren en behouden van het waterretentievermogen van watervoerende lagen, bodem- en ecosystemen met het oog op het verbeteren van hun toestand en bufferende vermogen om water vast te houden om zo de risico's op overstromingen en droogtes te verminderen. NWRM bieden daarnaast aanvullende voordelen, waaronder de verbetering van de waterkwaliteit en verbetering van ecosysteemfuncties en een bijdrage leveren aan klimaatmitigatie door het vastleggen van koolstof, en het verminderen van broeikasgasemissies.

Technische maatregelen zijn kunstmatige maatregelen, die de sponswerking van een gebied vergroot, b.v. aangelegde reservoirs en stuwen. Reservoirs kunnen water vasthouden in een natte periode of tijdens een langdurige regenbui, en gecontroleerd beschikbaar stellen voor een droge periode. Een aangelegd reservoir is dus wel een onderdeel van het vergroten van de sponsfunctie in een gebied, maar allesbehalve natuurlijk. Sponswerking als zodanig staat dan ook los van de biodiversiteitswaarde in een gebied. Door uit te gaan van het principe 'groen waar het kan, grijs waar het moet' bij de keuze van sponsmaatregelen kunnen er zeker meekoppelkansen ontstaan.

Naast inrichtingsmaatregelen zijn er ook beheermaatregelen om sponswerking te versterken: bijv. technisch peilbeheer, regelbare drainage en keuzes in het maaibeheer en baggeronderhoud.

In sommige gebieden zal meer natuurlijke sponswerking zijn (of mogelijk zijn), dan in andere systemen, waar dan kunstmatige sponswerking heel belangrijk kan zijn. Bijv. platteland versus de stad, en polder versus vrij afstromende systemen.

2.4 Sponswerking in verschillende karakteristieke deelgebieden in NL

2.4.1 Het Nederlandse landschap als geheel

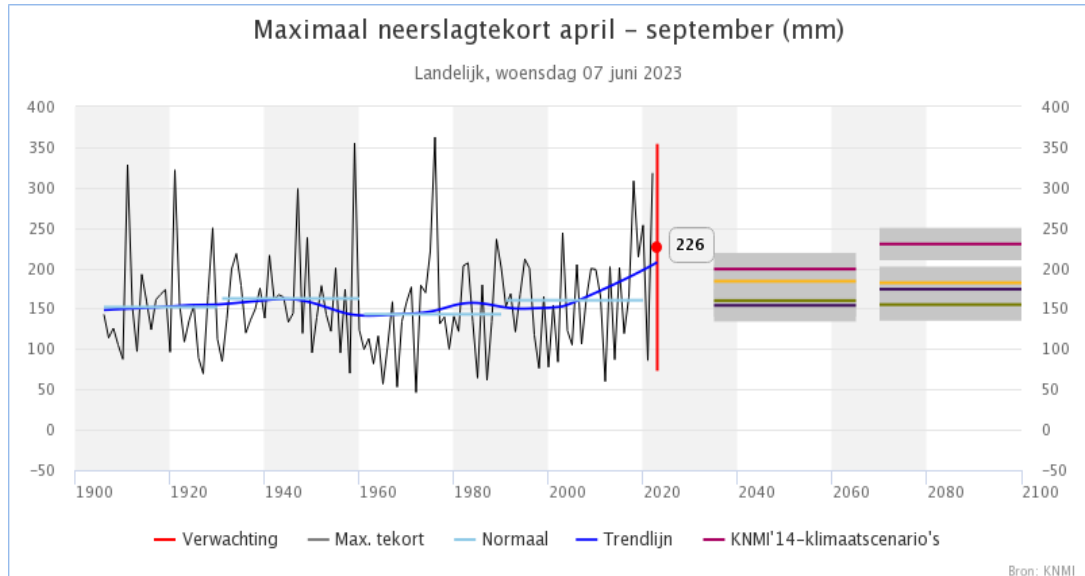
De noodzaak om te werken aan een klimaatbestendig landschap is algemeen erkend. 'Bodem en water sturend' als uitgangspunt nemen bij de ruimtelijke inrichting en het herstel van het natuurlijke systeem zijn daarin belangrijke begrippen. STOWA maakte 3 praatplaten die dit voor verschillende landschappen duidelijk maakt: voor [de beekdallandschappen](#) (Figuur 2.2), [de stad](#) en [laag Nederland](#) (STOWA, 2019b). Deze platen bespreken de maatschappelijke en ecologische schade die het huidige systeem ervaart en hoe deze schade kan worden verminderd door herstel van het water- en bodemsysteem met maatregelen in verschillende deelsystemen: de stad, het watersysteem, het grondwatersysteem en de wijze waarop we het landgebruik uitvoeren en het landschap inrichten. Het herstellen van de sponswerking van het bodem-watersysteem hoort daarbij en kan worden gedaan via verschillende type maatregelen in het grondwater- en oppervlaktewater systeem, zowel in de stad als op het platteland en zowel in het watersysteem zelf, als ook in de methoden en types landgebruik.



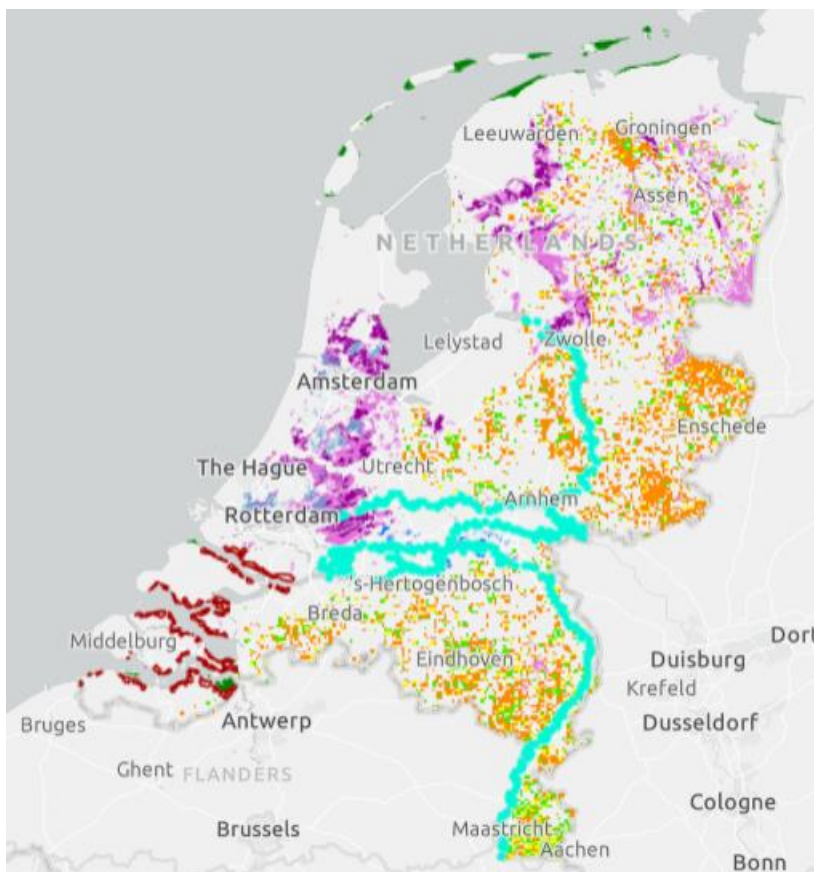
Figuur 2.2 Praatplaat Klimaatbestendig Beekdal-landschap (STOWA, 2019b)

In het werken aan klimaatrobustheid is het belangrijk om zowel de natte als droge periode van het jaar te beschouwen. Immers: klimaatverandering zorgt voor een toename aan zowel intensieve regen-gebeurtenissen als droogteperiodes. Een van de kenmerken van het huidige klimaat in Nederland is dat tijdens de wintermaanden (Oktober – Maart) een neerslagoverschot en tijdens de zomermaanden (April – September) een neerslagtekort bestaat. Figuur 2.3 toont het jaarlijkse neerslagtekort van april tot september in Nederland sinds de start van de metingen begin vorige eeuw. De trendlijn (blauw) laat een stijging van het tekort over de laatste 20 jaar zien. Vanaf 2040 zijn de verwachte neerslagtekorten voor de toekomst afhankelijk van de verschillende (KNMI'14) klimaatscenario's aangegeven. Deze wijzen op een duidelijke stijging van het toekomstige gemiddelde neerslagtekort.

Het is moeilijk om exacte cijfers te geven over de omvang van de sponswerking in Nederland voor het opslaan van water tijdens natte periodes, zodat dit kan worden gebruikt tijdens droge periodes. De sponswerking van een gebied kan lokaal sterk variëren afhankelijk van factoren zoals geografie, landgebruik, en de mate van waterbeheerinfrastructuur. De klimaateffectatlas geeft een overzicht van de kansen voor natuurlijke klimaatbuffers in verschillende delen van Nederland (Klimaateffectatlas, 2021). Deze locaties kunnen grotendeels worden gezien als potentiële locaties om de sponswerking te vergroten (Figuur 2.4)



Figuur 2.3 Maximaal neerslagtekort Nederland (KNMI, 2023)



Figuur 2.4 Totaalkaart Kansen voor Natuurlijke klimaatbuffers in de randstad (blauw), kustgebied (donkergroen), rivierengebied (aquamarijn), veengebied (paars) en zandgronden (oranje, geel, lichtgroen) (Klimaat-effectatlas, 2021)

2.4.2 Deelgebieden

De gebiedsindeling in dit rapport is gebaseerd op verschillen in sponswerking tussen deelgebieden, die nauw samenhangen met (verschillen in) bodemtype, geologie en topografie.

Op grond van deze eigenschappen maken we onderscheid tussen:

- 1 Vrij-afwaterende gebieden;
 - 1a. Heuvelland;
 - 1b. Hogere zandgronden;
 - 1c. Rivierengebied
- 2 Peilgestuurde gebieden in klei- en veengebieden/polders
- 3 Sterk gereguleerde systemen: 'Meren en Plassen' en het Stedelijk gebied.

Op grond van verschil in stuurbaarheid van het peil kunnen in Nederland twee deelgebieden onderscheiden worden die belangrijk zijn voor het vasthouden en bergen van water. Dat zijn de peilgestuurde en de vrij-afwaterende gebieden.

In vrij-afwaterende gebieden zijn maatregelen om water vast te houden afhankelijk van o.a. de terrehelling en het bodemtype. Bij diepe grondwaterstanden kan in deze gebieden veel bergingscapaciteit in de grond aanwezig zijn (STOWA, 2023). Bij het vrij-afwaterende gebied wordt onderscheid gemaakt tussen het **Heuvelland**, de **Hoge Zandgronden** en het **Rivierengebied** (Rijn en Maas).

Alle peilgestuurde vlakke landelijke gebieden in Nederland vallen in dit rapport onder de **Peilgestuurde klei- en veengebieden/polders**. In deze gebieden kan het vasthouden van water voor een deel gerealiseerd worden met hydrologische maatregelen, zoals peilbeheer en aanpassingen in het drainagesysteem (bijv. het verwijderen van buisdrainage). Het grondwaterpeil in deze gebieden staat relatief hoog, waardoor water in de bodem vasthouden soms slechts beperkt mogelijk is.

Aanvullend onderscheiden we de categorieën **Meren en plassen** en het **Stedelijk gebied**. Vanwege de sterke regulering in deze gebieden is de sponswerking in deze gebieden sterk afhankelijk van de keuzes die hierin worden gemaakt. De hydrologische kenmerken van deze categorieën verschillen dusdanig van de hierboven onderscheiden deelgebieden, dat vooral technische maatregelen nodig zijn om de sponswerking te vergroten.

In Hoofdstuk drie is de sponswerking van alle deelgebieden in detail beschreven.

2.4.3 Verschillende type neerslaggebeurtenissen

De tijdschaal waarop sponswerking tot uitdrukking komt is heel belangrijk: terwijl wateroverlast gebeurtenissen van korte duur zijn (uren/ dagen), heeft droogte een tijdschaal van maanden tot meerdere jaren (tabel 2.1). Voor het kwantificeren van de totale effecten van mogelijke sponsmaatregelen, is het belangrijk de prestatie van deze maatregelen voor verschillende type gebeurtenissen te evalueren en daarbij zowel de wateroverlast als droogte-situaties mee te nemen. Sommige maatregelen zijn heel effectief om het effect van heftige, maar korte buien te verminderen, maar maken bijna geen verschil tijdens een langdurige neerslaggebeurtenis. Daarnaast kunnen maatregelen die droogte bestrijden ook effect hebben op de respons van het landschap tijdens verschillende type neerslaggebeurtenissen. Daarnaast kan het zijn dat in een bepaald landschapstype het ene type gebeurtenis belangrijker is dan het andere (droogte versus wateroverlast).

In dit rapport beschouwen we 6 type gebeurtenissen waarvoor we verdere evaluaties doen in hoofdstuk 4 – de detail-voorbeelden in de Chaamse beken (hoge zandgronden) en de Geul (heuvelland).

Tabel 2.1 Indeling in type gebeurtenissen met tijdschalen

Categorie	Beschrijving	Herhalingskans	Tijdschaal	Referentie
Wateroverlast	Een heftige onweersbui (16.2 mm precipitatie in een uur)	1 x jaar	1 uur	(STOWA, 2019a)
	Een langdurig neerslag gebeurtenis (63 mm in 24 uur)	1 x 10 jaar	1 dag	(STOWA, 2019a)
	Een langdurig neerslag gebeurtenis (100 mm in 24 uur)	1 x 100 jaar	1 dag	(STOWA, 2019a)
	Lang event + verdeling in de tijd (200 mm in 48 uur)		2 dagen	Koppeling met stresstesten
Droogte	Jaarlijkse zomer droogte	1 jaar	Zomer	2018, 2020
	Langdurige droogte	Meerdere jaren	meerjarig	(Deltares, 2023)

2.5 Type sponsmaatregelen

2.5.1 Categorieën van sponsmaatregelen

Er zijn verschillende manieren om sponsmaatregelen te categoriseren:

- Gericht op het primaire doel (wateroverlast-beheer of droogte-beheer)
- Gericht op het systeem (oppervlakte, bodem, grondwater)

Juist omdat de koppeling tussen het droge en natte seizoen in het denken over sponswerking belangrijk is onderscheiden we in dit rapport vier categorieën van maatregelen, gebaseerd op het systeem waarop de maatregel zich richt (tabel 2.2 t/m 2.5):

- Grondwater-gerichte maatregelen (verbeteren van infiltratie, verminderen van drainage)
- Bodem- (o.a. verbeteren organisch stofgehalte, bodembiodiversiteit) en landgebruik-gerichte maatregelen (veranderingen van landgebruik en verbeteringen binnen een type landgebruik)
- Oppervlaktewater-gerichte maatregelen (vergroten van retentie-oppervlak en peilbeheer)
- Kleinschalige blauwgroene en technische maatregelen in de stad

Er bestaan ook grootschalige herinrichtingsmaatregelen, die meerdere deelsystemen bestrijken. In dat geval wordt de maatregel in die categorie geplaatst, die vanuit ons inzicht het meest toepasselijk is.

Grondwater-gerichte maatregelen

Grondwatergerichte sponswerking maatregelen zijn voornamelijk effectief voor het verminderen van droogteproblematiek. Ze zijn veelal gericht op het verbeteren van de infiltratie naar het grondwater, en het verminderen van drainage.

Bodem en landgebruik-gerichte maatregelen

Bodem en landgebruik maatregelen hebben een focus op het vergroten en verbeteren van de infiltratie-capaciteit en/of retentie capaciteit van de bodem. Dit type maatregelen kan bijdragen aan zowel het verminderen van wateroverlast als droogte.

Oppervlaktewater-gerichte maatregelen:

Deze maatregelen hebben vaak een primaire focus op het verminderen van wateroverlast, en een secundaire rol in het verminderen van droogte, daar waar vastgehouden water tijdens piek-gebeurtenissen ook kan infiltreren richting het grondwater. We onderscheiden drie type oppervlakte-watermaatregelen.

- 1 Het verminderen van de snelle afvoer van hellingen (bijv. herbebossing, aanleg van bufferzones en terrassen), waardoor het water meer tijd heeft om te infiltreren
- 2 Verbetering van de opslag/retentie van water (bijv. herstel van moeraszones en water buffers)
- 3 Afvoer in de beek verminderen of vertragen (bijv. door hermeandering of houtconstructies in beken aan te leggen). NB: daar waar droogval van de beek dreigt door een te hoge drainage-basis kan het nodig zijn de afvoer te bestendigen om ecologische waarden te beschermen.

Stedelijk gebied-gerichte maatregelen

Maatregelen in het stedelijke gebied zijn meestal gericht op korte intense regenbuien, maar kunnen ook een rol spelen om droogte dan wel hitte tegen te gaan. Vaak hebben deze maatregelen een belangrijke meerwaarde richting het verbeteren van de omgeving voor bewoners, het verminderen van hitte-eilanden in de stad en het ontkoppelen van waterstromen (grijs rioolwater en regenwater). Zij hebben vaak een technische component en zijn gemiddeld kleinschalig, door de beperkte ruimtebeschikbaarheid en de hoge bebouwingsdichtheid.

Tabel 2.2 Grondwater-gerichte maatregelen (gws = grondwaterstand)

Categorie	Maatregel	Beschrijving/ Werkwijze	Effect op wateroverlast	Effect op droogte	Aanvullende voordelen	Nadelen
Ontwatering beperken (water vasthouden)	Verhoging van de drainage basis	Beekbodempverhoging, dempen waterlopen, kleine stuwen in haarvaten		afname droogteschade landbouw	toename potentie natte natuur door hogere gws	toename natschade landbouw
	Peilverhoging	Opzetten van stuwpeilen	toename risico grondwateroverlast	afname droogteschade landbouw	toename potentie natte natuur door hogere gws	toename natschade landbouw - afname kwel (bij natuur)
Minder grondwater onttrekken	Minder grondwater onttrekking (ondiep en diep)	- Beperking van grondwater onttrekking - compenseren van grondwater onttrekking - verplaatsing van winningen		toename potentie natte natuur door hogere grondwaterstanden		
Meer grondwater aanvullen / meer water infiltreren	Infiltreren van regenwater	Aanwijzen van gebieden die als opvang van pieken en infiltratiezone kunnen dienen (gekoppeld aan verandering in landgebruik, zie tabel 2.3)	Aanvullende bergingsgebieden	Aanvulling grondwatersysteem		Herinrichtingproces is nodig
		afkoppelen stedelijk gebied in infiltratiegebied	afname piekafvoer RWZI en riooloverstorten	aanvulling grondwater systeem	Verminderde risico's op slechte waterkwaliteit door riooloverstorten	
	'Managed Aquifer Recharge'	'oftewel actief oppervlaktewater laten infiltreren richting het grondwater zoals het infiltreren van rivierwater in aangelegen gebieden		Minder verdamping in vergelijk met oppervlakte- opslag van water	toename potentie natte natuur door hogere gws, stuurbare aanvulling	waterkwaliteit infiltratie water moet worden beschouwd, kan slechter zijn dan huidige grondwaterkwaliteit
	Vernatting in bufferzones rondom natuurgebieden	Combinatie van meer grondwateraanvulling en minder grondwateronttrekking in een bepaalde zone		Meer water tijdens droge periode		
	bodembeheermaatregelen	Verbeteren bodemstructuur en verhogen organisch stofgehalte in de bodem leiden tot hogere infiltratie capaciteit	Verhoogde infiltratiecapaciteit	toename vasthouden water in de wortelzone		aanpassingen aan landbouw nodig
Aanpassingen in watergebruik	permanent beregeningsverbod	Verminderen van de vraag naar water		minder ver uitzakkende grondwaterstanden		droogteschade op landbouw afnemende bodemkwaliteit
	gedeeltelijke vervanging drinkwater uit grondwater door oppervlaktewater	Betere balans tussen gebruik van beschikbare bronnen		Minder ver uitzakkende grondwaterstanden	positieve effect op natte natuur	

Tabel 2.3 Bodem- en landgebruik-gerichte maatregelen

Subcategorie	Maatregel	Beschrijving/ Werkwijze	Effect op wateroverlast	Effect op droogte	Aanvullende voordelen	Nadelen
Ander landgebruikstype	Bebossing/ Herbebossing		Minder run-off, verminderen van wateroverlast en bodemerrosie, meer infiltratie	Meer evaporatie	Minder erosie, verbeteren van bodem compositie, recreatie	
	Herstel van natte laagtes en beekbegeleidende moerasgebieden	Geeft ruimte aan de natuurlijke afvoerdynamiek van de beek	Minder piekafvoer, verminderen van wateroverlast, meer infiltratie	Vergroot infiltratiegebied	verbeteren van natuurwaardes bodem compositie, recreatie	
	Omvormen van naaldbos naar andere vegetatietypes	omzetten naaldbos in loofbos of andere lage vegetatie typen vermindert evapotranspiratie		Vasthouden van meer gebiedseigen water, minder verdamping	toename diversiteit bomenpopulatie, afname ziektes	naaldbossen hebben ook specifieke waarden
	Permanent grasland op risico-percelen	In plaats van wisselteelt met braakligging inzetten op permanente graslandbedekking	Minder piekafvoer, verminderen van wateroverlast, meer infiltratie		Verminderde erosie, verbeterde waterkwaliteit door minder afspoeling	
Andere landbewerking	Verruiging van de bodem om infiltratie te stimuleren	Aangepaste machinerie (vorentrekkers, gitterrollen) zorgen voor een ruwer oppervlak	verminderen van wateroverlast en bodemerrosie	Vergroot infiltratiecapaciteit	Minder risico op slemp	
	Gewas- en bodembedekking om water vast te houden	Bedekken van de bodem (bijv. met mulching) of gewas vermindert snelle afspoeling en verminderde verdamping				
	Voorkom spoorvorming door werkzaamheden	Betere planning van werkzaamheden afhankelijk van bodemcondities				
	Buffers, greppels, drempels etc. op percelen om afspoeling te voorkomen (op en rond perceel)	Kleine variaties in terreinhoogte dragen bij aan mogelijkheid water vast te houden en te laten infiltreren				
Bodem verbeteren	Verbeteren bodemstructuur en verhogen organisch stofgehalte in de bodem	Gebruik van groenbemesters, toevoegen van organisch stof, stimuleren bodemfauna (regenwormen etc.)		toename vasthouden water in de wortelzone	verbetering van de waterkwaliteit, vermindert risico op slemp	aanpassingen aan landbouw nodig

Tabel 2.4 Oppervlaktewater-gerichte maatregelen

Subcategorie	Maatregel	Beschrijving/ Werkwijze	Effect op wateroverlast	Effect op droogte	Aanvullende voordelen	Nadelen
Waterretentie	Water buffers en retentiebekkens	Vergroot opvangcapaciteit tijdens hoogwaters en regenval	Verminderen piekafvoer, vergroten van retentie capaciteit,	vergroot de infiltratie		
	Houtachtige puindammen (in-stream woody debris dams) en beverdammen	Lokale kleinschalige semipermeabele (semi-)natuurlijke structuren verhogen lokaal het peil maar laten ook water door als peilen zakken	Lokaal hogere waterstanden, benedenstrooms beperkte verlaging, maar niet bij extreme gebeurtenissen			
	Riviermorfologie en herstel van uiterwaarden	Het verwijderen van dijken en herinrichting	Lagere hoogwaterstanden		Habitat herstel	
	Herstel en aanleg van groene overloopgebieden	Vergroot de laterale connectiviteit en verwijdert longitudinale obstakels.	Toename water retentie		Habitat herstel, recreatiemogelijkheden	
	Herinrichting en heraansluiting van nevengeulen en uiterwaarden	Uiterwaarden herinrichten, en het opnieuw aansluiten van bedijkte uiterwaarden en/of oude meanders op de hoofdrievier	Verminderen van piekafvoer, Toename water retentie, vergroten van infiltratie		Diversificatie van debiet, habitat herstel, verminderen beddegradatie, natuurwaarde	
	Gedeeltelijke/volledige dijkverlegging	Vergroten van het riviersysteem zodat pieken beter opgevangen kunnen worden	Vertraging en verminderen van de afvoer pieken, vergroten van infiltratie		Vermindering erosie in het zomerbed, ruimte voor wetland herstel	
Waterafvoer vertraging	Oevervegetatiebeheer/ stroombaanmaaien	Verkleinen doorvoercapaciteit watergang door vegetatie niet volledig te verwijderen	vertraging van de afvoer			
	Wetland herstel (verbonden met de rivier)	Vergroten van het riviersysteem zodat pieken beter opgevangen kunnen worden	Verminderen van piekafvoer, toename water retentie, vergroten van infiltratie		Recreatie, waterkwaliteit en natuurwaarde	
	Hermeandering in beeksystemen	Geeft ruimte aan de natuurlijke afvoerdynamiek van beken	Minder snelle piekafvoer	Vergroot infiltratiegebied	Habitat herstel, verminderen beddegradatie, vergroten natuurwaarde	
	Renaturalisatie van de beekbedding	Beton/inerte constructie in beekbedding en oevers verwijderen en vervangen door vegetatiestructuren	Minder snelle piekafvoer	Vertraging van afvoer	Habitat herstel	

Tabel 2.5 Stedelijk-gerichte maatregelen. *een groot overzicht van voorbeelden van verschillende blauwgroene maatregelen in de stad is te vinden op <https://urbangreenbluegrids.com/>

Subcategorie	Maatregel	Beschrijving/ Werkwijze	Effect op wateroverlast	Effect op droogte	Aanvullende voordelen	Nadelen
Water retentie	Wadi's /Swales		Verminderen piek afvoeren, toename water retentie		Verminderen stedelijk warmte-effect, verbeteren water kwaliteit	
	Groene daken		Toename water retentie		Verminderen stedelijk warmte-effect	
	Retentievijvers		Verminderen piek afvoeren, toename water retentie			
Water Infiltratie	Regenwaterafvoer afkoppelen van het rioolsysteem		Rioolsysteem minder belast tijdens piekbuien.	Meer infiltratie naar het grondwater	minder kans op overstorten (beter voor waterkwaliteit oppervlaktewater)	
	Doorlatende bestrating		Infiltratie tijdens piekbuien vermindert oppervlakkige afvoer	Meer infiltratie naar het grondwater		

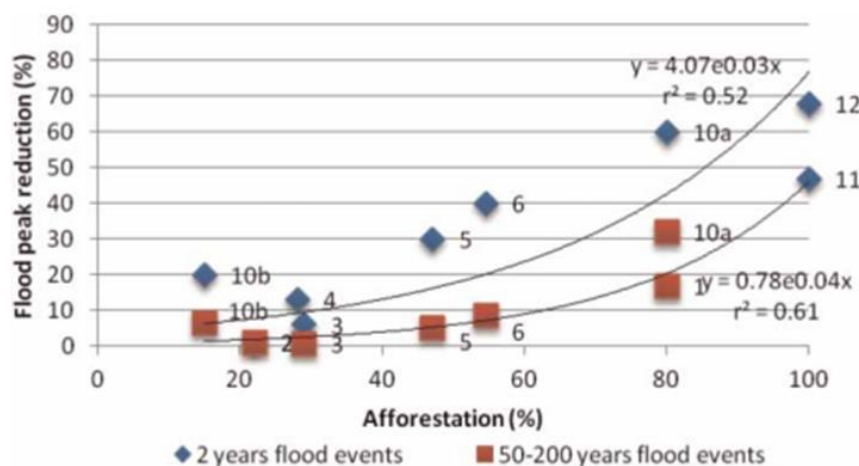
2.5.2 Ervaringen uit het buitenland

In het verleden was het gebruikelijk vooral 'grijze' oplossingen te implementeren om wateroverlast te verminderen: stuwen, drainagebuizen, dijken en oeververdediging. Meer en meer is er ook weer aandacht voor het herstel van het natuurlijk hydrologisch functioneren van het bodem- en watersysteem, en zijn natuurlijke waterretentie maatregelen (NWRM) belangrijker geworden omdat zij meerdere voordelen hebben. Deze NWRM staan nu sterk in de belangstelling en worden in Nederland ook wel ingezet onder het kopje 'Bouwen met de Natuur' en dragen zo bij aan het principe van Bodem en Water Sturend. Er is echter nog weinig kwantitatief bewijs in de literatuur over de effectiviteit van deze maatregelen voor verschillende typen neerslaggebeurtenissen (in het bijzonder die van over een lange termijn en voor extremere neerslaggebeurtenissen), bijvoorbeeld uitgedrukt in de afname van de piekafvoer, invloed op de basisafvoer of de verhoging van de grondwaterstanden (Penning et al., 2023).

Sponswerking in het landelijk gebied

Vooraf in de UK wordt veel aandacht gegeven aan het verbeteren van de sponswerking van gebieden, door de inzet van 'Natural Flood Management (NFM)' oplossingen in kleinschalige stroomgebieden (GOV UK, 2023). Het NFM-programma heeft tussen 2017 en 2021 zo'n 60 projecten uitgevoerd, en geëvalueerd en is recentelijk een nieuw programma gestart voor aanvullende projecten.

Al veel langer is in de UK veel aandacht voor dit onderwerp: Iacob et al. (2014) onderzochten het effect van natuurlijke stroombeheer maatregelen voor 25 stroomgebieden in Groot-Brittannië, op het vasteland van Europa en in Nieuw-Zeeland. De beschouwde stroomgebiedsbeheermaatregelen in deze studie zijn: (1) herbebossing, (2) het dempen van afwaterkanalen en het verwijderen van drainage kanalen, (3) herstel van wetlands en uiterwaarden en (4) gecombineerde oplossingen. In deze stroomgebieden wordt de effectiviteit van natuurlijke maatregelen geëvalueerd met metingen (in 11 van de 25 stroomgebieden) of een simulatiemodel (in 14 van de 25 stroomgebieden). In Figuur 2.5 is het gemeten effect van bebossing op de reductie van de afvoerpieken geïllustreerd voor kleinschalige overstromingen (herhalingsperiode van 2 jaar) en uitzonderlijke overstromingen (herhalingsperiode van 50 tot 200 jaar). De effecten zijn het grootst voor vaak optredende overstromingen. In het geval van een complete herbebossing (100%) kan de afvoerpiek bij minder extreme gebeurtenissen met 60-70% worden verminderd. Voor meer extreme gebeurtenissen is een vermindering van de piekafvoer van 30% gerapporteerd bij 80% bebossing.

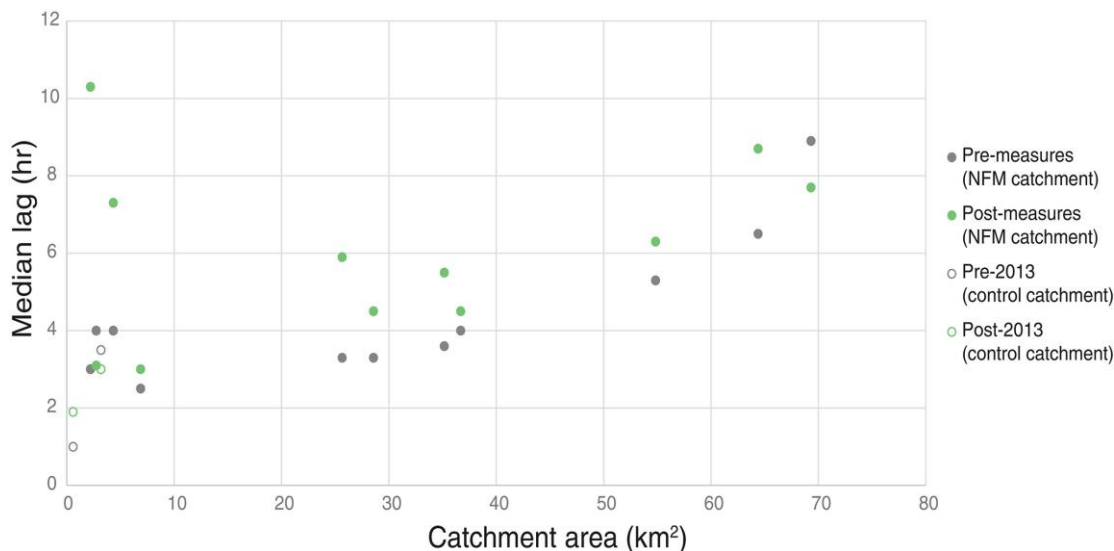


Figuur 2.5 De relatie tussen het percentage van verschillende bebossingsstrategieën en hun effect voor extreme en minder extreme gebeurtenissen (Iacob et al., 2014)

Het effect van (her-)bebossingsmaatregelen bij het verminderen van de piekafvoer is afhankelijk van verschillende factoren, met name het eerdere landgebruik. Herbebossing van grasland geeft een grotere verbetering dan bebossing van struikgewassen.

Gerapporteerde onderzoeken naar de effectiviteit van NWRM heeft zich voornamelijk gericht op hun effectiviteit in het tegengaan van overstromingen in kleinschaligere stroomgebieden, maar is tot nu vrijwel nooit gekoppeld aan onderzoek naar de gevolgen van deze maatregelen op de infiltratie naar het grondwater en hun gedrag bij lage debieten. Fenell et al. (2023) gebruikten een gecombineerd hydrologisch (MIKE SHE) en hydraulisch (MIKE 11) model om de effectiviteit van NWRM-maatregelen voor het verminderen van droogte te evalueren. De modelresultaten toonden dat deze maatregelen ook nuttig kunnen zijn om het effect van droogte te verminderen: doordat meer regenwater infiltreerde nam de basisafvoer toe.

Eén van die manieren om het effect van sponsmaatregelen op piekafvoer te evalueren is om te kijken naar de vertraging van deze afvoerpiek, uitgedrukt in de tijd tussen de neerslag en de piekafvoer op een bepaalde locatie. Voor grote stroomgebieden zoals de Rijn en Donau, en bij extreem grote afvoerpieken bestaat er nog grote onzekerheid over de effectiviteit van natuurlijke sponsmaatregelen (Black et al., 2021). Voor kleinere stroomgebieden (tot 100km²), en op meer lokale schaal is hun effectiviteit makkelijker te duiden. Zo laat Figuur 2.6 zien dat er enige vertraging van de afvoerpiek in dit soort systemen kan worden gerealiseerd door (semi-)natuurlijke maatregelen, zoals het toevoegen van dood hout aan beken, het construeren van semi-doorlaatbare barrières analoog aan beverdammen, herbebossing in de bovenlopen en het hermeanderen van beken. Tegelijkertijd moet aandacht worden gegeven aan de timing van pieken uit verschillend deelstroomgebiedjes. Het kan voorkomen dat het vertragen van een piek in één deelstroomgebiedje zorgt voor een samenvallen van deze piek met die uit een ander deelstroomgebiedje, of juist benedenstroomse pieken kan splitsen in twee opeenvolgende kleinere pieken (Pattison et al., 2014).



Figuur 2.6 Invloed van de catchment grootte op de vertraging in de afvoerpiek voor en na invoering van 'Natural Flood Management' (NFM) maatregelen in deze catchments inclusief controlecatchments (Black et al., 2021).

Stedelijke sponswerking

Met betrekking tot de implementatie van sponswerking in het stedelijk gebied is China koploper (Zevenbergen et al., 2018). Bij nieuwe ontwikkelingen wordt uitgegaan van het concept 'Sponge Cities', waarbij tijdens het ontwerp van nieuwe steden of stadsdelen nadrukkelijk rekening wordt gehouden met het creëren van voldoende bergingscapaciteit in de stad. Door de institutionele regulatie van bovenaf gaan zulke ontwikkelingen erg snel en zijn de voorzieningen om water op te vangen en te bergen grootschalig aanwezig. Zo zijn er bijvoorbeeld parken en wadi's ter grootte van een wijk, in plaats van enkele kleinschalige wadi's van een paar vierkante meter zoals in veel Nederlandse steden vaak het geval is. Grootschalige planologische ontwikkelingen zijn hier wel voor nodig, iets dat in het Nederlandse systeem lastiger te realiseren is. Recentelijk kwamen deze Chinese Sponge Cities negatief in het [nieuws](#) omdat zij niet in staat waren om tijdens zeer extreme regenval (een typhoon) het water overal veilig op te vangen. Dit laat zien dat het belangrijk is om te communiceren over de verwachte type gebeurtenissen waarvoor een watersysteem ontworpen is, en dat er altijd extremen zijn die risico's met zich mee brengen waar geen kruid tegen gewassen is.

Bewijs en evaluatie van sponsmaatregelen wereldwijd – koppeling tussen doelen

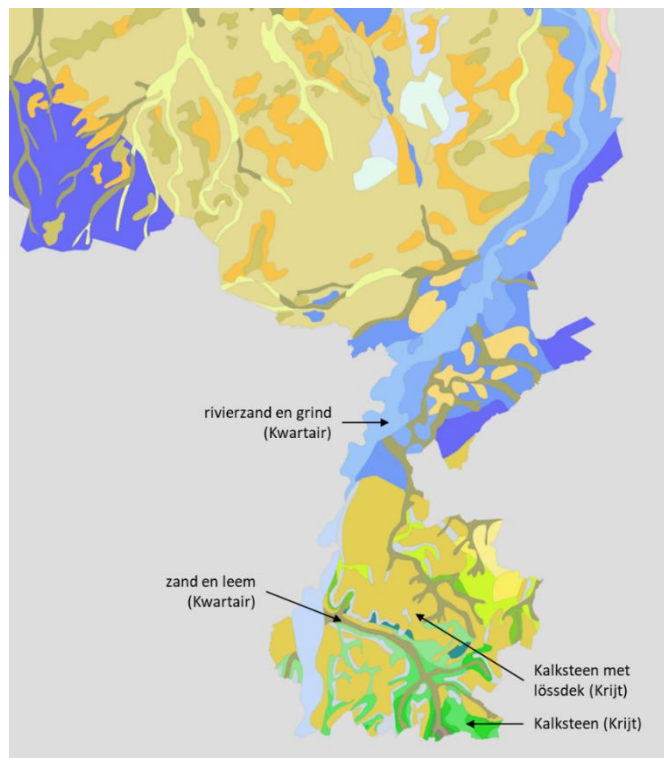
Er bestaan verschillende databases waarin geregistreerde voorbeelden van 'Nature-based Solutions' voor klimaatrobuustheid worden verzameld, zowel voor landelijke als stedelijke gebieden. Twee noemenswaardige databases zijn:

- www.nwrm.eu: een verzameling van 'natural water retention measures' met een focus op voorbeelden uit de EU (140 voorbeelden gerapporteerd), en tevens een overzicht van factsheets voor vier verschillende categorieën van maatregelen (landbouw, bos, watersysteem en de stad) met een totaal van 52 verschillende maatregelen, inclusief overzichten van hoe deze maatregelen bijdragen aan verschillende doelen (biofysische impact, ecosysteemdiensten geleverd, en bijdrage aan doelbereik voor verschillende EU-beleidsdoelen).
- <https://geoikp.operandum-project.eu/nbs/explorer>: platform voor 'nature-based solutions' met een database met 677 voorbeelden wereldwijd, waarvan een groot deel een bijdrage levert aan het verminderen van verschillende type overstromingsrisico's en droogtes.

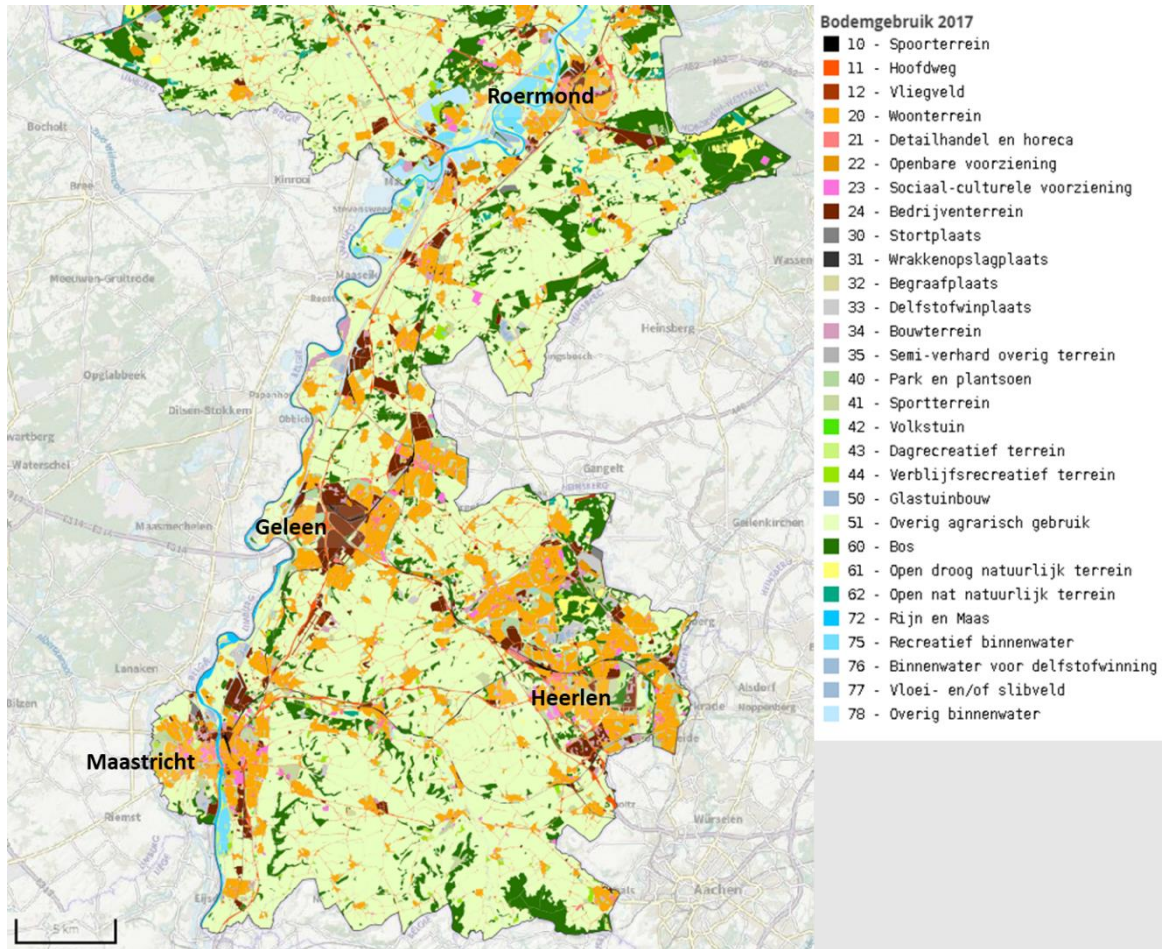
Een scan van deze twee en 7 aanvullende databases toonde slechts ongeveer 5% van de voorbeelden in deze databases voor meer dan 1 doel wordt geregistreerd, dan wel kwantitatief wordt geëvalueerd. Het merendeel blijft bij een kwalitatieve beschrijving. Dit vermindert het begrip over de daadwerkelijke effectiviteit van maatregelen onder verschillende neerslag- en droogtegebeurtenissen (Penning et al., 2023).

Figuur 3.2 toont de geologie van Limburg. In het zuidelijke heuvelland wordt de ondergrond gedomineerd door kalksteen uit het Krijttijdperk. Op de plateaus zijn deze afzettingen vaak bedekt met een laag löss. De beekdalen worden gekenmerkt door afzettingen van zand en leem. Verder naar het noorden en in het dal van de Maas bestaat de ondergrond vooral uit rivierzand en -grind. Hoewel het Nederlandse deel van de stroomgebieden vooral bestaat uit goed doorlatende gesteenten met daarop een relatief dikke bodem, is het belangrijk om op te merken dat dit niet geldt voor het hele stroomgebied van de Geul en de Roer. Het zuidelijk deel van het Geulstroomgebied in Wallonië wordt gekenmerkt door slecht doorlatende gesteenten uit het Carboon, met daarop vaak een dunne bodem. Een vergelijkbare tweedeling zien we in het stroomgebied van de Roer. Ook daar wordt het zuidelijke deel van het stroomgebied in de Ardennen en de Eifel gekenmerkt door slecht doorlatende gesteenten. In Nederland stroomt de Roer vooral de afzettingen van rivierzand en -grind.

Kenmerkend landgebruik in Zuid-Limburg zijn stedelijke gebieden omringd door landbouwgebieden met lokaal ook bos (zie Figuur 3.3). Bossen liggen vaak op de sterk hellende dalwanden. Grote steden in het meest zuidelijke deel zijn Maastricht, Heerlen, Sittard en Geleen, en verder naar het noorden ligt de stad Roermond (oranje gebieden op de kaart). Met name in het stroomgebied van de Geul zijn grote oppervlakten in gebruik als landbouwgebied. Landbouwgebieden bestaan uit grasland, maar ook uit akkerland. Dit onderscheid wordt niet gemaakt in Figuur 3.3. Het stroomgebied van de Geleenbeek kent meer bebouwing.



Figuur 3.2 Schematische weergave geologie van Limburg (TNO, 2023)

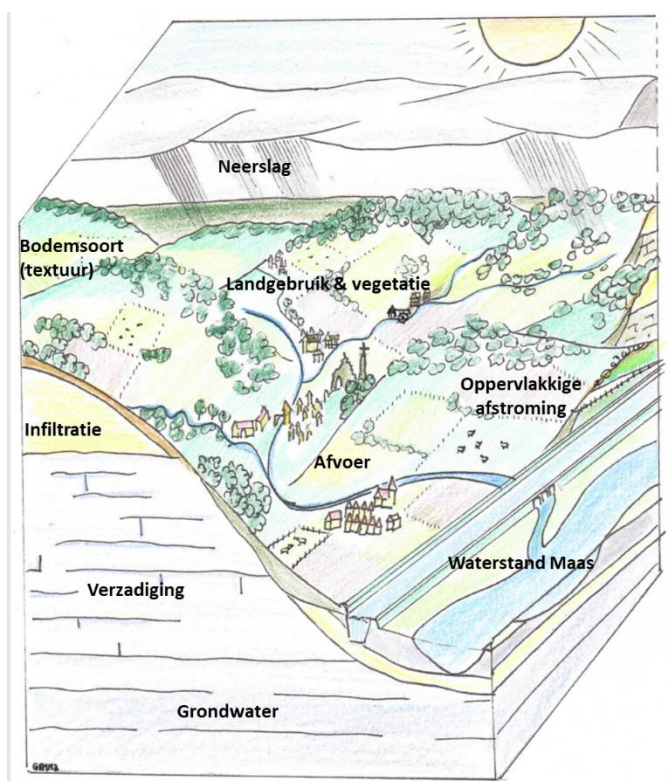


Figuur 3.3 Landgebruik in Midden- en Zuid-Limburg (Provincie Limburg, 2023)

3.1.2

Belangrijkste hydrologische processen en watersysteemkenmerken

Het blokdiagram in Figuur 3.4 beschrijft de hydrologische werking van het watersysteem in Zuid-Limburg.



Figuur 3.4 Schematische weergave Limburgs heuvelland met belangrijke onderdelen van de hydrologische processen (Bron: gemaakt door Gemma Ramaekers in Asselman en Van Heeringen, 2023)

Wanneer sprake is van (extreme) neerslag, dan **infiltreert** een deel van het water in de bodem. Hoeveel en hoe snel regenwater weg kan zakken in de bodem is onder meer afhankelijk van de infiltratiecapaciteit en de mate waarin de bodem verzadigd is. De infiltratiecapaciteit is afhankelijk van het bodemtype en daarmee ook van de geologie. Over het algemeen wordt aangenomen dat de berging van water in de bodem in het zuidelijke deel van het Geulstroomgebied veel minder is dan in het noordelijke deel. Dit komt onder andere doordat de bodems in het noorden dikker zijn en doordat ze liggen op beter doorlatende kalksteen¹.

Een deel van het water dat infiltreert kan verder zakken naar het soms zeer diepe **grondwater**. Met name op plaatsen waar de bodem dun is en op slecht doorlatende gesteenten ligt speelt **subsurface flow** een belangrijke rol. Dat betekent dat een deel van het water dat wegzakt in de bodem net onder het oppervlak afstroomt. In sommige gebieden (in België, maar ook in Nederland) wordt dit proces van ondergrondse afstroming versneld door de aanleg van drainagebuizen.

Het minste water kan wegzakken in verharde gebieden, waaronder wegen, gebouwen, betegelde tuinen en verharde openbare terreinen. Daar zal het water bij stevige buien direct **oppervlakkig afstromen** naar het riool en de beken. Maar ook van verslechte of sterk hellende akkers kan bij hevige neerslag veel water afstromen. Datzelfde geldt voor grasland wanneer het bewerkt wordt met zware machines.

¹ Deze tweedeling is ook te zien in het stroomgebied van de Roer.

Via de beekdalen wordt het water afgevoerd naar de Maas. **Overstromingen** in het beekdal zorgen voor tijdelijke berging van water en dragen bij aan **topvervlakking**.

3.1.3 Sponswerking

3.1.3.1 Natuurlijke sponswerking

Het Limburgse heuvelland kent van nature een relatief sterke sponswerking. In perioden van hevige neerslag wordt water geborgen in de bodem en het (vaak diepe) grondwater. Uit modelberekeningen van Jetten (2022) blijkt dat in juli 2021 in twee deelstroomgebiedjes in het Nederlandse deel van het stroomgebied van de Geul slechts ongeveer 20% van de gevallen neerslag is afgevoerd. De rest is geborgen in de bodem en het grondwater. Gemiddeld is in het hele stroomgebied van de Geul ongeveer 30% van de in juli 2021 gevallen neerslag afgevoerd naar de Maas (Asselman & van Heeringen, 2023). In het Waalse deel van het Geulstroomgebied is ongeveer twee-derde van de gevallen neerslag tot afstroming gekomen. De sponswerking in dit gebied is minder groot dan in het Nederlandse deel doordat dit gebied vaker dunne bodems kent die liggen op slecht doorlatende gesteenten.

Berging van neerslag in het grondwater zorgt voor 'langdurige' sponswerking. Klein (2022) toonde dat het grondwater tijdens de extreme neerslag van juli 2021 snel reageerde: op sommige locaties op de plateaus steeg het grondwater dat meer dan 40 m diep zit soms met wel 2 m. Na de extreme neerslag van juli 2021 duurde het een half jaar totdat het grondwater weer was uitgezakt tot het niveau van voor het hoogwater (Klein, 2022). Dit betekent dat neerslag die in de winter wordt geborgen in het grondwater nog bij kan dragen aan de waterbeschikbaarheid in de zomermaanden.

Het belang van berging en vertraagd afvoeren van regenwater in het Limburgse Heuvelland bleek ook uit de analyses van Kramer (2021). Kramer (2021) heeft in opdracht van RIWA-Maas en verschillende drinkwaterbedrijven gekeken naar de bijdrage vanuit de verschillende zijrivieren aan de afvoer van de Maas bij Keizersveer. Daaruit bleek dat de Geul en de Geleenbeek tijdens droge zomers relatief veel water leveren (omgerekend gemiddeld meer dan 5 l/s per km², terwijl de aanvoer vanuit sommige stroomgebieden in de Ardennen afneemt tot minder dan 1,5 l/s per km²).

Overstromingen in de beekdalen dragen ook bij aan berging van water en aftopping van piekafvoeren. Deze berging duurt echter slechts enkele dagen en draagt dus vooral bij aan het verlagen van piekafvoeren, maar niet aan het verbeteren van de waterbeschikbaarheid in droge perioden. Topvervlakking door overstromingen speelt langs alle drie de beken. Tijdens de watersysteemanalyse die is uitgevoerd door Asselman en van Heeringen (Asselman & van Heeringen, 2023) gaf een expert van Waterschap Limburg aan dat met name langs de Roer ook sprake is van infiltratie vanuit de overstromingsvlakte naar het onderliggende grindpakket. Het is niet bekend hoeveel water op deze manier geborgen wordt.

3.1.3.2 Veranderingen in sponswerking

Menselijk handelen gedurende de afgelopen eeuw heeft de sponswerking van de stroomgebieden van de Geul, de Geleenbeek en de Roer veranderd:

- In het stroomgebied van de Geul is het areaal landbouwgrond (akkerland en grasland) toegenomen ten koste van natuurlijk bos en grasland. Naar verwachting heeft dit geleid tot iets minder infiltratie en daardoor minder berging in het grondwater. Hoe groot deze afname is, is niet bekend.

- In het stroomgebied van de Geleenbeek heeft veel verstedelijking plaatsgevonden. Dit heeft geleid tot meer oppervlakkige afstroming. Echter, ondanks de toename van het verhard oppervlak suggereren de analyses van het hoogwater van juli 2021 en van Kramer (2021) dat de sponswerking van dit stroomgebied nog steeds relatief groot is.
- Kortdurende berging van water is in de stroomgebieden van de Geul en de Geleenbeek vergroot door regenwaterbuffers aan te leggen of uit te breiden ([Waterschap Limburg, 2020](#)). Tijdelijke berging van water door overstromingen in de beekdalen is behouden, vooral omdat gebieden niet zijn beschermd met dijken.
- In het stroomgebied van de Roer is de sponswerking sterk vergroot. Om water vast te houden zijn in het zuidelijk deel van het stroomgebied veel reservoirs/stuwmeren aangelegd. Zeven stuwmeren, allen beheerd door Wasserverband Eifel-Rur, hebben tot doel om de drinkwatervoorziening op peil te houden en het overstromingsrisico te verkleinen. Deze stuwmeren kunnen in geval van hoogwater maximaal 70 miljoen m³ water bergen. Hierdoor kan een hoogwater met een herhalingsstijd van 100 jaar worden afgetopt van ongeveer 300 m³/s naar 60 m³/s (Homann, 2022). Uit berekeningen van het Wasserverband Eifel-Rur voor het hoogwater van juli 2021 blijkt dat de totale piekafvoer naar de stuwmeren ruim 750 m³/s bedroeg. Door berging in de stuwmeren was de afvoer uit de stuwmeren beperkt tot maximaal 100 m³/s. In totaal is er ongeveer 40 miljoen m³ aan water geborgen. Mede daardoor was verder benedenstrooms in het Nederlandse deel van het stroomgebied wel sprake van overstromingen, maar is een echte ramp uitgebleven. Omdat de grootste hoogwaters in de Roer vooral in de winter optreden zorgt het Wasserverband ervoor dat de waterstanden in de reservoirs het laagst zijn in november. Er kan dan veel water worden geborgen. In februari en maart wordt veel water vastgehouden in de reservoirs. Het waterpeil is het hoogst in april en zakt gedurende de drogere zomermaanden langzaam uit. Uit de analyses van Kramer (2021) blijkt ook dat de Roer hierdoor in droge zomers een relatief grote bijdrage levert aan de afvoer van de Maas (gemiddeld afvoer ongeveer 5 l/s per km²).

3.1.3.3 Mogelijke maatregelen om sponswerking te herstellen of te vergroten

De volgende natuurlijke maatregelen zouden de sponswerking in het Limburgse heuvelland kunnen herstellen of vergroten:

- **Herstel van natuurlijk grasland:** Uit analyses van Jetten (2022) blijkt dat de afstroming van regenwater kan worden beperkt door akkerland om te zetten naar natuurlijk grasland. Jetten (2022) berekende dat bij een bui zoals in juli 2021 en bij het huidige landgebruik in twee deelstroomgebieden van de Geul ongeveer 25 tot 35 mm neerslag (van de 165 mm) wordt afgevoerd. Wanneer al het akkerland wordt omgezet naar natuurlijk grasland (met meer organisch materiaal en een lossere structuur in de bovenste bodemlagen) neemt dat af tot 14 à 26 mm; een afname van 25 tot 40%.
- **Herbebossing:** Wanneer het akkerland wordt omgezet naar natuurlijk bos, dan zou het effect nog groter kunnen zijn. Echter, omdat bossen in de zomermaanden meer verdampen dan grasland zou het effect in droge zomers negatief uit kunnen pakken. Ofwel: grootschalige herbebossing kan piekafvoeren verlagen, maar kan ook resulteren in een afname van de waterbeschikbaarheid in droge perioden. Hoe groot dit effect is, is op dit moment niet bekend.
- **Vermindering van de afstroming van akkerland:** uit metingen bij een proefboerderij blijkt dat een goed beheerde bodem in staat is veel water te bergen (Kroonen, 2020). Bij buien van circa 35 tot 40 mm bleek dat er maar 4 mm per m² afstroomt. Van deze 4 mm is er door toepassen van extra maatregelen, zoals drempels tussen aardappelruggen of toepassen van ruitzaai bij mais, circa de helft van het afstromend water extra te bergen (H2O Actueel, 2022).

- **Verruwing van de beekdalen door verhoging van de begroeiingsgraad:** dit kan leiden tot meer topvervlakking en dus lagere piekafvoeren. De extra berging die hierdoor gecreëerd wordt is echter van korte duur en heeft geen groot aanvullend effect op het verminderen van droge perioden.
- **Hermeandering van de beken** kan bij matig intensieve buien mogelijk leiden tot vertraging en afvlakking van de afvoergolf. Modelberekeningen voor de Geul op basis van de extreem intensieve bui van juli 2021 lieten wel zien dat het effect bij dit echt extreem hoogwater verwaarloosbaar is (Slager et al., 2022).

De sponswerking kan ook 'kunstmatig' worden vergroot:

- **De aanleg en het optimaliseren van het beheer van reservoirs en stuwmeren** in het stroomgebied van de Roer hebben een gunstig effect op zowel hoogwater als laagwater. Uit de analyses van het Wasserverband Eifel Rur is gebleken dat in juli 2021 ongeveer 40 m³ water is geborgen. NB: het effect op droogte is in deze analyse nog niet verder gededd.
- Mogelijk bieden verlaten bruinkoolmijnen ook een mogelijkheid om wateropslag te vergroten. Dit vergt echter nader onderzoek.
- In het Nederlandse deel van de stroomgebieden lijkt de aanleg van grote reservoirs niet haalbaar, gegeven het intensieve landgebruik en landschappelijke waardes. De realisatie van (nog meer) **regenwaterbuffers** kan echter wel bijdragen aan het aftoppen van hoogwaters. Dit is vooral nuttig voor tijdelijke berging (dagen tot maximaal weken).
- **Berging in het grondwater** speelt een belangrijke rol bij de sponswerking in Zuid-Limburg. Het is onbekend welke mechanismen precies verantwoordelijk zijn voor de observatie dat de neerslag snel in het diepe grondwater terecht komt. Gebeurt dit vooral lokaal in gebieden met karstverschijnselen? Spelen scheuren een rol? Wanneer dit proces beter bekend is zou ook geïnventariseerd kunnen worden of het mogelijk is om (technische) maatregelen te treffen om dit proces te versterken en de berging in het grondwater te vergroten.
- **Afkoppeling van verharde oppervlakte.** Dit kan de snelle afstroming uit stedelijk gebied verminderen.

3.1.3.4 Voorbeeldproject(en) in het heuvellandschap

Verbetering van de infiltratie op agrarische percelen

In Limburg zijn in het kader van bodemverbetering de afgelopen jaren samen met boeren verschillende maatregelen ontwikkeld. Dit pakket aan maatregelen bestaat uit een verplicht deel (de zogenaamde erosieverordening) en een vrijblijvend deel (maatregelen die bovenop de erosieverordening kunnen worden uitgevoerd om bodemverbetering te bewerkstelligen). Onderdeel van de verplichte erosieverordening in Limburg is de niet-kerende grondbewerking (zie o.a. (Waterschap Limburg, 2020, 2023a)). De Limburgse grond is over het algemeen diep doorwortelbaar en rijk aan natuurlijke grondbewerkers (zoals regenwormen), waardoor goede infiltratiekanalen ontstaan. Dit wordt door de niet-kerende grondbewerking in stand gehouden. Deze infiltratiekanalen zijn gunstig om afspoeling te voorkomen én zorgen voor een hogere teeltopbrengst. Onderzoek naar niet-kerende grondbewerking op andere ondergronden in Nederland, zoals de hoge zandgronden, heeft volgens Brigitte Kroonen (WUR) aangetoond niet hetzelfde effect te hebben. Een erosieverordening is daarom momenteel ook alleen in Limburg van toepassing.

Het programma Water in Balans van Waterschap Limburg heeft een boekje uit gebracht waarin 15 maatregelen worden beschreven waarmee water op agrarische percelen beter kan infiltreren. De maatregelen zijn voorgesteld door LLTB, Waterschap Limburg, provincie Limburg, WUR | Open Teelten locatie Vredepeel en Wijnandsrade en een aantal ondernemers en agrarisch adviseurs. Uit de in 2019 uitgevoerde praktijkproeven en demonstraties blijkt dat afhankelijk van de gekozen maatregel tot wel 10 mm extra water geborgen kan worden. Zo werd op een aantal aardappelpercelen gewerkt met drempels tussen de aardappelruggen, terwijl op andere percelen de rugopbouw van de aardappelen werd verruigd. Beide maatregelen zorgden ervoor dat de afstroming van water wordt vertraagd waardoor meer water de tijd heeft om te infiltreren. Uit de praktijkproeven bleek dat na en tijdens een forse regenbui aantoonbaar minder water van de akkers afstroomde. In droge tijden profiteren de aardappelplanten daarvan. Het toepassen van drempeltjes resulteerde in een 3 tot 4 procent hogere netto-opbrengst. Werken met rullere aardappelruggen leidde tot de hoogste netto-opbrengst. Deze was 7 tot 9 procent hoger dan die van de aardappelen uit de afgestreken ruggen zonder drempels.

Om agrariërs te stimuleren meer water vast te houden op hun percelen heeft Waterschap Limburg een stimuleringsregeling geïnitieerd. Agrariërs kunnen de subsidie aanvragen via de website van het waterschap wanneer zij een van de beschreven maatregelen willen implementeren (Waterschap Limburg, 2023b).

Waterbergen in regenwaterbuffers

Om de kans op een overstromingen te verkleinen heeft waterschap Limburg zo'n 455 regenwaterbuffers aangelegd. Hiermee worden afvoerpieken gereduceerd. Echter, wanneer de regenwaterbuffer vol is kan deze overlopen. In juli 2021 is dit op verschillende plaatsen gebeurd. De buffers zijn doorgaans zo ontworpen dat ze in 24 uur weer leeglopen. De berging van het water is dus van korte duur. Waterschap Limburg werkt nu echter aan de automatisering van sommige regenwaterbuffers. Zo is in juni 2022 de dynamische sturing van de regenwaterbuffer in de Watervalderbeek bij Meerssen in gebruik genomen (Figuur 3.5). Met de automatisering van de schuif kunnen regenwaterbuffers flexibeler worden gebruikt. Ze kunnen bijvoorbeeld later worden ingezet, zodat de buffer niet te vroeg vol is. Volgens het waterschap is het nu ook mogelijk om een beperkte hoeveelheid water in de buffer te laten staan in tijden van droogte te benutten. Naast de inzet van dynamisch bufferen om waterafvoer te verbeteren en droogte te bestrijden kan het voor ecologische doelen worden ingezet (Waterschap Limburg, 2022).



Figuur 3.5 Regenwaterbuffer Groenstergracht, nabij Eygelshoven (Foto N. Asselman)

Naast deze voorbeelden is er door het Waterschap Limburg en de Provincie Limburg ook een Visie Beekdalontwikkeling in Limburg opgesteld in [2018](#) (Waterschap Limburg, 2018). Het doel van deze visie is het realiseren van klimaatrobuuste en veerkrachtige beekdalen van de 280 km Natuurbeken in Limburg om problemen op het gebied van wateroverlast en droogte, waterkwaliteit en ecologie in relatie tot de aanwezige functies op een integrale wijze aan te pakken.

3.2 Hoge Zandgronden

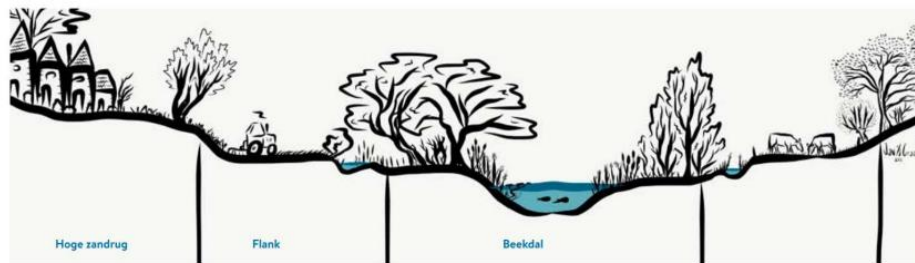
3.2.1 Algemene landschapkenmerken (bodem, geologie, landgebruik, topografie)

Het grootste deel van het hoge zandgrondengebied (Noord-Brabant, Limburg, Overijssel, Gelderland, Utrecht en Drenthe) is vrij-afwaterend wat betekent dat (zonder menselijk ingrijpen in het blokkeren van deze afwatering met bijvoorbeeld stuwen) het neerslagoverschot door hoogteverschillen via beken onder vrij verval richting de rivieren en uiteindelijk naar de zee stroomt. Veel van het regenwater infiltreert eerst naar het grondwater om vanuit daar tot afstroming te komen. Het vergroten van de sponswerking houdt voor dit gebied in dat dit proces van afwateren wordt vertraagd.

3.2.2 Belangrijkste hydrologische processen en watersysteemkenmerken

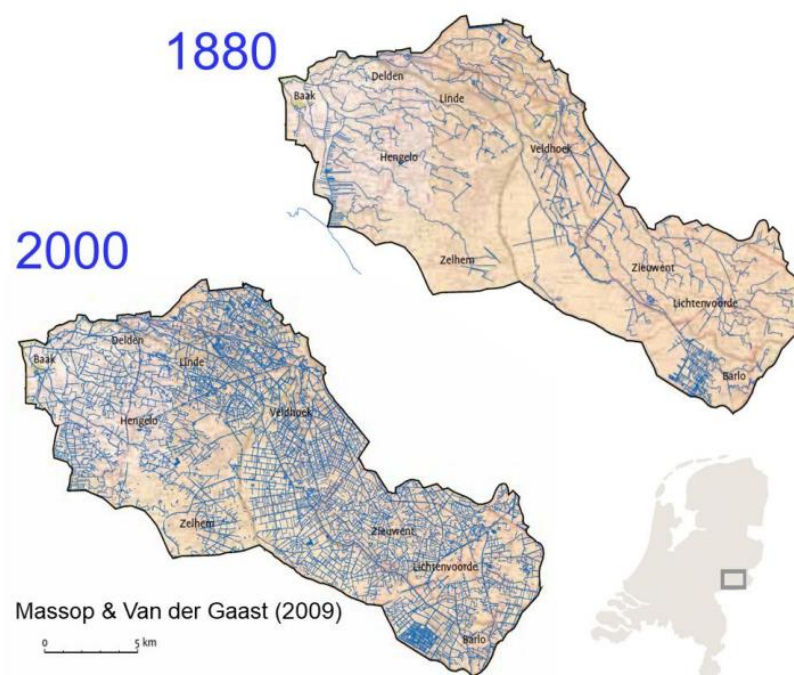
Een beekdal in Oost-Nederland in de hoge zandgronden bestaat uit hoge gronden, lage natte gronden en tussenliggende gebieden (figuur 3.6). De laagten en hoogten in het landschap zijn via het grondwater met elkaar verbonden. Het grondwater stroomt naar de beek en wordt afgevoerd. Als de laagten sterk ontwaterd worden door menselijk ingrijpen, kan het grondwater op de hoogten zich niet goed aanvullen. In de zomer is de afvoer meestal grotendeels afkomstig van grondwater (van den Eertwegh et al., 2021).

Historisch gezien stond het grondwater hoog in de lagere delen: in natuurlijke laagtes en door afwezigheid van ontwatering bevonden zich in deze gebieden door grondwater gevoede vennen, en vond in deze laagtes veenvorming plaats (Hendriks et al., 2023). In het gebied van Rijn-Oost bestaat ongeveer 22% van het landschap uit dit soort laagtes en beekdalen (Ter Harmsel, 2022)



Figuur 3.6 Principe beekdal profiel in de Hoge Zandgronden (Ter Harmsel, 2022)

Op de hoge zandgronden wordt sinds de middeleeuwen de ontwatering gestimuleerd en de afwatering versneld door aanleg van greppels, drainagesloten en aanpassingen in de loop van het beekstelsel om zo droge voeten te creëren voor landbouw en bebouwing (Ter Harmsel, 2022) (Figuur 3.7). Zo is de grondwaterstand verlaagd en de onverzadigde zone vergroot. Daarnaast is grondwateronttrekking voor drinkwater, industrie en landbouw sinds 1900 sterk toegenomen. Ook de verdamping is vergroot door de aanplant van naaldbos en hoogproductieve landbouwgewassen. Daardoor zijn natuurgebieden op de zandgronden, in kwelzones en hoogveenresten verdroogd. Klimaatverandering (langere droge periodes) verergert dit probleem (Hendriks et al., 2023).



Figuur 3.7 Voorbeeld van veranderingen in ontwatering voor een deel van de achterhoek in Nederland. Op de figuur is boven de oppervlakkige ontwatering rond 1880 te zien en onder het veel dichtere ontwateringsnetwerk rond 2000 (van der Gaast et al., 2009).

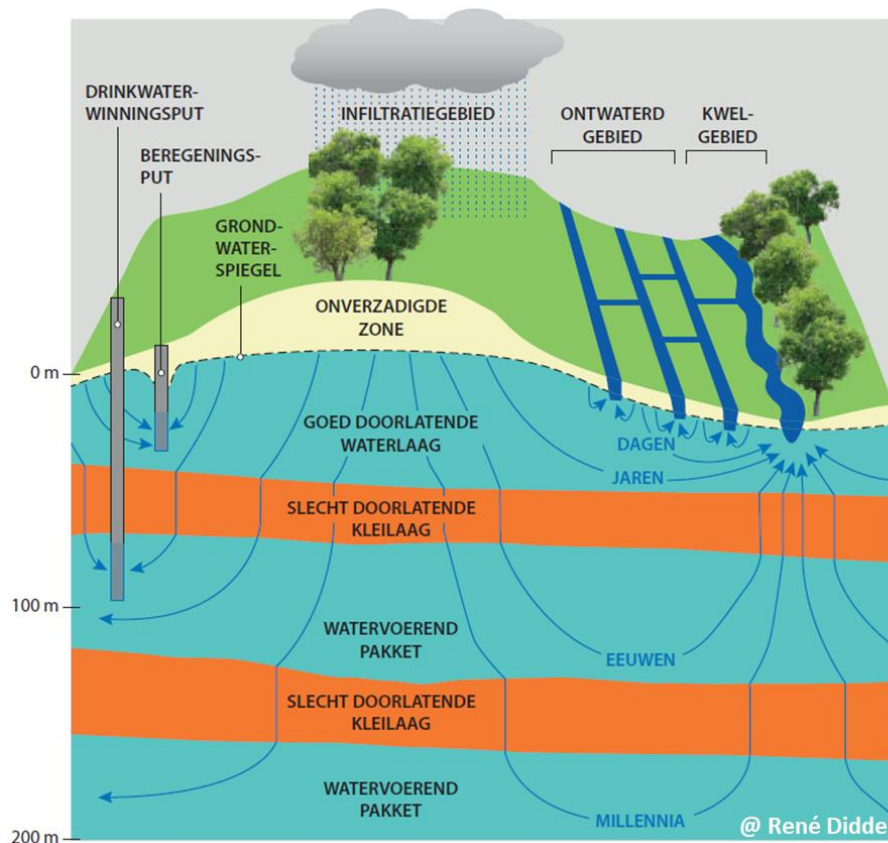
3.2.3 Sponswerking

3.2.3.1 Natuurlijke sponswerking

Het grondwater is de belangrijkste en bovenal grootste component van sponswerking in de hoge zandgronden. Voor de sponswerking van het grondwatersysteem is de reactietijd van het grondwater op wijzigingen in de hydrologie van belang. Modelstudies laten zien dat het systeem traag reageert en ook in een droge periode nog lang water nalevert naar het beekstelsel.

Sponswerking van het grondwatersysteem

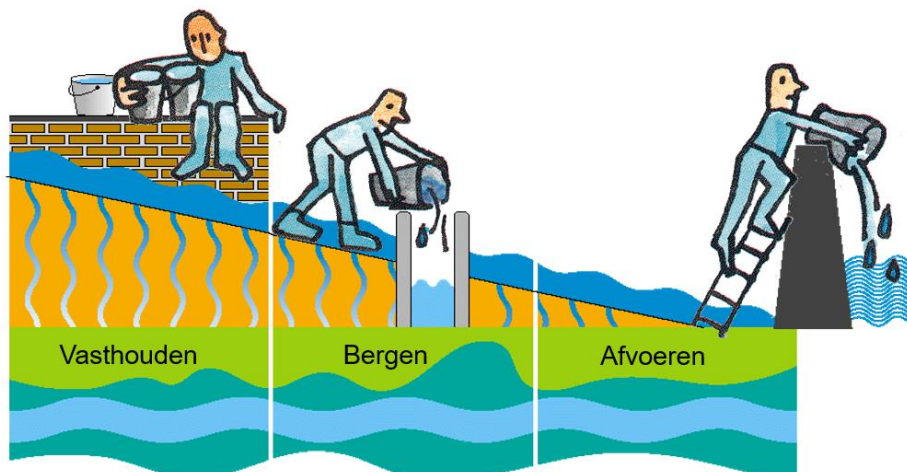
Vrijwel iedere druppel regen die in het hoge zandgrondegebied valt en niet verdampt (het neerslagoverschot) komt in het grondwatersysteem terecht en uiteindelijk via verschillende routes in het oppervlaktewater. Het oppervlaktewater dat via sloten en beken naar de grote rivieren en uiteindelijk naar de zee stroomt, bestaat daarom ook bijna voor 100% uit grondwater. In het grondwatersysteem stroomt de waterdruppel traag via zeer langzame routes in diepere watervoerende pakketten (tientallen tot duizenden jaren) of juist via snellere routes naar de dichtstbijzijnde sloot of drainagebuis (enkele dagen of jaren) naar het oppervlaktewater (zie figuur 3.8). Ondanks dat de grondwaterdruppel zich langzaam voortbeweegt zie je regenbuien wel vrij snel in de oppervlaktewaterafvoer terug en dit komt omdat de waterdruppels vooruit worden geduwd ('piston flow'). Hoe sterker een gebied ontwaterd is, hoe sneller een regenbui of natte periode tot uiting komt in de afvoer. Immers, de afstand naar een beek, sloot of drainagebuis is veel kleiner bij een intensief ontwaterd gebied dan bij een minder goed ontwaterd gebied.



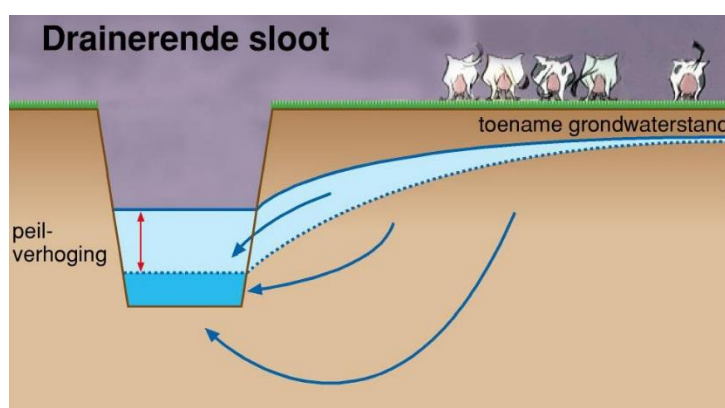
Figuur 3.8 Een schematische voorstelling van een grondwatersysteem in het vrij-afwaterende hoge zandgrondegebied met tijdsaanduiding voor snelheid van de grondwaterstromen (Hendriks et al., 2023).

3.2.3.2 Veranderingen in sponswerking

Het hoge zandgrondengebied is zeer sterk ontwaterd ten behoeve van de landbouw om voldoende lage grondwaterstanden te realiseren met als gevolg dat het neerslagoverschot snel wordt afgevoerd. Dit proces vertragen is de belangrijkste maatregel om de sponswerking in het hoge zandgrondengebied te vergroten en wordt ook wel als (langer) 'vasthouden' aangeduid (zie figuur 3.9). Het principe 'vasthouden' is de stroming van regenwater naar ontwateringsmiddelen te vertragen door (1) de weg naar het ontwateringsmiddel te vergroten door **sloten te dempen en drainagebuizen te verwijderen** of door het ontwateringsniveau te verhogen door **peilverhoging, slootbodemplugging of peilgestuurde drainage**. Het vertragen van de grondwaterafvoer door peilverhoging leidt ook tot hogere grondwaterstanden (Figuur 3.10).



Figuur 3.9 De trits Vasthouden-Bergen-Afvoeren uit Waterbeheer 21^{ste} eeuw



Figuur 3.10 Het vertragen van de grondwaterafvoer door peilverhoging leidt ook tot hogere grondwaterstanden

3.2.3.3 Mogelijke maatregelen om sponswerking te herstellen of te vergroten

De vergroting van de sponswerking zoals boven aangegeven zal vrijwel altijd leiden tot hogere grondwaterstanden wat vaak ook een belangrijk doel is. Het grondwatersysteem van het hoge zandgrondengebied is namelijk structureel verdroogd door met name de intensieve ontwatering voor de landbouw en vele grondwateronttrekkingen, met name voor drinkwater. Dit heeft de droogte van de jaren 2018, 2019, 2020 en 2022 weer duidelijk gemaakt. Maar dit heeft ook geleid tot sterke impulsen het grondwatersysteem weer klimaat-robust te maken. De belangrijkste oplossingsrichting daarbij is het grondwater 'langer vasthouden' dat hier gelijk staat aan 'het vergroten van de sponswerking'.

Dit leidt dus altijd tot hogere grondwaterstanden maar werkt wat betreft 'langer vasthouden' niet in alle situaties altijd de goeie kant op. Wanneer grondwaterstanden dichtbij bij maaiveld komen, bestaat de kans dat neerslag niet meer de bodem in kan dringen en via maaiveld naar de dichtstbijzijnde sloot zal stromen. En dit proces, zogenaamde maaiveldafvoer, gaat veelal veel sneller dan grondwaterstroming naar een sloot. Wanneer en waar maaiveldafvoer optreedt hangt sterk af van de neerslagbui, locatie, het bodemvocht en de grondwaterstand. Over het algemeen kan gesteld worden dat het vasthouden van grondwater goed werkt in het zomerhalfjaar en in de meeste situaties in het winterhalfjaar maar kan juist in sommige gevallen tot extra wateroverlast leiden.

De Louw et al. (2006) rekende verschillende maatregelen door, die allemaal kunnen worden gerekend tot het concept van het vergroten van de sponswerking in het grond- en oppervlaktewatersysteem. In Figuur 3.11 staat de samenvatting van de berekende effecten voor de maatregelen die kunnen worden gerekend onder '**langer vasthouden**' (maatregel A, B, C en D) en '**bergen in het oppervlaktewatersysteem**' (maatregel E, F en G). De figuur toont dat het dempen van sloten sterk bijdraagt aan het oplossen de verdroging, ook positief bijdraagt aan de reductie van de maatgevende afvoer (1Q) maar voor sterk piekafvoeren zoals twee keer maatgevende afvoer (2Q) juist negatief bijdraagt. Bij 'drainage nieuwe stijl' (ook wel **regelbare of peilgestuurde drainage** genoemd) is dit verschil nog veel groter. Dit toont aan dat **een sponsmaatregel gelijktijdig positieve effecten als negatieve effecten kan hebben** en dat de uitwerking sterk per situatie kan verschillen. Het is dus moeilijk om hier eenduidige uitspraken over te doen en zal per gebied maatwerk zijn om zowel het droogteprobleem als reductie van piekafvoeren te bewerkstelligen.

Maatregel	Piekafvoeren		Kans op Natschade	Droogteprobleem
	Q	2Q		
A: Waterconserveringstuw				
B: Slootbodempverhoging (0.5m)				
C: Sloot dempen (helpt van sloten)				
D: Drainage nieuwe stijl (t.o.v. traditionele)				
E: Knijpduiker				
F: Accoladeprofiel met slootbodempverhoging				
G: Waterretentiestuw				
Creatieve maatregel: watercon. knijpduiker				

Figuur 3.11 Effecten op piekafvoeren (1 en 2 keer maatgevend), natschade en droogte van verschillende maatregelen die de sponswerking vergroten (1) 'langer vasthouden in grondwatersysteem' (maatregel A, B, C en D) en 'oppervlaktewaterafvoer vertragen' (maatregel E, F en G) (P. de Louw et al., 2006).

Sponswerking van het oppervlaktewatersysteem

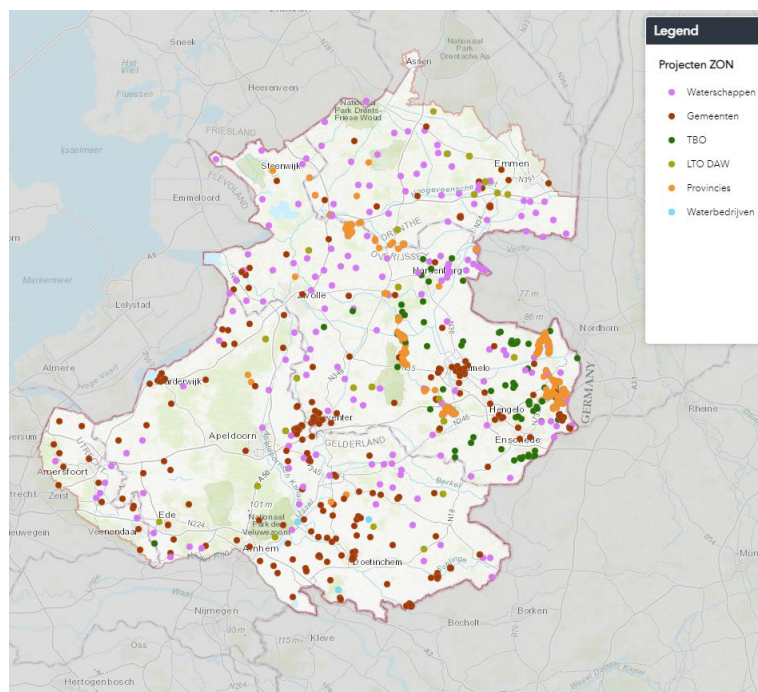
Is de regendruppel in het oppervlaktewatersysteem terecht gekomen (meestal via het grondwatersysteem), kan deze verder worden vertraagd door het water op maaiveld te bergen of het langzamer te laten stromen. Dit is de sponswerking vergroten vanuit het oppervlaktewatersysteem geredeneerd en is de 2e actie in de WB21-trits Vasthouden-Bergen-Afvoeren (zie Figuur 3.9). Het vergroten van de sponswerking kan worden gedaan door water op het maaiveld te bergen (actief of via overstromingsvlaktes), de af te leggen weg vergroten (bijv. via hermeandering van beken) en obstakels aan te brengen in de watergangen (hout, niet maaien in sloten, etc.). Het is echter veel moeilijker om de waterdruppels in het oppervlaktewatersysteem te vertragen dan in het grondwatersysteem omdat er nauwelijks weerstand in het oppervlaktewatersysteem zit en er is ook veel minder ruimte beschikbaar om het water (tijdelijk) te bergen. Bijvoorbeeld, een stuw in een waterloop leidt alleen maar tot extra berging en vertraging van de afvoer als er nog geen druppel over de stuw stroomt. Is het

waterpeil gestegen tot aan de stuw en stroomt er water over, dan zal elke druppel die dan nog in de waterloop terecht komt, vrijwel direct worden afgevoerd. Het is dan ook deze reden waarom dat 'vasthouden' op de eerste plaats komt in de WB21-trits, en dan pas het 'bergen' in het oppervlaktewatersysteem. De oplossing zit in het combineren van sponsmaatregelen in grond- en oppervlaktewater. De kosten voor deze integrale beekdal-brede benadering zitten in het ruimtebeslag in de beekdalen. Extensief beheerd hooiland is een van weinige economische functies waarmee zo'n overstromingsvlakte zich laat combineren.

3.2.3.4 Voorbeeldprojecten

Op de Hoge Zandgronden worden veel projecten en pilotonderzoeken uitgevoerd om de sponswerking van het landschap te vergroten, met een sterke focus op verminderen van verdroging. Zo lopen er verschillende projecten om de zoetwaterbeschikbaarheid in het gebied veilig te stellen binnen het overkoepelende programma ZON (Zoetwatervoorziening Oost-Nederland, Figuur 3.12) (ZON, 2021). Daarin wordt onder het motto van "water sparen, water aanvoeren, water accepteren" sinds 2015 gezocht naar een juiste balans tussen te nat en te droog. Dit gebeurt samen met 67 regionale partners (vier provincies, vijf waterschappen, en meer dan 70 terreinbeheerders, grondeigenaren, natuur- en milieuorganisaties, LTO, drinkwaterbedrijven). Fase 1, uitgevoerd tussen 2019 en 2022, focuste op snelle, zichtbare resultaten met "geen spijt" maatregelen, zoals het invoeren van regelbare drainage, het verwijderen van detailontwatering, het dempen, verondiepen en afdammen van sloten en greppels, het verhogen en verkleinen van duikers, het plaatsen van stuwen, en het aanleggen van infiltratiegreppels. De uitvoering hiervan gebeurde vooral op kleine schaal na een gedegen detailanalyse van het gebied en in samenspraak met de gebruikers, onder wie veelal agrariërs en landgoedeigenaren. Het animo vanuit de beheerders bleek groot. In de Achterhoek wordt bijvoorbeeld vraaggestuurd gewerkt: inmiddels hebben zich al meer dan 470 deelnemers gemeld, waarvan ca. de helft is afgehandeld. Door de kleinschaligheid van de maatregelen, zijn er nog geen zichtbare resultaten te meten. In de volgende fase van ZON zal echter meer gefocust worden op grotere, aangewezen gebieden.

In de volgende paragrafen worden een aantal sponswerkingsprojecten binnen dit overkoepelende programma uitgelicht.



Figuur 3.12 Projecten binnen het ZON programma (ZON, 2021)

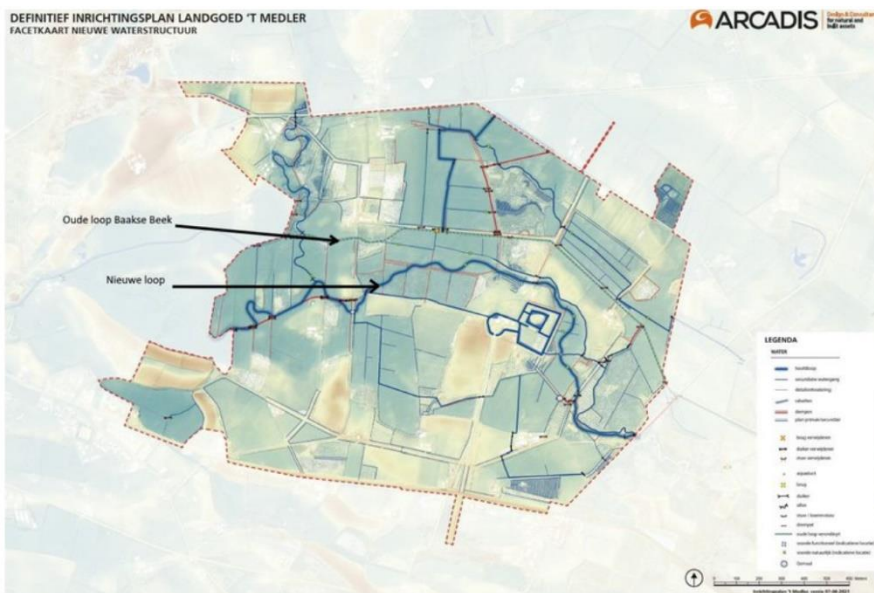
1 Wierdense Veld

Het [Wierdense Veld](#), gelegen bij Almelo, is een hoogveenlandschap. Door verdroging staat het gebied echter onder druk. Hoogveenmos kan namelijk alleen groeien op een ondoorlatende gliedelaag (een laag van organisch materiaal), die het regenwater tegenhoudt en zorgt dat het veenmos continue nat en zompig blijft. Echter, doordat veen vroeger is afgegraven, zijn er lekken in de gliedelaag ontstaan waardoor het regenwater wegloopt naar de zandondergrond. In 2021 en 2022 zijn de lekken daarom gedicht met leemhoudend materiaal van 30-40 cm dik. Om te zorgen dat het water ook niet horizontaal zal weglopen, worden nog drie soorten maatregelen uitgevoerd: (1) de aanleg van aarden walletjes in de ontginningsporen, (2) de plaatsing van folieschermen langs de rand van het gebied die reiken tot op de ondoorlatende bodemlaag en (3) het verwijderen van kleine bomen en struiken om verdamping te verminderen en te voorkomen dat de wortels de ondoorlatende bodemlaag weer lek maken (Landschap Overijssel, 2023).

2 Landgoederenzone Baakse Beek

De landgoederenzone Baakse Beek, gelegen tussen Ruurlo en Wichmond, was ooit een zeer nat gebied maar kampt nu al decennia met ernstige verdroging en behoud van het historisch erfgoed vergt continue inspanning. Door het gebied loopt de Baakse Beek, een gekanaliseerde waterloop in het hogere gedeelte van het gebied die het gebied snel ontwaterd. Om het gebied te vernatten, wordt de Baakse Beek verondiept en zal er een nieuwe waterloop worden aangelegd door de Veroude, ondiepe slenk in het laagste gedeelte van het gebied worden blootgelegd (Figuur 3.13). Uitgangspunten hierbij zijn dat het water zoveel mogelijk zijn eigen weg kan zoeken, kwel dominantier wordt, en het gebied wordt ingericht met natte bronvegetaties bijvoorbeeld door naaldbos om te vormen naar loofbos.

Dit wordt zo ook gedaan op landgoed 't Medler. Daar krijgt de slenk een breedte van 30 meter en diepte van 30 cm. Op deze manier kan overvloedig regenwater in de breedte uitstromen en langzaam de grond in kan zakken en stijgt het peil uiteindelijk zo'n 30cm. 30 hectare grond is daardoor niet meer beschikbaar voor landbouwactiviteit en komt ten goede aan nieuwe natuur (Waterschap Rijn en IJssel, 2022).



Er komt een nieuwe waterloop. De oude waterloop wordt verondiept (Bron: Waterschap Rijn en IJssel/Arcadis)

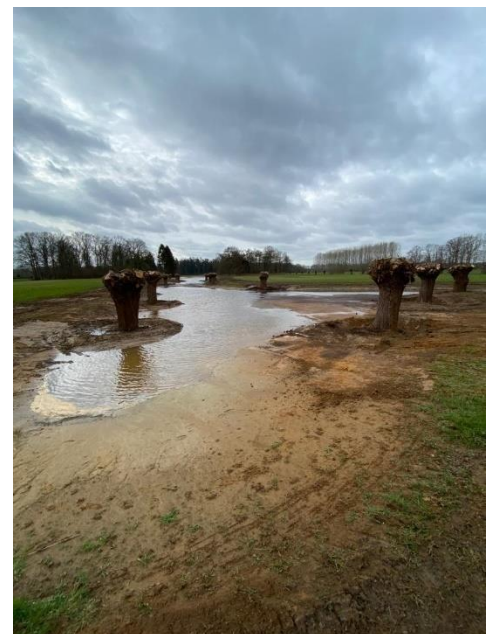


Figure 3-13 Rechts: nieuwe Baakse Beek (de oude "Vordense Beek") in 't Medler

3 Leuvenemse/Hierdense beek

Het herstel van de Leuvenemse/Hierdense beek is een grootschalig project om deze beek (die op verschillende trajecten een andere naam heeft) weer de ruimte te geven om zich natuurlijk te ontwikkelen (Waterschap Vallei en Veluwe, 2016). De beek mag in grote delen weer zonder beperkingen buiten zijn oevers treden, en daarmee is dit een van de koploperprojecten op het gebied van integraal beek- en stroomgebiedherstel.

4 Noardlike Fryske Wâlden

Ook in de hogere zandgronden rond Twijssel (prov. Fryslan) is onderzoek gedaan naar het vasthouden van water voor tegengaan van droogte. In deze proef zijn slootpeilen hoger gezet, door de aanleg van nieuwe stuwen in sloten en aanpassingen aan duikers. Belangrijk neven doel was na te gaan of deze maatregelen invloed zouden hebben op de vegetatiedoelen in het nabijgelegen Tjisselermiede. De eerste meetresultaten toonden een kleine verhoging van de grondwaterstand, maar deze was dusdanig klein dat een grootschalige peilverhoging op de hele hogere zandgronden geen invloed lijkt te hebben op de vegetatiedoelen in het Tjisselermiede (Noardlike Fryske Walden, 2021).

Naast deze vier voorbeelden, zijn er ook verschillende pilots en grootschalige onderzoeken die specifieke functies proberen te stimuleren, zoals klimaatadaptieve drainage en paludicultuur als een vorm van aangepast landgebruik. Het onderzoeksproject KLIMAP onderzoekt verschillende hiervan in een serie aan proefgebieden (KLIMAP, 2023).

Ook lopen er op het moment van schrijven verschillende verdiepende onderzoeken naar een meer klimaat-robuste inrichting van de hoge zandgronden, zoals NWO-NAT, NWO-Castor, NWO-Wunder en NWO-refresh. Resultaten van deze onderzoeken zullen in de komende 2 jaar beschikbaar komen.

3.3 De stroomgebieden van de Rijn en de Maas

De stroomgebieden van de Rijn en de Maas liggen grotendeels bovenstrooms van Nederland. Ze zijn echter erg belangrijk voor de wateraanvoer naar Nederland. Samen voeren ze drie keer meer water aan dan er aan neerslag in Nederland valt (Kwadijk, 2007). Deze buitenlandse stroomgebieden zijn daarmee zeer belangrijk voor de zoetwaterbeschikbaarheid in grote delen van Nederland, zeker in droge perioden. Daarnaast kunnen grote delen van Nederland vanuit deze rivieren overstromen. De sponswerking van de Rijn en de Maas is daarmee van groot belang voor zowel het overstromingsrisico als het droogterisico in Nederland.

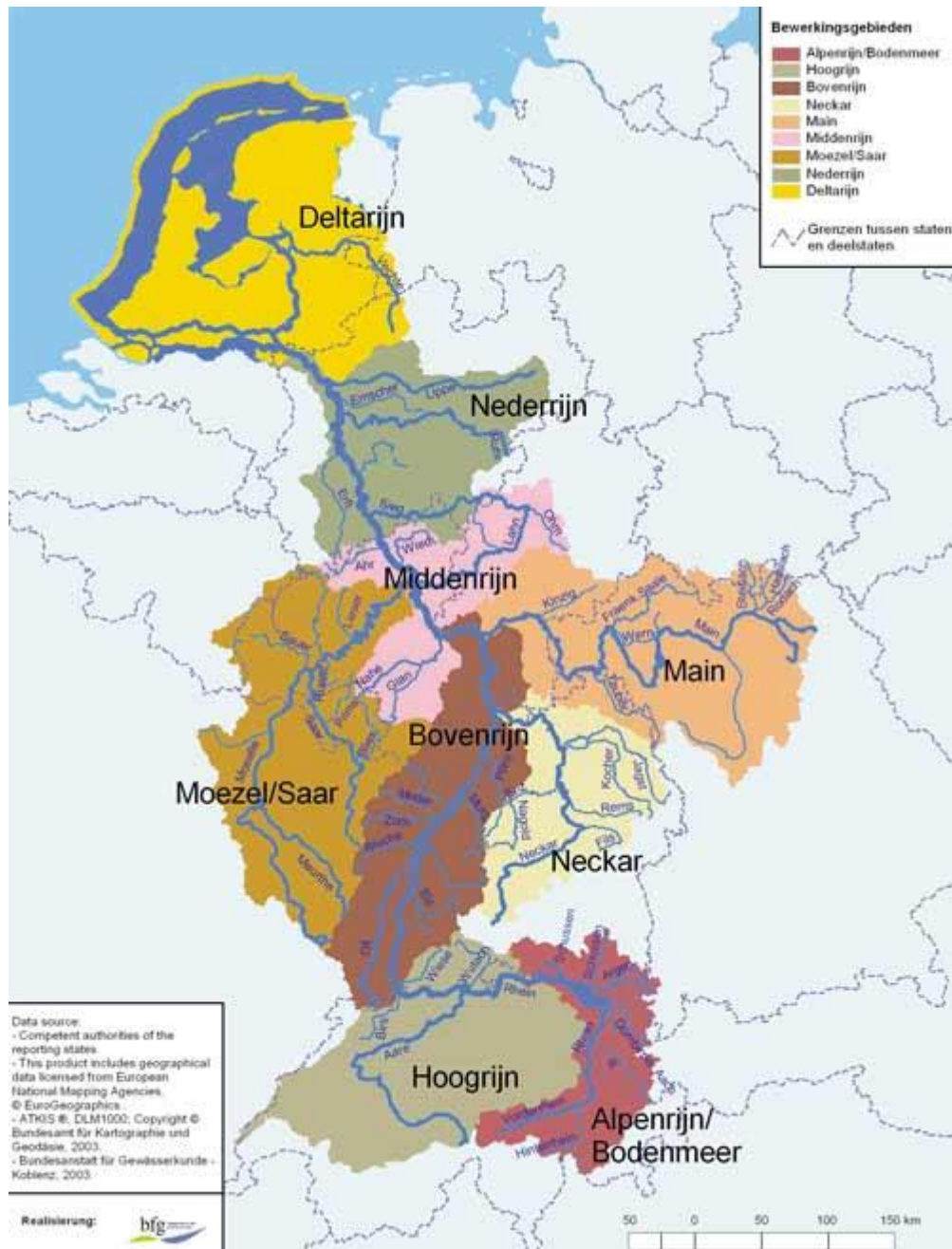
3.3.1 Algemene landschapkenmerken (bodem, geologie, landgebruik, topografie)

Rijn

De Rijn is ruim 1200 km lang. Het stroomgebied beslaat 185.000 km² (Figuur 3.14). Het Rijnstroomgebied kan ruwweg worden onderverdeeld in drie hoofddelen:

- 1 De Rijn ontspringt in de Zwitserse Alpen. Het Alpiene deel van de Rijn beslaat de Hoogrijn en de Alpenrijn (Figuur 3.14). De maximale hoogte in dit deel van het stroomgebied bedraagt meer dan NAP +4000 m. Het landgebruik bestaat uit landbouw in de lagere regionen en bos, gras, onbegroeide gebieden en gletsjers op de hoger gelegen hellingen.
- 2 Het middentraject wordt gekenmerkt door lagere bergen en heuvels en beslaat de Bovenrijn, Middenrijn en de zijrivieren Neckar, Maien en Moezel. De bergen van het middengebergte in Duitsland, waaronder de Vogezes en Zwarte Woud, bereiken hoogtes van meer dan NAP+1000 m in het zuiden tot ongeveer NAP +600 m richting het noorden. Het landgebruik bestaat uit gemengde landbouw, wijngaarden op zonnige valleihellingen, en bos op de hogere delen.

- De Nederrijn en de Deltarijn stromen door laaglandgebieden. Het landgebruik bestaat naast stedelijk gebied vooral uit akkerland en grasland.



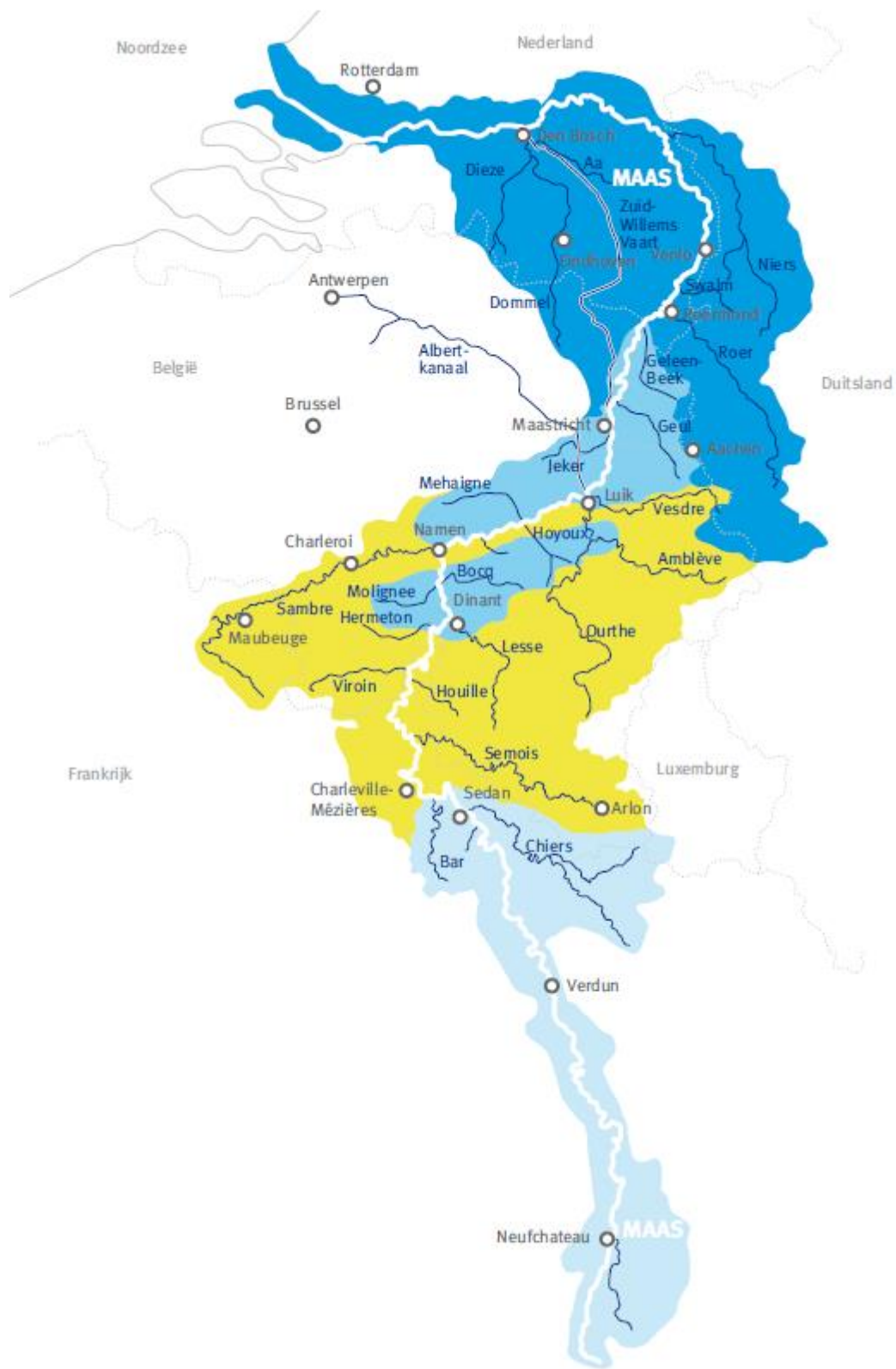
Figuur 3.14 Het stroomgebied van de Rijn (IKSR, 2023)

Maas

De Maas ontspringt in Frankrijk en stroomt via België naar Nederland. Kramer (2021) verdeelt het stroomgebied in vier delen (Figuur 3.15):

- De bovenloop (Lotharingse Maas), van de bron te Pouilly-en Bassigny tot de monding van de Chiers. Dit deel van het stroomgebied is langgerekt en smal. Het terrein is glooiend. De ondergrond bestaat uit kalksteen. Deze ondergrond is goed doorlaatbaar en vruchtbaar en dat maakt de bodem geschikt voor akkerbouw.

- 2 De Ardense Maas, met belangrijke zijrivieren zoals de Semois, Viroin, Lesse en Ourthe. De Maas doorsnijdt hier rotsgesteente, waardoor een smalle rivier en een groot verhang zijn ontstaan. De ondergrond wordt gekenmerkt door slecht doorlatend gesteente, zoals leisteen.
- 3 De middenloop beslaat de regio Namen-Luik-Dinant en de regio Namen-Maastricht-Aken. Hier bestaat de ondergrond uit kalksteen.
- 4 De benedenloop van de Maas, met als belangrijkste zijrivieren de Roer, Niers en Dieze.



Figuur 3.15 Het stroomgebied van de Maas (Kramer, 2021)

3.3.2 Belangrijkste hydrologische processen en watersysteemkenmerken

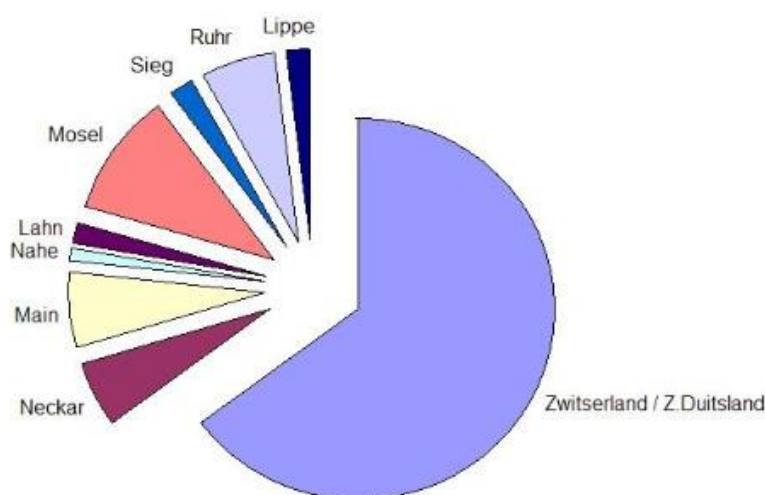
Rijn

De Rijn is een gemengde rivier. In de Hoogrijn en de Alpenrijn wordt de afvoer vooral bepaald door sneeuwsmelt in de zomer. Benedenstrooms spelen regen en verdamping een belangrijke rol, wat resulteert in hogere afvoeren in de wintermaanden. Door deze combinatie wordt de afvoer van de Rijn gekenmerkt door een regelmatig regiem.

De kans op hoogwater is het grootst in de winter en het vroege voorjaar, wanneer neerslag valt op een verzadigde ondergrond of smeltende sneeuw en wanneer de verdamping gering is. De rivieren in het middentraject (met name de Moezel) leveren dan een groot deel van het water (Figuur 3.16a). In perioden met lage rivierafvoeren wordt juist relatief veel water aangevoerd uit de Alpen. In het droge jaar 1976 kwam ongeveer twee-derde van het water uit de Alpen (Figuur 3.16b). Toen de Rijnafvoer in Nederland in de zomer extreem laag was bedroeg dat aandeel ruim 90% (Kwadijk, 2007).



Figuur 3.16a Herkomst van het water tijdens het hoogwater van 1993 (Kwadijk, 2007)



Figuur 3.16b Herkomst van het water in het droge jaar 1976 (Kwadijk, 2007)

Maas

De gemiddelde afvoer van de Maas bij de monding ligt rond de 350 m³/s. De laagst gemeten afvoer te Luik bedraagt slechts 20 m³/s, terwijl de hoogst gemeten afvoer bij Luik meer dan 3000 m³/s bedraagt. Dit is een verschil van een factor 150. Het geeft aan dat het afvoerregime van de Maas relatief grillig is: de verschillen tussen hoog- en laagwater zijn groot. Ter vergelijking, het verschil tussen hoge en lage afvoeren op de Rijn bedraagt slechts ongeveer een factor 20.

Het grillige afvoerverloop van de Maas wordt voor een groot deel verklaard door het feit dat de Maas een regenrivier is. Dat betekent dat de afvoer van de Maas vooral bepaald wordt door de neerslag die valt in het stroomgebied. In het stroomgebied van de Rijn wordt een deel van de afvoer geleverd door het smelten van gletsjers en sneeuw in de Alpen. Er zijn geen gletsjers aanwezig in het stroomgebied van de Maas. Ook de buffering van neerslag in de vorm van sneeuw is in het stroomgebied van de Maas beperkt.

Afvoerpieken op de Maas bij de Nederlandse grens worden vooral veroorzaakt doordat de regen die in Wallonië valt snel tot afstroming komt. Dit deel van het stroomgebied is steil en de bodem is slecht doorlatend. Er vindt daardoor weinig buffering plaats.

3.3.3 Sponswerking

3.3.3.1 Natuurlijke sponswerking

Sneeuw en ijs

Het verschil tussen hoge en lage afvoeren is in de Maas veel groter dan in de Rijn. Dit wordt echter niet alleen veroorzaakt door verschillen in sponswerking van de bodems in het stroomgebied, maar ook door het vrijwel ontbreken van buffering van water in de vorm van sneeuw en ijs in het Maas-stroomgebied. De verwachting is dat deze bufferwerking in de Rijn door klimaatverandering ook kleiner zal worden. Gletsjers zullen naar verwachting voor het einde van deze eeuw zijn verdwenen en door de hogere temperaturen zal er minder neerslag worden opgeslagen in de vorm van sneeuw (de Rijn wordt net als de Maas een regenrivier, met een grilliger afvoerregiem).

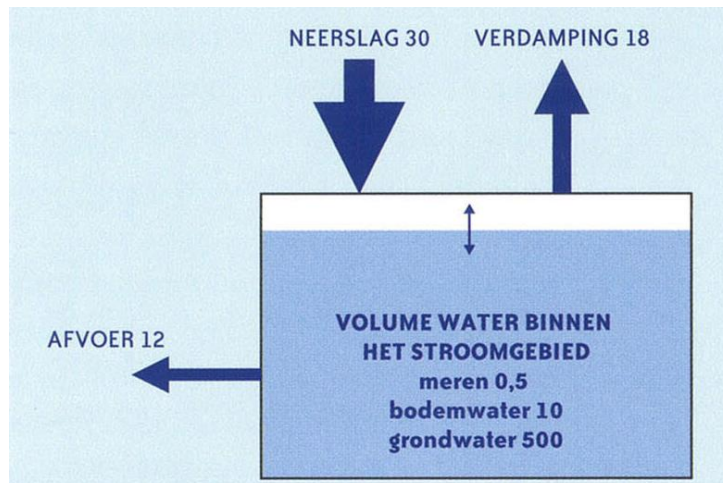
Berging van water in overstromingsvlakten

Bij zeer hoge afvoeren kunnen delen van het stroomgebied overstromen. Dit leidt tot een afname van de piekafvoer benedenstrooms. Deze aftopping kan worden gezien als sponswerking, maar de opslag van water is slechts van tijdelijke aard. Deze vorm van aftopping en berging van water leidt vooral tot een vertraging in de afvoer van enkele dagen tot weken. Langs de Maas en de belangrijke zijrivieren treden overstromingen op, maar de omvang (in termen van km²) is beperkt. Het effect op de afvoerpiek is daardoor ook beperkt. Volgens Buiteveld (2017) bedraagt de demping van de piekafvoer op de Maas (bij extreme hoogwaters) door overstromingen bovenstrooms van de Nederlandse grens maximaal 5%. In het Nederlandse deel van de Maas speelt **topvervlakking** wel een grote rol. De Jong & Asselman (2019) en Asselman et al. (2022) hebben berekend dat bij een afvoerpiek van 4400 m³/s en een zeer spitse (kortdurende) afvoergolf, de piekafvoer tussen Eijsden (nabij de grens) en Cuijk met ongeveer 1000 m³/s af kan nemen.

In tegenstelling tot de Maas leiden overstromingen langs de Rijn in Duitsland naar verwachting wel tot zeer sterke aftopping van de afvoerpieken op een maximum afvoer van ongeveer 18.000 m³/s. Zonder deze aftopping zou de afvoer zeker enkele duizenden m³/s hoger kunnen worden.

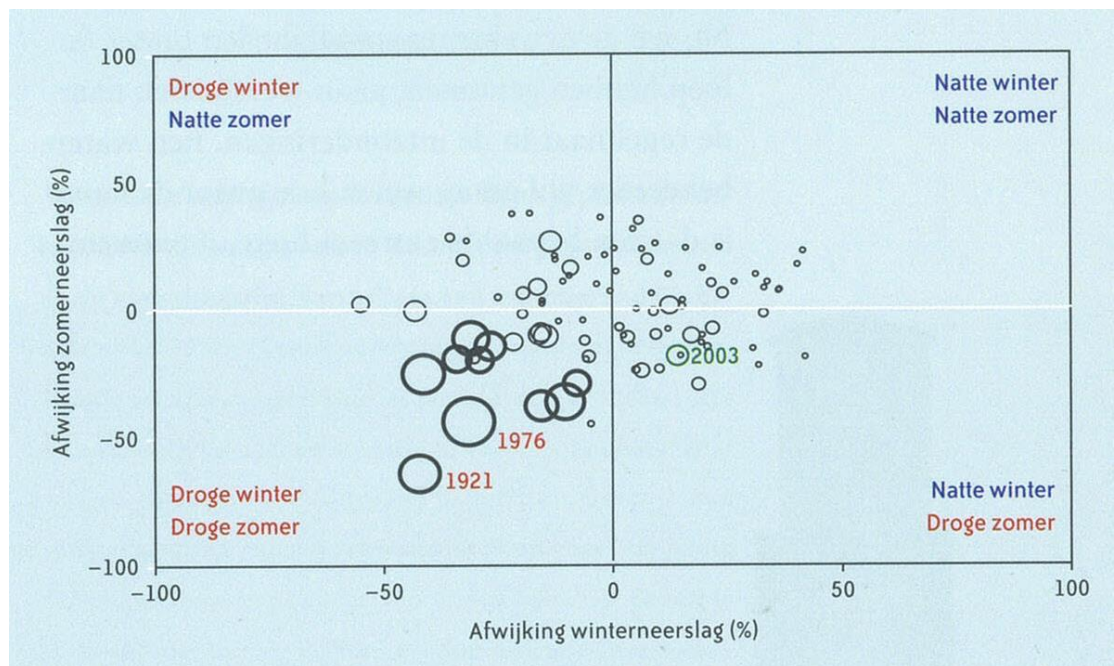
Grondwater

In het stroomgebied van de Maas, vindt berging van water vooral plaats in de vorm van grondwater. Het grondwaterreservoir is ongeveer 500 km³ groot (de Wit & Joenje, 2008). Dat is ruim 40 keer meer dan de Maas jaarlijks aan water afvoert (Figuur 3.17).



Figuur 3.13 Langjarig gemiddelde waterbalans in km³ in de Maas (de Wit & Joenje, 2008)

Extreem lage afvoeren komen vooral voor wanneer het in de zomer **en** in de voorafgaande winter droog is geweest. Wanneer het alleen in de zomer, of alleen in de winter droog is geweest, dan is de kans op watertekorten veel kleiner. Dit komt doordat het grondwaterreservoir in dat geval nog water kan naleveren. Hoe deze grondwaterreservoirs precies werken is op dit moment niet goed bekend, maar de analyse van De Wit (2008, zie Figuur 3.14) laat wel zien dat sponswerking in het stroomgebied van de Maas belangrijk is en dat de **sponswerking waarschijnlijk vooral het gevolg is van berging in het grondwater**.



Figuur 3.14 Indicatie van afvoertekorten in de Maas in de zomer afhankelijk van de correlatie tussen afwijkingen in zomer- en winterneerslag. Ieder bolletje representeert een jaar tussen 1911 en 2003. De grootte van het bolletje illustreert het afvoertekort in het zomer halfjaar (de Wit & Joenje, 2008)

Kramer (2021) heeft in opdracht van RIWA-Maas en verschillende drinkwaterbedrijven gekeken naar de bijdrage vanuit de verschillende zijrivieren aan de afvoer van de Maas bij Keizersveer. Een overzicht van de procentuele bijdragen tijdens 6 droge jaren is te zien in Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Procentuele bijdrage aan de Maas afvoer tot aan Keizersveer voor de maand juli t/m sept voor 6 droge jaren. De totaalafvoer is de som van alle bemeten zijrivieren (Kramer, 2021).

Stroomgebiedsdeel	Bijdrage per zijrivier aan totaalafvoer in juli-sept [%]						Oppvl. km ²	Gemiddeld Oppervlakte	
	2020	2019	2018	2017	2011	2003		%	%
Boven									
Stenay	9,8	12,5	13,9	8,9	8,5	9,3	3904		
Chiers	15,8	14,9	14,2	9,7	8,7	12,2	2222		
Bar	1,5	1,6	1,8	1,6	1,1	1,4	389		
	27,2	29,0	29,9	20,2	18,2	22,9	6515,0	25	26,6
Ardennen									
Semois	3,0	3,6	3,8	7,3	3,6	4,8	1358		
Viroin	1,5	1,4	1,2	1,2	1,3	1,3	593		
Houile	0,2	0,3	0,3	0,6	0,3	0,4	186		
Hermeton	0,5	0,3	0,3	0,2	0,3	0,4	161		
Lesse	2,6	3,0	2,8	3,9	2,7	3,7	1314		
Sambre	11,7	10,0	11,9	9,0	11,6	10,7	2863		
Ourthe	3,5	4,1	3,2	5,2	3,3	4,3	1597		
Ambleve	5,0	6,2	4,9	8,4	4,6	4,7	1044		
Vesdre	5,0	5,8	4,7	5,0	4,6	4,2	677		
	32,9	34,7	33,1	40,8	32,3	34,6	9793,0	35	40,0
Midden									
Molignee	0,9	0,7	0,6	0,5	0,6	0,9	127		
Bocq	1,7	1,3	1,4	0,9	1,1	1,5	188		
Hoyoux	0,8	0,5	0,5	0,4	0,5	0,8	246		
Mehaigne	0,7	0,7	0,6	0,6	0,8	1,2	345		
Jeker	1,9	2,0	1,8	1,8	1,9	2,9	463		
Geul	3,3	3,3	2,3	2,4	2,1	2,6	338		
Geleenbeek	2,6	2,5	2,1	2,4	2,4	3,0	203		
	11,8	11,0	9,3	9,1	9,3	13,0	1910,0	11	7,8
Beneden									
Roer	16,4	13,1	16,5	12,2	14,8	15,7	2105		
Swalm	2,4	2,3	1,8	1,8	1,8	2,1	130		
Niers	5,1	4,4	4,5	5,3	6,2	6,6	1220		
Dieze	4,2	5,4	5,0	10,6	17,2	5,1	2800		
	28,0	25,2	27,7	29,9	40,1	29,6	6255,0	30	25,6
Totaal	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	24473	100,0	100,0

Het bovenstroomse deel van het stroomgebied van de Maas (bijna 27% van het oppervlak van het totale stroomgebied) levert in droge zomers ongeveer 25% van het water. Deze percentages komen redelijk overeen.

De rivieren in de Ardennen leveren echter maar 35% van het water terwijl dit gebied 40% van het totale stroomgebied beslaat. Kramer (2021) merkt op dat de slechte doorlatendheid van de ondergrond in dit deel van het stroomgebied en het grote verhang bijdragen aan een snelle afvoer van de gevallen neerslag. De bijdrage van dit gebied aan hoogwatergolven is daarom groot, de bijdrage aan lage afvoeren relatief gering. De grootste bijdrage wordt hier geleverd door de Sambre, welke een groot stuwmeer bovenstrooms bevat, dat mede voor de scheepvaart tijdens laagwater wordt ingezet.

De rivieren in de middenloop leveren tijdens droge zomers juist bovengemiddeld veel water: ze beslaan minder dan 8% van het oppervlak maar leveren gemiddeld ongeveer 11% van het water. Deze rivieren kennen blijkbaar een betere sponswerking, waarschijnlijk doordat de rivieren gelegen zijn in vlakkere gebieden met doorlaatbare bodems (Kramer, 2021).

Ook de rivieren in de benedenloop dragen bovengemiddeld bij aan de afvoer tijdens laagwater (30% van de afvoer, tegen 26% van het oppervlak). Dit kan mede verklaard worden door de bovenstroomse stuwmeren, bodemopbouw en topografie. Met name de bijdrage van de Roer valt op. De bijdrage kan oplopen tot meer dan 16% terwijl het stroomgebied van de Roer minder dan 9% van het totale oppervlak beslaat. Deze rivier kent dus een zeer grote sponswerking die vooral samenhangt met de aanwezige stuwmeren.

Een vergelijkbaar overzicht voor de Rijn is nog niet beschikbaar

3.3.3.2 Veranderingen in sponswerking

Door klimaatverandering zullen de gletsjers in de Alpen smelten en zal er minder neerslag geborgen worden in de vorm van sneeuw. Dit zal leiden tot een grilliger afvoerregiem van de Rijn. Daarnaast geldt voor zowel de Rijn als de Maas dat klimaatverandering zal resulteren in nattere winters en drogere zomers, waardoor in de winter de kans op hoogwater toeneemt en er in de zomer een grotere kans is op langdurige perioden met lage afvoer.

Verschillende studies laten zien dat veranderingen in landgebruik een gering effect hebben op het afvoerregiem van de Rijn en de Maas (Pfister et al., 2004).

3.3.3.3 Mogelijke maatregelen om sponswerking te herstellen of te vergroten

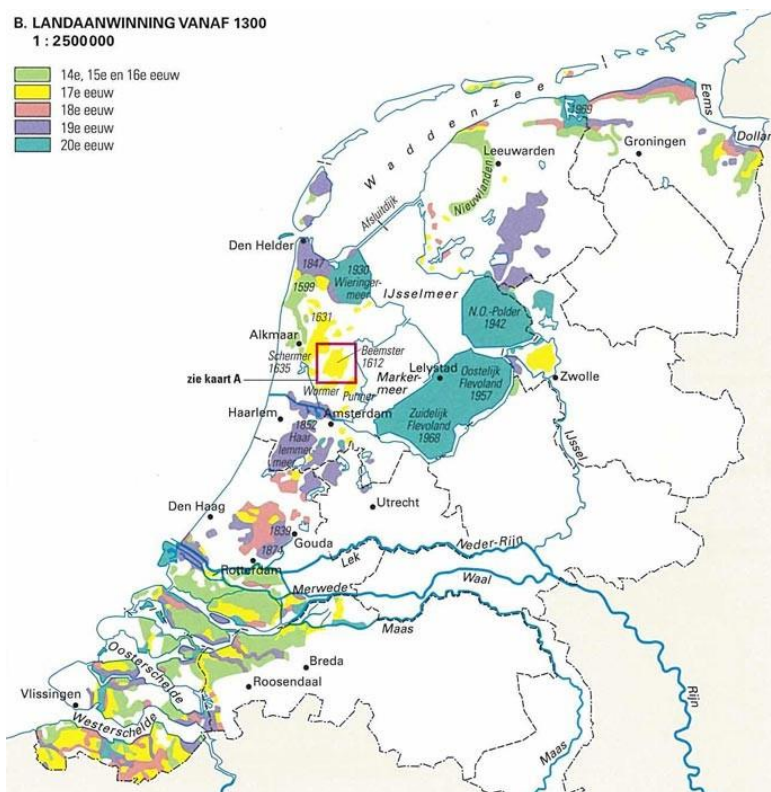
Mogelijke maatregelen om de sponswerking in het stroomgebied van de Rijn en Maas te vergroten, en zo de voorspelde toenames aan piekafvoer, en verwachte afname aan laagwater afvoer te bufferen liggen dus niet alleen in Nederland, maar ook in het bovenstroomse gebied. Het stimuleren van de natuurlijke sponswerking in het gebied en name in het herstel van de natuurlijke dynamiek van de rivier kan helpen om toenemende overstromingsrisico's te verminderen bijv. middels verdere 'Ruimte voor de River' maatregelen. Tegelijkertijd zal ook bovenstrooms de toenemende droogte leiden tot nieuwe vragen en initiatieven over de mogelijkheden van het lokaal vasthouden van water.

Het belang van een stroomgebieds-brede, internationaal gedragen visie en afspraken over het beheer van deze internationale grote rivieren onder klimaatverandering is essentieel, om zo tot klimaatbestendige oplossingen te komen.

3.4 Peil gestuurde klei- en veengebieden/polders

3.4.1 Algemene landschapskenmerken (bodem, geologie, landgebruik, topografie)

Een polder is een laaggelegen drooggelegd gebied dat afhankelijk is van kunstmatige afvoer van water. Vanaf de 14^e eeuw zijn polders ontstaan, eerst door ontwatering van veengebieden en bedijken van laaggelegen gebieden. Vanaf de 17^e eeuw door het droogmalen van meren (droogmakerijen) en nog later grootschalige landaanwinning op het IJsselmeer (Figuur 3.19). Polders bevatten weinig hoogteverschillen. Er wordt onderscheid gemaakt tussen veenpolders (veelal ondiepere, oudere polders) en kleipolders (veelal nieuwere, diepere polders).



Figuur 3.19 Landaanwinning in Nederland sinds 1300 (Nordhoff, 2021)

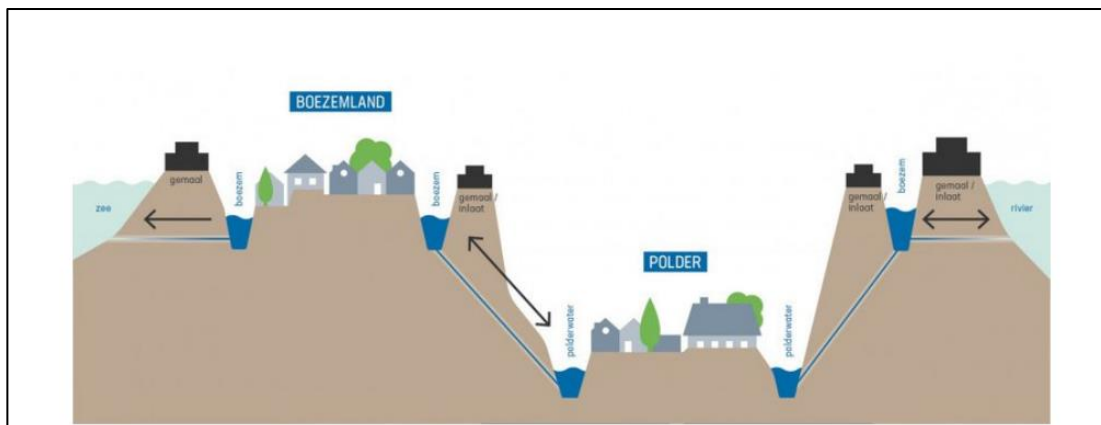
Veenpolders hebben overwegend een diepteligging tot enkele meters onder zeeniveau. Vanwege hoge sloot- en grondwaterpeilen worden veenpolders hoofdzakelijk gebruikt als grasland. Het veen heeft een variërende dikte tot maximaal enkele meters, waaronder zich klei of zand bevindt. In veenpolders is bodemdaling een probleem, wat grotendeels wordt veroorzaakt door ontwatering van het veen (Hendriks et al., 2023). De oxidatie van veengrond leidt tot uitstoot van broeikasgassen. Als gevolg van de klimaatverandering zullen grondwaterstanden in de zomer waarschijnlijk dalen, wat tot verdere bodemdaling en CO₂ uitstoot kan leiden (Hendriks et al., 2023).

De oudste kleipolders zijn ontstaan door bedijking en komen voor in de Zuidwestelijke delta, waar ze op een diepte tot enkele meters onder zeeniveau liggen. Nieuwere kleipolders zijn droogmakerijen zoals de Beemster (1612), Schermer (1635) en Haarlemmermeer (1952). De meest recente kleipolders zijn de Zuiderzee/IJsselmeerpolders Wieringermeer (1930), Noordoostpolder (1942) en Flevoland (1957-1968). Kleipolders zijn zeer vruchtbaar en worden voornamelijk gebruikt voor akkerbouw.

3.4.2

Belangrijkste hydrologische processen en watersysteemkenmerken

In polders was snelle afvoer van overtollig water altijd de kern van het waterbeheer. Hiervoor is een netwerk van greppels, sloten en vaarten gegraven. Het peil van het oppervlaktewater wordt beheerd door het wegpompen van overtollig water vanuit het slootsysteem naar verhoogde primaire boezemkanalen (Figuur 3.20). Met het oppervlaktewatersysteem in de polders wordt ook het grondwaterpeil gestuurd. Diepe sloten, greppels en ondergrondse drainagebuizen faciliteren de afvoer van grondwater. Deze goede afwatering is met name van belang voor de landbouw.

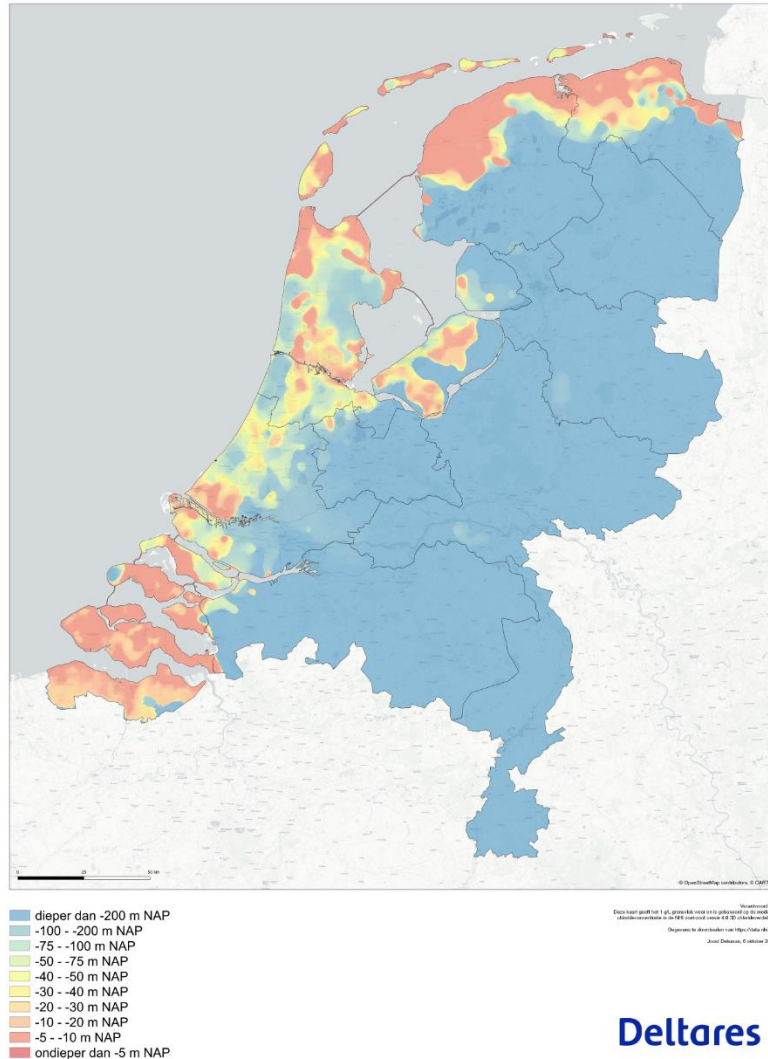


Figuur 3.20 Poldersysteem Rijnland (Hoogheemraadschap Rijnland, 2023)

Een polder bestaat uit één of meerdere peilgebieden. Een peilgebied is gedefinieerd als een gebied waar wordt gestuurd op een bepaald oppervlaktewaterpeil, door middel van pompen en (verstelbare) stuwen. De streefwaarde voor de oppervlaktewaterpeilen zijn afhankelijk van het landgebruik en de bijbehorende afwateringsbehoefte. Om rekening te houden met de seizoensdynamiek van het grondwatersysteem wordt onderscheid gemaakt tussen zomer- en winterstreefpeil. In de winter is de gemiddelde grondwateraanvulling positief. Om wateroverlast te voorkomen wordt een relatief laag winterstreefpeil aangehouden. In de zomer is de gemiddelde grondwateraanvulling negatief. Om te voorkomen dat het grondwaterpeil te sterk zakt, wordt een relatief hoog zomerstreefpeil aangehouden. De pompen en stuwen worden bediend op basis van actuele metingen van het oppervlaktewaterpeil. Met de pompen wordt het water via kleine gemalen naar de boezem afgevoerd. Vervolgens wordt het boezemwater geloosd op de Noordzee via de boezemgemalen. In situaties waar veel neerslag wordt verwacht, kan het waterpeil in de boezem en in sommige polders verlaagd worden om meer berging beschikbaar te hebben. Bij extreme neerslag kan water ook in bergingsgebieden tijdelijk gehouden worden (piekberging).

In de ondergrond van een groot aantal polders komt brak of zout grondwater voor. Door het wegpompen van water uit de polder wordt dit water omhooggetrokken waardoor er verzilting optreedt (Figuur 3.21). Op deze locaties vindt akkerbouw plaats op een ondiepe dunne laag zoet water (regenwaterlenzen).

Ligging grensvlak tussen zoet en zout grondwater



Figuur 3.21 Diepte van de interface tussen zoet en brak tot zout grondwater (meters beneden maaiveld) (Delsman et al 2020)

3.4.3 Sponswerking

In polders is de sponswerking volledig peil gestuurd en bepaald door keuzes in het peilbeheer. Doordat de gebieden laag liggen, met relatief ondiepe grondwaterstanden en weinig hoogteverschil, is er maar beperkt ruimte voor het vasthouden en bergen van water.

Klimaatverandering leidt waarschijnlijk tot een versterkte daling van de zomer grondwaterstand. Hierdoor treedt een stapeling van effecten op, vooral in gebieden met slappe bodems (veen en klei) zoals verhoging van de CO₂-uitstoot, verschilzettingen, paalrot, grondwateroverlast en mogelijk zoutschade. **Vernatting** door een actief verhoging van de waterpeilen boven de huidige streefpeilen vermindert CO₂-uitstoot, bodemdaling en verzilting en gevolgen van deze droogte.

Water vasthouden op landbouwpercelen:

Voor de landbouw is het belangrijk om water vast te houden tegen de droogte. Dan kan op verschillende manieren:

- Water vasthouden in de onverzadigde zone
- Water vasthouden in dat grondwater systeem
- Water vasthouden op landschapsniveau

In peilgestuurde gebieden kan het water voor een deel worden vastgehouden met hydrologische maatregelen, die door waterbeheerders of agrariërs worden genomen. Zoals peilbeheer maatregelen, dichten van watergangen en het verwijderen van buisdrainage. De maatregelen voor het vasthouden van water in de bodem zijn beperkt [Water vasthouden en bergen op landbouwpercelen | STOWA](#) (STOWA, 2023).

Maatregelen voor het minderen van CO₂-uitstoot en bodemdaling.

Om CO₂-uitstoot en bodemdaling in veenweidegebieden tegen te gaan, zijn gebieden aangewezen waar geleidelijk vernatting zal worden toegepast door middel van een verhoging van het oppervlaktewaterpeil naar 20 tot 40 cm onder maaiveld (zie kamerbrief 'Water en Bodem sturend', 25 november 2022 (IenW, 2022)). Deze maatregel zal waarschijnlijk leiden tot een stijging van de grondwaterstand in nabijgelegen stedelijk gebied.

3.4.3.1 Voorbeeldprojecten

Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweiden (NOBV)

De Veengebieden staan voor grote uitdagingen. De bodem daalt als gevolg van zetting, inklinking en veenoxidatie. De laatste twee zijn gevolgen van de ontwatering en daardoor verlaagde grondwaterstanden in het veen. De oxidatie van veengrond leidt tot uitstoot van broeikasgassen (Figuur 3.22). Vanuit de Klimaatakkoord is er een reductie van de jaarlijkse emissie met 1.0 Mton in 2030 vastgelegd. Momenteel vormen de veengebieden 2% tot ruim 4% van de totale broeikasgasuitstoot in Nederland (Hendriks et al., 2007). Als gevolg van de klimaatverandering zullen grondwaterstanden in de zomer waarschijnlijk dalen, wat tot verdere bodemdaling en CO₂ uitstoot kan leiden (Hendriks et al., 2023).

Het Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweiden (NOBV) is in 2019 opgezet om deze vragen na te gaan. Conclusies zullen in 2024 volgen. Doel van het programma is de effectiviteit van maatregelen te onderzoeken en de emissies beter te voorspellen (NOBV, 2023). Aan het onderzoekprogramma nemen verschillende universiteiten (TU DELFT, Wageningen, VU, Universiteit Utrecht, Radboud Universiteit Nijmegen) en kenniscentra deel (Deltares, Kytalyk, Bware).

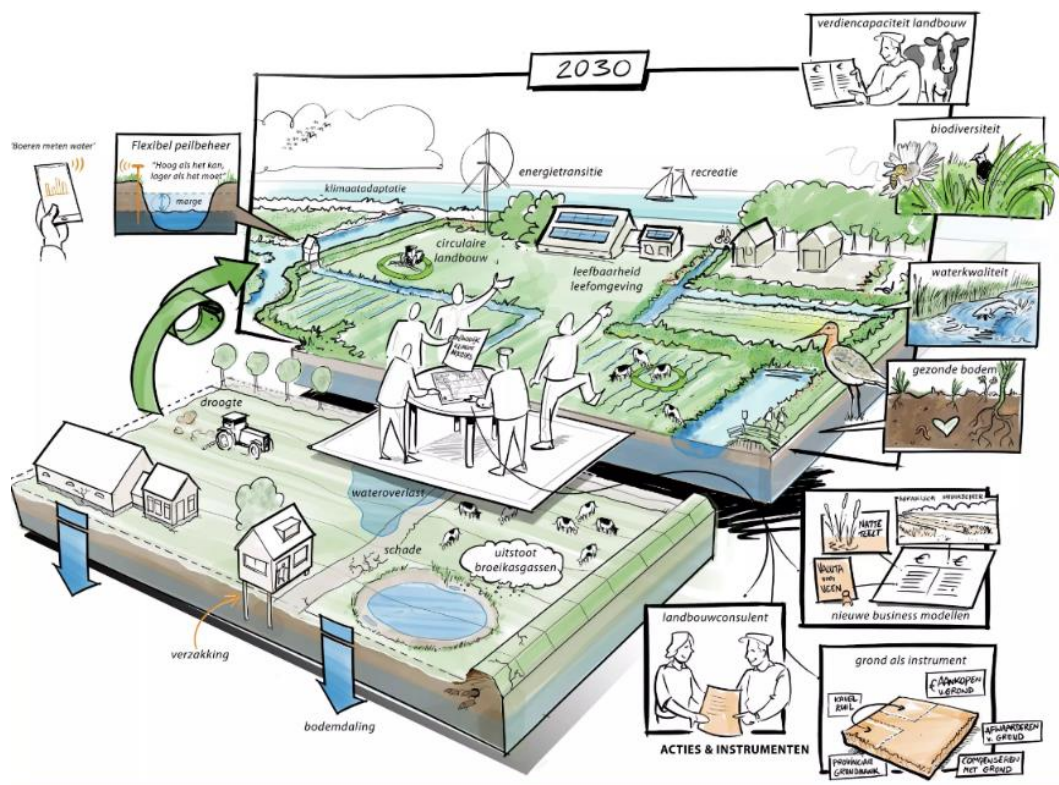


Figuur 3.22 Infographic NOBV uitstoot van broeikasgassen door veenafbraak (https://www.nobveenweiden.nl/wp-content/uploads/2023/03/Infographic_NOBV_Uitstoot-van-broeikasgassen-door-veenafbraak.pdf)

Ook andere samenwerkings- en innovatieverbanden zijn bezig met het genereren van nieuwe kennis voor de veenweidegebieden, waarbij de koppeling tussen bodem en water een belangrijke rol speelt, zoals het Veenweide Innovatiecentrum in Zegveld. <https://www.veenweiden.nl/>.

Veenweide programma Provincie Fryslan

Het Veenweideprogramma 2021-2030 van de provincie Fryslan is opgezet als vervolg van de Veenweidevisie 2015, die door de provincie, Wetterskip Fryslan, gemeenten, belangorganisaties en inwoners samen is opgesteld worden (Provincie Fryslan, 2023). Het programma heeft de volgende doelen: (1) de vermindering van de negatieve effecten van bodemdaling, (2) afname van broeikasgasuitstoot (minimaal 0,4 megaton CO2 equivalenten per jaar), (3) de landbouw heeft een duurzaam toekomstperspectief en (4) een robuust en klimaatbestendig watersysteem (Figuur 3.23). Maatregelen omvatten onder andere een verhoogd en flexibel peilbeheer in gebieden met een dik veenpakket (onder het motto HAKLAM: 'Hoger als het kan, lager als het moet'), extra berging bij overschotten (met name in de winter) en extra zoetwatervoorraden bij tekorten (in de zomer). De afname van waterberging door het verhoogde grondwaterpeil wordt opgevangen door het vergroten van sloten, de aanleg van nieuwe sloten of waterbergingsgebieden.



Figuur 3.23 Overzicht over de onderwerpen van het Veenweide programma (Provincie Fryslan, 2023).

3.5 Meren/plassen als reservoirs

3.5.1 Algemene landschapskenmerken (bodem, geologie, landgebruik, topografie)

Meren en plassen worden vaak gezien als belangrijke waterreservoirs in het Nederlandse landschap. Zo wordt het IJsselmeer zelfs aangeduid als ‘de nationale regenton’, die kan worden ingezet als buffer in de watervoorziening. Dit systeem wordt in onderstaande tekst dan ook verder uitgewerkt als voorbeeld van hoe we omgaan met de meren en plassen. Uiteraard spelen ook de meren en plassen in het regionale watersysteem zo’n bufferende rol, zij het in kleinere mate. Veel van deze wateren staan onder strikt peilregime dat in de winter lager ligt dan in de zomer. Zo kan in de winter neerslag worden opgevangen, en in de zomer watertekort worden voorkomen. Onderstaande tekst is grotendeels gebaseerd op het rapport ‘Verkennde systeemanalyse IJsselmeergebied’ (Van Ginkel et al, 2022)

Het IJsselmeer als buffer

Het oorspronkelijke Zuiderzee-ecosysteem is door menselijk ingrijpen sterk veranderd waardoor een uniek systeem ontstaan van zoetwatermeren met gereguleerd meerpeil, die worden gevoed door rivieren en zijn afgesloten van de invloed van de zee. De vroegere Zuiderzee heeft nog wel invloed op het meerpeil en de waterkwaliteit, evenals de bodemsamenstelling en diepteverdeling (bathymetrie) van het meer. Het oorspronkelijke patroon van de vroegere getijdengeulen van de Zuiderzee zijn nog steeds duidelijk aanwezig in het IJsselmeer, terwijl de bodemsamenstelling varieert van zandig in het noorden (bij de vroegere monding van de Zuiderzee) tot kleiig in het Markermeer (in de delen die vroeger juist op grote afstand van de zee lagen).

Het gebied levert voor een heel groot deel van Noord-Nederland cruciale ecosysteem-diensten. Deze diensten zijn van nationaal belang en juist daarom heeft de Rijksoverheid de systeemverantwoordelijkheid voor dit gebied. Van Ginkel et al (2022) duiden deze diensten als volgt aan:

- 1 **Komberging als onderdeel van de hoogwaterbeheersing**, als:
 - a) niet gespuid kan worden vanwege stormvloed of te hoge zeestand,
 - b) de rivieraanvoer door de IJssel en/of vanuit de regio heel groot is, of,
 - c) een combinatie van beide;
- 2 **Voorraadberging in relatie tot de zoetwatervoorziening, als er sprake is van** meteorologische droogte en de aanvoer door de IJssel tijdelijk tekortschiet om in de vraag te voorzien;
- 3 **Een robuust (semi-)aquatisch ecosysteem als onderdeel van het Natuurnetwerk** Nederland (NNN), Natura2000 (Europees natuurnetwerk en beschermd door Vogel- en Habitatrichtlijn), de Kaderrichtlijn Water (KRW) en als habitat voor flora en fauna en als functiegebied voor foeragerende of ruiende standvogels en als winterhabitat voor trekvogels.

Het 'IJsselmeergebied' omvat vier deelsystemen:

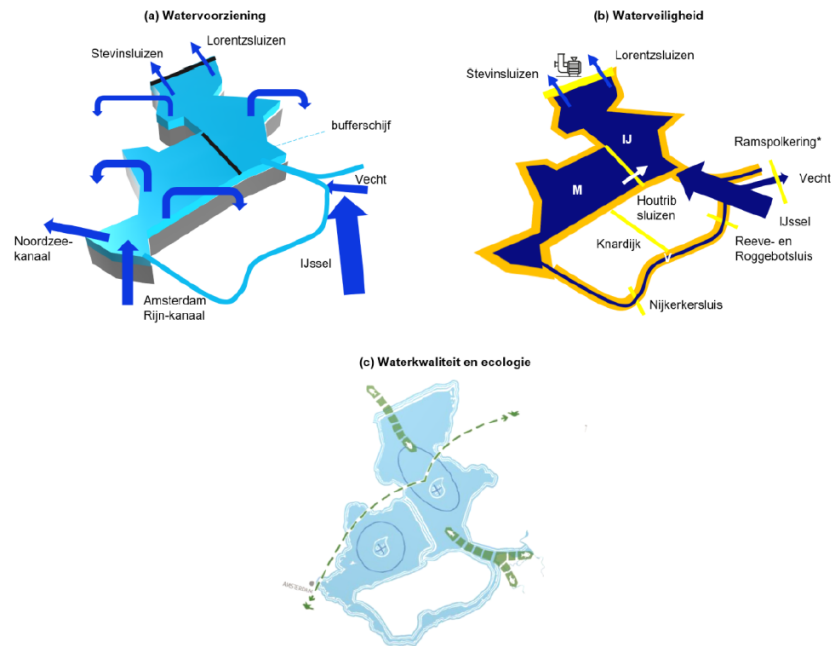
- (I) het IJsselmeer,
- (II) het Markermeer/ IJmeer,
- (III) de (Veluwe)randmeren,
- (IV) de IJssel-Vechtdelta,

Tot deze deelsystemen behoren ook alle kunstwerken voor het beheersen van dit systeem en de subsystemen: de Afsluitdijk, de Houtribdijk, de Ramspolkering, de compartimenterende keringen in de randmeren, de verbindende sluizen, etc. Op groter schaalniveau maakt het IJsselmeergebied ook deel uit van verschillende grotere systeem. Een voorbeeld hiervan is het Rijnstroomgebied (van waaruit deze meren water ontvangen) of de Waddenzee en Noordzee (waar het water naartoe wordt gespuid). Het IJsselmeergebied maakt echter ook deel uit van de in- en omliggende gebieden die van zoetwater worden voorzien of worden beschermd tegen overstromingen.

De gebieden rondom het IJsselmeer zijn belangrijk in zowel het beheer als het functioneren van het totale systeem: het rivierafvoerregime of de zeespiegelstand beïnvloeden het beheer van het IJsselmeer zelf. Ook is het omliggende gebied de 'afnemer' van de genoemde diensten (bijv. hoogwaterbeheersing, zoetwatervoorziening), waarvoor het IJsselmeergebied specifiek is ingericht en wordt beheerd. Bij zoetwatervoorziening betreft dit bijvoorbeeld de wateraanvoer en de watervraag vanuit de omliggende gebieden (voor peilbeheer, doorspoeling, landbouw, drink- en industriewater), en andere fluxen het systeem in of uit zoals neerslag, kwel en verdamping (Figuur 3.24a).

Bij hoogwaterbeheersing betreft dit ook de dammen, dijken, stormvloedkeringen, spuisluisen en andere kunstwerken waarmee het achterland beschermd wordt tegen overstroming, en waarmee de aanvoer en afvoer van te veel water gereguleerd wordt (Figuur 3.24b).

Bij het robuust netwerk van natuurgebieden betreft dit ook de aansluiting op aangrenzende ecosystemen, zoals de Waddenzee en overgangen van water naar land (Figuur 3.24c).



Figuur 3.24 A Watervoorziening in het IJsselmeergebied, B Waterveiligheidssysteem IJsselmeergebied, C Ecologische kernen en verbindingen in het IJsselmeer (bron Van Ginkel et al, 2022).

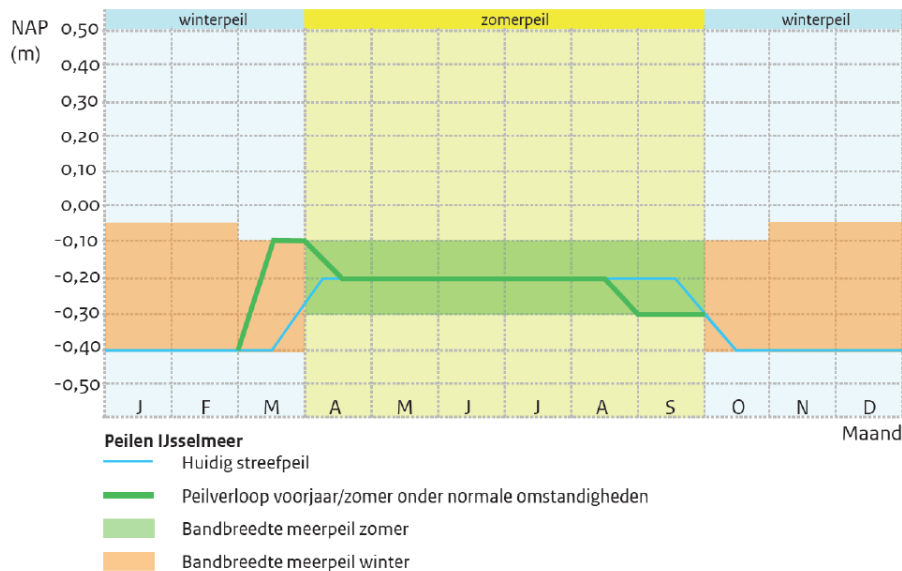
3.5.2 Sponswerking

3.5.2.1 Natuurlijke sponswerking

Gedurende het jaar wordt het peilbeheer in het IJsselmeergebied afgesteld op de behoefte vanuit het omringende gebied: In de winter is de kombergingsfunctie belangrijk en geldt er een relatief laag streefpeil, omdat dat de periode is waarin stormen en stormvloed op zee het vaakst voorkomen en de bescherming tegen overstromingen de meeste aandacht vraagt. Het IJsselmeer dient dan als een tijdelijke berging van binnenkomend rivier- en boezemwater. Gedurende die periode van komberging mag het IJsselmeerpeil niet te hoog worden; want boven op het meerpeil kan wind tijdens storm sterke scheefstand en golven veroorzaken die de dijken bedreigen.

Het peil in het IJsselmeergebied wordt dan ook gereguleerd, waarbij in het IJssel- en Markermeer gestreefd wordt naar een winterpeil van - 0,40 m NAP, zie Figuur 325 (alle peilen in deze paragraaf zijn gegeven t.o.v. NAP). De kombergfuncties van het IJssel- en Markermeer verschillen sterk, omdat het IJsselmeer veel meer water ontvangt, namelijk vanuit de IJssel. Naar het IJsselmeer stroomt jaarlijks gemiddeld 16 miljard m³ water, dat voor driekwart afkomstig is uit de IJssel (Remmelzwaal et al., 2015). Naar het Markermeer stroomt slechts 1,8 miljard m³ water, dus ongeveer tien keer zo weinig. Hoewel de kombergingscapaciteit van het Markermeer (met een oppervlak van zo'n 700 à 750 km²) kleiner is dan die van het IJsselmeer (1200 km²), wordt er dus ook in relatieve zin veel minder water naar het Markermeer afgevoerd dan het IJsselmeer (Remmelzwaal et al., 2015).

Als gevolg van deze veel grotere aanvoer naar het IJsselmeer fluctueert het IJsselmeerpeil in de winter veel sterker dan het Markermeerpeil. De toegelaten bandbreedte rond het streefpeil is - 0,40 m tot - 0,05 m voor het IJsselmeer (Figuur 325), en - 0,40 m tot - 0,20 m voor het Markermeer.



Figuur 3.25 Nagestreefd zomer- en winterpeil in het IJsselmeer, volgens het vigerend peilbesluit (Rijkswaterstaat, 2018)

In de zomer is de voorraadbergingsfunctie het belangrijkste. Het IJsselmeergebied functioneert dan eigenlijk als een soort stuwmeer op zeeniveau, waar voortdurend water instroomt (voornamelijk uit de IJssel) en water uit wordt onttrokken. In de zomer is er vanuit de regio een grote watervraag voor o.a. het handhaven van de polder-peilen, het doorspoelen ter bestrijding van verzilting en het voorzien van de landbouw van water. Door het waterpeil tussen bepaalde grenzen te laten fluctueren kan water tijdelijk worden opgeslagen, zodat het verschil in timing tussen waterbeschikbaarheid en watervraag gedurende enige tijd kan worden overbrugd. Een belangrijk verschil met andere stuwmere is dat het peil hierbij maar 20 cm mag fluctueren, zodat er sprake is van een vrij beperkte bufferschijf. Er wordt gestreefd naar een peil tussen de - 0,10 m en - 0,30 m (Figuur 325), anticiperend op de watervragen vanuit het voedingsgebied. Bij verwachte droogte wordt het peil opgezet naar - 0,10: de 'zomeropzet'. Vanaf half augustus mag het peil geleidelijk uitzakken tot - 0,30 m en in oktober wordt het geleidelijk verlaagd tot winterpeil. In de Veluwerandmeren fluctueert het peil veel minder, in de zomer tussen - 0,10 en - 0,05 m, en in de winter tussen - 0,30 en - 0,10 m. Maar deze meren vervullen dan ook geen voorraadfunctie en hebben slechts een zeer geringe kombergingsfunctie.

Het peilverloop dat op deze manier ontstaat, een zomerpeil dat hoger is dan het winterpeil, is tegennatuurlijk. In een met de seizoensvariatie mee-ademende natuurlijke situatie zou het winterpeil namelijk hoger zijn dan het zomerpeil. Vanuit ecologisch perspectief wordt het huidige peilverloop dan ook als ongewenst beschouwd.

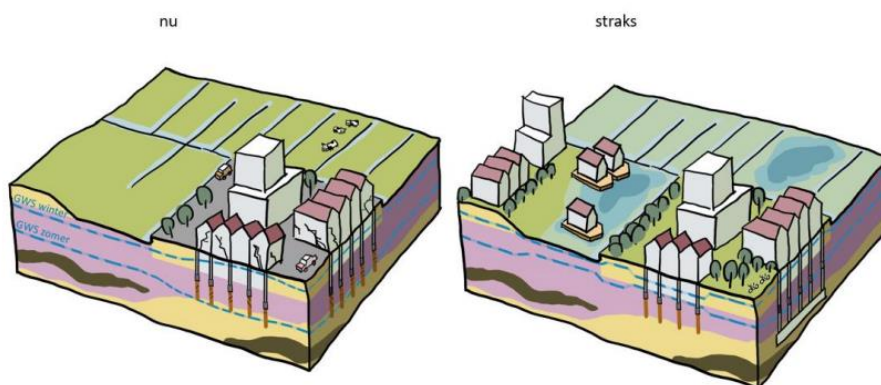
3.5.2.2 Veranderingen in sponswerking en mogelijke maatregelen om sponswerking te herstellen of te vergroten

De verandering in sponswerking in het verleden is vooral ingegeven vanuit toen geldende behoeften gerelateerd aan peilbeheersing. In de komende decennia zorgt klimaatverandering en de daaraan gekoppelde stijgende zeespiegel en veranderende rivierafvoer voor nieuwe vragen rondom het beheersen van dit peil. Spuien onder vrij verval wordt minder makkelijk, de aanvoer vanaf de IJssel wordt grilliger en de vraag voor doorspoeling van het achterland om verzilting en droogte tegen te gaan wordt hoger. Momenteel worden er daarom onder andere al extra pompen aangelegd in de afsluitdijk als een van de maatregelen om het peilbeheer te kunnen blijven uitvoeren. Ook wordt er meer integraal nagedacht over het

handelingsperspectief in het achterland: hoe kan water in het achterland en bovenstrooms langer worden vastgehouden en worden geborgen, zodat het minder afhankelijk is van het IJsselmeergebied en dus ook de druk op het IJsselmeergebied zelf kan worden verminderd. Daar waar tot nu 'peil volgt functie' de norm was, moet ook nagedacht worden over een overstap op een werkwijze waarin functie peil volgt. Als voorbeeld hiervan kan ook worden nagedacht hoe piekberging in het achterland wordt opgevangen, in plaats van dit direct naar het IJsselmeergebied af te wateren.

3.6 Stedelijk gebied

De bebouwde omgeving is sterk verhard en daarom erg kwetsbaar voor wateroverlast, omdat een grote deel van de neerslag direct naar de rivieren afstroomt. Het rioleringsysteem kan meestal ook geen grote hoeveelheden neerslag bergen. Als meer water in de stad kan worden geborgen of kan infiltreren naar het grondwater, er is minder risico op overlast op straat en in het rioolsysteem en tegelijkertijd wordt het grondwater aangevuld en kan water worden geborgen voor drogere periodes. Tegelijkertijd is het noodzakelijk om bij stedelijke uitbreidingen het watersysteem een rol te geven in deze verdere ontwikkeling en bebouwing zoveel mogelijk aan te passen aan het aanwezige bodem- en watersysteem (Figuur 3.26).



Figuur 3.26 Situatie van het stedelijke gebied en de omgeving in Laag Nederland in de huidige situatie (links) en in een mogelijke toekomstige situatie (rechts) waarbij in bestaand en nieuw stedelijk gebied rekening is gehouden met veranderingen van grondwaterstanden:- nieuwe bebouwing in minder kwetsbare gebieden; - nieuwe bebouwing aanpassen op vernatting grondwaterdynamiek - bestaande bebouwing aanpassen aan grondwaterdynamiek (o.a. andere fundering)- actief grondwaterbeheer bij bebouwing waar aanpassing op korte termijn niet onmogelijk is.

3.6.1 Algemene landschapkenmerken (bodem, geologie, landgebruik, topografie)

Stedelijke gebieden door heel Nederland worden gekenmerkt door hun hoge percentage aan verhard oppervlak. Dit vermindert infiltratiecapaciteit en kan leiden tot lokale wateroverlast ten tijde van hevige buien. Wanneer veel van de lokale afwatering via het riool gaat, kan dit ook leiden tot riool-overstorten die de waterkwaliteit in het gebied nadelig kunnen beïnvloeden. Zowel in steden in poldergebieden als op de hoge zandgronden moeten dan ook zoeken naar manieren om met dit overtollige water om te gaan.

Daarnaast is de verharding en gebrek aan begroeiing een bron van hittestraling tijdens de zomer, en kan de temperatuur flink oplopen ten opzichte van gebieden buiten de stad. Hitte-eilanden ontstaan op locaties waar de verharding hoog is.

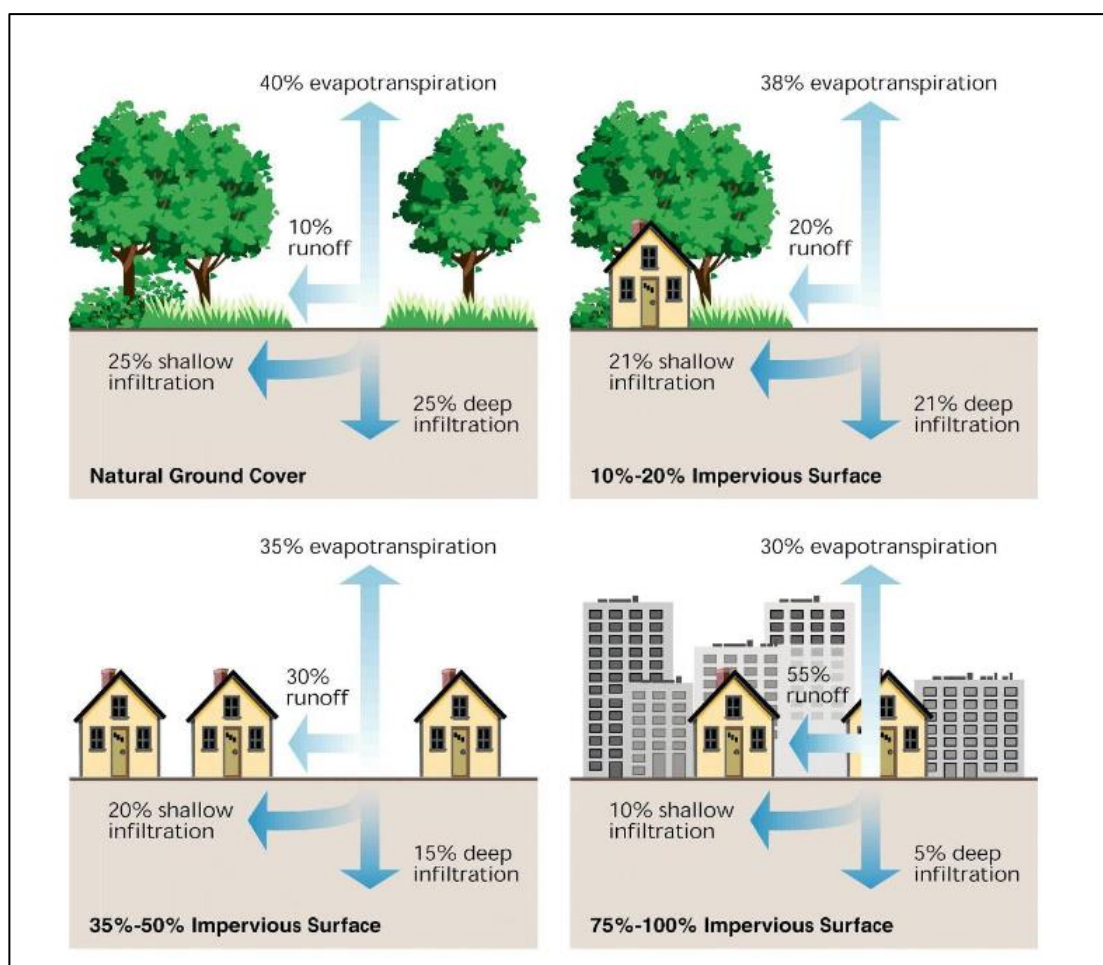
3.6.2

Belangrijkste hydrologische processen en watersysteemkenmerken

Als gevolg van de klimaatverandering (droge zomers, piekbuien) wordt de grondwaterdynamiek in de toekomst toenemen, maar grote delen van het stedelijk gebied zijn er momenteel niet bestand tegen. Ook de toename van verstedelijking leidt tot sterkere fluctuatie van het freatische (ondiepe) grondwater, zoals b.v. toename verharding van het oppervlak of constructies in de ondergrond (tunnels, parkeergarages), die de grondwaterstroming blokkeren (Hendriks et al., 2023).

Daarnaast zijn er problemen met bodemdaling voornamelijk in Laag-Nederland en daaraan gekoppelde mogelijkheden om het water in de stad af te voeren. Verdroging kan leiden tot schade door verzakking, paalrot en verdere schade aan infrastructuur.

Verharding leidt tot een verminderde evapotranspiratie en infiltratie naar het grondwater, en een toegenomen oppervlakkige afvoer (Figuur 3.27) en leidt ertoe dat in stedelijke gebieden de waterbalans en respons tijdens een regenbui sterk verstoord is.



Figuur 3.27 De invloed van verstedelijking op verschillende onderdelen van de waterkringloop (WMO, 2008).

3.6.3 Sponswerking

Sponswerking in steden is meestal gefocust op het verminderen van de overlast van korte hevige buien en niet gericht op het opvangen van droogte. Een enquête bij beleids- en stadsmakers in verschillende steden toonde dat de belangrijkste reden om groen-blauwe infrastructuur te implementeren hierin gelegen is. Daarnaast spelen aspecten zoals het creëren van meer groen voor het verhogen van de leefbaarheid en de daarbij komende lokale kansen voor het verhogen van biodiversiteit, en het koelende effect tijdens hitte. Bij het toekomst-bestendig maken van het stedelijk gebied moet niet alleen worden gekeken naar het nemen van individuele maatregelen in bestaand gebied, maar ook naar het vermijden van verdere nieuwe stedelijke ontwikkeling in kwetsbare gebieden en het robuust (her)ontwikkelen van (nieuw) stedelijk gebied en infrastructuur.

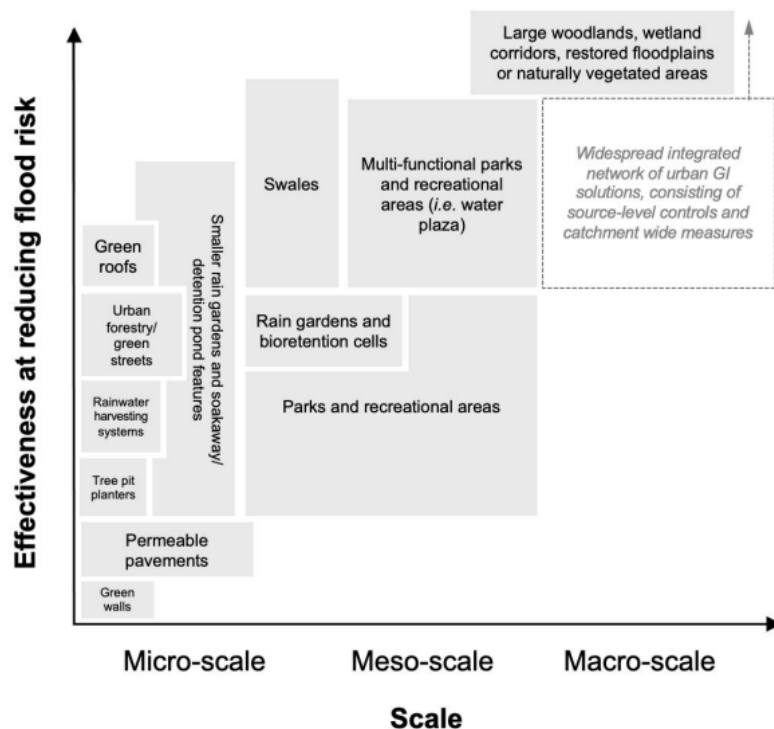
3.6.3.1 Mogelijke maatregelen om sponswerking te herstellen of te vergroten

Veel van de sponsmaatregelen in het stedelijk gebied zijn kleinschalig en moeten worden ingepast binnen de bestaande bebouwing. Een koppeling met technische aspecten is vaak nodig om dit te realiseren. Zo zijn veel wadi's voorzien van ondergrondse aangebrachte goed drainerende lagen en worden ook andere infiltratievoorzieningen voorzien van ge-engineerde ondergrondse buffersystemen.

Het verminderen van de verharding en het afkoppelen van regenwater van het riool in het stedelijk gebied zijn twee maatregelen die gezamenlijk een goede bijdrage kunnen leveren aan het opvangen en laten infiltreren van water naar de ondergrond. Hierdoor ontlast het rioolsysteem, en hoeven riolen minder vaak over te storten naar het oppervlaktewater, wat ook de waterkwaliteit ten goede komt.

Voorbeelden van maatregelen die hier onder vallen zijn opgenomen in de database <https://www.urbangreenbluegrids.com/> zoals regenttuinen, wadi's, infiltratie en buffergrachten, vijvers, nieuwe parken, opnieuw open gelegde waterlopen, groene daken en bermmen, meer bomen aanplanten, voor- en achtertuinen ontharden etc. (Groenblauw, 2016). Lokale waterpleinen, ondergrondse buffers, regenwaterputten of infiltratievoorzieningen zorgen voor een vertraagd afvoeren van water en het tijdelijk vasthouden in de zogenaamde 'groenblauwe infrastructuur'.

Afhankelijk van de schaal zal de effectiviteit van de maatregel groter dan wel kleiner zijn: grotere sponswerkingsgebieden in de stad, zullen bijdragen aan een grotere effectiviteit. Daarom wordt in het buitenland (met name in China) ook vaak gesproken over 'Sponge Cities' om dit schaal effect te benadrukken. Figuur 3.28 geeft een overzicht van hoe de schaal en effectiviteit van specifieke groepen maatregelen in het reduceren van risico's gekoppeld is.



Figuur 3.28 Conceptueel overzicht van de schaal en effectiviteit van verschillende typen sponsmaatregelen in stedelijk gebied (Green et al., 2021)

Sommige maatregelen behoeven aanvullende aandacht om geen onverwachtste problemen te veroorzaken:

- Het afkoppelen regenwaterafvoer van het riool kan alleen gebeuren als er ook zorg is gedragen voor een goede oplossing hoe dit water voldoende snel in de bodem kan infiltreren;
- Gecreëerde hoogteverschillen aan maaiveld zorgen voor variaties in stijghoogtes in het freatische pakket. Zo kan het ophogen van een straat met een zandpakket zorgen voor het ontstaan van grondwateroverlast in nabijgelegen souterrains;
- Vergroening van stedelijk gebied kan leiden tot meer verdamping met verlaging van grondwaterstanden als gevolg
- Aanleg van regenwaterinfiltratie voorzieningen kan, bij ontbreken van aandacht voor gevoeligheid van omliggend gebied en landgebruik, leiden tot ongewenste veranderingen in het grondwaterregime.

3.6.3.2 Voorbeeldprojecten

Veel steden in Nederland zijn bezig met het maken van een toekomstbestendige visie op het waterbeheer in de stad waarbij sponsmaatregelen (meestal groenblauwe maatregelen genoemd) worden meegewogen in een totaalstrategie. Hieronder twee voorbeelden van steden die hier actief mee bezig zijn en ook maatregelen in uitvoering hebben: Zwolle en Rotterdam.

Zwolle

Zwolle heeft sponswerking in de stad onderdeel gemaakt van één van de drie peilers van de “groenblauwe stad”, een bouwsteen in de Zwolse Adaptatiestrategie (Groenblauw, 2019). Het heeft daarnaast een aparte portefeuille in het college van de stad. Het vergroten van de sponswerking is gericht op kleine ingrepen op gebouw-, straat- en buurniveau, in realisatie samen met inwoners en bedrijven, met de visie dat al deze kleine maatregelen samen een groot effect hebben voor de hele stad. Via initiatieven op wijkniveau, zoals “[de groene loper](#)” en “[50 tinten groen Assendorp](#)” betrekken bewoners om de buurt samen groener, gezonder en prettiger te maken en versterken het groenblauwe netwerk binnen de stad. Zwolle heeft daarnaast ook een regionale sponsstrategie ontwikkeld, waarbij de focus is op watercirculariteit, waterbewustzijn en samenwerking tussen landelijk en stedelijk gebied. Dit laatste wordt gedaan door waterlopen te verruimen, afvoer te vertragen op de Sallandse Heuvelrug om water daar beter vast te houden, een retentiegebied toe te voegen vóór het water in Zwolle komt, en een bypass van de Vecht om Zwolle heen te leiden.

Rotterdam

Om de gevolgen van klimaatverandering in de stad tegen te gaan, heeft Rotterdam een visie en plan opgesteld tot en met 2030: [het WeerWoord](#) (Gemeente Rotterdam, 2023). Hiermee wil Rotterdam een beweging in gang zetten om zich sámen met de inwoners voor te bereiden op klimaatverandering. Er komen dus niet alleen ingrepen vanuit de gemeente zelf, initiatieven van inwoners worden ook gestimuleerd door middel van subsidies bij bijvoorbeeld het vergroenen en ontharden van de tuin of buurt. In het WeerWoord wordt veel gefocust op het vergroten van sociale cohesie en leefbaarheid in de stad aan de hand van de verschillende uitdagingen: neerslag, overstroming, hitte, droogte, grondwater en bodemdaling. Daarnaast is het uniek dat water en klimaatadaptatie (net als vergroening, biodiversiteit, mobiliteit, parken en groenstructuren) nu onder de Groen-agenda van de stad vallen, en dus vanuit dezelfde financiering worden geregeld.

Sponswerking in de stad is vooral terug te zien binnen de thema's droogte, grondwater en bodemdaling. Rotterdam stelt dat het water- en bodemsysteem leidend zou moeten zijn voor de stedelijke inrichting. Daarnaast wordt de sponswerking van de bodem verhoogd door zoveel mogelijk regenwater te infiltreren en meer vormen van waterberging te creëren, zoals onder Ahoy. Hier wordt een waterberging van 20.000 m³ gecreëerd door het parkeerterrein en het Zuidplein af te koppelen van de riolering. Het opgevangen regenwater wordt gezuiverd en in diepe bodemlagen geborgen voor drogere periodes. Dit water kan weer worden opgepompt om te gebruiken voor de bewatering van planten, verkoeling, toiletspoeling en evenementen.

Vanuit Deltares en De Urbanisten is in [2023](#) een ontwerpend onderzoek gedaan naar Rotterdam als sponsstad met circulaire zoetwatersystemen in 2100 (De Urbanisten & Deltares, 2023). Het uitgangspunt daarbij is water zo lokaal mogelijk opvangen, vasthouden (bijvoorbeeld in de bodem), hergebruiken en enkel resterend water transporteren naar de nieuwe Binnenmaas (een enorme zoetwaterbuffer voor de stad). De Krimpenerwaard wordt getransformeerd in een zuiveringsmoeras als belangrijke schakel in het circulaire watersysteem van de stad. Midden Delfland wordt daarbij gebruikt als klimaatbuffer in extreme omstandigheden.

4 Detail-uitwerking sponswerking voor 2 cases

In dit hoofdstuk wordt voor 2 cases gekwantificeerd hoe sponswerking tot uitdrukking komt en hoe geëvalueerd kan worden wat de impact van maatregelen is op deze sponswerking voor zowel wateroverlast als watertekort. Er is gekozen voor de Geul (heuvellandschap) en de Chaamse Beken (hoge zandgronden), omdat in deze gebieden al verschillende studies beschikbaar waren die als basis konden dienen. In dit rapport wordt een samenvatting van de bevindingen gegeven. Voor de Geul is gebruik gemaakt van het eerdere onderzoek rond de bui van juli 2021, en de vraag hoe het systeem daarop reageerde. In de Chaamse Beken is vanuit het KLIMAP-project al een eerste set aan analyses gemaakt om te zoeken naar klimaatrobuste oplossingen om de droogteproblematiek aan te pakken.

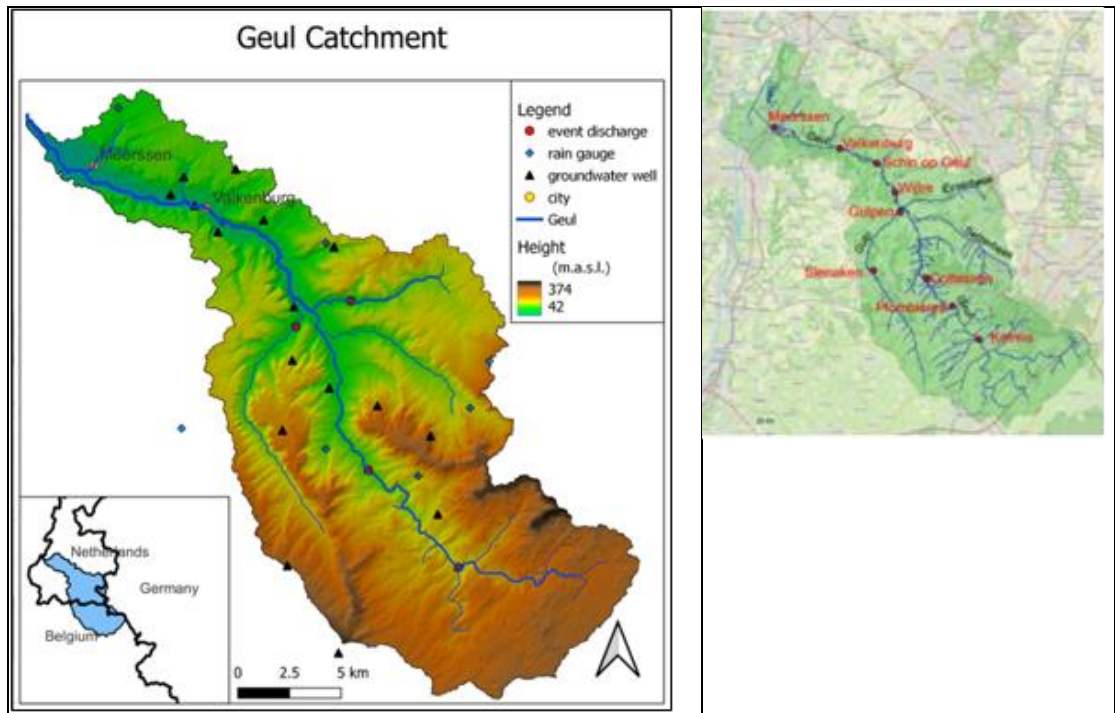
Voor beide systemen is getracht om met het beschikbare instrumentarium een beter beeld te krijgen van de huidige sponswerking en het effect daarvan op zowel wateroverlast als droogte. Ook is onderzocht in hoeverre bepaalde maatregelen daar invloed op hebben.

4.1 Geul – focus op wateroverlast

4.1.1 Landschapskenmerken

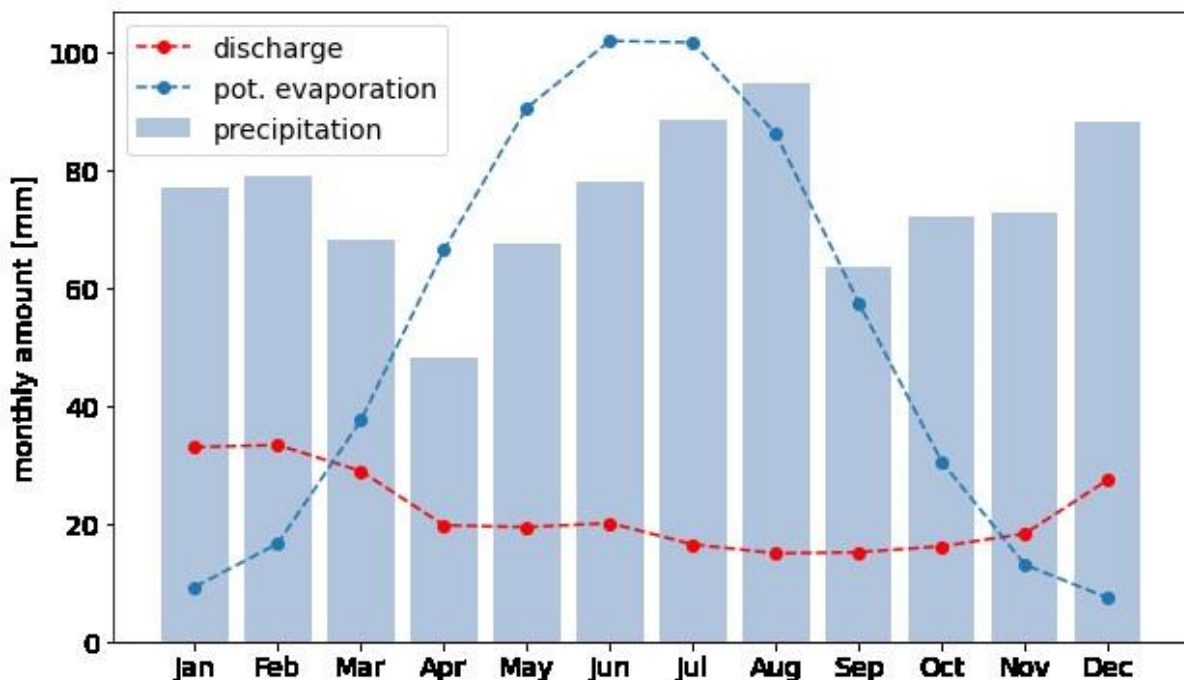
De Geul (Figuur 4.1) heeft een grensoverschrijdend stroomgebied in België (Waals Gewest: 42%), Nederland (Zuid-Limburg: 52%) en Duitsland (6%). De Geul ontspringt in België op ongeveer NAP +350 m en stroomt via plaatsen als Kelmis, Plombières en Sippenaeken bij Cottessen Nederland binnen. Bij Gulpen komen drie grotere zijbeken samen (de Gulp, Eyserbeek en Selzerbeek), waarna de Geul via Wijlre, Schin op Geul, Valkenburg en Meerssen bij Bunde in de Maas uitmondt.

Het stroomgebied van 340 km² heeft een hoogteligging die varieert van 40 tot 400 m boven zeeniveau en een helling van 0,2m/m in het bovenstroomse gebied en <0,01m/m in het benedenstroomse gebied (de Moor & Verstraeten, 2007; van den Munckhof, 2020). Het stroomgebied heeft veel grasland (46%), akkerbouw (19%) en bos (20%), naast bebouwing (2%) en wegen (5%). De resterende verharding in bebouwd gebied beslaat nog eens 7%. Het landschap omvat dus veel landelijk gebied en tamelijk weinig bebouwing (Slager et al., 2022).



Figuur 4.1 Het stroomgebied van de Geul. Links (Klein, 2022), rechts (van Heeringen et al., 2022)

De gemiddelde afvoer van de Geul bij de uitmonding in Meerssen is ongeveer $3 \text{ m}^3/\text{s}$. Omdat de Geul een regenrivier is, varieert de afvoer sterk (variërend van minder dan $1 \text{ m}^3/\text{s}$ tijdens de basisafvoer tot meer dan $40 \text{ m}^3/\text{s}$ na een storm met een terugkeerperiode van 5 jaar). Figuur 4.2 toont de regime-curves van het stroomgebied voor neerslag, afvoer en potentiële verdamping. De gemiddelde jaarlijkse neerslag is ongeveer 880 mm/jaar . De gemiddelde jaarlijkse potentiële verdamping is ongeveer 620 mm/jaar , variërend van minder dan 10 mm/maand in december/januari tot meer dan 100 mm/maand in juni/juli. De jaarlijkse afvoer is ongeveer 260 mm/jaar , waarbij de winter het gebruikelijke overstromingsseizoen van de Geul is (de Moor et al., 2008). Hoge afvoeren worden meestal veroorzaakt door een combinatie van (relatief) veel neerslag, natte omstandigheden, smeltende sneeuw en lage evapotranspiratie.



Figuur 4.2 Regime-curves van het stroomgebied (Afvoer: Meerssen, Neerslag: Epen, pot. Evaporatie(Klein, 2022))

Tabel 4.1 toont de acht hoogste afvoeren die sinds 1970 zijn geregistreerd bij station Hommerich. Zes van de acht hoogste afvoeren vonden plaats in de winter tussen november en februari, een periode waar de bodem al verzadigd is. De grootste geregistreerde afvoer is echter de zomerafvoer van 2021 met 97 m³/s bij Hommerich, ongeveer halverwege de Belgische grens en Valkenburg.

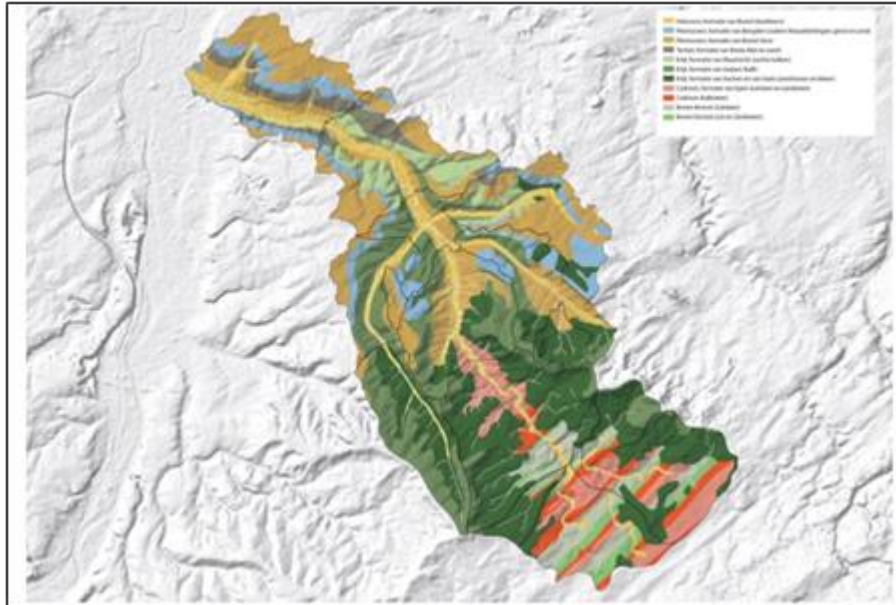
Tabel 4.1 Acht hoogste geregistreerde uurgemiddelde afvoeren in de Geul sinds 1970. De piekafvoer van het gebeurtenis op 15-07-2021 is gebaseerd op modelsimulaties (Klein, 2022).

Datum	48-uurs neerslag (Epen) (mm)	Piekafvoer (m ³ /s) Hommerich
15-07-2021	109,8	97
15-09-1998	94,3	58
28-02-1987	27,2	47
07-02-1984	49,8	45
22-02-1970	46,9	44
14-11-2010	56,1	36
07-01-2011	14,9	34
19-11-2004	50,0	31

4.1.2 Sponswerking (gebaseerd op de data van Juli 2021)

De ondergrond van het stroomgebied kent twee delen. Het zuidelijke Belgische deel (rode en lichtgroene kleuren in Figuur 4.3) bestaat uit slecht doorlatende gesteenten uit het Carboon, met daarop vaak dunne bodems. Naar het noorden toe worden de bodems dikker en liggen ze op beter doorlatende gesteenten uit het Krijt (groene kleuren in Figuur 4.3). Deze dikke onverzadigde krijtlagen fungeren als belangrijke opslaggebieden in het stroomgebied.

De verschillende geohydrologische kenmerken binnen het stroomgebied worden weerspiegeld in het natuurlijke afwateringspatroon van het Geuldal. Het beeknetwerk is goed ontwikkeld in het bovenstroomse deel van het stroomgebied met een afwateringsdichtheid van ca. 1,35 km/km² (Stroming, 2022), wat duidt op een snelle hydrologische respons met hoge piekafvoeren (Pallard et al., 2009). Het afwateringspatroon in het centrale en lager-gelegen deel van het stroomgebied is daarentegen slecht ontwikkeld. De rivieren bestaan alleen uit de hoofdtak en bijgevolg is de gemiddelde afwateringsdichtheid 0,4 tot 0,6 km/km² (Stroming, 2022). De lage dichtheid geeft aan dat er een beperkte oppervlakkige afstroming is en een goede infiltratie- en opslagcapaciteit (Pallard et al., 2009).



Figuur 4.3 Geologische ondergrond van het Geuldal. (Stroming, 2022)

Zelfs bij een langdurige en heftige bui zoals in juli 2021, waarbij in het stroomgebied in twee dagen gemiddeld 128mm neerslag viel, wordt een groot deel van het water in het gebied vastgehouden en stroomt niet af. Tabel 4.2 toont dat zelfs in het bovenstroomse gebied meer dan 55% van de neerslag in het gebied gebleven is. Benedenstrooms is ongeveer 20 – 25% van het water tot afvoer gekomen. Berekeningen met andere modellen komen tot vergelijkbare afvoercoëfficiënten (Asselman & van Heeringen, 2023).

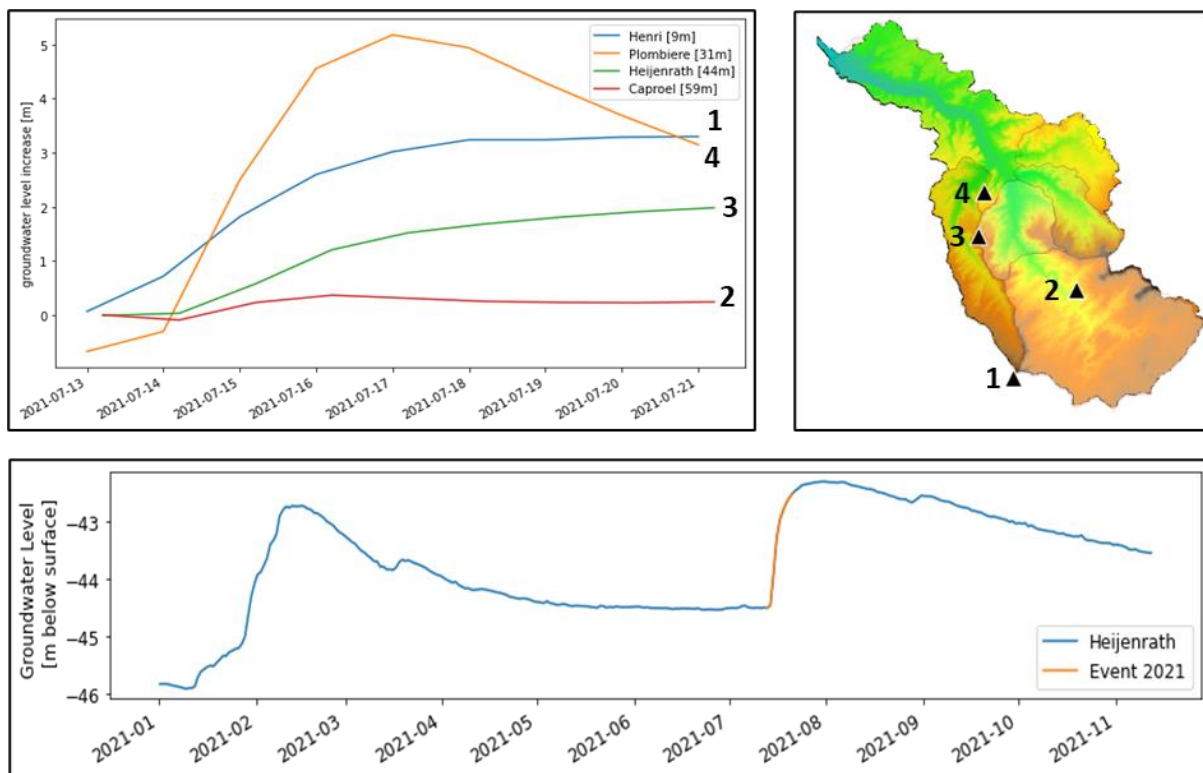
Tabel 4.2 Grootte, neerslag en afvoer kenmerken per deelstroomgebied bovenstrooms van Schin op Geul (Slager et al., 2022)

Deelstroomgebied	Grootte [ha]	Grootte [%]	Neerslag [mm]	Afvoer ¹⁰ [%]	Afvoercoëfficiënt [-]
Boven Geul Wallonië	7495	26	180	41	0.45
Beneden Geul Wallonië	4639	16	150	14	0.41
Boven Gulp België	2541	9	130	5	0.21
Totaal België	14675	51	160	60	
Boven Geul ¹¹ Nederland	6019	21	150	23	0.40
Beneden Gulp Nederland	2098	7	130	5	0.21
Selzerbeek	2936	10	130	6	0.18
Eyserbeek ¹²	2845	10	130	7	0.23
Totaal Nederland	13898	48	130	40	
Totaal Bovenstrooms Schin op Geul	28573	100		100	

Gegevens van de grondwaterstanden (dagelijkse gegevens van geselecteerde grondwatermeetpunten op de heuvels in het stroomgebied) laten zien dat de grondwaterstanden op de krijtplateaus ondanks de diepte (meer dan 30 m) snel op de neerslag reageerden.

Figuur 4.4 laat zien dat het grondwaterpeil binnen een dag na het begin van de neerslag steeg en bleef stijgen in de loop van deze gebeurtenis in juli 2021. Stijgingen tussen 0,1 m en 6 m werden waargenomen in de geanalyseerde grondwatermeetpunten op de plateaus. Ter referentie: jaarlijkse grondwaterfluctuaties tussen 5 en 15 m zijn gebruikelijk in deze gebieden (Dassargues & Ruthy, 2009). De omvang en snelheid van de stijging verschilde tussen de meetpunten, wat de heterogeniteit van het systeem benadrukt.

De grondwatermeetpunten op de plateaus in het Nederlandse deel van het stroomgebied vertoonden een verhoogde grondwaterstand ten opzichte van de situatie vóór de neerslaggebeurtenis gedurende de hele zomer (Figuur 4.4). Het duurde veelal tot eind 2021 voordat de grondwaterstanden weer waren gezakt tot het niveau van voor de overstromingen. Dit toont de lange termijn opslagcapaciteit van het systeem en de belangrijke rol van de (kalk)watervoerende lagen voor wateropslag in het stroomgebied.



Figuur 4.4 Linksboven: grondwaterstandverandering (in mm) uitgezet voor verschillende grondwaterputten in het stroomgebied van 13 juli – 21 juli 2021. Tussen haakjes staat de dikte van de onverzadigde zone. Het zwarte cijfer geeft de positie op de kaart aan. Onder: grondwaterstand (in m onder maaiveld) uitgezet voor één grondwaterput voor 2021: in oranje is de stijging door de gebeurtenis in juli 2021 aangegeven (Klein, 2022).

Eerdere studies in het stroomgebied van de Geul vonden een sterke correlatie tussen de piekafvoer en de voorafgaande neerslag van maximaal 30 dagen (Tu, 2006). De resultaten van Klein (2022) toonden aan dat de voorafgaande omstandigheden ook van invloed waren op de ernst van de afvoerreactie op de extreme neerslag in 2021. De 30 dagen voorafgaand aan de gebeurtenis waren natter dan normaal in de hele regio.

4.1.3 Aanpak

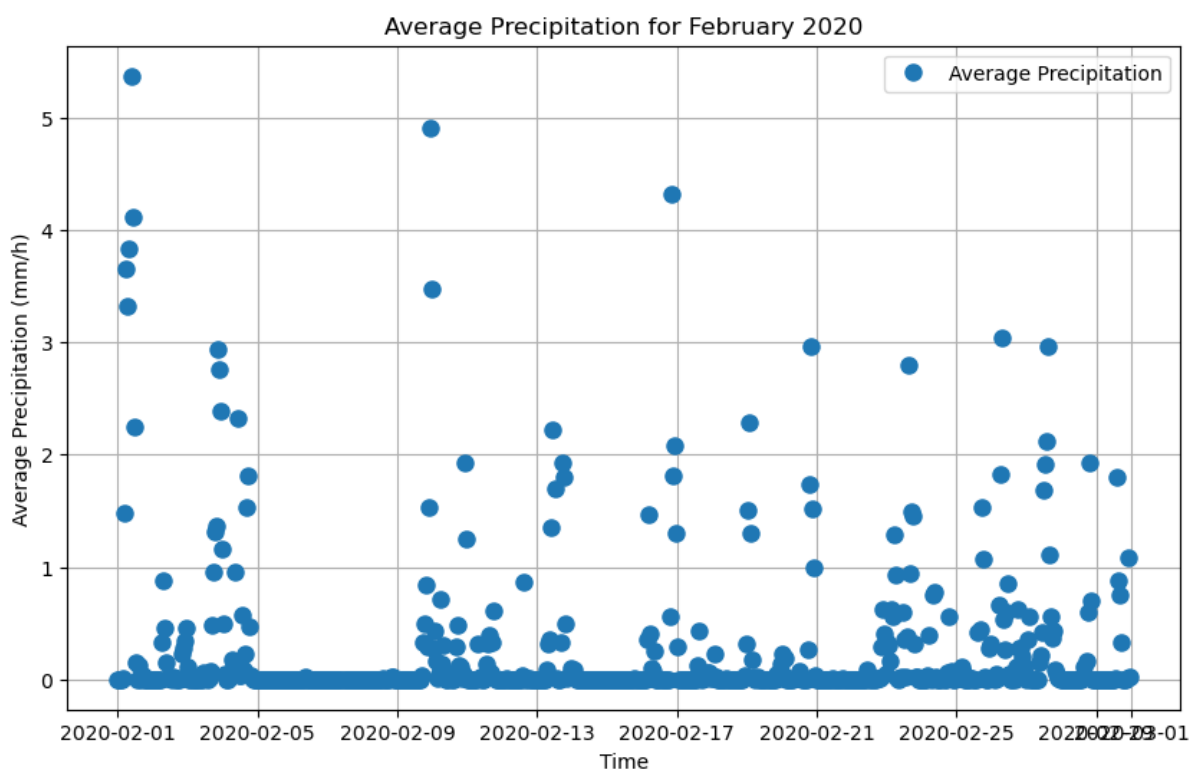
Het doel van deze casus is om een eerste stap te zetten om het effect van grootschalige sponsmaatregelen zoals de verandering van landgebruik op de afvoer voor verschillende gebeurtenissen te kwantificeren zoals voor wateroverlast- en droogte-scenario's. De resultaten van de RAT studie (Slager et al., 2022) tonen dat veranderingen in landgebruik een beperkt effect op de piekafvoer in het Geulstroomgebied hebben. In dit rapport willen wij ook het effect van deze maatregelen op minder extreme gebeurtenissen beschouwen.

De impact van deze maatregelen wordt geëvalueerd voor verschillende neerslag gebeurtenissen (Tabel 4.3) en voor droge en natte initiële condities.

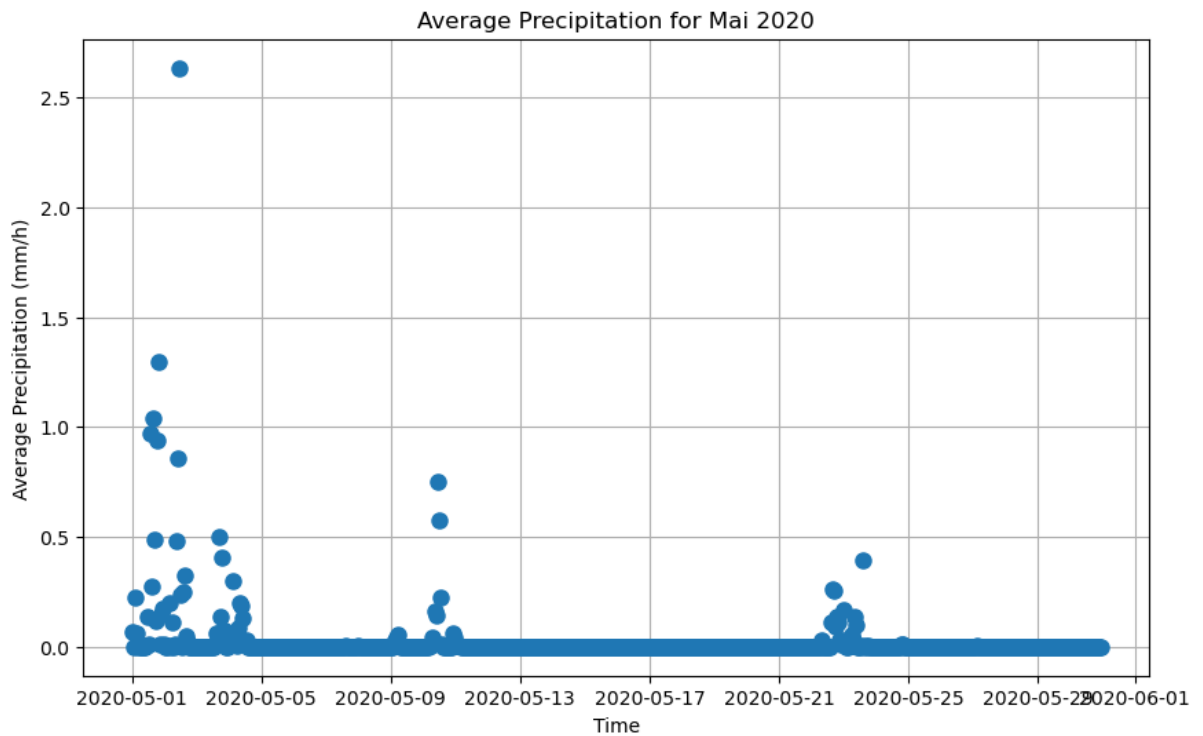
Tabel 4.3 Beschrijving beschouwde gebeurtenissen

Categorie	Naam	Beschrijving	Herhalingskans	Tijdschaal
Water overlast	Bui	Een heftige onweersbui (16.2 mm neerslag in een uur)	1 x 1 jaar	1 uur
	Regen 1	Een langdurig neerslaggebeurtenis (41.5 mm in 24 uur)	1 x 2 jaar	1 dag
	Regen 2	Een langdurig neerslaggebeurtenis (72.9 mm in 24 uur)	1 x 20 jaar	1 dag
	Regen 3	Een langdurig neerslaggebeurtenis (100 mm in 24 uur)	1 x 100 jaar	1 dag
	Regen 4	Lang neerslag gebeurtenis (200 mm in 48 uur) + verdeling in de tijd gebaseerd op bui van juli 2021		2 dagen
Droogte		Langdurige droogte (meerdere jaren achter elkaar, zonder voldoende grondwateraanvulling in de winter)		Meerjarig
		Jaarlijkse zomer droogte		Zomer

De natte initiële situatie is gebaseerd op een heel natte wintermaand (februari 2020) (Figuur 4.5). In deze maand werd bij het meetstation in Maastricht 122 mm neerslag gemeten (gemiddeld 56 mm in februari). De droge initiële condities zijn gebaseerd op een droge voorjaarsmaand (mei 2020) (Figuur 4.6). In deze maand werd bij het meetstation in Maastricht minder dan 18 mm neerslag gemeten.



Figuur 4.5 Gemiddelde gebied neerslag in uurwaarden in het Geulstroomgebied in februari 2020 gebaseerd op KNMI radar data. Deze maand wordt gebruikt om te komen tot natte initiële condities



Figuur 4.6 Gemiddelde neerslag in uurwaarden in het Geulstroomgebied in mei 2020 gebaseerd op KNMI radar data. Deze maand wordt gebruikt als om te komen tot de droge initiële condities.

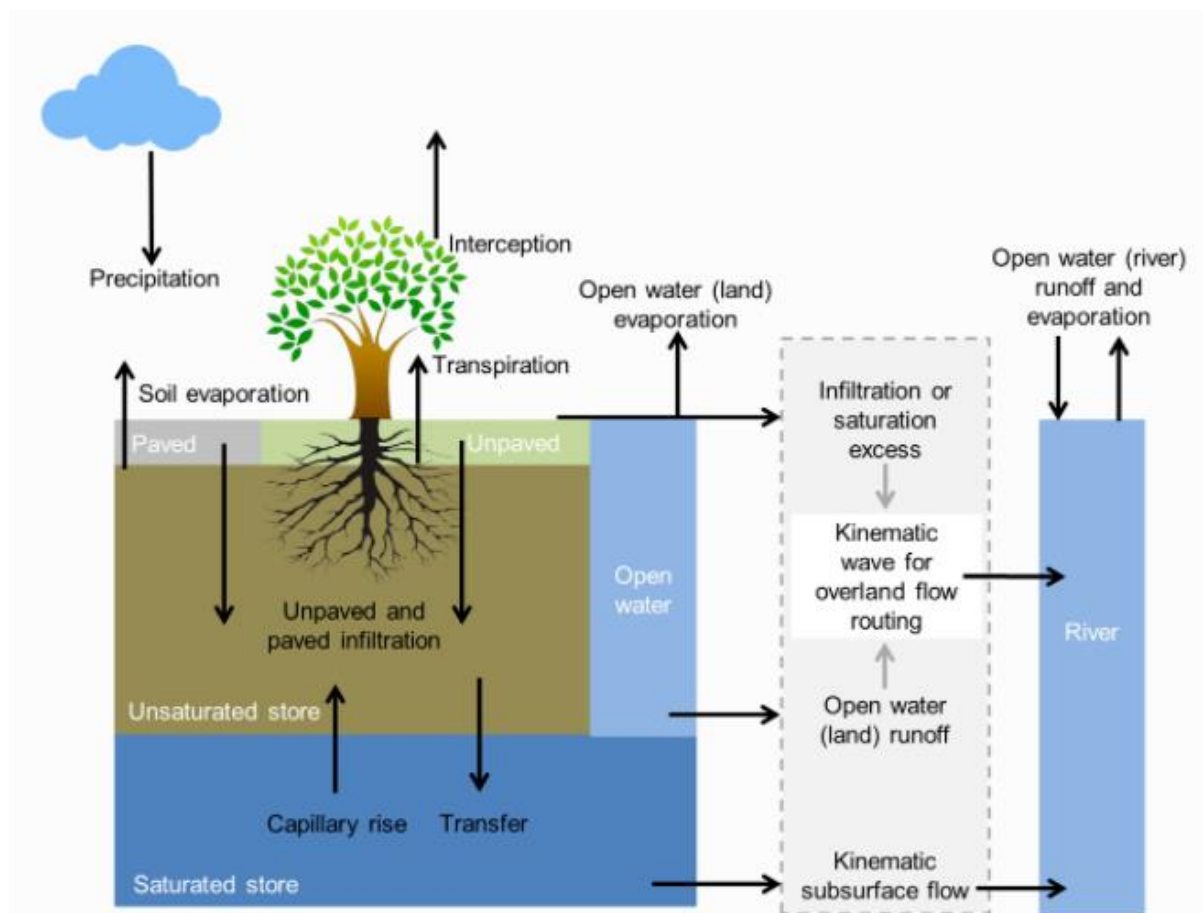
4.1.4 Gebruikte modellen

Voor dit onderzoek is een gekoppeld hydrologisch (Wflow-sbm) en hydrodynamisch (SOBEK 2) model gebruikt, dat voor een eerdere studie (Slager et al., 2022) ontwikkeld is. Nu wordt hetzelfde model en dezelfde landgebruiksscenario's gebruikt, maar voor verschillende type neerslaggebeurtenissen.

Alle neerslaggebeurtenissen en verschillende scenario's zijn met het Wflow-sbm model doorgerekend. Dit model houdt geen rekening met aftopping van het hoogwater door overstromingen in het Geuldal. Een aantal berekeningen is uitgevoerd met het gekoppelde Wflow-sbm – SOBEK-model om een indruk te krijgen van het vertragen en aftoppen van de afvoergolf.

4.1.4.1 Wflow –SBM

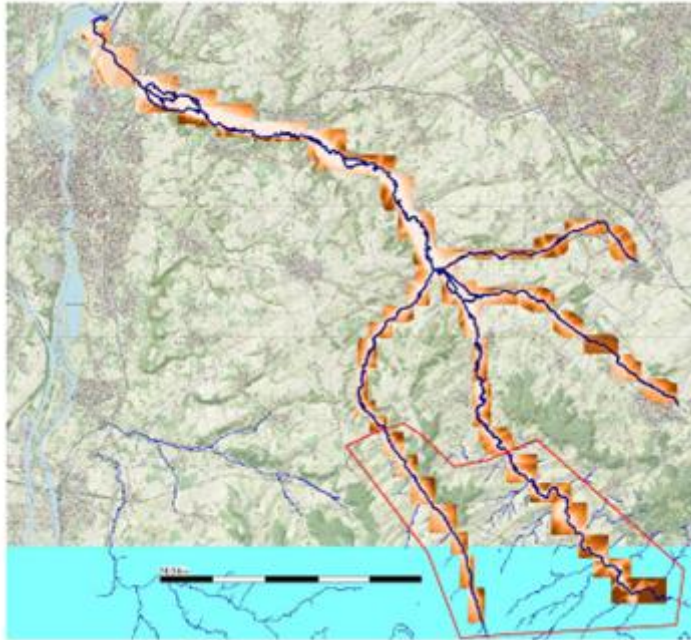
Een gedistribueerd Wflow-sbm model (Verseveld et al., 2022) is opgezet met een resolutie van 1000 m x 1000 m. Het model maakt gebruik van kaarten met landgebruik en bodemeigenschappen om de parameterwaarden te schatten voor de verschillende hydrologische processen (Figuur 4.7). Een eerste kalibratie van het model werd uitgevoerd door Klein (2022) . Er zijn verschillende aanvullende aanpassingen gedaan aan het model door Slager et al. (2022).



Figuur 4.7 Schematisatie van de belangrijkste processen in Wflow-sbm

4.1.4.2 SOBEK

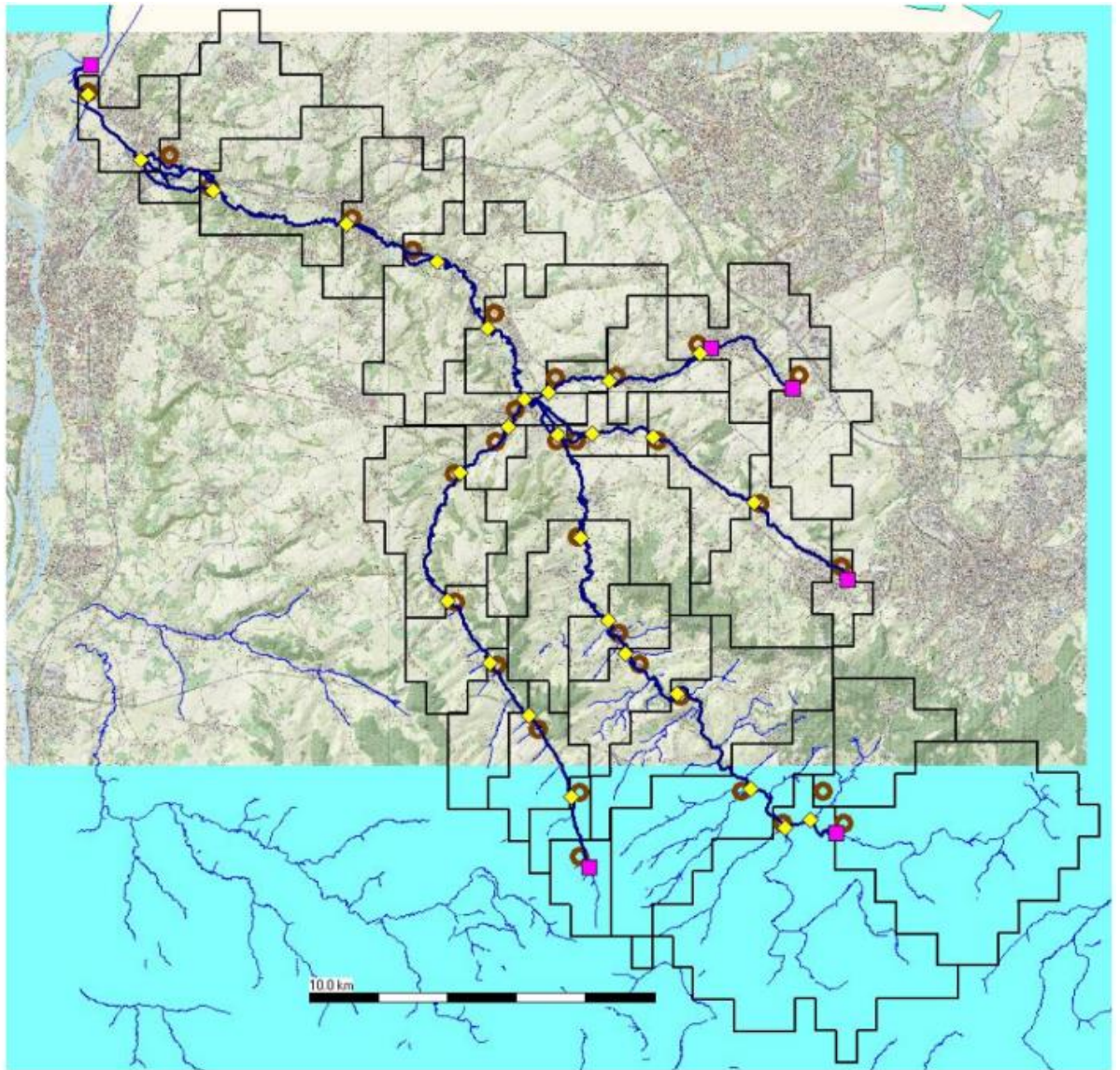
Het SOBEK-model bestaat uit een 1D en 2D hydrodynamisch model in SOBEK2. Figuur 4.8 toont de omvang van het model – de rivieren (blauw) stellen de 1D- component voor en de overstromingsgebieden. Het oorspronkelijke model strekt zich uit van de Nederlands-Belgische grens bij Cottessen (Geul) en Slenaken (Gulp), de Nederlands-Duitse grens bij Vaals (Selzerbeek) en Bocholtz (Eyserbeek) tot Meerssen, waar de Geul uitmondt in de Maas. Voor de RAT studie (Slager, 2022) is het model met het Belgische deel uitgebreid, maar dit is een sterke vereenvoudiging. Het riviertraject is overgenomen van Earth Data, er zijn indicatieve dwarsdoorsneden gebruikt.



Figuur 4.8 Omvang van het SOBEK 2-model van de Geul, inclusief het bestaande Nederlandse en (binnen de rode polygoon) het nieuwe Belgische deel. De donkerblauwe lijnen stellen de 1D-component van het hydrodynamische model voor, de bruine gebieden zijn de hoogtegrijs van de 2D-component.

4.1.4.3 Gekoppeld Wflow-sbm – SOBEK

Het uitgebreide Sobek-model bevat vier stroomopwaarts grenzen (Kelmis/Geul, Hombourg kruis/Gulp, Vaals/Selzerbeek en Bocholtz/Eyserbeek) en één benedenstroomse grens (Meerssen/monding in Maas). De randvoorwaarde voor de waterstand stroomafwaarts blijft bij Meerssen. Bij de andere drie (stroomopwaarts) wordt het model gevoed met afvoertijdreeksen gegenereerd door Wflow_sbm voor de meest bovenstroomse deelstroomgebieden van de Gulp, Geul, Eyserbeek en Selzerbeek, zoals weergegeven in Figuur 4.9. Afvoeren uit de resterende Wflow_sbm deelstroomgebieden worden toegepast op een reeks lateralen langs de riviertakken. De lateralen in Sobek worden op geschikte locaties op de riviertakken geplaatst, zo dicht mogelijk bij de locaties van de corresponderende deelstroomgebiedafvoer van Wflow_sbm. Alle lateralen die in het oorspronkelijke SOBEK-model bestonden, zijn verwijderd. Na deze aanpassing is het SOBEK-model volledig geforceerd met afvoeren uit Wflow_sbm (en de waterstand in de Maas).



Figuur 4.9 Koppeling tussen het hydraulische model in Sobek en het hydrologische model in Wflow. Roze vierkanten geven de stroomopwaarts en stroomafwaarts grenzen van het hydrodynamische model in Sobek, Gele ruiten zijn locaties met laterale instroom. De zwarte polygonen stellen de deelstroomgebieden uit het Wflow model voor, en de bruine "ringen" geven de locaties aan waarvoor Wflow de afvoer van de deelstroomgebieden produceert.

4.1.5 Scenario's

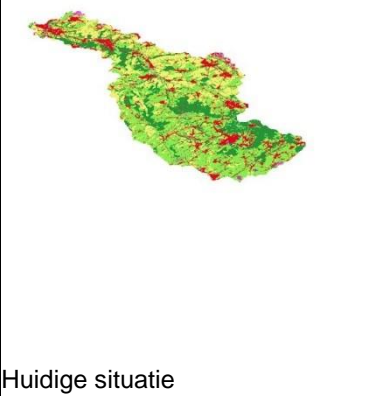
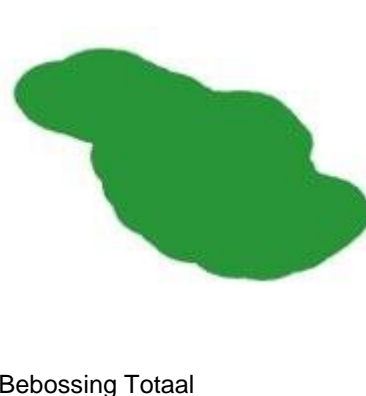

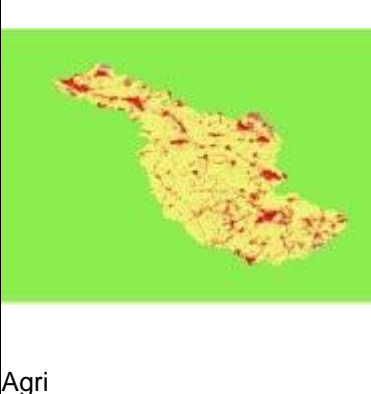

4.1.5.1 Landgebruik scenario's

De verschillende landgebruikscenario's zijn opgezet als een gevoeligheidsanalyse om het begrip van de werking van het systeem te vergroten. In Tabel 4.4 worden de landgebruikscenario's in detail beschreven en in Tabel 4.5 gevisualiseerd. De scenario's richten zich op de invloed van het landgebruik op de afvoer voor de verschillende neerslaggebeurtenissen. De gebeurtenissen zijn in detail beschreven in Tabel 4.3. De beschouwde gebeurtenissen omvatten overstromingen en droogte. Voor elk van de overstromingsgebeurtenissen werd het model zo opgestart dat het een droge situatie (zomer) en een natte situatie (winter) kon simuleren (zoals in de aanpak in 4.1.3 beschreven). Voor de droogtescenario's wordt het model voor een jaar (eenjarige droogte) of voor meerdere jaren (meerjarige droogte) gedraaid.

Tabel 4.4 Beschrijving van de ontwikkeld scenario's; tussen haakjes de verdeling van het landgebruik in percent)

Scenario	Beschrijving
Huidige Situatie	Referentie casus: huidige landgebruik in het Geulstroomgebied (grasland (46%), akkerbouw (19%), bos (20%) en stedelijk gebied + infra (14%))
Bebossing Totaal	Overall bebossing (100 %)
Bebossing	Bebossing behalve stedelijke gebieden (86 % bos, 14% stedelijk gebied)
Agri	Overall landbouw behalve stedelijke gebieden (86 % akkerbouw, 14% stedelijk gebied)
Stedelijk Totaal	Overall stedelijk gebied (100%)

Tabel 4.5 Overzicht gebruikte landgebruikskarten voor de verschillende scenario's.

		
Huidige situatie	Bebossing Totaal	Bebossing
		
Agri	Stedelijk Totaal	

Met de verandering van de landgebruikskarten worden ook de landgebruiksparementen in de Wflow-sbm model aangepast. Tabel 4.6 geeft een overzicht van de gemiddelde parameters in het huidige model en de parameters die afhankelijk van het landgebruik in de scenario's aangepast worden:

- Een toename van de **Manning ruwheidsfactor** leidt tot gedempte/vertraagde piekafvoer en daarmee is er meer tijd voor het water om te infiltreren.
- Een toename van de **rooting depths** (worteldiepte) verhoogt de transpiratie. Tijdens een neerslaggebeurtenis is dat minder belangrijk, maar in droge tijden kan dat de basisafvoer verminderen. Een toename van de **paved fraction** (verhard oppervlakte) vermindert de infiltratiecapaciteit van de grond en leidt tijdens een regenbui tot een snelle en sterke reactie van de afvoer.

- De laatste drie parameters (**K - extinction coefficient, storage leaves en storage wood**) in Tabel 4.6 zijn belangrijk voor de berekening van de interceptie (Simplified Rutter Model).

Tabel 4.6 Overzicht van landgebruiksparameter voor verschillende landgebruikstypen

	N land (Manning)	Rooting depth [mm]	Paved Fraction [-]	Kext extinction coeff for canopy gap [-]	Storage leaves [mm]	Storage wood [mm]
Huidige situatie	0.21	236	0.1	0.64	0.1	0.1
Weilanden	0.15	107	0.0	0.6	0.127	0.01
Akkerbouw	0.6	390	0.0	0.6	0.127	0
Gemengd bos	0.8	406	0.0	0.8	0.039	0.5
Stedelijk	0.6	256	0.9	0.6	0.04	0

De Leaf Area Index (Bladoppervlakte-index) parameter is de enige landgebruiksafhankelijke parameter die niet standaard wordt aangepast in Wflow wanneer het landgebruik wordt gewijzigd. Net als de verandering van de interceptie, is de verandering van de bladoppervlakte-index vooral belangrijk voor de droogte-scenario's. De index is voor dit model niet aangepast en is een beperking van het gebruikte model.

4.1.5.2 Andere Scenario's

Naast de landgebruikscenario's, die gebaseerd zijn op het veranderen van een landgebruikskaart in Wflow-sbm, is er als aanvullende maatregel analyse gedaan naar de effecten van de **aanleg van retentiegebieden bovenstrooms**. Deze kunnen een manier zijn om water tijdens en neerslaggebeurtenis tijdelijk op te slaan en daarmee te piekafvoer benedenstrooms te verminderen.

Voor de verschillende neerslaggebeurtenissen is het benodigde bergingsvolume berekend door aan te nemen dat alle afvoer die hoger is dan de zogenaamde bankfull afvoer (ofwel de afvoer waarbij de Geul buiten haar oevers treedt) geborgen moet worden. Voor deze studie is aangenomen dat de bankfull afvoer in Valkenburg 75 m³/s is. Om te voorkomen dat de retentiegebieden al vol zitten op het moment dat de piekafvoer passeert, is het belangrijk dat de retentiegebieden sturing hebben.

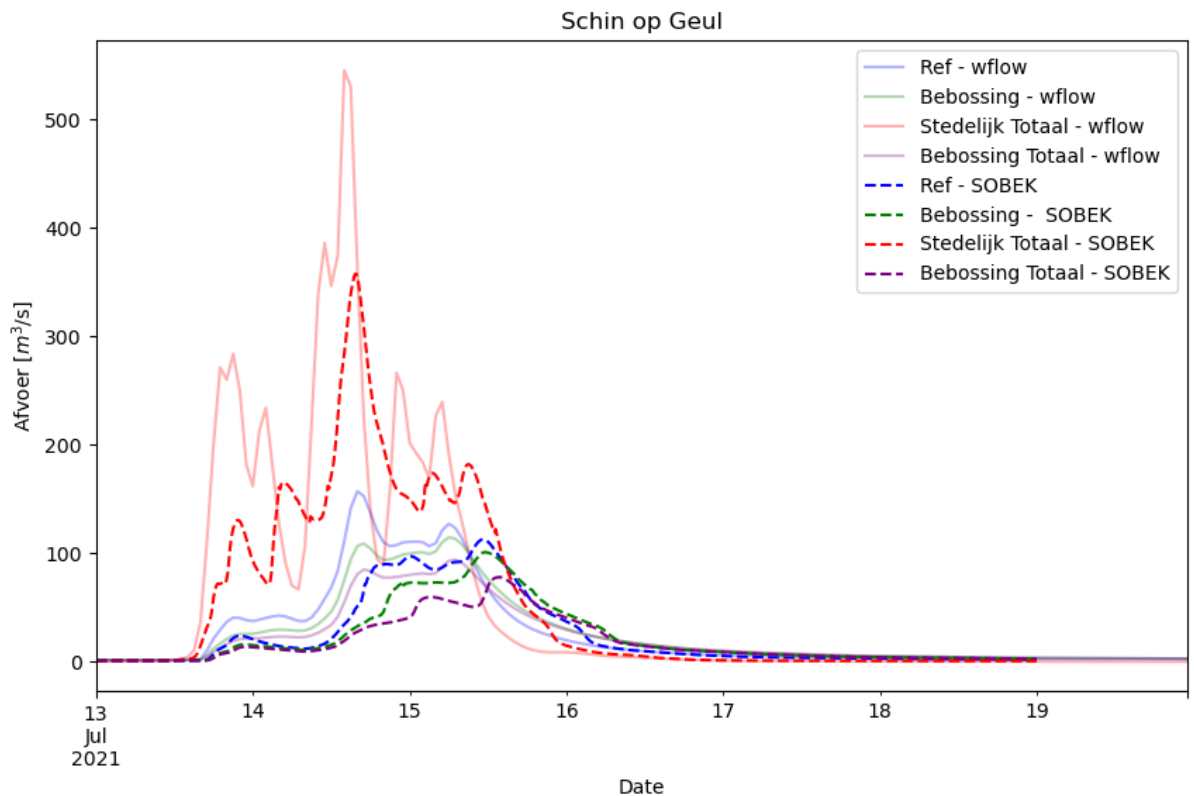
Omdat de retentiegebieden voor een neerslag gebeurtenis leegmoeten zijn, leveren zij geen bijdrage tijdens een droge situatie.

Het effect van de **bebassing in de overstromingsvlakten in het Geuldal** kan in een gekoppeld Wflow-SOBEK model gesimuleerd worden door het verhogen van de **Manning ruwheidsfactor**. De maatregel is gesimuleerd in verband met de RAT-studie Geul (Slager et al., 2022).

4.1.6 Resultaten

4.1.6.1 Vergelijking Wflow-sbm standalone en WFLOW-sbm gekoppeld met SOBEK

De zogenoemde Limburg bui (ca. 130 mm/ 48 uur) wordt gesimuleerd om de verschillen tussen de Wflow-sbm standalone en de Wflow-sbm gekoppeld met SOBEK2 te verduidelijken.



Figuur 4.10 Vergelijking van de piekafvoeren bovenstrooms van Valkenburg voor de gesimuleerde afvoeren in juli 2021 tussen het Wflow model (Wflow) en het gekoppelde Wflow-SOBEK (SOBEK) model

De vergelijking tussen de afvoeren in Wflow-sbm en het gekoppelde Wflow-sbm – SOBEK-model toont aan dat een gekoppeld model noodzakelijk is om de vervlaking en vertraging van de piekafvoer goed in beeld te krijgen. De resultaten in Figuur 4.10 laten zien dat tijdens een bui zoals in juli 2021 geen van de landgebruiksscenario's in staat is om de piekafvoer voldoende te dempen en te vertragen om wateroverlast in Valkenburg te overkomen. Ook niet wanneer rekening wordt gehouden met de topverflaking als gevolg van overstromingen in het Geuldal. Dat geeft een eerste inzicht dat tijdens extreme gebeurtenissen ook heel ingrijpende maatregelen nodig zullen zijn om in dit geval de wateroverlast in Valkenburg compleet te vermijden.

De bosscenario's zijn het meest efficiënt in het dempen van de piekafvoeren bovenstrooms van Valkenburg. Het (extreme) scenario van overal verstedelijking leidt tot heel extreme afvoeren.

Op basis van de vergelijking wordt geconcludeerd dat het Wflow_sbm model de piekafvoeren overschat. De met Wflow_sbm berekende piekafvoeren zijn echter wel van de juiste orde van grootte en geven daarmee een voldoende eerste beeld van het effect van de verschillende landgebruiksveranderingen op de piekafvoer tijdens een gebeurtenis zoals juli 2021. Om die reden is besloten om een groot aantal scenario's alleen met Wflow_sbm door te rekenen (dit bespaart rekentijd).

4.1.6.2 Wateroverlast Scenario's in Wflow_sbm

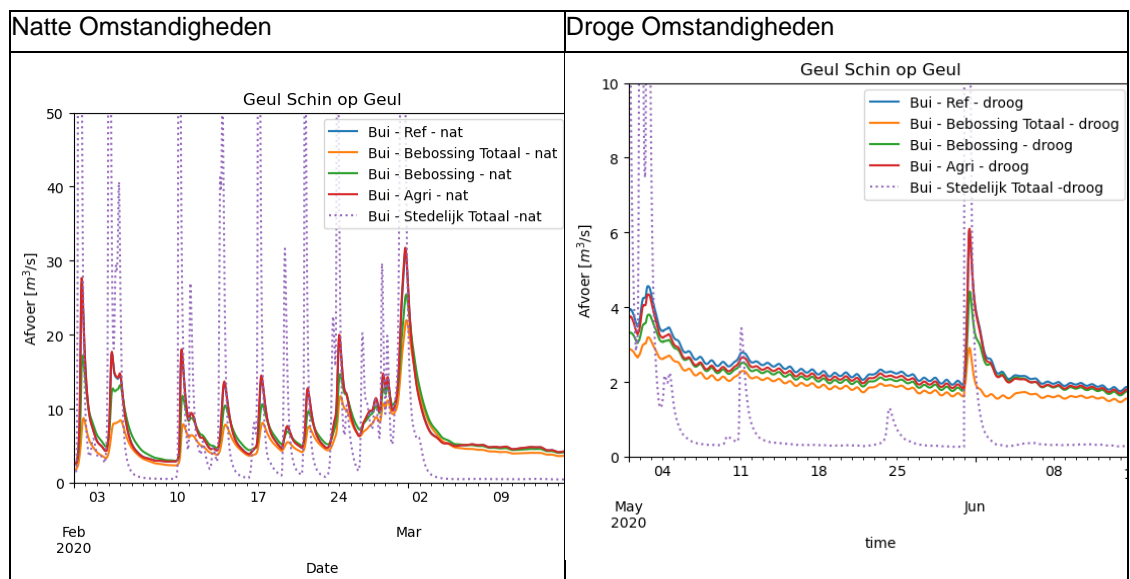
In totaal zijn er 4 verschillende neerslag gebeurtenissen in het model doorgerekend. Voor ieder neerslag gebeurtenis wordt het effect van de landgebruiksveranderingen geëvalueerd. De 100 % stedelijk en 100% bos scenario's beschrijven de grenzen van wat er theoretisch bereikt kan worden door de verandering van landgebruik.

Een helemaal verstedelijkt stroomgebied leidt tot een sterke afname van de Manning ruwheidsfactor en daarmee tot flashy pieken. De infiltratiecapaciteit gaat sterk terug (600 mm/dag naar 5 mm/dag) zodat bijna geen water meer infiltreert en oppervlakkige afstroming zal de respons domineren. Deze effecten resulteren in significant hogere afvoeren. Ook het totale volume neerslag dat tot afvoer komt is veel groter. Er is geen retentiecapaciteit meer. Dit leidt ook tot een vroegere aankomst van de vloedgolf in de rivier.

Aan de andere kant van het spectrum wordt met het 100% bos scenario gesimuleerd in hoeverre de piekafvoeren maximaal met landgebruik maatregelen verminderd kunnen worden. **Bebossing** leidt tot een vergroting van de interceptie en transpiratie. Transpiratie is minder belangrijk voor neerslag buien (korte duur), maar belangrijk voor droogte evaluaties (lange duur). Voor overstromingen is de toename van de Manning ruwheidsfactor essentieel, die tot een vertraagde en gedempte afvoer leidt. Aanvullend wordt in het 100% bebossing scenario de infiltratie capaciteit en daarmee een verminderde afvoer verwacht omdat er geen verharde oppervlakte meer in het gebied bestaat. Er kan meer water infiltreren. De andere twee scenario's (bebossing en agri) zijn minder extreem.

In de volgende paragrafen worden de effecten van landgebruiksveranderingen bij verschillende neerslag gebeurtenissen in meer detail beschouwd.

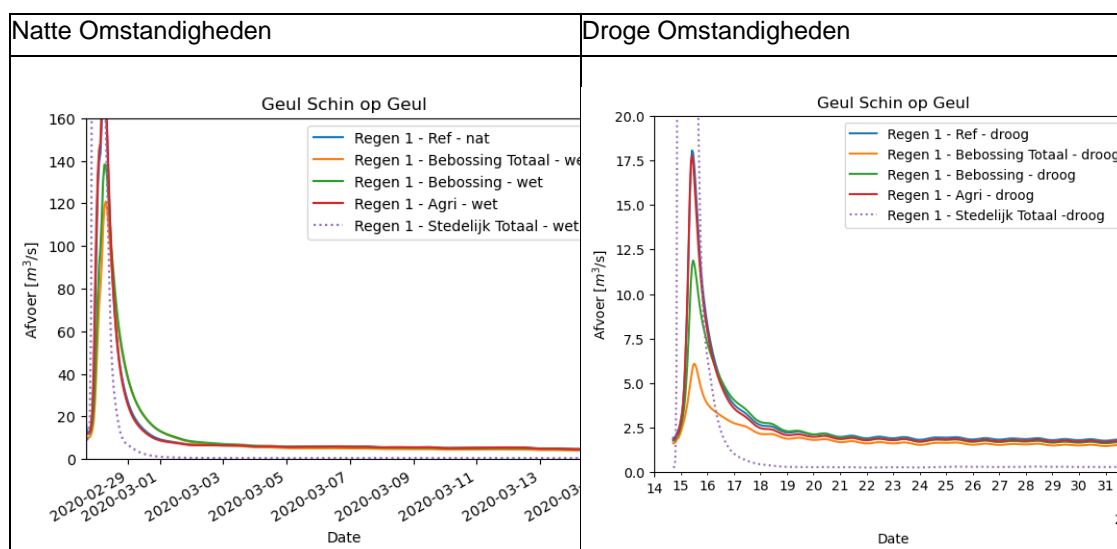
Het eerste gebeurtenis de **zomerse onweersbui** (bui - 16.2 mm/h gemiddeld in het hele stroomgebied) zal bij droge en natte situaties geen wateroverlast geven in Valkenburg. Lokaal kan er natuurlijk wel overlast zijn, vooral als plaatselijk meer regen valt. Maar voor het hele stroomgebied geldt dat er met de huidige landinrichting genoeg opvangcapaciteit in de vegetatie, rivier, bodem en grondwater aanwezig is, zodat er geen grootschalige overstromingen en schade te verwachten is. Er is een duidelijk verschil in impact van de bui te zien onder natte en droge omstandigheden (figuur 4.11), waarbij onder droge omstandigheden de bui in een veel minder grote afvoer resulteert dan onder natte omstandigheden. In de droge situatie wordt veel van het water opgevangen in het landschap.



Figuur 4.11 Gesimuleerde afvoeren met Wflow-sbm van een zomerse onweersbui (16.2 mm/uur) voor droge en natte omstandigheden voor de verschillende scenario's.

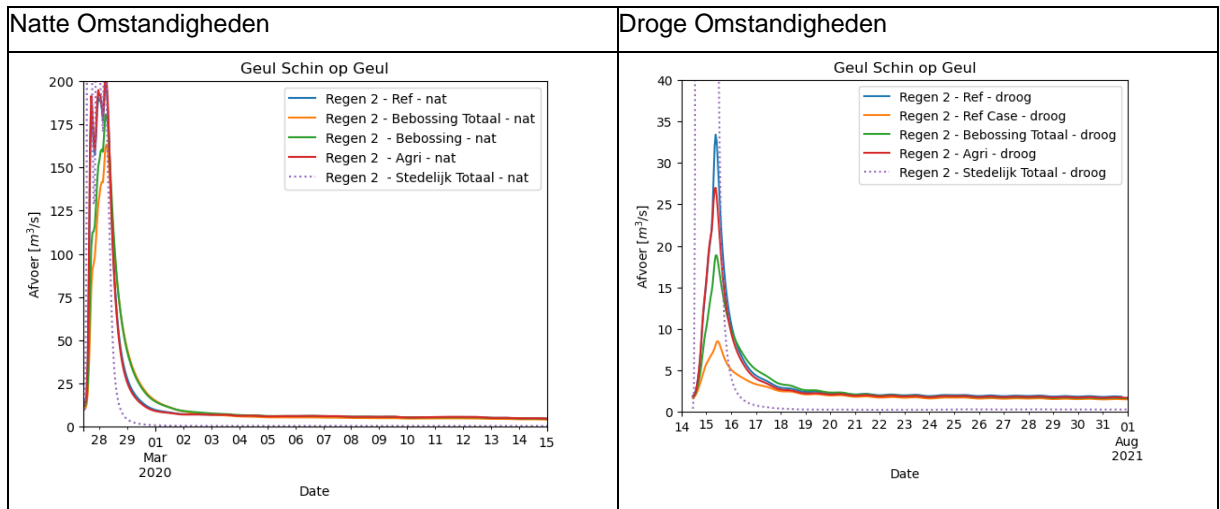
Bij een iets **langere en omvangrijkere neerslag gebeurtenis** (Regen 1 – 41.5 mm/24 uur – gebaseerd op de bui van 14.7.2021 16:00 – 15.7.2021 16:00) is de afvoerpiek heel erg afhankelijk van de initiële omstandigheden in het stroomgebied (figuur 4.12). In een droge situatie leidt ook deze gebeurtenis niet tot overlast/overstromingen in Valkenburg, maar dezelfde neerslag in een heel natte wintermaand resulteert in afvoeren boven de 150 m³/s bovenstrooms van Valkenburg en daarmee tot vergelijkbare gesimuleerde afvoeren als in Juli 2021 met het zelfde model . Meer bebossing (scenario 1 en 4) vermindert de piekafvoeren met 20 % (scenario 1) tot 30% (scenario 4), maar dit kan de overstroming in Valkenburg niet voorkomen.

De vergelijking tussen de afvoeren van de natte en droge situatie laat zien, dat relatief gezien het veranderen van landgebruik tot grotere verschillen in de piekafvoer in droge omstandigheden leidt, en er minder spreiding tussen de scenario's is. In een natte situatie is al een (groot) deel van de spons vol voordat het gebeurtenis optreedt, waardoor een veel groter deel van de neerslag afstroomt. De berekeningen laten ook zien dat het effect van initiële condities relatief groot is ten opzichte van het effect van veranderingen in landgebruik.



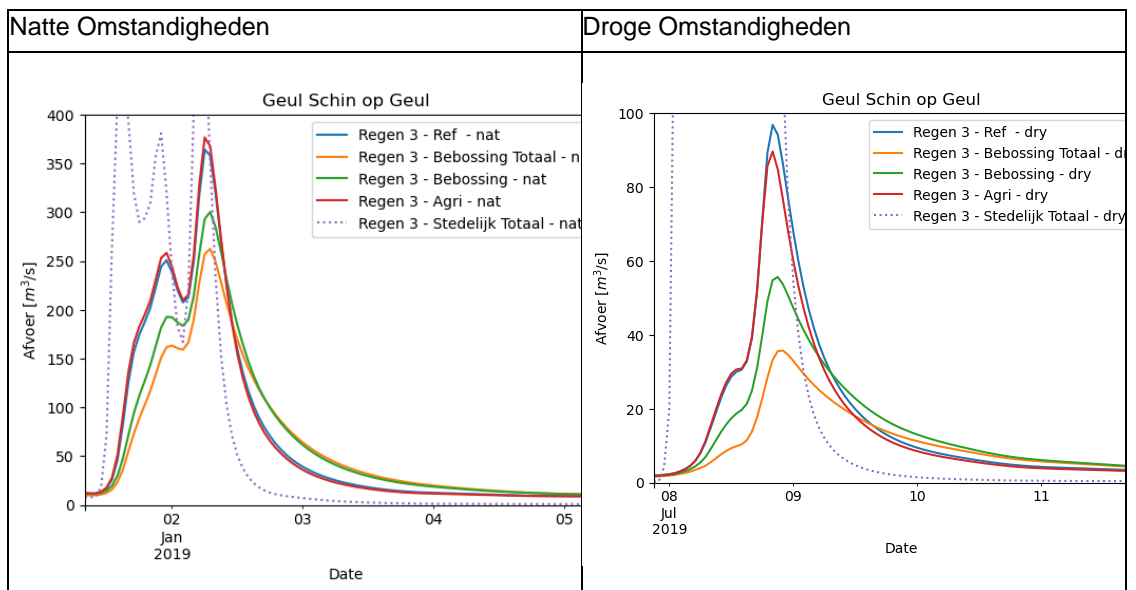
Figuur 4.12 Gesimuleerde afvoeren met Wflow-sbm van een neerslag gebeurtenis (41.5 mm/24uur) voor droge en natte omstandigheden voor de verschillende scenario's.

De scenario's zijn ook voor een nog **langere en omvangrijkere neerslag gebeurtenis 24 - uursbui** doorgerekend (Regen 2: 72.9 mm/24 uur – gebaseerd op de bui van 14.7.2021 10:00 – 15.7.2021 10:00) (figuur 4.13). Zoals voor de regen 1 gebeurtenis, leidt ook de regen 2 gebeurtenis in een droge situatie niet tot overlast in Valkenburg. Daarentegen berekent het Wflow-sbm model piekafvoeren van meer dan 200 m³/s stroomopwaarts van Valkenburg voor natte omstandigheden. Ook in dit geval vermindert bebossing de piekafvoeren (Scenario 1: 10%, Scenario 2: 20%). De spreiding tussen de scenario's in de natte situatie is klein. Dit komt doordat de bodem bij de natte omstandigheden snel verzadigd is. Vanaf dat moment stroomt alle gevallen neerslag af, ongeacht het landgebruik.

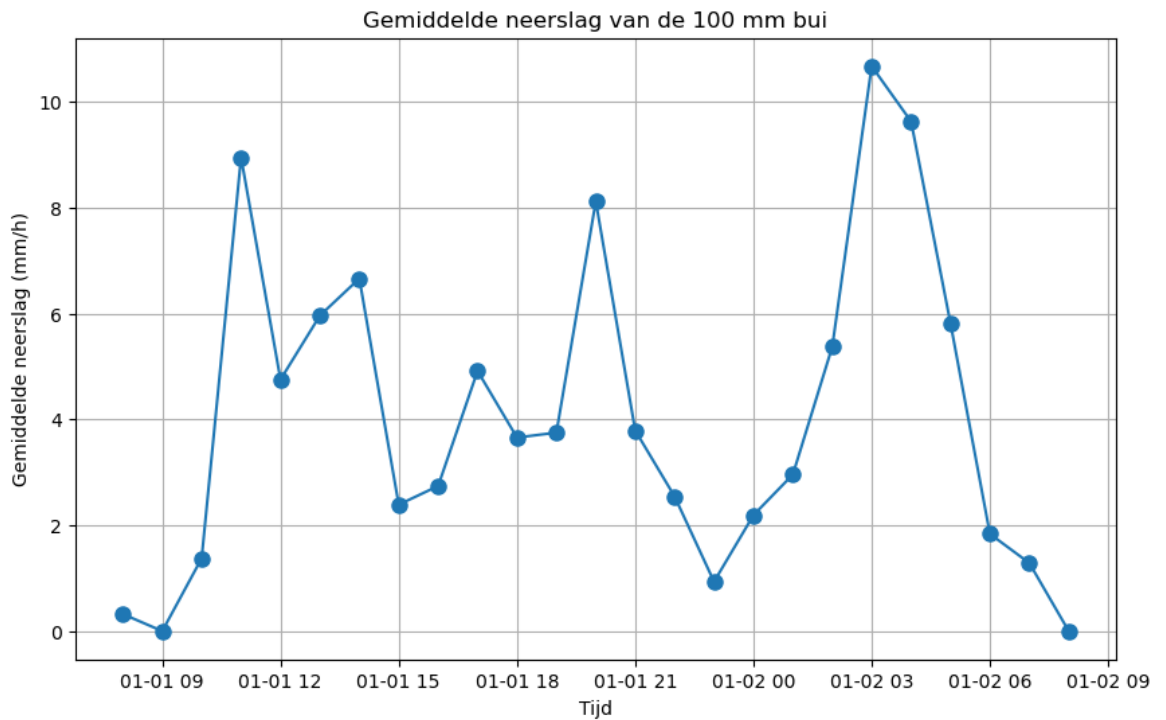


Figuur 4.13 Met Wflow-sbm gesimuleerde afvoeren met Wflow van een neerslag gebeurtenis (98.4 mm/24 uur) voor droge en natte omstandigheden voor de verschillende scenario's.

De scenario's worden ook voor een nog **zwaardere 24-uursbui** doorgerekend (Regen 3: 100 mm/24 uur) (figuur 4.14). Zou deze bui in een natte situatie plaatsvinden dan zou dat met elke scenario tot grote overlast in Valkenburg leiden. In een droge situatie zou de huidige referentie casus en de agri scenario tot overlast leiden (97 en 90 m³/s), maar met de bebossing scenario's kan de overlast voorkomen worden. Beide bebossing scenario's verminderen de afvoer aanzienlijk (60% bij het scenario van totale bebossing en 40% bij het bebossing scenario met bestaande infrastructuur). De neerslag patroon van de 100 mm bui is redelijk gelijk, de neerslag intensiteit is alleen een uur kort boven de 10 mm/h, daarmee wordt de infiltratie capaciteit van de grond niet langdurig overschreden en veel water is in staat om te infiltreren (figuur 4.15).



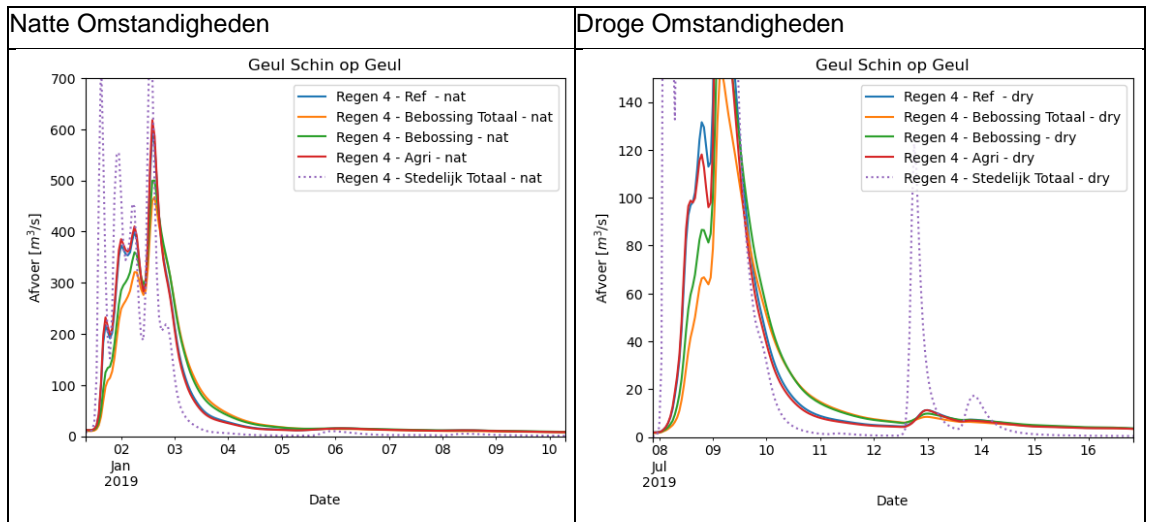
Figuur 4.14 Met Wflow-sbm Gesimuleerde afvoeren met Wflow van een neerslag gebeurtenis (98.4 mm/24 uur) voor droge en natte omstandigheden voor de verschillende scenario's.



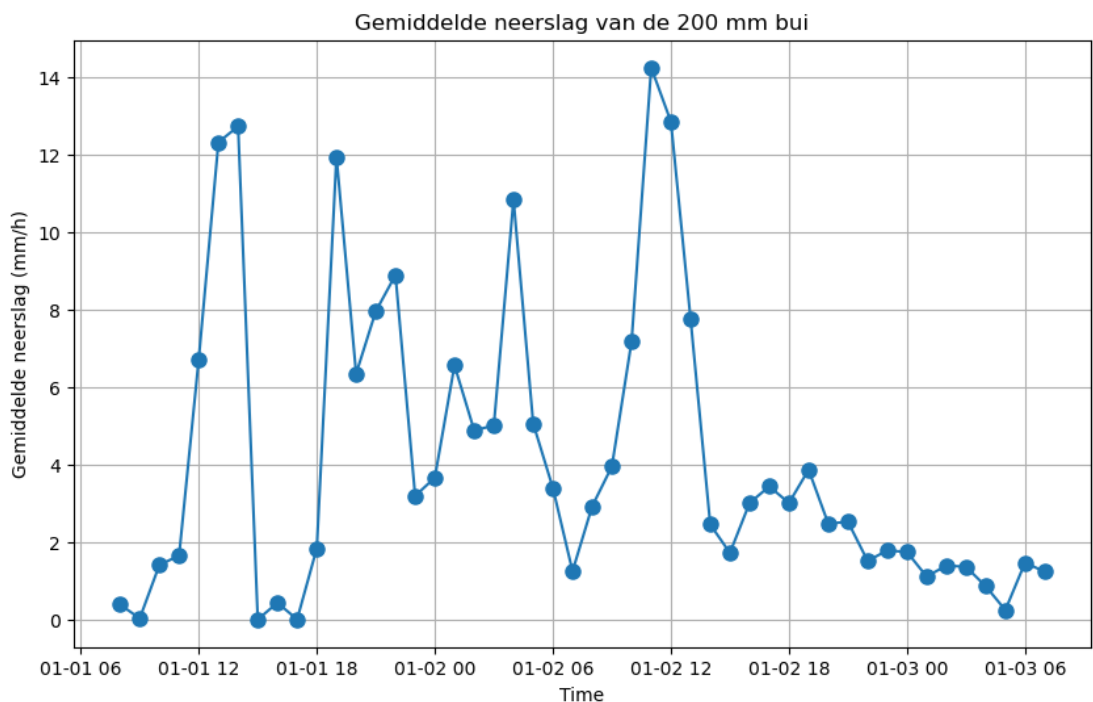
Figuur 4.15 Gemiddelde neerslag in het stroomgebied van de 100 mm bui.

Tenslotte de **200 mm/48u bui** (regen 4 – zie Figuur 4.2), die ook voor de bovenregionale en grensoverschrijdende stresstesten wordt gebruikt. Dit gebeurtenis is extremer dan de gebeurtenis in juli 2021. In juli 2021 is in 48 uur gemiddeld 120 mm neerslag in het stroomgebied gevallen, bij deze bui valt er 200 mm neerslag in 48 uur homogeen over het stroomgebied (figuur 4.17).

In dit geval, onafhankelijk van de voorafgaande nattigheid, zullen de gesimuleerde afvoeren tot forse overlast in Valkenburg leiden. Voor de referentie casus worden afvoeren van bijna 300 m³/s (droge omstandigheden) en bijna 600 m³/s (natte omstandigheden) in Wflow-sbm gesimuleerd (met het gecombineerde Wflow-SOBEM model zullen de piekafvoeren lager uitvallen). Het verschil in afvoeren tussen de droge en de natte situatie wordt relatief gezien kleiner (factor 2; in plaats van factor 10 voor de onweersbui en factor 8 voor regen 2). Ook in deze extreme situatie leidt bebossing nog steeds tot een verminderde piekafvoer.



Figuur 4.16 Met Wflow gesimuleerde afvoeren van een neerslag gebeurtenis (200 mm/48 uur) voor droge en natte omstandigheden voor de verschillende scenario's.



Figuur 4.17 Gemiddelde neerslag in het stroomgebied van de 200 mm bui.

Tabel 4.7 toont een overzicht van de maximale gesimuleerde afvoeren voor de verschillende scenario's en randvoorwaarden. Over het algemeen is te zien dat het verschil tussen natte en droge omstandigheden veel groter is dan het effect van verschillende landgebruiksveranderingen.

Een mogelijke omschakeling van het huidige landgebruik leidt toch een lichte toename van de Mannings ruwheidsfactor. Daarnaast zal de transpiratie (vanwege de grotere wortel diepte) toenemen (belangrijk bij droogte). Overall lijken de gemiddelde landgebruiksparementen van het agricultuur scenario's erg op de gemiddelde parameters van het huidige landgebruik (zie paragraaf 4.1.4.1). Daarom zijn de verschillen in berekende afvoer ook minimaal.

Tabel 4.7 Overzicht van de met wflow-sbm berekende piekafvoeren voor de verschillende scenario's en randvoorwaarden

Gebeurtenis	Antecedente condities	Piekafvoer				
		Ref Case [m ³ /s]	Bebossing Totaal [m ³ /s]	Bebossing [m ³ /s]	Agri [m ³ /s]	Stedelijk Totaal [m ³ /s]
Bui (16.2 mm / uur)	nat	31	22	25	32	257
	droog	6	3	4	6	61
Regen 1 (41.5 mm /24 uur)	nat	178	121	138	183	404
	droog	18	6	12	18	241
Regen 2 (72.9 mm/24 uur)	nat	200	163	181	205	624
	droog	33	9	19	27	479
Regen 3 (100 mm/24 uur)	nat	364	262	300	377	560
	droog	97	36	56	90	565
Regen 4 (200 mm /48 uur)	nat	593	467	499	617	831
	droog	293	153	195	277	820

Retentiecapaciteit:

De retentiecapaciteit is niet met het model gesimuleerd, maar achteraf berekend op basis van de bankfull afvoer bovenstreams van Valkenburg (tabel 4.8). Het berekende volume kan beschouwd worden als de retentiecapaciteit, die minimaal nodig is om wateroverlast in Valkenburg te voorkomen.

In realiteit moet de retentiecapaciteit duidelijk hoger zijn (Factor 2 – Van Heeringen, 2021) om ook daadwerkelijk, met meer zekerheid, het volume te kunnen bergen. Dit komt doordat de beschikbare berging snel afneemt wanneer het bergingsgebied zich iets te vroeg vult met water.

De berekende capaciteit geeft een eerste inzicht van de hoeveelheid water die bij de verschillende landgebruiksscenario moet worden vastgehouden. Ter indicatie, een olympisch zwembad heeft een volume van 2,500 m³.

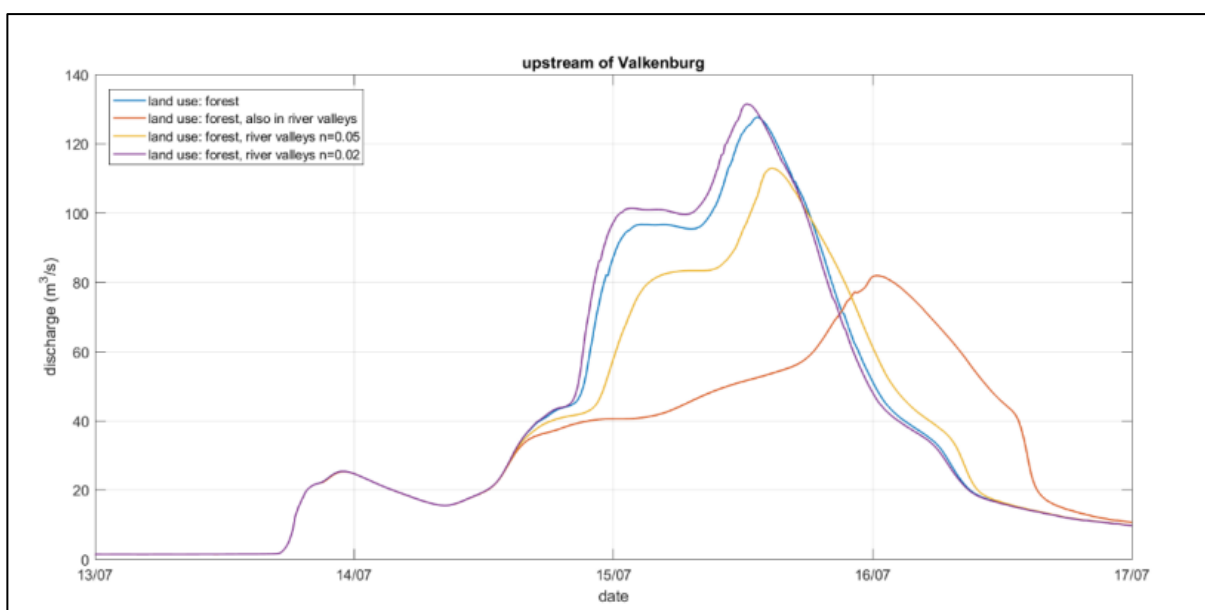
Tabel 4.8 Overzicht van de berekende retentiecapaciteit die nodig is om wateroverlast in Valkenburg te voorkomen. Een streepje betekent dat er geen aanvullende retentie nodig is om wateroverlast te voorkomen.

Gebeurtenis	Antecedent condities	Retentiecapaciteit (miljoen m ³)				
		Ref Case	Bebossing Totaal	Bebossing	Agri	Stedelijk Totaal
Regen 1 (41.5 mm /24 uur)	nat	2,94	1,05	1,68	3,12	7,50
	droog	-	-	-	-	4,80
Regen 2 (72.9 mm/24 uur)	nat	7,13	4,03	5,28	7,43	12,50
	droog	-	-	-	-	9,48
Regen 3 (100 mm/24 uur)	nat	12,5	8,22	10,24	12,88	18,90
	droog	2,45	-	-	1,31	16,67
Regen 4 (200 mm /48 uur)	nat	32,82	27,80	30,32	33,30	37,02
	droog	7,55	2,57	4,41	6,39	35,31

Tabel 4.8 toont dat een enorme hoeveelheid aan retetievolume nodig is om overstromingen in Valkenburg te voorkomen. Ter vergelijking: momenteel zijn er meer dan 400 retentie bekkens in het gebied met een totale capaciteit net boven de 0.8 miljoen m³.

Het verschil tussen de benodigde retentiecapaciteit in de huidige situatie in vergelijking met het 100% stedelijk scenario voor regen 3 (200 mm /48 uur) laat zien dat het gebied bovenstrooms van Valkenburg in staat is om tijdens een extreme gebeurtenis bijna 28 miljoen m³ water te bergen. Verdere bebossing van het gebied kan de berging nog iets (tot 5 miljoen m³ als het hele stroomgebied bebost is) verhogen. Deze waarden bevestigen de enorme sponswerking van het gebied in de huidige situatie.

Het effect van de **bebossing in de overstromingsvlakten in het Geuldal** is voor deze studie niet extra beschouwd worden. De resultaten vanuit de RAT-Studie gebaseerd op de Limburg Bui geven een eerste indicatie dat bebossing in de overstromingsvlakten tot een extra piek piekreductie (ca. 45 m³/s) en vertraging (6 uur) in Valkenburg kan leiden (zie Figuur 4.18). Ondanks de lagere afvoer leidt de sterk toegenomen ruwheid in het rivierdal lokaal tot aanzienlijk hogere waterstanden (enkele decimeters hoger) dan in de huidige situatie (Slager et al., 2022).



Figuur 4.18 Gemodelleerde afvoer bovenstrooms van Valkenburg (meetpunt Hertenkamp) voor verschillende ruwheidscoëfficiënten in de Nederlandse 2D-roosters (Slager et al., 2022).

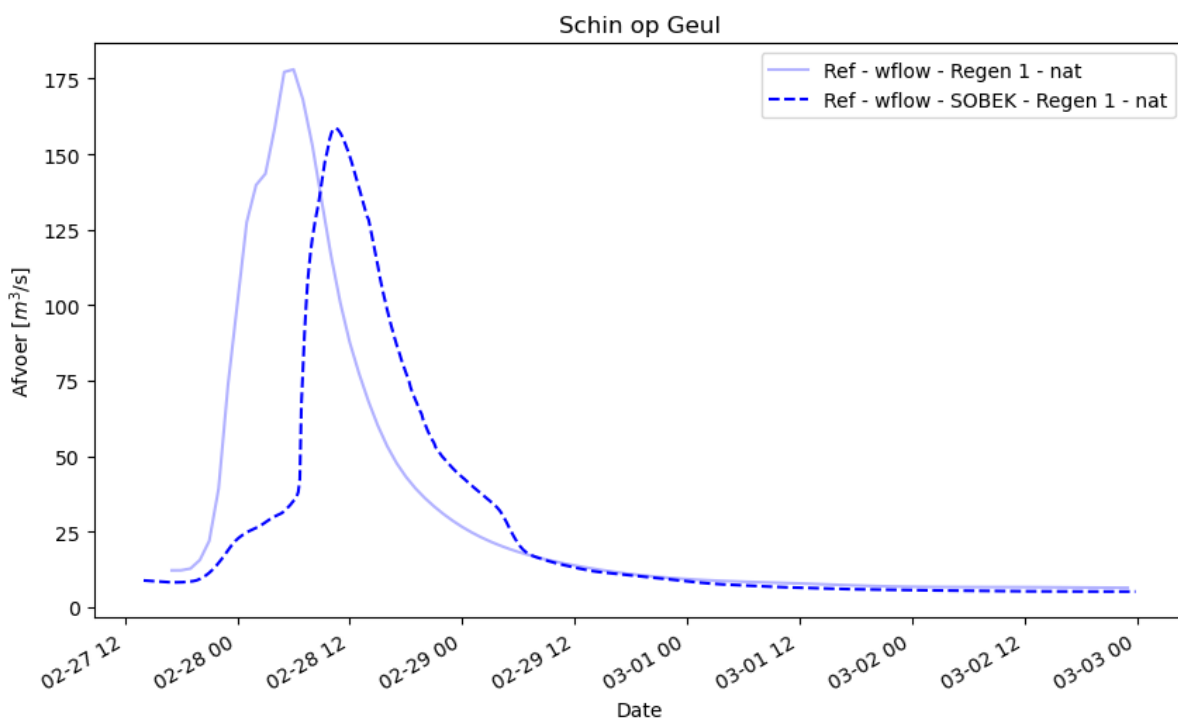
4.1.6.3 Wateroverlast scenario's in gekoppeld Wflow_SBM – SOBEK model

Zoals in paragraaf 4.1.5.1 besproken overschat het niet gekoppelde Wflow-sbm de piekafvoeren en houdt het model geen rekening met potentiële vertraging en demping van de afvoer piek als gevolg van overstromingen. Om deze effecten op de afvoerpiek te verduidelijken, zijn er enkele runs in het gekoppeld Wflow-sbm – SOBEK model gedraaid.

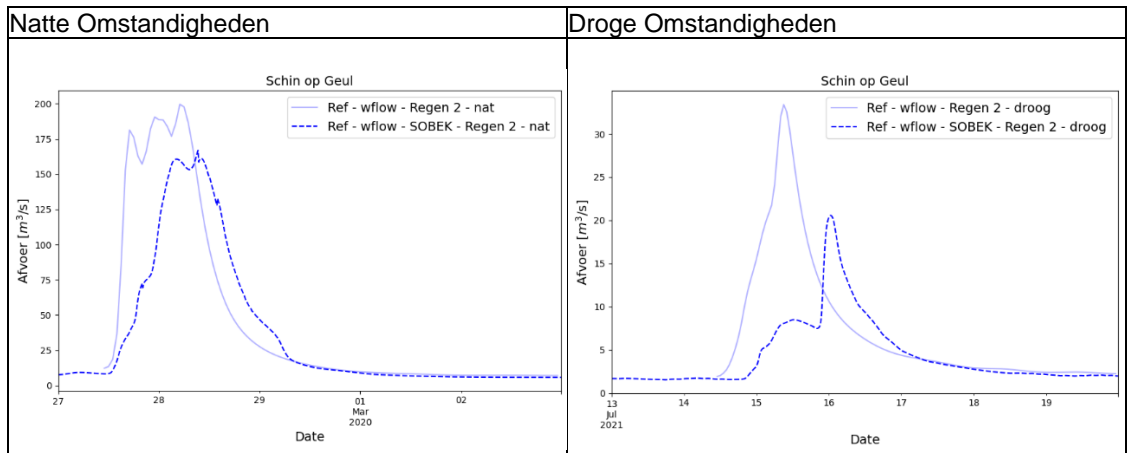
Tabel 4.9 Vergelijking tussen de Wflow en de gekoppelde Wflow-SOBEK - model qua piekafvoeren en benodigde retentie capaciteit gebaseerd op de huidige situatie voor verschillende neerslag gebeurtenissen.

Gebeurtenis	Antecedente Conditie	Piekafvoeren (Ref Casus)			Benodigde Retentie Capaciteit (Ref Casus)		
		Wflow-sbm (m ³ /s)	Sobek (m ³ /s)	Sobek/Wflow-sbm(%)	Wflow-sbm (miljoen m ³)	Sobek (miljoen m ³)	Sobek/Wflow-sbm(%)
Regen 1 (41.5 mm /24 uur)	nat	178	159	89	2,94	1,98	67
	droog	33	21	64	0	0	0
Regen 2 (72.9 mm/24 uur)	nat	200	167	84	7,13	4,40	62
	droog	33	21	64	0	0	0
Regen 4 (200 mm /48 uur)	nat	593	377	64	32,82	22,67	69
	droog	293	176	60	7,55	3,70	49

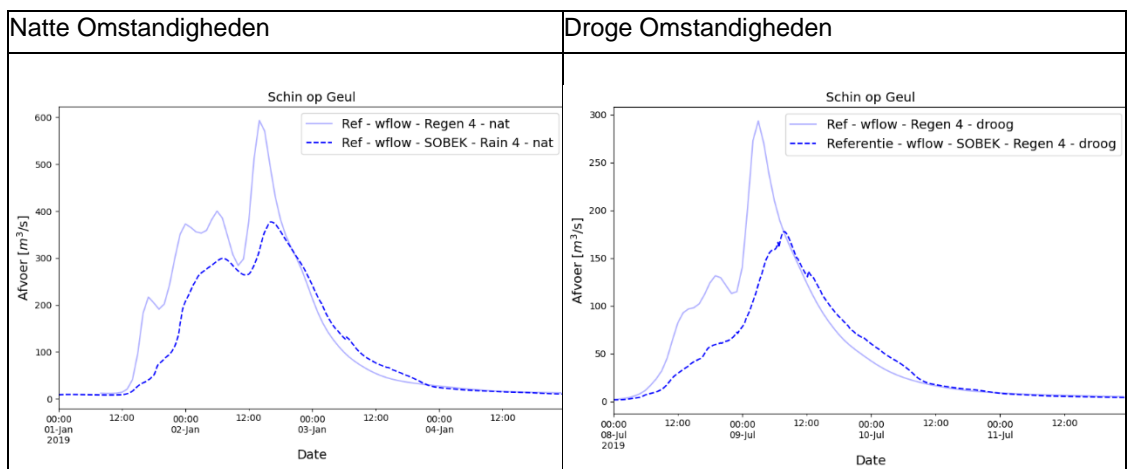
Vanuit het overzicht in Tabel 4.9 is te zien, dat de verschillen van Wflow en de gekoppelde Wflow-SOBEK model in opzichte van de piekafvoeren en retentie capaciteit voor de extremere gebeurtenissen groter worden dan voor minder extreme gebeurtenissen. Ofwel, overstromingen hebben een groter effect op de piekafvoer tijdens extreme gebeurtenissen. Vooral voor de extreme neerslag gebeurtenis van 200 mm in 48 uur zijn de berekende piekafvoeren tussen 35 – 40% minder met het gekoppeld model als met de Wflow-model alleen (figuur 4-19 t/m 4.21). Het gekoppeld Wflow-SOBEK model houdt rekening met het grote opslagvolume van het dal van de Geul. De berging in het gekoppelde model bedraagt ongeveer 10 miljoen m³ (gebaseerd op de 200 mm in 48 uur bij natte omstandigheden).



Figuur 4.19 Vergelijking tussen de gesimuleerde piekafvoeren voor de respons van het huidige stroomgebied bij natte omstandigheden bij een neerslaggebeurtenis van 41.5 mm in 24 uur berekend met Wflow en een gekoppeld Wflow-SOBEK model.



Figuur 4.20 Vergelijking tussen de gesimuleerde piekafvoeren voor de respons van het huidige stroomgebied bij natte omstandigheden en droge omstandigheden bij een neerslaggebeurtenis van 72.9 mm in 24 uur berekend met Wflow en een gekoppeld Wflow-SOBEK model.



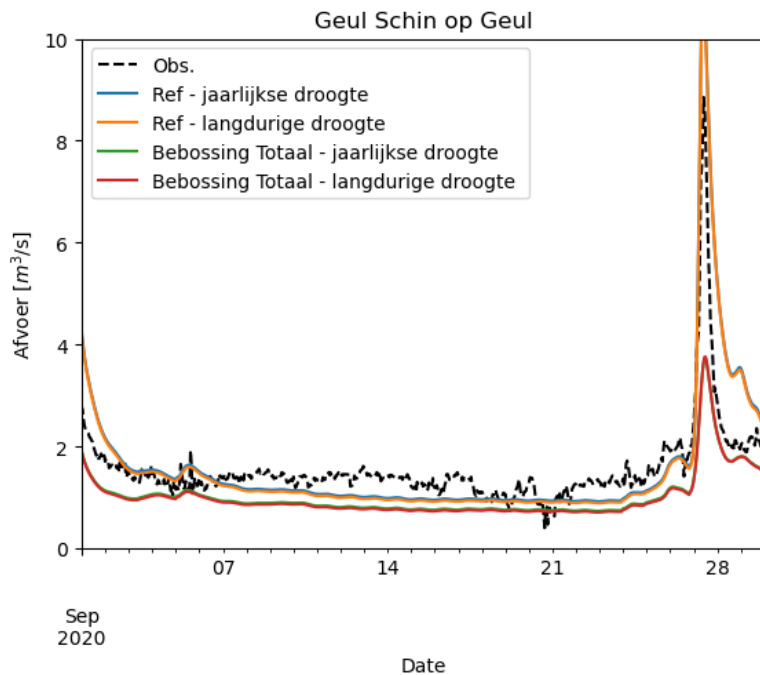
Figuur 4.21 Vergelijking tussen de gesimuleerde piekafvoeren voor de respons van de huidige stroomgebied bij natte omstandigheden en droge omstandigheden op een neerslag gebeurtenis van 200 mm in 48 uur gerekend met Wflow en een gekoppeld Wflow-SOBEK model.

Naast de verlaging van de piekafvoer (tussen 10 – 40%) en de benodigde water retentie capaciteit (30 – 50%) is er ook een vertraging van de piekafvoer te observeren. De vertraging is enkele uren voor de eendaagse neerslag gebeurtenissen, en het grootst voor droge omstandigheden. Voor het 48 uur gebeurtenis is er een vertraging aan het begin van het gebeurtenis te observeren, maar de duur van de afvoergolf vermindert weinig.

4.1.6.4 Droogte scenario's

Veranderingen in het stroomgebied hebben niet alleen invloed tijdens een 'te natte' situatie maar ook tijdens een 'te droge' situatie. Zoals in hoofdstuk 2 beschreven zullen sponsmaatregelen idealiter tijdens zowel droge als natte omstandigheden positief werken, maar in werkelijkheid kunnen de effecten onder beide omstandigheden ook tegengesteld zijn.

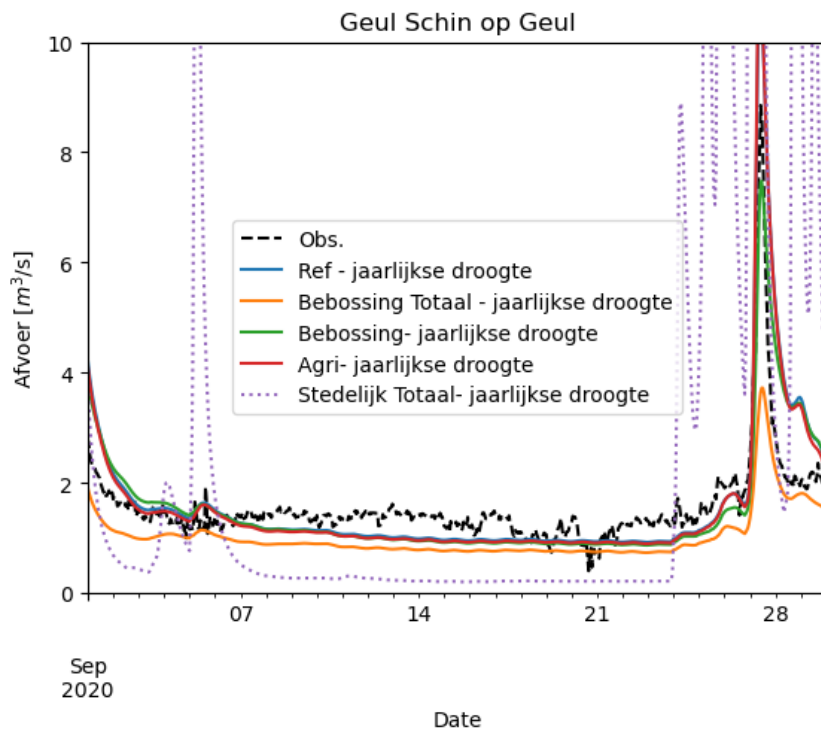
In dit studie zijn twee verschillende droogte gebeurtenissen beschouwd. Een jaarlijkse zomer droogte (2020) en een langdurige droogte tijdens drie opeenvolgende jaren (zie paragraaf 4.1.2). Voor beide gebeurtenissen wordt de afvoer na de zomer (september) vergeleken.



Figuur 4.22 Vergelijking afvoeren bovenstrooms van Valkenburg voor een eenjarige zomerdroogte en een meerjarige droogte.

De resultaten in [Figuur 4.22](#) laten zien, dat de afvoeren in het Wflow- model voor de zomerdroogte en de meerjarige droogte hetzelfde zijn. Dit kan worden verklaard door het feit dat dieper grondwater niet wordt mee genomen in het Wflow- model. Het model heeft een bodem dikte, die tussen 1.5 en 2.5 m varieert. Als de grondwater stand eronder zakt, kan het in het model niet gerepresenteerd worden. Het is bekend dat grondwaterstanden tijdens opeenvolgende jaren steeds lager kunnen worden, met lagere basisafvoeren als gevolg. Dit effect kan niet worden gesimuleerd met Wflow. Daarvoor is koppeling met een grondwatermodel nodig.

In het vervolg wordt daarom alleen naar het effect van de eenjarige droogte op de verschillende landgebruik scenario's gekeken.



Figuur 4.23 Gesimuleerde basisafvoer tijdens een eenjarige droogte gebeurtenis voor de verschillende scenario's.

De extreme scenario's van het stroomgebied, hetzij volledig bedekt met bomen of verharde oppervlakken, resulteren in een afname van het basisdebiet vergeleken met de referentiesituatie (figuur 4.23). Een verdere afname van de basisdebiet in vergelijking met de huidige situatie kan negatieve effecten hebben op het aquatisch milieu, de landbouw en andere functies, die afhankelijk zijn van water uit de rivier. In principe streeft men ernaar de basisafvoer tijdens een droogte zo stabiel en hoog mogelijk te houden. Bebossing leidt tot een vergroting van de interceptie en evapotranspiratie, zodat tijdens een droogte minder water in het rivier terecht komt en de verdamping langer door gaat. In het volledig stedelijke gebied gaat de basisafvoer het sterkst terug, omdat er maar heel weinig water in de grond komt, omdat de infiltratie capaciteit heel beperkt is en daarmee ook veel minder water wordt afgevoerd als het niet regent.

Daar tegenover hebben de minder extreme scenario's voor landbouw en bos volgens het model slechts een beperkt effect op het basisdebiet.

4.1.6.5 Model beperkingen

Het is goed mogelijk om het effect van sponswerkingsmaatregelen op wateroverlast EN droogte in een model te kwantificeren. In deze studie is een Wflow-model en een gekoppeld Wflow-SOBK-model gebruikt voor een gevoeligheidsanalyse om op hoofdlijnen te begrijpen welke effecten verschillende landgebruiksmaatregelen hebben op de afvoer bij verschillende type neerslag gebeurtenissen.

Het Wflow – model is opgezet met een **resolutie** van 1000 x 1000 m. Deze resolutie is veel te grof om het effect van gedetailleerde maatregelen lokaal te kwantificeren, maar voldoende om het effect op de schaal van het stroomgebied te beschouwen.

Met verandering van het landgebruik zijn ook de landgebruiksparementers in het Wflow-model aangepast, behalve de **Leaf Area Index** (Bladoppervlakte-index). De verandering van de bladoppervlakte-index vergeleken met de huidige situatie is vooral belangrijk voor de droogte – scenario's. Het kan leiden tot een overschatting van de gesimuleerde basisafvoer tijdens een droogte vooral voor de bebossing scenario's.

Het Wflow-model omvat een beperkte bodem-dikte (tot 2.5 m in dit geval) en heeft **geen diep grondwater** in het model. Dit is niet nodig voor de analyses van de neerslaggebeurtenissen. In dit geval 'verdwijnt' het water wat naar het diepe grondwater en daarmee uit het model. Voor droogtegebeurtenissen is het diepe grondwater wel belangrijk. Het gebruikte model kan geen verschil tussen éénjarige en een meerjarige droogte in de basisafvoer berekenen, in werkelijkheid zou de basisafvoer tussen de twee droogtegebeurtenissen verschillen, omdat de grondwaterstanden bij een meerjarige droogte nog verder terug gaan.

Het gebruikte SOBEK model was oorspronkelijk alleen voor het Nederlandse deel van het stroomgebied opgezet worden. Voor de RAT Study Geul (Slager et al., 2022) is het model uitgebreid met het Belgische deel van het stroomgebied. De modeluitbreiding volgde zoveel mogelijk dezelfde principes als toegepast op het oorspronkelijke model van de Nederlandse Geul, maar er zit minder detail in het Belgische deel (geen rivieren doorsnede gegevens, geen bruggen). Voor de evaluatie van de afvoer benedenstrooms in Valkenburg, is het detailniveau van het Belgische deel voldoende, maar het model is niet geschikt om lokaal in het Belgische deel de effecten van maatregelen op de afvoer te kwantificeren.

4.1.6.6 Koppeling wateroverlast, droogte en biodiversiteit

De verschillende beschouwde landgebruiksmatregelen, zoals meer bebossing hebben natuurlijk ook meerwaarde voor de landschappelijke beleving, biodiversiteit, natuurwaarde en waterkwaliteit.

Het onderzoek toonde aan dat als een zware regenbui plaatsvindt onder (zeer) natte omstandigheden in het stroomgebied, het effect van veranderingen in landgebruik op de piekafvoer beperkt is. In het geval dat de voorafgaande omstandigheden minder nat zijn, hebben veranderingen in landgebruik (met name herbebossing) echter een positief effect op de piekafvoeren, vooral ook bij de minder zware gebeurtenissen.

De eerste modelresultaten laten zien dat bebossing in het geval van droogte tot een lagere basis afvoer zou leiden, wat negatieve consequenties op het aquatisch milieu, maar ook op de landbouw kan hebben.

4.1.7 Samenvatting Wflow-SOBEK analyse voor de Geul

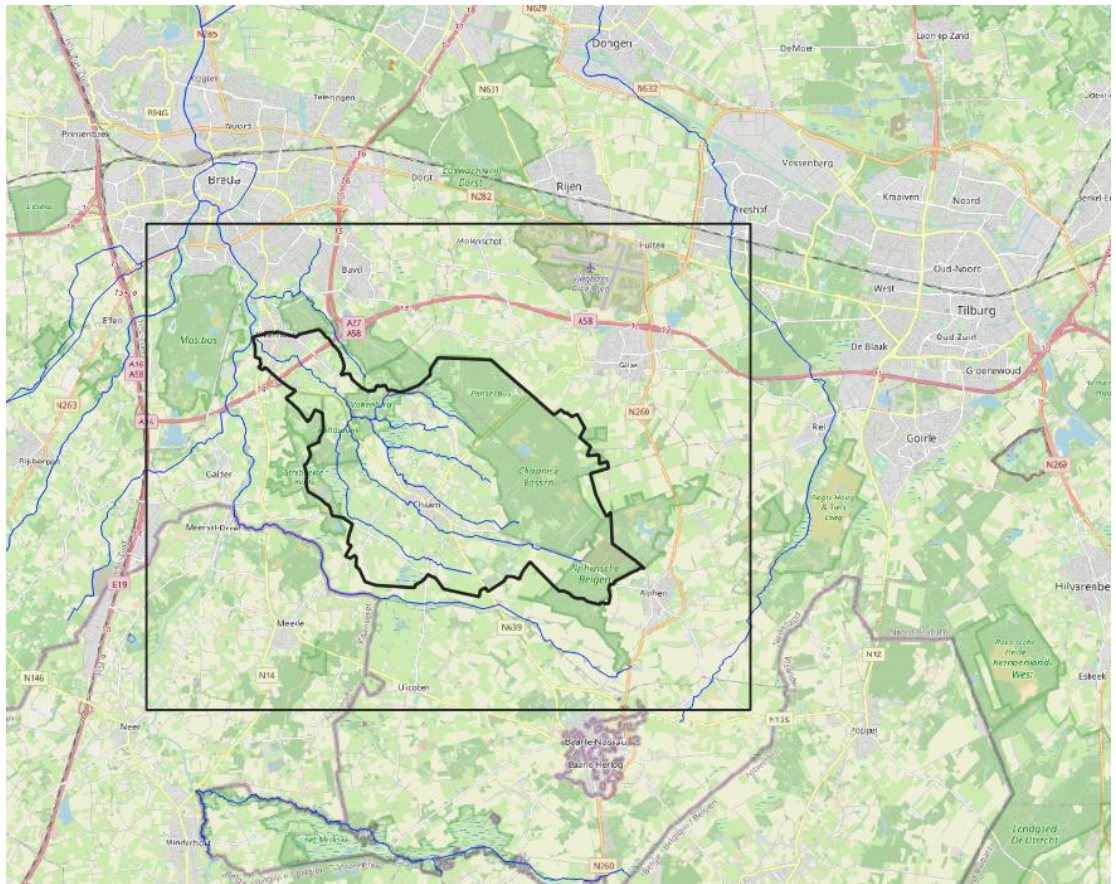
Op hoofdlijnen kan het volgende worden geconcludeerd:

- Het stroomgebied van de Geul heeft al een grote sponswerking. Er bestaat veel retentiecapaciteit in de bodem, grondwater en de uiterwaarden. Terwijl een onweersbui wel tot lokale overlast kan leiden, hebben kleinere buien een beperkte effect op de afvoer van de Geul bij Valkenburg
- Vanwege de grote sponswerking is de natheid vooraf een neerslag gebeurtenis heel bepalend voor de respons (piekafvoeren) van het systeem. De natheid heeft grotere invloed op het systeem als de effect van verandering van landgebruik. Voor dit reden gebeuren de meeste overstromingen in de winter.
- Hoe extremer een gebeurtenis, hoe kleiner is het effect van veranderingen in landgebruik. Veranderingen van landgebruik zijn meest effectief voor kleinere gebeurtenissen. Hoewel deze gebeurtenissen geen probleem voor de piekafvoer in Valkenburg vormen, kunnen veranderingen in landgebruik wel effectief zijn om lokaal wateroverlast te voorkomen.

- Voor gebeurtenissen in de orde van grootte of 100mm/24uur combineert met redelijk lage neerslag intensiteiten heeft bebossing een aanzienlijk effect of de afvoer en kan zelfs een overstroming een Valkenburg mogen voorkomen.
- Voor de modellering van extreme neerslaggebeurtenissen is een gekoppeld Wflow-SOBEM model noodzakelijk, omdat anders de piekafvoeren en de benodigde aanvullende retentie capaciteit overschat worden
- Bebossing is de meest efficiënte landgebruik maatregel om de piekafvoeren bij Valkenburg te verminderen, maar bebossing leidt tijdens drogere tijden tot een vermindering van basisafvoer, wat gevolgen voor de ecologie in de beek kan hebben.
- De enorme benodigde aanvullende retentiecapaciteit bij extreme gebeurtenissen verklaart dat in deze gevallen wateroverlast niet te voorkomen is en heel ingrijpende maatregelen (b.v. een dam bovenstrooms van Valkenburg) noodzakelijk zijn om de schade te kunnen beperken.
- De effect van de maatregelen tijdens droogte kon slechts in beperkte mate worden geanalyseerd, omdat het Wflow-model geen diepe grondwatermodule bevat. Hierdoor kunnen de effecten tijdens een meerderjarige droogte gebeurtenis niet worden onderzocht met het gebruikte model.

4.2 Chaamse beken – focus op watertekort

Het stroomgebied Chaamse Beken (Figuur 4.3) ligt ongeveer 4.5 km ten zuidoosten van Breda en 10 km ten zuidwesten van Tilburg. In het zuidwesten grenst het gebied vrijwel aan de Belgische grens. In het midden van het gebied ligt het dorp Chaam, waar ook een RWZI (rioolwaterzuivering) aanwezig is. Het stroomgebied van de Chaamse Beken heeft een oppervlak van ongeveer 50 km². In het noordwesten van het stroomgebied ligt de benedenloop van de Chaamse Beek, welke uitmondt in de Boven Mark. Het stroomgebied ligt volledig binnen het beheergebied van waterschap Brabantse Delta. Er zijn opgaven in het kader van KRW (Kaderrichtlijn Water) en verdrogingsbestrijding. Daarnaast is er zowel sprake van kans op wateroverlast als kans op droogte.



Figuur 4.24 Stroomgebied Chaamse Beken (middelste polygoon). Zwarte vierkant is het modelgebied gebruikt in deze case study. De blauwe lijnen zijn de waterlopen met een KRW-doelstelling.

De casestudy voor Chaamse Beken is opgestart binnen het project KLIMAP (KlimaatAdaptatie in de Praktijk) (zie ook (Schoonderwoerd et al., 2023)). Binnen deze casestudy voor het KLIMAP project is een eerste verkenning uitgevoerd met een grondwatermodel om te onderzoeken op welke manier het gebied klimaatbestendig kan worden ingericht en wat dit betekent voor de ontwikkelingsmogelijkheden van verschillende functies. Er zijn binnen die casestudy twee varianten doorgerekend die gericht zijn op het versterken van de natuur binnen het gebied. Bij de keuze van de inrichtingsvarianten was het uitgangspunt om te kijken wat de mogelijkheden zijn wat betreft aanpassingen in het watersysteem. Er is geen rekening gehouden met de vraag in hoeverre het ook haalbaar is om alle maatregelen daadwerkelijk te implementeren. In deze rapportage wordt verder gewerkt met één inrichtingsvariant uit deze eerdere KLIMAP studie, die wel werd gezien als de meest realistische variant.

Maatregelen om droogte te bestrijden worden in de praktijk vaak getoetst door middel van grondwatermodellen en droogtesimulaties over langere tijdspannes. Met het oog op klimaatverandering is het belangrijk om ook verschillende, elkaar opvolgende, extreme gebeurtenissen te toetsen. In dit onderzoek is gezocht naar een methode om de droogtemaatregelen voorgesteld in het KLIMAP onderzoek ook te toetsen op hun effect op wateroverlast als gevolg van extreme neerslaggebeurtenissen.

Door een koppeling van het grondwatermodel met een hydraulisch model op te zetten is het mogelijk om meer inzicht te krijgen in wateroverlast als gevolg van droogtmaatregelen. Dit onderzoek is een eerste verkenning voor de mogelijkheid van een offline model koppeling tussen een MODFLOW6-MetaSWAP grondwater- en onverzadigde zone model een D-HYDRO 1D2D oppervlaktewater model. Het doel is om eenvoudig en snel een eerste inschatting te kunnen maken van het effect van droogtmaatregelen op wateroverlast. De huidige studie is dus een eerste inventarisatie of deze koppeling technisch haalbaar is en meer inzicht kan bieden in het effect van maatregelen op zowel droogte als wateroverlast.

De gedetailleerde resultaten van deze studie zijn gerapporteerd als apart rapport, dat tevens is bijgesloten in achterliggende rapportage bij deze studie - 'Sponswerking van Landschappen – Casus Chaamse beken (Schoonderwoerd et al. 2023b)'.

Uit de casestudy kunnen de volgende belangrijke conclusies worden getrokken:

- De droogtmaatregelen zorgen voor een stijging in de grondwaterstand en lokaal voor een stijging in de kwelflux en hebben dus een positief effect op de verdrogingsbestrijding in natte natuurgebieden. Het blijft de vraag of deze grondwaterstandstijging voldoende is om de verdroging te bestrijden.
- Het aanpassen van de ontwatering binnen het gebied heeft als gevolg dat er meer water wordt vastgehouden in de ondergrond. Hierdoor wordt er in de zomer minder water afgevoerd, waardoor de basisafvoer afneemt. In de winter neemt de afvoer juist toe. Dit effect wordt veroorzaakt door het sterk ophogen van de drainagebasis in de grotere waterlopen. Er is meer onderzoek nodig om te kijken of een andere inrichting van het watersysteem mogelijk wel kan zorgen voor een stijging van de basisafvoer.
- De maatregelen zorgen ook voor een stijging van de grondwaterstand in de winter, waardoor er minder ruimte is om de neerslag te bergen in de ondergrond ('vol is vol') en grondwaterstanden eerder aan maaiveld komen. Daardoor kunnen de droogtmaatregelen zorgen tot grotere wateroverlast tijdens neerslaggebeurtenissen.
- De maatregelen zorgen voor meer maaiveldafvoer in het grondwatermodel. In de toegepaste methode zorgt dat voor een toename in het overstromingsoppervlak. Een belangrijk aandachtspunt is dat in de methodiek deze maaiveldafvoer niet meer kan herinfiltreren naar het grondwater. In realiteit zal het water dat op maaiveld blijft staan en niet afstroomt richting het oppervlaktewatersysteem wel weer infiltreren.

Voor vervolgonderzoek worden de volgende aanbeveling gedaan:

- De toegepaste modelkoppeling van het grondwatermodel met een hydraulisch model werkt goed voor een eerste verkenning van het effect van maatregelen op wateroverlast, maar er kunnen nog enkele verbeteringen doorgevoerd worden in de koppeling tussen het grondwatermodel en hydraulisch model:
 - Het grondwatermodel wordt nu niet beïnvloed door het hydraulisch model. Om dit te verbeteren kunnen de berekende waterstanden uit het hydraulische model weer opnieuw toegepast worden in het grondwatermodel als peilverhoging. Op die manier simuleert het grondwater ook een realistischere situatie waarbij de waterpeilen toenemen door de regenbuien. In de huidige modellering gebeurt dit niet (de waterpeilen blijven constant), waardoor de hoeveelheid water dat gedraineerd wordt overschat wordt.
 - Een verdere verbetering kan gehaald worden door gebruik te maken van een 'online' gekoppeld grondwater en hydraulisch model.
- Er is geen validatie geweest van de resultaten. Om meer inzicht te krijgen in hoeverre de huidige resultaten realistisch zijn, kan de methodiek mogelijk toegepast worden voor een casus waar wel data beschikbaar is voor validatie, bijvoorbeeld bij gebieden waar al vergelijkbare maatregelen getroffen zijn.

- In de zomersituatie kunnen flinke buien mogelijk ook zorgen voor wateroverlast. Dit is dan gerelateerd aan de infiltratiecapaciteit van de bodem. Als de neerslagintensiteit groter is dan de infiltratiecapaciteit van de bodem, vindt er maaiveldafvoer plaats. Om het effect van deze zomerbuien te onderzoeken, dient het grondwatermodel aangepast te worden zodat de infiltratiecapaciteit ook goed geschematiseerd wordt.
- Het landgebruik speelt een belangrijke rol in de mate van de sponswerking van het gebied. In deze analyse zijn er geen veranderingen gedaan in het landgebruik, maar het kan interessant zijn om ook het effect van landgebruiksveranderingen (andere gewassen, minder verhard oppervlak, van bos naar korte vegetatie of vice versa, etc.) te onderzoeken.

Verdere modelverbeteringen van het hydraulisch model zijn:

- Het huidige hydraulische model representeert het primaire systeem in de huidige situatie. Om de droogtemaatregelen beter te kunnen toetsen is het belangrijk om de maatregelen die effect hebben op het hydraulische systeem ook te implementeren in het 1D model:
 - De tertiaire waterwegen moeten worden toegevoegd in het referentie model zodat de impact van het verwijderen van deze waterwegen zichtbaar wordt
 - De verhoging van de bodemniveaus in de waterlopen moet worden geïmplementeerd. Deze verhoging moet vervolgens ook gecompenseerd worden in de breedte om dezelfde afwateringscapaciteit te behouden.
- De benedenstroomse randvoorwaarde is momenteel een constante waterstand in de Mark van 1.4m NAP. In werkelijkheid zal deze waarde ook neerslag afhankelijk zijn en zal de Mark tijdens de neerslaggebeurtenissen naar verwachting voor meer opstuwung zorgen dan tijdens een droge periode. Er zijn nieuwe meetinstrumenten geplaatst in het benedenstroomse gedeelte van de Chaamse Beek waaruit we in de toekomst een beter beeld kunnen krijgen van de benedenstrooms randvoorwaarde.
- De ruwheid van het 2D grid in het hydraulische model heeft momenteel een constante waarde. Er is informatie beschikbaar over de verschillende landtypes in het gebied waardoor het mogelijk is om een gedistribueerde weerstandkaart te maken. Hierdoor zal het water op de geasfalteerde ondergronden sneller afstromen dan in de beboste gebieden.
- Om een beter begrip te krijgen van de verschillen tussen de huidige toetsing en onderzochte methode is het belangrijk om in verder overleg met het Waterschap Brabantse Delta de verschillen te bespreken die we zien in de overstromingskaarten.

Een belangrijke aanvullende conclusie uit deze studie is dat er verdere uitwerking moet worden gegeven aan 1 methode/toetsing om alle aspecten (zowel droogte als wateroverlast, als de impact op biodiversiteit en waterkwaliteit) te kunnen toetsen in plaats van de maatregelen los van elkaar te beoordelen. Zeker omdat een groot deel van de waterlopen in het gebied vallen onder KRW-waterlichamen is het belangrijk te realiseren dat droogtemaatregelen, naast een effect op wateroverlast ook effect kunnen hebben op de doelen die binnen de KRW worden gesteld. Wanneer de basisafvoer in het gebied door voorgestelde droogtemaatregelen wordt verminderd, moet ook een afweging worden gemaakt of dit wenselijk is vanuit dit aanvullende perspectief.

5 Conclusies en aanbevelingen voor werkwijze kwantificeren sponswerking

5.1 Conclusies uit deze studie

Terugkomend op de kennisvragen uit Hoofdstuk 1 geven we hieronder gebundeld per hoofdonderwerp antwoord op deze vragen. Het beeld dat voor de verschillende karakteristieke deelgebieden is geschetst geeft antwoord op vragen 1 t/m 4 (Hoofdstuk 3). Kennisvragen 5 - 10 zijn te beantwoorden, gebruikmakend van de case studies (Hoofdstuk 4).

De kennisvragen gekoppeld aan Hoofdstuk 3 zijn:

- 1 Wat is de oorspronkelijke sponswerking van verschillende landschapstypen in Nederland en wat is het relatieve belang van processen die hiervoor verantwoordelijk zijn?
- 2 Zijn er gebieden waar van nature weinig sponswerking is, maar die wel natuurlijk zijn, dus wat is de rol van geologie, topografie en bodem?
- 3 In hoeverre werken bepaalde landschapstypen in de huidige situatie al als spons?
- 4 Hoe heeft de aangepaste inrichting en land- en watergebruik van een gebied de sponswerking beïnvloed?

Voor het beantwoorden van bovenstaande vragen is een overzicht gegeven in Hoofdstuk 3 voor de verschillende karakteristieke landschappen. In heel Nederland functioneert het open landschap als een spons, zij het in veel gebieden in verminderde mate door ingrepen om het landschap zo snel mogelijk te ontwateren en te laten afwateren ten gunste van bepaalde gebruiksfuncties. Met de huidige en verwachte veranderingen in neerslagintensiteit en droogte-gebeurtenissen is een herbeschouwing van de inrichting en het beheer van het watersysteem in verschillende landschapstypen nodig.

Inzichten per landschapstype:

- In het heuvelland in Limburg is de natuurlijke sponsfunctie relatief groot, mede ook door het vermogen van de ondergrond om snel water op te nemen. Zo is gebleken dat in juli 2021 in het stroomgebied van de Geul 'maar' 30% van de neerslag direct is afgevoerd. De rest is opgeslagen in de bodem en het vaak diepe grondwater
- Vooral op de hoge zandgronden is de natuurlijke sponswerking van het landschap hoog: water kan snel infiltreren en er is veel ruimte in de ondergrond om water te bergen. Door de vele fysieke aanpassingen in het watersysteem (detail-ontwatering, sloten, kanalisering etc.) wordt dit potentieel niet optimaal benut. Wel is er veel potentieel om de sponsfunctie te herstellen, vooral met het oog op droogtebestrijding. De vele drainage-systemen die in het verleden zijn aangelegd zorgen nu voor een intensieve ontwatering. Zo kan in de Chaamse beken (Noord-Brabant) het verwijderen van de drainage in een bufferzone van 150 m rond de beken resulteren in een grondwaterstandsverhoging van ongeveer 20 cm. Tegelijkertijd moeten de effecten van dit type droogte-maatregelen tijdens zeer extreme regensituaties duidelijk gemaakt worden. In het voorbeeld van de Chaamse beken resulteren de doorgerekende droogtemaatregelen in vergrote kans op extra water op het maaiveld en een geschatte toename van de afvoer van zo'n 33% bij een T=100 neerslaggebeurtenis. Technische maatregelen zoals regelbare drainage kunnen een rol spelen bij het verminderen van mogelijke problemen ten tijde van wateroverlast als gevolg van droogtemaatregelen.

- Voor de grote rivieren geldt dat een goed begrip over de werking van het systeem in onze bovenstroomse buurlanden belangrijk is om in te schatten hoe rivierafvoeren bij de grens (Lobith, Monsin) in de toekomst verder zullen wijzigen. Ook in die gebieden zal worden nagedacht of het verder vasthouden van water voor zomerdroogte mogelijk is, en een goede internationale dialoog hierover is essentieel.
- In de peilgestuurde veenweide- en kleipolders is het gereguleerde peil de belangrijkste sleutelfactor in het functioneren van het systeem. Bewuste keuzes in het al dan niet opzetten of wijzigen van deze peilen kan ook voortkomen uit andere doelen zoals het verminderen van broeikasgas-uitstoot of de gebruiksfuncties in het gebied. Specifiek in de veenweidegebieden, waar vernatting voor het verminderen van broeikasgasemissies dus een belangrijke factor is, speelt de vraag in welke mate een gebied als een spons kan optreden als deze eigenlijk al min of meer permanent 'vol' moet zijn om deze uitstoot te verminderen.
- Ook de grote meren en plassen zijn onderhevig aan gebruiks-gerelateerde keuzes in de zomerse en winterse streefpeilen. De buffercapaciteit van deze waterlichamen is daarmee vaak ingericht op het kunnen opvangen van te veel water in de winter en het beschikbaar stellen van water voor de droge zomerperiode naar het achterland. Hierdoor ontstaat een tegennatuurlijk peil, wat voor natuurdoelen ongunstig is. Vragen hoe het achterland minder afhankelijk te maken van water uit het IJsselmeer (door water vast te houden in het achterland zelf) verdienen nadere beschouwing.
- In het stedelijk gebied zijn veel mogelijkheden voor kleinschalige aanpassingen in inrichting om vooral regenwater op te kunnen vangen en te laten infiltreren in het grondwater. De aard van deze maatregelen is vaak veel technischer dan op het platteland als gevolg van het gebrek aan ruimte.

Kennis uit de case studies

Kennisvragen 5 - 10 zijn te beantwoorden, gebruikmakend van de case studies:

- 5 Kan sponswerking vergroot worden? Helpt dat dan voor wateroverlast en wat zijn effecten op droogte en biodiversiteit?
- 6 Waar of in wat voor landschapstypes kan het verder vergroten van sponswerking wel en niet?
- 7 Hoe beïnvloeden tijdschaal en ruimteschaal de beoordeling van de effectiviteit van maatregelen (op oppervlaktewater vs. grondwatervolumes);
- 8 Wat is de effectiviteit van kleinschalige/grootschalige maatregelen en het type gebied?
- 9 Kunnen we sponswerking al goed analyseren en modelleren en zo niet, hoe kan dat dan wel?
- 10 Hoe hebben verschillende typen vegetatie en landgebruik invloed op hoe de bodem als spons kan werken?

Vraag 5 – Kan sponswerking vergroot worden? Helpt dat dan voor wateroverlast en wat zijn effecten op droogte en biodiversiteit

De twee casestudies laten zien dat er met hydrologische modellen een goed beeld te schetsen is voor de huidige en potentiële sponswerking in deze gebieden. De kwantitatieve gevoeligheidsanalyses die zijn uitgevoerd voor de Geul en de Chaamse beken tonen de respons van de systemen op verschillende type neerslag-gebeurtenissen en droogte. De gemodelleerde sponsmaatregelen hebben een effect op de afvoerpatronen en grondwaterstanden in het systeem.

Er is in deze studie nog geen doorvertaling gemaakt naar de impact op biodiversiteit. Hiervoor kan onder andere gebruik worden gemaakt van bijvoorbeeld de belangrijkste hydraulische en hydrologische Ecologische Sleutel Factoren (ESF) die door de STOWA² worden voorgesteld: Afvoerdynamiek, Grondwater, Stagnatie en Connectiviteit. Er moet worden benadrukt dat aanvullende parameters zoals bijvoorbeeld Belasting, Toxiciteit en Context ook een grote invloed hebben op de totale biodiversiteit.

Vraag 6: Waar of in wat voor landschapstypes kan het verder vergroten van sponswerking wel en niet?

De twee case-studies tonen dat er op de hoge zandgronden en in het heuvelland goede kansen liggen om de sponswerking te vergroten. Wel moet er gedetailleerd worden gekeken per gebied hoe het systeem precies werkt. De mate waarin sponswerking optreedt is afhankelijk van verschillende landschapskenmerken binnen een beheergebied: geologie, bodemtype, helling, topografie, landgebruikstype, aanpassingen in de richting en beheer binnen een landgebruikstype spelen allemaal een rol. Ondoorlatende lagen of gesteenten kunnen zorgen voor een beperkte mogelijkheid om water te bergen in de ondergrond. De lokale gesteldheid van de bodem kan door landgebruik zijn veranderd (bijv. verslemping van bodems, de hoeveelheid organische stof etc.). Aangelegde drainage, stuwen, verharding en de gekozen werkwijze om een landgebruikstype te beheren hebben grote invloed op de fysische processen die een rol spelen in sponswerking

Vraag 7 Hoe beïnvloeden tijdschaal en ruimteschaal de beoordeling van de effectiviteit van maatregelen (op oppervlaktewater vs. grondwatervolumes);

Tijd en ruimteschalen zijn van invloed op het beoordelen van de effectiviteit van sponswerking en mogelijke maatregelen. Kleine maatregelen hebben lokaal effect, maar zullen in een groot stroomgebied mogelijk maar een zeer beperkte rol spelen in de totale grondwater- en oppervlaktewater dynamiek. Pas als maatregelen op een voldoende grote schaal worden geïmplementeerd wordt er op stroomgebiedsniveau een effect zichtbaar. Model-analyses kunnen hierbij helpen om te zoeken naar de benodigde inspanning om een aantoonbaar resultaat te genereren. Zo toont de case studie in de Chaamse beken dat het invoeren van een bufferstrook van 150 m langs het gehele watersysteem zichtbaar effect kan geven op de schaal van het hele systeem.

Er is een groot scala aan processen dat een rol speelt bij het bepalen van de sponswerking van een landschap. De directe koppeling tussen de deelsystemen van het oppervlaktewatersysteem, de bodem en het grondwatersysteem is een essentieel onderdeel van de sponswerking. Naast processen zoals infiltratie, evapotranspiratie, beschikbare opslagcapaciteit in de deelsystemen, zijn ook het weer in de periode voorafgaand aan een gebeurtenis, bovenstroomse- en benedenstroomse interactie, en seizoensfluctuaties bepalend in de uitwerking van sponswerking op een gegeven locatie.

² <https://www.stowa.nl/onderwerpen/waterkwaliteit/realiseren-van-ecologische-waterkwaliteitsdoelen-krw/stromend-water-esf>

Vraag 8 Wat is de effectiviteit van kleinschalige/grootschalige maatregelen en het type gebied?

Uit de twee casestudies in deze studie (de Geul en de Chaamse Beken) blijkt dat het belangrijk is duidelijk te zijn over het type neerslaggebeurtenis dat wordt beschouwd om de effectiviteit van maatregelen te beoordelen. De case studies geven inzicht in het verschil in effectiviteit van verschillende typen neerslaggebeurtenissen. Dit helpt in de evaluatie van het effect van sponswerkingsmaatregelen: lokale piekbuien kunnen mogelijk lokaal worden opgevangen met kleinschaligere maatregelen, terwijl langdurige natte situaties een catchment-brede blik vragen. Het vasthouden van water in het landschap voor droogte kan ertoe leiden dat er tijdens perioden met extreme neerslag meer overlast wordt ervaren. Dit is het gevolg van de hogere grondwaterstanden, waardoor er minder ruimte over is om water in de bodem te bergen (de spons is al gedeeltelijk gevuld). Ook wanneer door eerdere neerslag de bodem al gedeeltelijk verzadigd is, zal er minder ruimte zijn om extra water te bergen en zal een groter deel van de neerslag afstromen. Zeker voor zeer extreme neerslaggebeurtenissen kan gelden dat het alleen vertrouwen op natuurlijke sponswerking (al dan niet in combinatie met technische sponswerkingsmaatregelen) niet altijd voldoende zal zijn. Tijdens dit soort gebeurtenissen is de kans immers groot dat de bodem op een zeker moment verzadigd raakt of opvangbekkens vol zijn en een groot deel van de neerslag oppervlakkig afstroomt.

Vraag 9: Kunnen we sponswerking al goed analyseren en modelleren en zo niet, hoe kan dat dan wel?

De twee case studies volgden verschillende model-aanpakken, gebruikmakend van bestaande model-systemen die al voor eerdere studies waarin ingezet. In beide gevallen zijn de berekeningen uitgebreid met aanvullende analyses om binnen het palet van ofwel type gebeurtenissen (de Chaamse beken) of het type maatregelen (de Geul) een inzicht te krijgen hoe maatregelen de sponswerking beïnvloeden, ten opzichte van de huidige situatie. In beide cases zijn echter nog niet daadwerkelijk op grote schaal maatregelen geïmplementeerd om de sponswerking te versterken, waardoor validatie van de resultaten niet mogelijk was. Hiervoor zouden aanvullende cases, waar wel validatiedata voor beschikbaar is moeten worden ingezet.

In beide cases is gebruik gemaakt van off-line gekoppelde modellen: in de Geul is een W-Flow model gekoppeld aan een SOBEK model, en in de Chaamse beken is een MODFLOW6-Meta-SWAP model gekoppeld met D-HYDRO. Beide aanpakken leveren een goed eerste inzicht op, maar technische verbeteringen (zoals bijv. een online koppeling tussen MODFLOW6-Meta-SWAP en D-Hydro, verdere detaillering van sub-grid processen binnen W-flow en koppeling tussen W-Flow en diepere grondwater) zijn nodig om een aantal processen zoals bijv. re-infiltratie naar het grondwater, en de impact van bepaalde type maatregelen (bijv. de aanleg van bufferzones, kleinschalige veranderingen in hoogte, graften op hellingen of wadi's langs wegen) beter en meer realistisch mee te nemen.

Er zijn veel verschillende modellen en technieken beschikbaar om sponswerking in gebieden te kwantificeren. Deze variëren van landelijke modellen (LHM, LSM) tot regionale modellen en lokale modellen beschikbaar voor specifieke deelgebieden van individuele waterbeheerders. Het detailniveau van deze modellen varieert, zowel in ruimtelijke resolutie, de tijdstappen waarmee wordt gerekend en de domeinen waarop wordt gefocust (grondwater/bodem/oppervlaktewater). Modellen zijn veelal ontstaan uit de noodzaak om één type fenomeen goed te kunnen beschouwen, en zijn ofwel op langzamere (droogte-grondwater) of snelle processen (wateroverlast-oppervlaktewaterdynamiek) gefocust. De koppeling tussen modellen voor verschillende domeinen en verschillende schalen is een onderwerp waar momenteel veel aandacht voor is. Zeker voor het goed kwantificeren van combinaties van verschillende type gebeurtenissen en specifieke kleinschalige maatregelen

zijn nog verdere ontwikkelingen nodig. Het verschil in tijdstappen tussen modellen voor piekbuien (uurbasis of minuutbasis) en modellen voor grondwaterrespons (dagbasis) maken deze koppeling geen sinecure.

Naast de in deze studie gebruikte modelsystemen worden er door de verschillende waterbeheerders ook andere modelsystemen gebruikt. Er is nu nog geen verder overzicht gemaakt van de verschillende beschikbare modelsystemen, en hoe deze allen in detail functioneren wanneer sponswerking gekwantificeerd moet worden.

Vraag 10: Hoe hebben verschillende typen vegetatie en landgebruik invloed op hoe de bodem als spons kan werken?

Met simulatiemodellen zijn de effecten van grootschalige veranderingen in landgebruik op de sponswerking in het landschap inzichtelijk te maken. Deze gevoeligheidsanalyse van het landschap voor verschillende type maatregelen geeft inzicht in de maximaal haalbare effecten als maatregelen op grote schaal worden geïmplementeerd. De twee casestudies tonen dat grootschalige veranderingen in drainagesystemen en herbebossing inderdaad bij kunnen dragen aan de verhoging van sponswerking in een gebied. Echter, sommige maatregelen kunnen een positief effect hebben voor het ene doel (droogte of reductie in piekafvoer), maar negatief uitwerken voor het andere doel (wateroverlast/basisafvoer). Herbebossing leidt bijvoorbeeld niet alleen tot vertraagde afvoer van regenwater: er treedt ook meer verdamping op in de zomerperiode. Dit maakt dat herbebossing kan leiden tot een verlaging van de basisafvoer in de zomer, wat weer invloed kan hebben op het aquatisch ecosysteem in de beek, zeker als de dimensies van de beek niet in lijn zijn met deze verwachte afvoer. Het verwijderen van drainage helpt grondwaterstanden te verhogen, maar dit kan in het natte seizoen ook betekenen dat er meer wateroverlast optreedt omdat de bodem (de spons) al deels gevuld is met water.

5.2 Aanvullende beschouwingen

In deze studie geen nieuwe landelijk dekkende kansencarten gemaakt voor sponswerking in Nederland (hiervoor wordt de lezer verwezen naar <https://www.klimaat-effectatlas.nl/nl/kansenkaart-natuurlijke-klimaatbuffers>). Er is vooral gericht op het in kaart brengen van de beschikbare proceskennis en benodigde systeemkennis om sponswerking in de context van landschapskarakteristieken te kunnen duiden. Hoewel landelijke kansencarten nodig en nuttig zijn, blijft lokaal systeembegrip nodig om te bepalen welke invloed maatregelen daadwerkelijk kunnen hebben.

Het kunnen inzetten op de 'service' van de sponswerking van een gebied is afhankelijk van hoe nat het systeem al is op het moment dat er een bui op het gebied valt: als de spons vol is, is die vol; en vergelijkbaar voor droogte: als de spons leeg is, is hij leeg. We zien dit fenomeen ook sterk in de gevoeligheidsanalyse van de Geul case-studie, waar het landschap zelf een goede spons is, maar in tijden van extreme situaties niet nog meer water kan absorberen.

Door voor verschillende typen gebeurtenissen te evalueren hoe het systeem reageert in termen van het opvangen van het event middels sponswerking kan wel de bandbreedte worden ingeschat, en kan gezocht worden naar maatregelen die deze bandbreedte kunnen vergroten, binnen de limieten van het natuurlijk systeem. Hoewel er al meerdere methodes beschikbaar zijn om zo'n kwantificering uit te voeren, zijn er wel modelverbetering nodig om dit betrouwbaarder en eenvoudiger te maken.

Om de sponswerking in een systeem te kunnen herstellen blijft het nodig te erkennen dat het huidige ruimtegebruik mogelijk niet toestaat dat dit herstel volledig kan worden vormgegeven. Daarbij moet rekening worden gehouden met het feit dat maatregelen elkaar kunnen tegenwerken afhankelijk van het primaire doel dat ze dienen: droogtmaatregelen zoals beschouwd in de Chaamse Beken casestudie kunnen de wateroverlast als gevolg van intensieve regengebeurtenissen versterken, zeker in de winterperiode wanneer de bodem verzadigd is. De koppeling naar waterkwaliteit en biodiversiteit moet hierbij ook worden beschouwd, omdat het veranderen van de dynamiek van grondwater- en oppervlaktewaterpeilen negatief kunnen uitwerken voor de waterkwaliteit of het functioneren van de aquatische ecosystemen. Zo laat de casestudy van de Chaamse beken ook zien dat de base-flow in de zomerperiode lijkt af te nemen onder droogtmaatregelen, doordat er minder afvoer wordt gerealiseerd als gevolg van de keuze voor het ophogen van de beekbodem als onderdeel van de maatregelen om de grondwaterstanden te verhogen.

Afwegingen voor inzet op sponswerking voor gecombineerde doelen

De afweging van maatregelen ter bevordering van de sponswerking dient het functioneren onder verschillende omstandigheden en in alle jaargetijden te beschouwen, zodat zowel de werking van de beoogde maatregelen in perioden met extreme neerslag en langdurige droogte duidelijk is. Naast waterkwantiteitsbeheer spelen er in een gebied ook nog andere beleidsopgaven zoals het halen van doelen op het gebied van terrestrische en aquatische natuur en waterkwaliteit. Dit pleit voor het opzetten van een integraal afwegingskader waarin niet alleen verschillende type waterkwantiteitsopgave (wateroverlast en droogte), maar ook waterkwaliteits- en biodiversiteitsopgaven gezamenlijk worden beschouwd

Voor het nemen van maatregelen die de sponswerking van het landschap verbeteren moet het maatschappelijk draagvlak ook duidelijk zijn. De samenwerking met lokale stakeholders via goed georganiseerde gebiedsprocessen is hierin cruciaal. Dit is een heel ander spoor om verder op te werken en geen onderdeel geweest van deze studie, evenmin als de discussie over het zoeken naar een balans tussen het vasthouden van water en de maatregelen om onttrekkingen te verminderen.

5.3 Aanbevelingen voor vervolg

Het herstellen van de sponswerking in Nederland is een complex en multidisciplinair vraagstuk dat gepaard gaat met verschillende kennisleemtes en uitdagingen. Enkele van de belangrijkste aanbevelingen zijn onder andere:

1 Maak een richtlijn voor gekoppelde evaluatie van waterbeheermaatregelen in een breder afwegingskader

Maak een **richtlijn** die stimuleert dat waterbeheermaatregelen worden geëvalueerd op droogte, wateroverlast en biodiversiteit/waterkwaliteit en definieer een overkoepelend **afwegingskader**, zodat verschillende doelen evenwichtig kunnen worden afgewogen. Systemkennis en modelkennis zijn daarbij de belangrijkste ingrediënten, die op deelaspecten nog verdere verbetering behoeven.

Koppel hierbij ook beleidsdoelen voor integrale klimaatbestendige gebiedsontwikkeling: Een betere evaluatie van de sponswerking van landschappen voor zowel wateroverlast en droogte verbindt beleidsdoelen, die ook verder gaan dan alleen waterkwantiteitsdoelen. Het herstellen van de sponswerking vereist coördinatie tussen verschillende andere beleidsgebieden, zoals ruimtelijke ordening, landbouw en natuurbehoud. Er is behoefte aan meer methoden om de evaluatie van sponsmaatregelen niet alleen op hun hydrologische effect, maar ook op hun effect op waterkwaliteit en ecologie te kunnen beoordelen.

Deze koppeling gaat ook verder dan alleen het bio-fysische systeem. Een beter begrip van de economische kosten en baten van sponswerkingsmaatregelen is nodig om investeringen te rechtvaardigen en financiering te verkrijgen. Dit omvat het evalueren van de lang termijnvoordelen, zoals het verminderen van schade door overstromingen en droogte, en ook inzicht geven in de mogelijkheid dat er toch gebeurtenissen zullen zijn die niet te managen zijn qua zowel een wateroverlastrisico en een droogterisico. De rol van een goed inzicht in de verwachte veranderingen in het klimaat en de impact ervan op neerslagpatronen en droogte is daarbij van groot belang. Het ontwikkelen van scenario's voor toekomstige klimaatverandering en het beoordelen van de veerkracht van sponswerkingsmaatregelen in verschillende klimaatomstandigheden.

2 Verbeter de kwantitatieve evaluatie van de verschillende type maatregelen voor sponswerking

Verbeter de kwantitatieve evaluatie van de **verschillende type maatregelen** die de sponswerking van landschappen kunnen verbeteren: In deze studie zijn verschillende type maatregelen beschouwd, maar nog lang niet alle type maatregelen zijn in deze studie gekwantificeerd. Zeker de rol van lijn-elementen in het landschap is met de beschouwde modellen niet een eenvoudig mee te nemen. Ook andere werkwijze binnen landgebruikstypen (vooral in de agrarische landgebruikstypen) en invloed op bijvoorbeeld de bodemgesteldheid en infiltratiecapaciteit zijn nog niet beschouwd. Hiervoor zijn verdere verbeteringen en kennisontwikkeling nodig.

Werk hiervoor ook aan verbeteringen in het beschikbare modelinstrumentarium om gecombineerde analyses van wateroverlast en droogte uit te voeren: Het verder ontwikkelen van voldoende nauwkeurige en betrouwbare, gevalideerde hydrologische modellen en voorspellingsmethoden is van cruciaal belang om te begrijpen hoe maatregelen de waterbalans in een groter gebied zullen beïnvloeden. De huidige (geo-) hydrologische modellen moeten worden verbeterd om op een efficiënte en betrouwbare wijze zowel voor droogte als wateroverlast een goede inschatting te maken van de impact van maatregelen. Nieuwe rekenmethodes waarin online gekoppelde grond- en oppervlaktewater-modellen snel en efficiënt op de benodigde tijd- en ruimteschalen antwoord geven zijn daarvoor nodig. Zorg ervoor dat deze modellen ook de mogelijkheid hebben voor doorvertaling naar effecten op waterkwaliteit en biodiversiteit. Neem hier ook klimaatscenario analyses in mee, zodat kan worden gezocht naar de meest adaptieve set aan maatregelen

3 Vergroot de bewijslast voor sponswerking van landschappen en verzamel succesverhalen en lessons-learned voor alle betrokken stakeholders

Het vergroten van het **begrip en de bewijslast voor selectie van effectieve maatregelen** en welke specifieke maatregelen het meest effectief zijn om de sponswerking in verschillende delen van Nederland te herstellen onder verschillende type hydrometeorologische gebeurtenissen is nodig.

Start met het maken van een **gezamenlijke database** om succesverhalen, lessons-learned en bewijslast bijeen te brengen van verschillende type maatregelen en hun impact op sponswerking. Monitor geïmplementeerde maatregelen en evalueer hun effect zowel lokaal als in samenhang met andere maatregelen op landschapsschaal op droogte, wateroverlast, waterkwaliteit en biodiversiteit en vertaal dit door naar socio-economische kosten en baten. Zowel natuurlijke als technologische oplossingen behoeven verdere evaluatie, zoals het herstel van wetlands, groene infrastructuur, waterberging en bodemverbetering. Hiervoor is kwantitatieve **monitoring en evaluatie** nodig niet alleen van het primaire functioneren, maar ook de kosten en baten van andere aspecten (onderhoudsregimes en kosten, opbrengsten vanuit de landbouw, verbetering van waterkwaliteit en biodiversiteit, waardering van het landschap). Dit is van groot belang om ervoor te zorgen dat de gekozen maatregelen daadwerkelijk de beoogde resultaten opleveren.

Investeer hierbij voldoende in de gebiedsprocessen en geef handvatten voor co-creatie: Het is belangrijk op te merken dat het verbeteren van de sponswerking een langetermijnproces is dat samenwerking vereist tussen verschillende belanghebbenden, waaronder overheden, gemeenschappen, bedrijven en wetenschappers. Het doel is om veerkrachtiger te worden tegen de gevolgen van klimaatverandering en tegelijkertijd duurzaam om te gaan met waterbronnen. Het betrekken van gemeenschappen en belanghebbenden bij keuze voor, en implementatie van maatregelen om de sponswerking in een gebied te herstellen of bevorderen is van essentieel belang voor een succesvol traject. Het betrekken van lokale gemeenschappen vereist kennis en kunde vanuit het sociaalwetenschappelijke en technisch-bestuurlijke domein. Er zijn veel technieken beschikbaar zoals co-creatie en co-design die kunnen bijdragen aan het proces om groepen te betrekken, en die inzicht geven in hoe sociale acceptatie kan worden bevorderd en hoe culturele en sociale factoren van invloed zijn op de keuze voor specifieke sponswerkingsmaatregelen.

6 Referenties

- Asselman, N., de Jong, J. S., Kroekenstoel, D., & Folkertsma, S. (2022). The importance of peak attenuation for flood risk management, exemplified on the Meuse River, the Netherlands. *Water Security*, 15. <https://doi.org/10.1016/J.WASEC.2022.100114>
- Asselman, N., & van Heeringen, K.-J. (2023). *watersysteemanalyse - wat leren we van het hoogwater van juli 2021? : inzichten in het functioneren van beeksystemen bij grote hoeveelheden neerslag en het effect van verschillende typen maatregelen*. Deltares rapport 11207700-000-ZWS-0035. <https://www.deltares.nl/expertise/publicaties/watersysteemanalyse-wat-leren-we-van-het-hoogwater-van-juli-2021-inzichten-in-het-functioneren-van-beeksystemen-bij-grote-hoeveelheden-neerslag-en-het-effect-van-verschillende-typen-maatregelen>
- Black, A., Peskett, L., MacDonald, A., Young, A., Spray, C., Ball, T., Thomas, H., & Werritty, A. (2021). Natural flood management, lag time and catchment scale: Results from an empirical nested catchment study. *Journal of Flood Risk Management*, 14(3), e12717. <https://doi.org/10.1111/JFR3.12717>
- Buiteveld, H. (2017). *Afvoerstatistiek Maas en Afvoercapaciteit Maas*.
- Dassargues, A., & Ruthy, I. (2009). *Carte hydrogéologique de Wallonie. Planchettes Visé–Sint-Martens-Voeren (34/7-8)*. SPW. https://www.academia.edu/12435084/Crétacé_du_Pays_de_Herve
- De Jong, J., & Asselman, N. (2019). *Topvervlakking Maas Het effect van golfvormen, bergingsgebieden en rivierverruiming*. [https://open.rijkswaterstaat.nl/open-overheid/onderzoeksrapporten/@127615/topvervlakking-maas-effect-golfvormen/#highlight=Asselman, N.](https://open.rijkswaterstaat.nl/open-overheid/onderzoeksrapporten/@127615/topvervlakking-maas-effect-golfvormen/#highlight=Asselman,%20N.)
- De Louw, P. G. B., Oude Essink, G. H. P., Eeman, S., Van Baaren, E. S., Vermue, E., Delsman, J. R., Pauw, P. S., Siemon, B., Gunnink, J. L., & Post, V. E. A. (2015). Dunne regenwaterlenzen in zoute kwelgebieden. *Landschap*, 1, 5–15. http://www.researchgate.net/profile/Gualbert_Oude_Essink/publication/274456824_Dunne_regen_waterlenzen_in_zoute_kwelgebieden/links/552020440cf2a2d9e143359e.pdf
- De Louw, P., van Bakel, J., Buma, J., Hakvoort, H., & Veldhuizen, A. (2006). *Vergroting Retentiewerking*
- Delsman, J. R., Oude Essink, G., Huizer, S., Bootsma, H., Mulder, T., Zitman, P., Romero Verastegui, B., & Janssen, G. M. C. M. (2020). Actualisatie zout in het NHI - Toolbox NHI zoet-zout modellering en landelijk model. In *Deltares rapport 11205261-003-BGS-000*.
- De Moor, J. J. W., Kasse, C., van Balen, R., Vandenbergh, J., & Wallinga, J. (2008). Human and climate impact on catchment development during the Holocene - Geul River, the Netherlands. *Geomorphology*, 98(3–4), 316–339. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2006.12.033>
- De Moor, J. J. W., & Verstraeten, G. (2007). Alluvial and colluvial sediment storage in the Geul River catchment (The Netherlands) — Combining field and modelling data to construct a Late Holocene sediment budget. *Geomorphology*, 95(3–4), 487–503. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2007.07.012>
- De Urbanisten, & Deltares. (2023). *Rotterdam Waterstad 2100*. https://eowijers.nl/wp-content/uploads/2023/07/Rotterdam_Waterstad_2100_Urbanisten_Deltares_uitwerking.pdf

- De Wit, M., & Joenje, Maaïke. (2008). Van regen tot Maas : grensoverschrijdend waterbeheer in droge en natte tijden. *Veen Magazines*.
- Deltares. (2023). *Droogte Monitor*. <https://www.droogteradar.nu/#/actuele>
- Fennell, J., Soulsby, C., Wilkinson, M. E., Daalmans, R., & Geris, J. (2023). Time variable effectiveness and cost-benefits of different nature-based solution types and design for drought and flood management. *Nature-Based Solutions*, 3, 100050. <https://doi.org/10.1016/J.NBSJ.2023.100050>
- Gemeente Rotterdam. (2023). *Rotterdams Weerwoord*. <https://rotterdamsweerwoord.nl/>
- GOV UK. (2023). *Natural flood management programme - GOV.UK*.
<https://www.gov.uk/guidance/natural-flood-management-programme>
- Green, D., O'Donnell, E., Johnson, M., Slater, L., Thorne, C., Zheng, S., Stirling, R., Chan, F. K. S., Li, L., & Boothroyd, R. J. (2021). Green infrastructure: The future of urban flood risk management? *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 8(6), e1560. <https://doi.org/10.1002/WAT2.1560>
- Groenblauw. (2016). *Urban Green-blue Grids*. <https://urbangreenbluegrids.com/>
- Groenblauw. (2019). *Zwolle maakt zich op voor het nieuwe klimaat*.
- H2O Actueel. (2022). "Goed beheerde bodem in staat veel water te bergen."
<https://www.h2owaternetwerk.nl/h2o-actueel/goed-beheerde-bodem-in-staat-veel-water-te-bergen>
- Hendriks, D., Passier, H., Marsmaan, A., Levelt, O., & Lamers, N. (2023). *Integrale Grondwaterstudie Nederland module 1: landelijke analyse*. https://publications.deltares.nl/11208092_001_0001.pdf
- Hendriks, D. M. D., Van Huissteden, J., Dolman, A. J., & Van Der Molen, M. K. (2007). The full greenhouse gas balance of an abandoned peat meadow. *Biogeosciences*, 4, 411–424.
www.biogeosciences.net/4/411/2007/
- Homann, C. (2022). *Forecast-System for the Rur-Reservoirs*.
- Hoogheemraadschap Rijnland. (2023). *Werkgebied Rijnland - Hoogheemraadschap van Rijnland*.
<https://www.rijnland.net/over-rijnland/organisatie/ons-werkgebied/>
- Iacob, O., Rowan, J. S., Brown, I., & Ellis, C. (2014). Evaluating wider benefits of natural flood management strategies: An ecosystem-based adaptation perspective. *Hydrology Research*, 45(6), 774–787. <https://doi.org/10.2166/NH.2014.184>
- IenW. (2022). *Kamerbrief over rol Water en Bodem bij ruimtelijke ordening | Kamerstuk | Rijksoverheid.nl*. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2022/11/25/water-en-bodem-sturend>
- IKSR. (2023). *IKSR: Internationale Kommission zum Schutz des Rheins*. <https://www.iksr.org/de/>
- Jetten, V. (2022). *Evaluatie van potentiële veranderingen in landgebruik op oppervlakte afvoer. Een model analyse met openLISEM van de stroomgebieden Ransdaal en de Strabeek. December*.

- Klein, A. C. (2022). *Hydrological Response of the Geul Catchment to the Rainfall in July 2021* [Master Thesis, TU DELFT]. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Aee25d687-70af-4aca-ae41-78e3f83943bf>
- Klimaat-effectatlas. (2021). *Kansenkaart natuurlijke Klimaatbuffers - Klimaat-effectatlas*. <https://www.klimaat-effectatlas.nl/nl/kansenkaart-natuurlijke-klimaatbuffers>
- KLIMAP. (2023). *Proefgebieden - KLIMAP: regionale aanpak klimaatadaptieve maatregelen voor hooggelegen zandgronden*. <https://klimap.nl/proefgebieden>
- KNMI. (2021). *KNMI Klimaatsignaal'21*. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2021/10/25/bijlage-1-knmi-klimaatsignaal-21-hoe-het-klimaat-in-nederland-snel-verandert>
- KNMI. (2023). *KNMI - Klimaatdashboard*. <https://www.knmi.nl/klimaatdashboard>
- Kramer, N. (2021). *Lage afvoeren in de Maas RIWA-Maas RIWA-Vereniging van Rivierwaterbedrijven*.
- Kroonen, B. (2020). *Satellietbedrijven netwerk Zuid Limburg Water in Balans 2020*. www.wur.nl/plant-research
- Kurstjens G, M. Nijssen, A. van Winden, M. Dorenbosch, H. Moller Pillot, C. van Turnhout & P. Veldt, 2020. Natte overstromingsvlakten in het rivierengebied. Ecologisch functioneren en ontwikkelkansen, rapport 2020/OBN237-RI. VBNE, Driebergen.
- Kwadijk, J. (2007). *Waar komt het water vandaan - Climate and Water - Deltares Public Wiki*. <https://publicwiki.deltares.nl/display/CAW/Waar+komt+het+water+vandaan>
- Landschap Overijssel. (2023). *Natura 2000-project Wierdense Veld | Landschap Overijssel*. <https://landschapoverijssel.nl/project/wierdense-veld>
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2000) Anders omgaan met water. Waterbeleid voor de 21^e eeuw. <https://open.overheid.nl/documenten/ronl-archieff-08d6561f-6807-406f-8e08-2939878cb5be/pdf>
- Noardlike Fryske Walden. (2021). *Water vasthouden op hogere zandgronden - Noardlike Fryske Wâlden*. <https://www.noardlikefryskewalden.nl/water-vasthouden-op-hogere-zandgronden/>
- NOBV. (2023). *NOB – Veenweiden*. <https://www.nobveenweiden.nl/>
- Nordhoff. (2021). *De Bosatlas*. <https://www.noordhoff.nl/bosatlas>
- Pallard, B., Castellarin, A., & Montanari, A. (2009). A look at the links between drainage density and flood statistics. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(7), 1019–1029. <https://doi.org/10.5194/HESS-13-1019-2009>
- Pattison, I., Lane, S. N., Hardy, R. J., & Reaney, S. M. (2014). The role of tributary relative timing and sequencing in controlling large floods. *Water Resources Research*, 50(7), 5444–5458. <https://doi.org/10.1002/2013WR014067>
- Penning, E., Burgos, R. P., Mens, M., Dahm, R., & Bruijn, K. de. (2023). Nature-based solutions for floods AND droughts AND biodiversity: Do we have sufficient proof of their functioning? *Cambridge Prisms: Water*, 1, e11. <https://doi.org/10.1017/WAT.2023.12>

- Pfister, L., Kwadijk, J., Musy, A., Bronstert, A., & Hoffmann, L. (2004). Climate change, land use change and runoff prediction in the Rhine–Meuse basins. *River Research and Applications*, 20(3), 229–241. <https://doi.org/10.1002/RRA.775>
- Province Fryslan. (2023). *Het Friese Veenweideprogramma | Veenweide*. <https://www.veenweidefryslan.frl/>
- Provincie Limburg. (2023). *Atlas Limburg*. <https://portal.prvlimburg.nl/viewer/app/default>
- Remmelzwaal, A., Kors, A., Tanczos, I., Hebbink, A., & Helmer, J. (2015). Meerpeilen en waterveiligheid IJsselmeergebied. In *Rijkswaterstaat* (Issue september).
- Schoonderwoerd et al. (2023). *KLIMAP Case study Chaamse Beken*.
- Schoonderwoerd et al. (2023) Sponswerking van Landschappen – Casus Chaamse beken Deltares rapport.
- Slager, K., Becker, A., Bouaziz, L., & Kwadijk, J. (2022). *Rapid assessment study on the Geul river basin : screening of flood reduction measures*. <https://www.deltares.nl/en/expertise/publicaties/rapid-assessment-study-on-the-geul-river-basin-screening-of-flood-reduction-measures>
- STOWA. (2019a). Neerslagstatistiek en reeksen voor het waterbeheer 2019. *Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer*, 205.
- STOWA. (2019b). *Praatplaat Naar een klimaatbestendig beekdallandschap | STOWA*. <https://www.stowa.nl/publicaties/praatplaat-naar-een-klimaatbestendig-beekdallandschap>
- STOWA. (2023). *Deltafacts: Water vasthouden en bergen op landbouwpercelen*. https://www.stowa.nl/deltafacts/zoetwatervoorziening/aanpassen-aan-klimaatverandering/water-vasthouden-en-bergen-op?utm_source=STOWA+digitale+nieuwsbrief&utm_campaign=af72fcf108-EMAIL_CAMPAIGN_2023_03_28_12_29&utm_medium=email&utm_term=0_-af72fcf108-%5BLI
- Stroming. (2022). *Analyse functioneren klimaatbuffers in het Geul stroomgebied tijdens extreme neerslag in juli 2021*. https://www.stroming.nl/sites/default/files/2022-06/Klimaatbuffer_Geuldal_rapportage_juni_2022_2.pdf
- Ter Harmsel, A. (2022). *Beekdalen & Laagten in het ZON-gebied*. https://geo.overijssel.nl/geoportaal/docs/ZON_Beekdalen_def_als_PDF_6dec22.pdf
- TNO. (2023). *Geologische Kaart van Nederland*. <https://www.geologischekaart.nl/>
- Tu, M. (2006). *Assessment of the effects of climate variability and land use change on the hydrology of the Meuse River Basin* [PHD Thesis]. VU Amsterdam.
- Van den Eertwegh, G., de Louw, P., Witte, J.-P., van Huigevoort, M., & Bartholomeus, R. (2021). *Droogte in de zandgebieden van Nederland: Effecten op en oplosaangrichtingen voor natuur, landbouw en het bodem- en watersysteem*. https://droogteportaal.nl/rapporten/Droogte_zandgronden_samenvatting.pdf
- Van den Munckhof, G. (2020). *Forecasting river discharge using machine learning methods: with application to the Geul and Rur river* [Master Thesis, TU Delft]. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A9678ca98-43bf-49ca-ab6f-ebbb71044260>

- Van der Gaast, J. W. J., Massop, H. T. L., & Vroon, H. R. J. (2009). Actuele grondwaterstandsituatie in natuurgebieden WOt Een pilotstudie. *Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu*, No. 94.
- Van Ginkel K, Klijn F, Mens M, Ter Maat J. (2022). Verkennde systeemanalyse IJsselmeergebied. Deltares rapport 11208074-010-ZWS-0002
- van Heeringen, K.-J., Asselman, N., Overeem, A., Beersma, J. J., & Philip, S. (2022). *Analyse overstrooming Valkenburg : watersysteemevaluatie Waterschap Limburg | Deltares*. <https://www.deltares.nl/expertise/publicaties/analyse-overstroming-valkenburg-watersysteemevaluatie-waterschap-limburg>
- Verseveld, W. J. van, Weerts, A. H., Visser, M., Buitink, J., Imhoff, R. O., Boisgontier, H., Bouaziz, L., Eilander, D., Hegnauer, M., Velden, C. ten, & Russell, B. (2022). *Wflow_sbm v0.6.1, a spatially distributed hydrologic model: from global data to local applications*. <https://doi.org/10.5194/GMD-2022-182>
- Waterschap Limburg. (2018). *Visie Beekdalontwikkeling in Limburg*.
- Waterschap Limburg. (2020). *Water in Balans: Water vasthouden op landbouwpercelen in Zuid-Limburg – 15 maatregelen. Samengesteld door B. Kroonen, P. de Wolf en D. Verstand (WUR | Open Teelten)*.
- Waterschap Limburg (2020) <https://www.waterschaplimburg.nl/actueel/nieuwsberichten-2020/uitbreiding/>
- Waterschap Limburg. (2022). *Dynamisch bufferen in Meersen om wateroverlast aan te pakken - Waterschap Limburg*. <https://www.waterschaplimburg.nl/actueel/nieuwsberichten-2022/dynamisch-bufferen/>
- Waterschap Limburg. (2023a). *Erosie en niet-kerende grondbewerking - Waterschap Limburg*. <https://www.waterschaplimburg.nl/overons/regels-wetgeving-0/regels-agrarische/erosie-kerende/>
- Waterschap Limburg. (2023b). *Stimuleringsregeling water vasthouden landbouwpercelen Zuid-Limburg - Waterschap Limburg*. <https://www.waterschaplimburg.nl/vooragrariers/stimuleringsregeling-water-vasthouden/>
- Waterschap Rijn en IJssel. (2022). *Baakse Beek Veengoot - Gebiedsproces - Baakse Beek*. <https://www.baaksebeek.nl/>
- Waterschap Vallei en Veluwe. (2016). *Leuvenumse beek - Vallei en Veluwe*. <https://www.vallei-veluwe.nl/actueel/actuele-thema/beleef-waterschap/recreatietips/leuvenumse-beek/>
- WMO. (2008). *APFM Technical Document – 11 : Urban Flood Risk Management*. <https://library.wmo.int/viewer/37067/?offset=#page=2&viewer=picture&o=bookmark&n=0&q=>
- Zevenbergen, C., Fu, D., & Pathirana, A. (2018). Transitioning to Sponge Cities: Challenges and Opportunities to Address Urban Water Problems in China. *Water* 2018, Vol. 10, Page 1230, 10(9), 1230. <https://doi.org/10.3390/W10091230>
- ZON. (2021). *ZON | Zoetwater voorziening Oost-Nederland*. <https://zoetwatervoorzieningoostnederland.nl/>

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

Deltares

www.deltares.nl