

Sponswerking in het stroomgebied van de Chaamse beken



Sponswerking in het stroomgebied van de Chaamse beken

Auteur(s)

Eva Schoonderwoerd

Joost Delsman

Joachim Rozemeijer

Perry de Louw

Rianne Meeusen

Ellis Penning

Sponswerking in het stroomgebied van de Chaamse beken

Documentgegevens		
Versie	0.1	
Datum	22-07-2025	
Projectnummer	11209970-003	
Document ID	11209970-003-ZWS-0001	
Pagina's	53	
Classificatie		
Status	Definitief	
Auteur(s)		
	Eva Schoonderwoerd Joost Delsman Joachim Rozemeijer Perry de Louw Rianne Meeusen Ellis Penning	

Samenvatting

In dit rapport is onderzocht hoe de sponswerking – het vermogen van een landschap om water vast te houden en langzaam weer vrij te geven – vergroot kan worden in het stroomgebied van de Chaamse beken (gelegen ten zuidoosten van Breda). Het onderzoek maakt deel uit van het project SponswerkingNL en bouwt voort op eerdere studies binnen KLIMAP en SponswerkingNL. Binnen deze studie is met een grondwatermodel onderzocht wat het effect is van een set aan sponswerkingsmaatregelen voor verschillende sectoren (landbouw en natuur) binnen een stroomgebied, daarnaast is met het model de systeemwerking van ontwateringsmaatregelen verder onderzocht en is een literatuurstudie uitgevoerd naar het verband tussen een gezonde bodem en sponswerking.

Effect sponswerkingsmaatregelen

Er is een scenario met sponswerking maatregelen onderzocht waarbij is gekeken naar het effect op de grondwatersituatie, de afvoercharacteristiek en de gebruiksfuncties natuur en landbouw. Hierbij is ook speciale aandacht voor het verschil in effect tussen de winter- en zomersituatie en het effect in een extreem droge zomer (2003).

Door de maatregelen wordt de grondwaterstand jaarrond verhoogd, maar het effect in de winter (GHG) is groter dan in de zomer (GLG). In een droge zomer als 2003 is het effect op de zomergrondwaterstand nog kleiner. Daarnaast zorgen de maatregelen ook voor een daling van de basisafvoer in de zomer en een stijging van de piekafvoer. Dit is tegengesteld aan het doel van sponswerking, waarbij beoogd wordt om water langer vast te houden en hiermee tegelijkertijd een bijdrage te leveren aan het opvangen van weersextremen (opvangen van piekbuien).

Voor de landbouw binnen het gebied geldt dat de gekozen maatregelen zorgen voor een nattere situatie in de zomer, waardoor er meer optimale verdamping van gewassen (T_a/T_p) kan optreden en daarmee een mogelijke toename in gewasopbrengst. Echter, de nattere wintersituatie leidt tot een toename in natschade waardoor er toch een opbrengstderving optreedt. Dit effect is vooral te zien in de bufferzones waar de maatregelen getroffen zijn. In een droge zomer als 2003 is een grotere verbetering van de T_a/T_p te zien dan het langjarig gemiddelde, wat aangeeft dat in droge zomers een groter positief effect te halen is op de landbouwopbrengst als gevolg van de maatregelen. Ook de terrestrische natuur profiteert van de toegenomen grondwaterstanden en de potentie voor natuurtypes van een hogere botanische natuurwaarde neemt toe. De aquatische natuur wordt juist negatief beïnvloed door de afname van de basisafvoer.

Systeemwerking van ontwateringsmaatregelen

Daarnaast is een verkenning gedaan naar de watersysteemwerking van sponswerkingsmaatregelen, waarbij specifiek is gekeken naar aanpassing van de drainagebasis in het ontwateringssysteem. Hierbij is gekeken naar het verschil tussen een aanpassing in de detailontwatering óf in de hoofdwaterlopen óf beide.

Met een aanpassing in alleen de detailontwatering stijgt de GHG (Gemiddelde Hoogste Grondwaterstand) in een groot gebied, maar is het effect op de GLG (Gemiddelde Laagste Grondwaterstand) beperkt. In deze situatie gaat het hoofdwatersysteem meer water afvoeren, waardoor het effect van de gestegen wintergrondwaterstanden weer gedeeltelijk teniet gedaan wordt. Bij alleen een aanpassing van de hoofdwaterlopen is te zien dat de grondwaterstand alleen in de buurt van de hoofdwaterlopen beïnvloed kan worden. Ook een aanpassing van de ontwatering in alleen in het infiltratiegebied is onderzocht. Hierbij is alleen

een klein effect te zien in het infiltratiegebied zelf, en wordt de grondwaterstand in het lagere deel van het stroomgebied niet beïnvloed. Het grootste effect wordt gehaald als de maatregel gecombineerd in beide systemen (detail- & hoofdwatersysteem) wordt doorgevoerd. Dit effect is ook groter dan de som van de afzonderlijke maatregelen. Dat geeft aan dat sponswerking het beste werkt wanneer je het totale ontwateringssysteem op regionale schaal (inclusief de beken) aanpakt, in plaats van een aanpassing in een kleiner gebied.

Gezonde bodem

Er is een literatuurstudie uitgevoerd naar het effect van een gezonde bodem op de sponswerking van een gebied. Hierbij is in het bijzonder aandacht voor het organische stofgehalte van de bodem, maar is ook gekeken naar andere aspecten van een gezonde bodem. Deze elementen zijn bodemstructuur, gewas en beworteling, bodemleven, bodemchemie, waterhuishouding en organische stofgehalte. Gezonde bodems hebben een hogere infiltratiecapaciteit en een beter vochtvasthoudend vermogen. Ook kunnen gewassen beter en dieper wortelen. Meer organische stof verhoogt het waterbergend vermogen (4–6 mm per 1% extra, bij relatief arme zandbodems (Schipper et al., 2015, STOWA, 2021)). Het verhogen van het organische stofgehalte kan door de afbraak van organische stof te verminderen of meer organische stof aan te voeren. Dit is wel een traag proces, wat tientallen jaren kan duren voordat het gehalte 1% is verhoogd.

De studie van Schipper et al. (2015) heeft met hulp van modelberekeningen aangetoond dat een gezonde bodem ten opzichte van een verdichte bodem minder problemen heeft op het gebied van waterbeschikbaarheid en wateroverlast, met name op perceelsschaal. Piekafvoeren bij hevige buien in de zomer nemen af, omdat een gezonde bodem een grotere infiltratiecapaciteit heeft, en er treedt minder droogteschade in de landbouw op omdat het vochtbergend vermogen van een gezonde bodem groter is en gewassen dieper wortelen. De beregeningsbehoefte neemt hierdoor ook af. Voor hydrologische effecten op landschapssysteemschaal (zoals het verhogen van de langjarig gemiddelde grondwaterstand) zijn naast bodemverbetering ook aanvullende maatregelen in het oppervlaktewatersysteem nodig; het effect op de GHG en GLG van een verbeterde bodem was erg beperkt. Dit wordt veroorzaakt doordat de ongewijzigde drainagehoogte (in de modellering van Schipper et al. (2015)) van het ontwateringssysteem voorkomt dat de grondwaterstanden sterk kunnen stijgen.

Inhoud

	Samenvatting	4
	Inhoud	6
1	Inleiding	8
1.1	Achtergrond	8
1.2	Onderzoeksvragen	8
2	Methode	10
2.1	Gebiedsomschrijving Chaamse beken	10
2.2	Aanpak modellering Chaamse beken	13
2.2.1	Beschrijving grondwatermodel Chaamse beken	13
2.2.2	Varianten	14
2.2.2.1	Variant maatregelen voor het vergroten van de sponswerking	14
2.2.2.2	Varianten voor het onderzoeken van de systeemwerking van ontwateringsmaatregelen	17
2.3	Analyse	18
2.4	Organische stof en een gezonde bodem	18
3	Resultaten	19
3.1	Referentiesituatie	19
3.1.1	Grondwater	19
3.2	Resultaat variant “maatregelen voor het vergroten van de sponswerking”	21
3.2.1	Grondwaterstanden	21
3.2.2	Afvoer	25
3.2.3	Terrestrische natuur	27
3.2.4	Landbouw	27
3.3	Resultaat varianten ‘systeemwerking van ontwateringsmaatregelen’	31
3.3.1	Grondwater	31
3.3.2	Afvoer	35
3.4	Gezonde bodem	39
3.4.1	Relatie tussen organische stofgehalte en sponswerking	39
3.4.2	Relatie een verbeterde bodemkwaliteit en sponswerking	40
3.4.3	Maatregelen verhogen organische stofgehalte	42
3.4.4	Internationale literatuur	43
4	Discussie	46
4.1	Effecten maatregelen sponswerking en seizoenseffecten – Chaamse Beken	46
4.2	Ruimtelijke systeemwerking	47
4.3	Gezonde bodem	48

5	Conclusies en aanbevelingen	49
	Referentielijst	51

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Sponswerking van landschappen is het vermogen van het natuurlijke landschap om neerslag vast te houden en vervolgens langzaam weer vrij te geven. Het vergroten van sponswerking kan daarmee een bijdrage leveren aan de opvang van weersextremen, zoals piekbuien en perioden van watertekort. Sponswerking impliceert het vullen van een spons in natte tijden, waarna het vastgehouden water in droge tijden beschikbaar is, om natuurgebieden natter en de basisafvoer hoger te houden en de waterbeschikbaarheid voor de landbouw te verhogen.

Voorliggend onderzoek richt zich op het onderzoeken van het vergroten van sponswerking in het stroomgebied van de Chaamse beken, een stroomgebied ten zuidoosten van Breda. Het stroomgebied is een goede casestudie voor het onderzoeken van sponswerking-maatregelen. De Chaamse beek is namelijk een typische beek voor de hoge zandgrondenregio en het stroomgebied kent problemen met wateroverlast, watertekort en waterkwaliteit. Vergroting van de sponswerking zou een bijdrage kunnen leveren aan de vermindering van deze problemen. Dit onderzoek bouwt voort op eerder onderzoek in het gebied in het kader van het KLIMAP project (Clevers & Nijp, 2023; Schoonderwoerd et al., 2024a; Hendriks et al., 2024)) en onderzoek in het kader van SponswerkingNL uit 2023 (Schoonderwoerd et al., 2024b).

Het onderzoek richt zich specifiek op de seizoensmatige aspecten van sponswerking: kan het langer vasthouden van water het droge zomerseizoen positief beïnvloeden? Daarbij wordt ook de systeemwerking van maatregelen verder onderzocht. In hoeverre hebben maatregelen bovenstrooms invloed benedenstrooms en andersom? Hoe telt het effect van maatregelen op als deze op verschillende plekken in het landschap worden genomen? Hoe kan met het vergroten van de hoeveelheid organische stof in de bodem (of op een andere manier verbeteren van de bodemkwaliteit) de sponswerking van het systeem worden vergroot?

Het onderzoek maakt deel uit van het SITO-PS project SponswerkingNL en neemt ook kennis mee uit het Europese 'SpongeScapes' project. Het SpongeScapes project richt zich op het verbeteren van de veerkracht van landschappen tegen hydrometeorologische gebeurtenissen, zoals overstromingen en droogte, door het vergroten van de sponswerking van het landschap. Het richt zich op het potentiële gebruik van natuurlijke waterretentiemaatregelen voor het verbeteren van het retentievermogen van grondwater, bodem en oppervlaktewater in heel Europa (waarvan de Chaamse Beken één van de casusgebieden is).

1.2 Onderzoeksvragen

Dit onderzoek richt zich op de volgende onderzoeksvragen, waarbij is onderzocht hoe de set aan sponswerkingsmaatregelen voor het gebied Chaamse Beken uitwerken:

1. Wat zijn de effecten van vernatting als gevolg van de gekozen sponswerkingmaatregelen en hoe beïnvloedt de seizoensmatigheid deze effecten?
 - a. Wat levert vernatting op voor sponswerking **in de tijd**?
 - b. Hoe hangt dat af van **de seizoensmatigheid** van droogte?
 - c. Welke **ruimtelijke verdeling** van vernattingsmaatregelen levert meeste op voor de sponswerking?

Deze vragen worden onderzocht voor het stroomgebied van de Chaamse Beken, waarbij ook gebruikgemaakt wordt van modelresultaten uit eerdere projecten. Met behulp van deze modelresultaten, en enkele nieuwe inzichten over de systeemwerking van aanpassingen in het ontwateringssysteem, wordt meer inzicht over deze vragen opgedaan. Doordat er maar één stroomgebied bekeken wordt, waarbij alleen enkele scenario's zijn berekend, kunnen er geen generieke conclusies over de werking van sponswerking getrokken worden.

Daarnaast wordt de volgende onderzoeksvraag behandeld met een literatuuronderzoek naar Nederlandse en internationale studies, waarbij de focus dus niet alleen op de Chaamse Beken ligt:

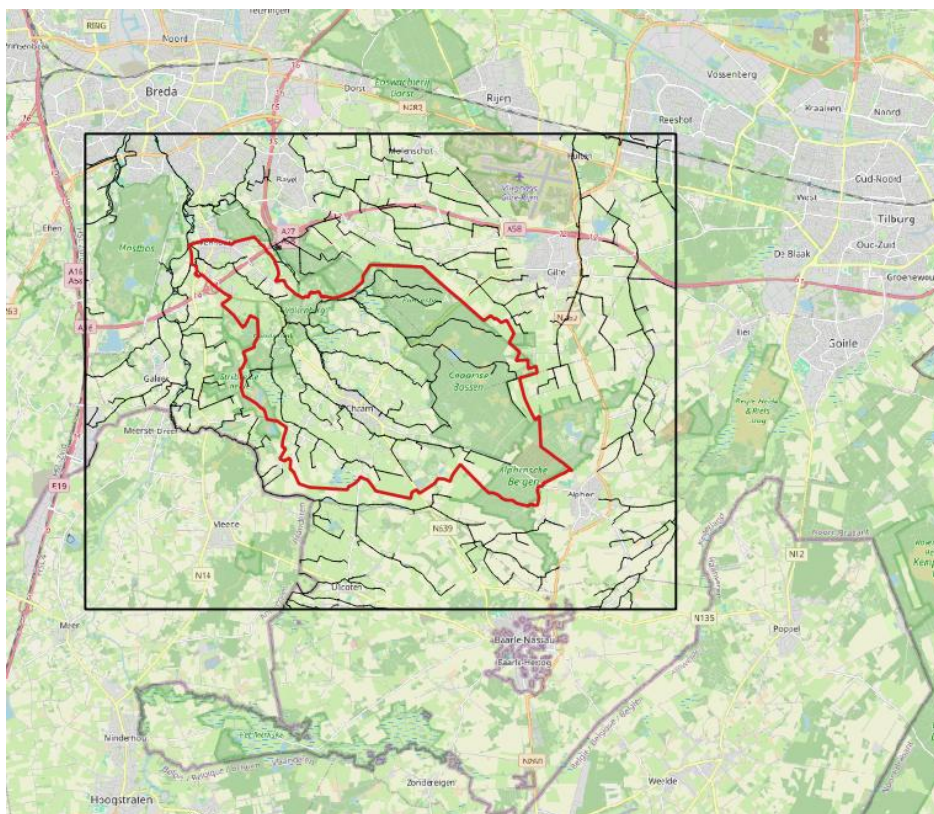
2. Wat is het effect van meer organische stof in de bodem (of een andere verbetering van de bodemkwaliteit) op de sponswerking?

2 Methode

2.1 Gebiedsomschrijving Chaamse beken

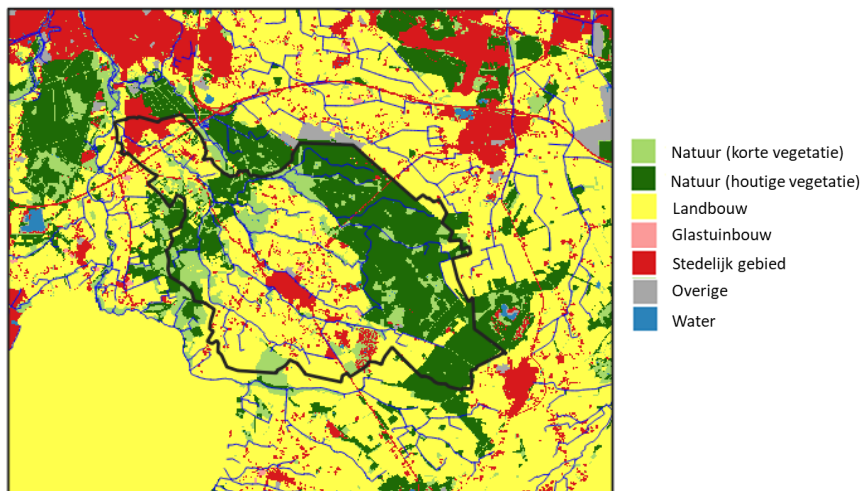
Het stroomgebied van de Chaamse Beken (rood omlijnd in Figuur 2.1) ligt ongeveer 4.5 km ten zuidoosten van Breda en 10 km ten zuidwesten van Tilburg. In het zuidwesten grenst het gebied vrijwel aan de Belgische grens. In het midden van het gebied ligt het dorp Chaam, waar ook een rioolwaterzuivering (RWZI) aanwezig is. Het stroomgebied heeft een oppervlakte van ongeveer 50 km². Het stroomgebied ligt volledig in het beheergebied van waterschap Brabantse Delta.

Het stroomgebied watert af in noordwestelijke richting, waar de Chaamse beek uitmondt in de Boven Mark. De beek stroomt vervolgens verder als Mark richting Breda om uiteindelijk uit te monden in het Volkerak. Er zijn opgaven in het kader van de KRW en verdrogingsbestrijding. Daarnaast is er zowel sprake van uitdagingen op het gebied van wateroverlast als droogte.

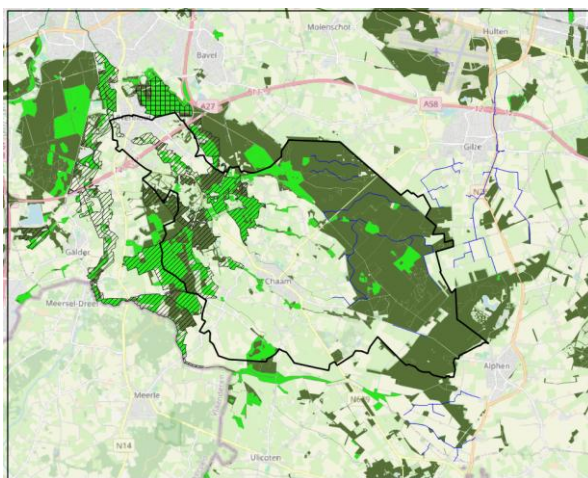


Figuur 2.1 Stroomgebied Chaamse Beken (rood omlijnd). De monding van het stroomgebied is de Chaamse Beek in het noordoosten. Het zwarte vierkant is het modelgebied gebruikt in deze casestudy. De zwarte lijnen zijn de hoofdwaterlopen binnen het modelgebied.

In het stroomgebied zijn natuur en landbouw verweven (Figuur 2.2). Het oostelijke deel van het gebied bestaat uit voornamelijk bos (houtige vegetatie). In het midden van het stroomgebied zijn enkele gebieden met grondwaterafhankelijke natuur (Figuur 2.3). Het landgebruik van het landbouwgebied bestaat voornamelijk uit grasland en maïs. Net buiten het stroomgebied, ten noorden van de benedenloop van de Chaamse Beek, ligt het Natura2000 gebied Ulvenhoutse Bos (vierkant gearceerd weergegeven in Figuur 2.3). In het stroomgebied liggen ook de Natte Natuurparels Strijbeekse Heide, St. Annabosch en Het Broek (diagonaal gearceerd weergegeven in Figuur 2.3).

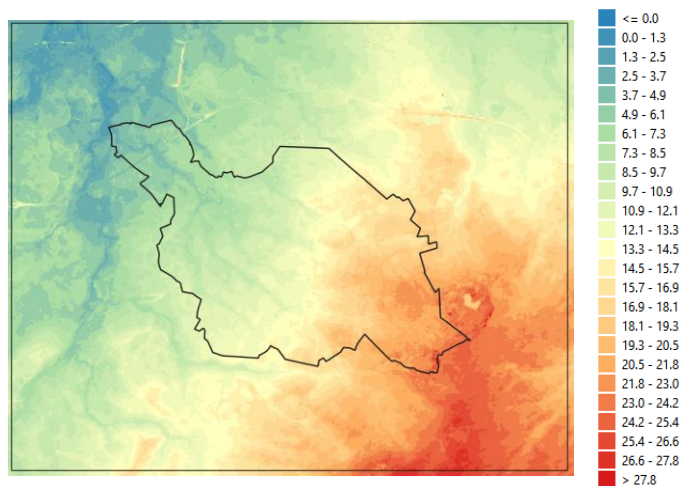


Figuur 2.2 Landgebruik in het modelgebied zoals opgenomen in het grondwatermodel. De onderverdeling in korte vegetatie en houtige vegetatie (bos) is gebaseerd op het Natuurbeheerplan 2022 (BIJ12, 2022).



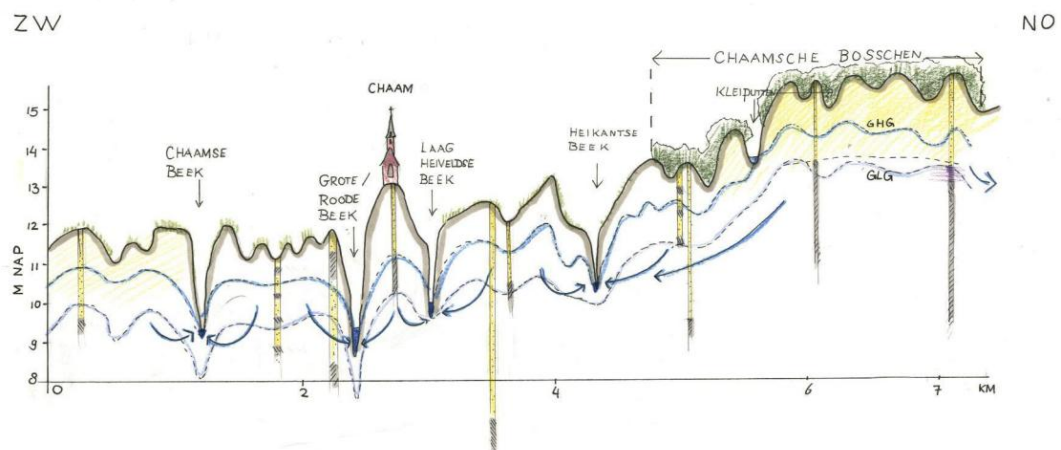
Figuur 2.3 Natuur in het modelgebied. De lichtgroene gebieden zijn natuurgebieden met grondwaterafhankelijke natuur, de donkergroene gebieden zijn de overige natuurgebieden (Natuurbeheerplan 2022 (BIJ12, 2022)). Het gearceerde gebied (met vierkantjes) net ten noorden van het stroomgebied is het Natura2000-gebied Ulvenhoutse bos en de overige gearceerde gebieden (met diagonalen) zijn Natte Natuurparels.

Het maaiveld (Figuur 2.4) toont een sterke helling van zuidoost naar noordwest in het gebied. In de zuidoostelijke punt van het stroomgebied komt de maaiveldhoogte tot aan 27 m NAP, waar de Chaamse beek de Boven Mark instroomt is het maaiveld 2 m NAP.



Figuur 2.4 Maaiveldhoogte (m NAP)

Figuur 2.5 geeft een conceptuele geohydrologische dwarsdoorsnede van het gebied. In het hoger gelegen oosten (de Chaamse Bosschen) infiltreert water naar het diepe grondwater. Dit water stroomt langzaam in westelijke richting, om uit te treden in het lager gelegen beekdal. Op kleinere schaal infiltreert er ook water tussen de watergangen in, om in de watergangen tot afvoer te komen. In de conceptuele schets volgt de grondwaterstand het maaiveld en is daardoor lager in het lagere, westelijke deel dan in het hoger gelegen oosten. Uit de modellering blijkt de grondwaterstand in het oosten zich ook dieper onder het maaiveld te bevinden (verder toegelicht in paragraaf 3.1). Waterlopen snijden zich in in het landschap, en draineren het grondwater als het grondwater boven de bodem van de watergang uitkomt. Wanneer het grondwater onder de bodem zakt, verliest de watergang zijn rol in het grondwatersysteem.



Figuur 2.5 Hydrologische dwarsdoorsnede gebied (uit gebiedspresentatie Brabantse Delta, 2022)

2.2.2 Varianten

Met het grondwatermodel zijn verschillende varianten doorgerekend. Allereerst een referentievariant, waarin geen maatregelen ten opzichte van de huidige situatie zijn geïmplementeerd. Naast de referentie is een variant doorgerekend waarin een set aan maatregelen is geïmplementeerd die de sponswerking voor natte natuurgebieden vergroten. Deze variant is ook al eerder gerapporteerd binnen het KLIMAP project Schoonderwoerd et al., (2024a) en onderzoek in het kader van SponswerkingNL uit 2023, waar het effect van de maatregelen op wateroverlast is onderzocht (Schoonderwoerd et al., 2024b). Tenslotte zijn verschillende varianten doorgerekend die de systeemwerking van maatregelen in het ontwateringssysteem verder verkennen.

Neerslag en verdamping zijn in de referentie- en alle andere varianten opgelegd als het klimaat in het KNMI'14 WH2050 scenario (KNMI, 2014).

2.2.2.1 Variant maatregelen voor het vergroten van de sponswerking

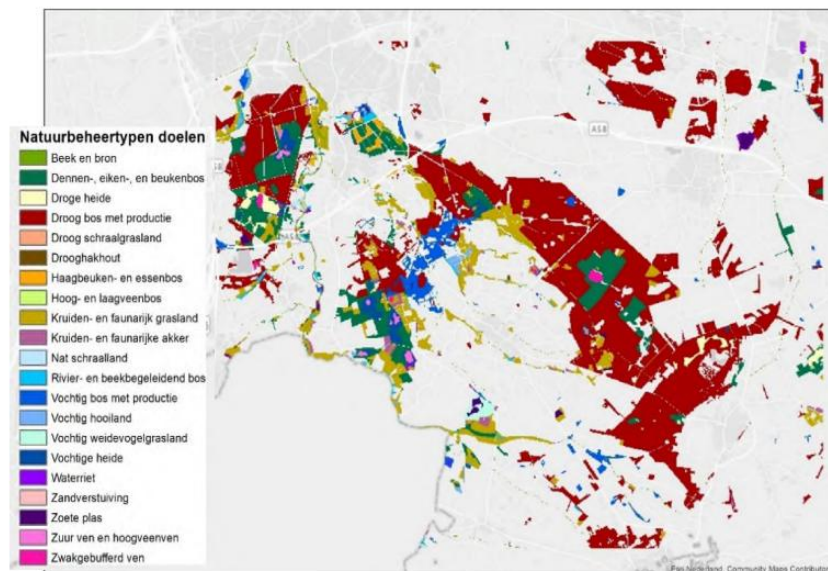
Deze variant is al eerder gerapporteerd in Schoonderwoerd et al. (2024a, 2024b). Binnen dat project is destijds één set aan maatregelen gedefinieerd die bedoeld zijn ter versterking van de natuur in het gebied. Deze maatregelen passen binnen de definitie van sponswerking, omdat de maatregelen zijn bedoeld om water langer vast te houden in de ondergrond en de grondwaterstanden te verhogen. Dit maatregelpakket is dus niet uitsluitend de enige manier waarop sponswerking in het gebied toegepast kan worden.

In deze variant worden er binnen bufferzones rond grondwaterafhankelijke natuur en de beken met een KRW-doelstelling, maatregelen getroffen die zorgen dat de grondwaterstand verhoogd wordt. Hiermee wordt beoogd om de sponswerking in het gebied te vergroten, waarbij water in de winter langer vastgehouden wordt en er ook in de zomer nog een effect is, oftewel het vullen van een spons in natte tijden, waarna het vastgehouden water in droge tijden beschikbaar is. Het doel is om hiermee de grondwaterafhankelijke natuur (volgens het natuurbeheerplan) binnen het stroomgebied te vernatten en versterken ten opzichte van de referentiesituatie. De maatregelen worden daarom gericht op de gebieden in de buurt van deze natte natuur, daarbuiten blijft de inrichting gelijk aan de referentiesituatie. Dit is een voorbeeld van vernattingmaatregelen die je in een stroomgebied zou kunnen nemen.

De natte natuurtypen, oftewel grondwaterafhankelijke natuurtypen, die voorkomen in het modelgebied staan in Tabel 2-1, de locatie van deze natuurbeheertypen is afgeleid uit het Natuurbeheerplan 2022 en weergegeven in Figuur 2.7.

Tabel 2-1 In het modelgebied aanwezige grondwaterafhankelijke natuurtypen.

Code	Omschrijving	Code	Omschrijving
N03.01	Beek en bron	N12.02	Kruiden- en faunarijk grasland
N04.02	Zoete plas	N12.05	Kruiden- en faunarijke akker
N05.04	Dynamisch moeras	N12.06	Ruigteveld
N06.04	Vochtige heide	N14.01	Rivier- en beekbegeleidend bos
N06.05	Zwakgebufferd ven	N14.02	Hoog- en laagveenbos
N06.06	Zuur ven of hoogveenven	N14.03	Haagbeuken- en essenbos
N10.01	Nat schraalland	N16.04	Vochtig bos met productie
N10.02	Vochtig hooiland	N17.03	Park- en stinzenbos



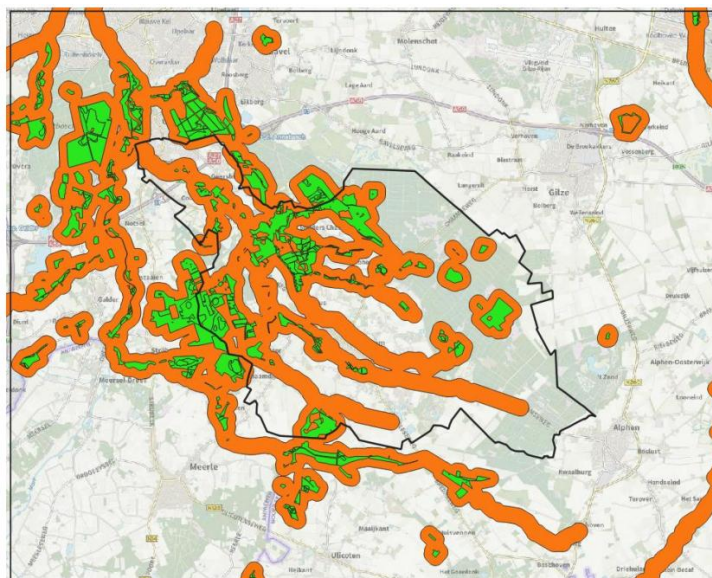
Figuur 2.7 Ligging natuurdoeltypen in het stroomgebied van de Chaamse beken.

De volgende maatregelen worden geïmplementeerd in een bufferzone van 200 m rondom de grondwaterafhankelijke natuurgebieden in het modelgebied (Figuur 2.8):

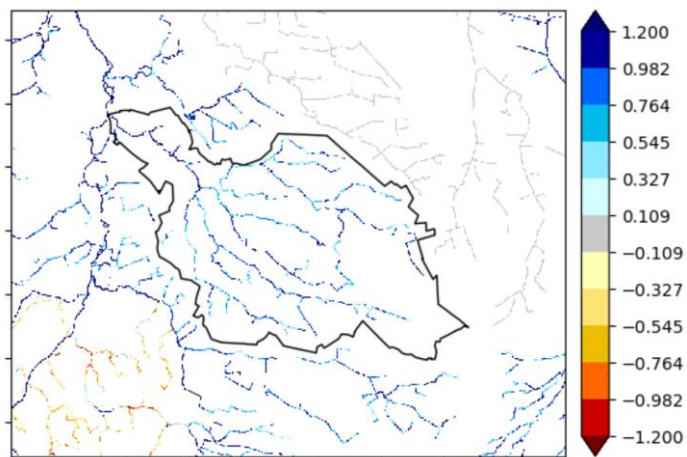
- Verwijderen van alle detailontwatering (buisdrainage en detailwatergangen),
- Geen onttrekking toestaan voor beregening.

Daarnaast is

- Alle detailontwatering in België verwijderd,
- De drainagehoogte van een groot deel van de grote waterlopen in het modelgebied aangepast naar 0.3m-mv: grofweg alle beken met een KRW-doelstelling en de bovenlopen ervan (Figuur 2.9). Voor deze waterlopen is de drainage aangepast naar een drooglegging van 0.3 m-mv. Deze grote waterlopen zijn alleen drainerend; er vindt geen infiltratie plaats vanuit de beken richting het grondwater.



Figuur 2.8 Ligging grondwaterafhankelijke natuur (groen) in het modelgebied, met in oranje de bufferzones van 200m rondom de grondwaterafhankelijke natuur.



Figuur 2.9 Aanpassing waterpeil hoofdwatgangen (m). Een blauwe kleur geeft een verhoging van het waterpeil in de watergang weer. Buiten het stroomgebied van de Chaamse beken komt ook verlaging van het waterpeil voor, hier waren de geschematiseerde peilen al erg ondiep, naar verwachting is het effect op het interessegebied verwaarloosbaar.

2.2.2.2

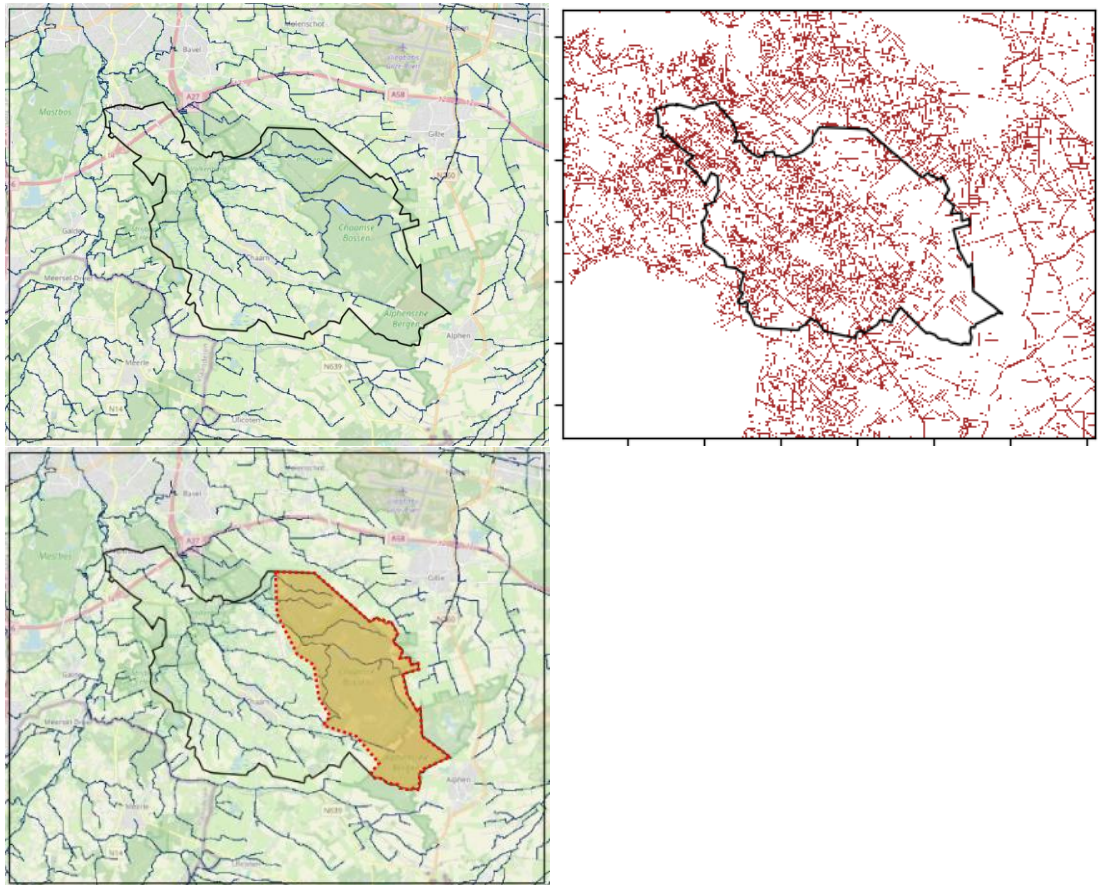
Varianten voor het onderzoeken van de systeemwerking van ontwateringsmaatregelen

Deze varianten zijn (in tegenstelling tot de variant in paragraaf 2.2.2.1) nieuw gerapporteerde berekeningen. Het doel van deze varianten is het beter in beeld krijgen van de effectiviteit van maatregelen in verschillende onderdelen van het ontwateringssysteem (grote waterlopen of de detailwatergangen) en op verschillende plekken in het landschap.

De systeemwerking van verschillende maatregelen is onderzocht met de volgende varianten:

- A. Ontwateringsniveau van alle hoofdwatertgangen in het stroomgebied verhogen met 30 cm (Figuur 2.10, linksboven),
- B. Ontwateringsniveau van alle detailwatergangen in het stroomgebied verhogen met 30 cm (Figuur 2.10, rechtsboven),
- C. Ontwateringsniveau van alle hoofd- en detailwatergangen in het stroomgebied verhogen met 30 cm,
- D. Ontwateringsniveau van alle hoofd- en detailwatergangen in het hooggelegen infiltratiegebied verhogen met 30 cm (Figuur 2.10, linksonder).

De aanpassing van het ontwateringssysteem is kleiner dan de aanpassing die in de 'variant voor het verhogen van sponswerking' (vorige paragraaf, 2.2.2.1) is beschreven. De resultaten van deze 'systeemwerking' varianten dienen dus alleen onderling vergeleken te worden en niet met de variant uit paragraaf 2.2.2.1)



Figuur 2.10 Watergangen behorend tot het hoofdwatersysteem (linksboven) en ontwatering die behoort tot het detailwatersysteem (rechtsboven). Linksonder geeft het infiltratiegebied weer.

2.3 Analyse

De analyse richt zich op het analyseren van de veranderingen in het hydrologische systeem ten opzichte van de referentiesituatie. Daarbij richt de analyse zich specifiek op hydrologische grootheden die verband houden met verschillende gebruiksfuncties van het stroomgebied (grondwaterstand, GxG, Ta/Tp, gebiedsafvoer). Voor variant 'maatregelen voor het vergroten van de sponswerking' wordt, naast een analyse van de grondwaterstanden en gebiedsafvoer, toegelicht wat de verwachte effecten van de maatregelen zijn op de functies landbouw en natuur in het stroomgebied. Voor de 'Varianten voor het onderzoeken van de systeemwerking van ontwateringsmaatregelen' richt de analyse zich op de werking van de maatregel op de grondwaterstand (GxG) en gebiedsafvoer.

Ook is er aandacht voor relatief droge zomers. Tabel 2-2 geeft middels de Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI, (Vicente-Serrano et al., 2010)) per seizoen in de rekenperiode weer of deze periode relatief droog of relatief nat was. Negatieve waarden duiden op relatief droge perioden (onder -1: droog, onder -1.5: erg droog, onder -2: extreem droog), positieve waarden op relatief natte perioden (boven 1: nat, boven 1.5: erg nat, boven 2: extreem nat). Kenmerkende jaren zijn bijvoorbeeld 1996, waarbij een droge winter wordt gevolgd door een normale zomer, en 2003, waarbij een normale winter wordt gevolgd door een erg droge zomer, en weer wordt gevolgd door een erg natte winter. Deze waarden zijn relatief ten opzichte van het klimaatgemiddelde. Voor de opgelegde WH2050 klimaatreeks zijn deze waarden dus relatief ten opzichte van het WH2050 klimaat, en niet ten opzichte van het huidige klimaat.

Tabel 2-2 Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) per seizoen voor de periode 1995-2004. Met de kleuren is aangegeven of het seizoen nat, erg nat, extreem nat (blauwe kleuren) of droog, erg droog of extreem droog was.

Jaar	winter	voorjaar	zomer	herfst
1995	2	0.4	-1.2	-0.07
1996	-1.7	-1.2	-0.3	0.4
1997	-1.3	-0.3	-0.2	-1.2
1998	-0.5	1.5	1.1	2.3
1999	0.4	0.4	-0.2	-0.5
2000	1.4	1.2	-0.3	1.5
2001	0.6	0.5	-0.1	1.5
2002	1.6	-0.5	0.9	0.1
2003	-0.3	-0.4	-1.7	-0.7
2004	1.5	-1.1	1.6	-0.4

2.4 Organische stof en een gezonde bodem

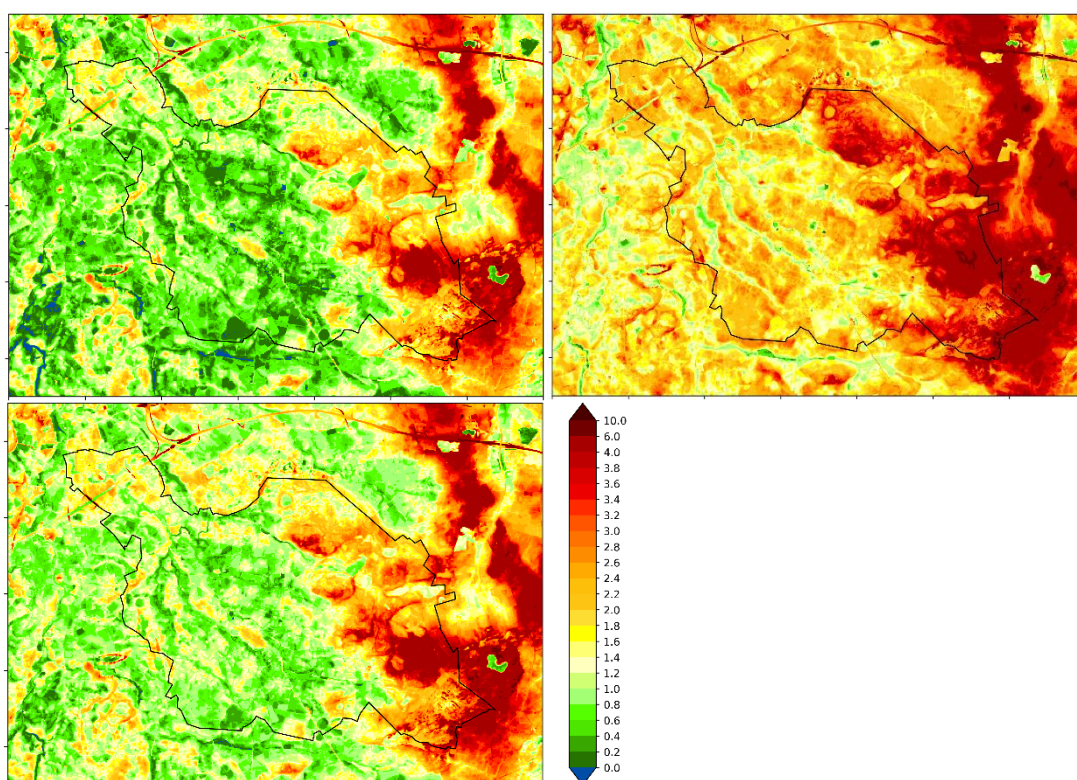
Uit een eerste verkenning bleek het niet mogelijk het vergroten van organische stof mee te nemen in de gemodelleerde varianten, omdat er geen goede vertaling naar geschikte modelparameters voor handen is. De relatie tussen de hoeveelheid organische stof in de bodem en de sponswerking van het systeem is daarom onderzocht door middel van literatuuronderzoek. In dit literatuuronderzoek is gekeken naar (1) de processen die de relatie tussen organische stof en sponswerking bepalen, (2) welke maatregelen kunnen worden toegepast om organische stof en sponswerking te vergroten en (3) wat kan worden geleerd uit de internationale literatuur. Bij dit literatuuronderzoek werd duidelijk dat organische stof één van de onderdelen is van een gezonde bodem, en dus is uiteindelijk ook gekeken naar (4) het effect van algemene bodemverbetering op sponswerking.

3 Resultaten

3.1 Referentiesituatie

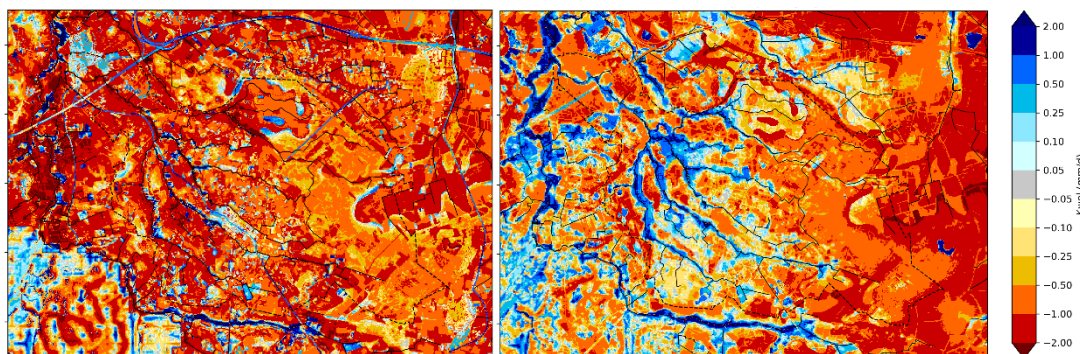
3.1.1 Grondwater

Figuur 3.1 geeft de grondwaterstandskarakteristieken (Gemiddeld Hoogste, Laagste en Voorjaars Grondwaterstand) voor de referentiesituatie. Zoals beschreven in de methode (paragraaf 2.2.1 en 2.2.2) zijn alle berekeningen uitgevoerd met klimaatscenario WH 2050 ('sterke klimaatverandering') uit de KNMI '14 klimaatscenario's. De referentiesituatie betreft dus ook de situatie onder dit klimaatscenario. Grondwaterstanden liggen in de wintersituatie in het lage deel van het stroomgebied nabij maaiveld, in droge perioden zakt de grondwaterstand in de lage delen op ongeveer 1 m onder maaiveld. In het hoge deel van het stroomgebied zijn jaarrond diepe grondwaterstanden te vinden. De voorjaarsgrondwaterstanden liggen in de beekdalen rond de halve meter onder maaiveld.



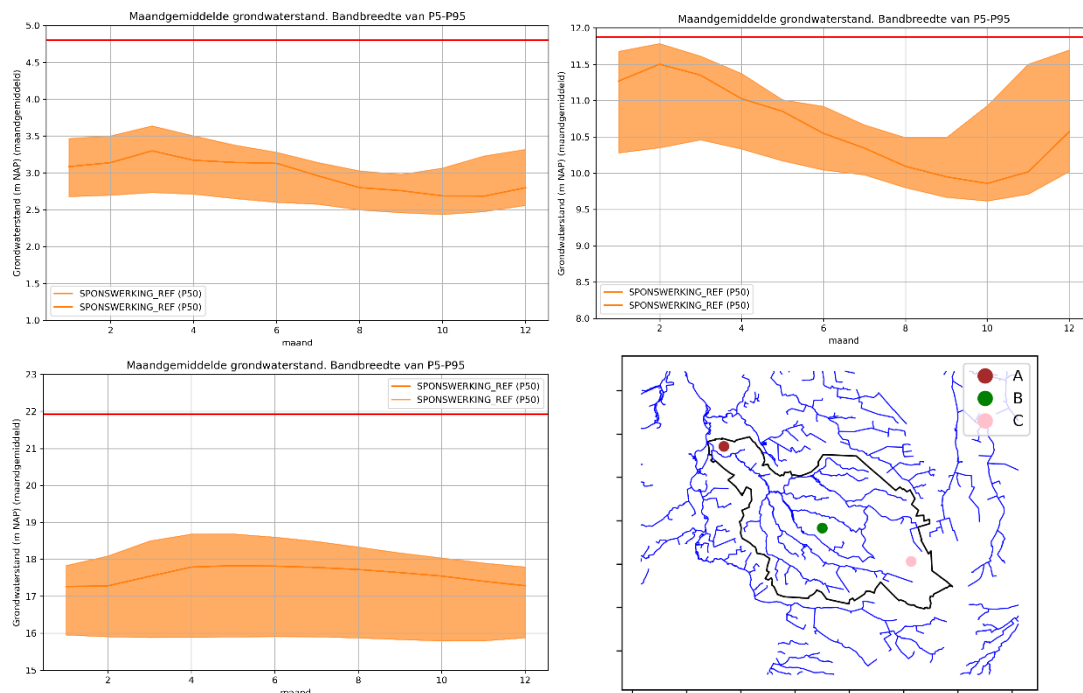
Figuur 3.1 Gemiddelde Hoogste Grondwaterstand (GHG, linksboven), Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG, rechtsboven) en Gemiddelde Voorjaarsgrondwaterstand (GVG, onder) in de referentiesituatie (Klimaat WH2050).

Met kwelstromen (en opwaartse stroming van grondwater richting het oppervlak) wordt voor natuurwaarden belangrijk basenrijk grondwater aangevoerd. Figuur 3.2 geeft de kwel- en wegzijgingsflux naar het ondiepe grondwater voor een gemiddelde winter- en zomersituatie. Dit is de flux die vanuit het grondwater naar boven stroomt (stroming door de onderkant van de bovenste modellaag), maar dit betreft niet per se kwelwater dat ook tot aan de wortelzone stroomt. Door de hogere grondwaterstanden in de winter beperkt de opwaartse stroming vanuit het grondwater zich goeddeels tot de grotere beken. In de zomer is dit anders, het gebied waar een opwaartse stroming is, breidt zich uit tot soms honderden meters afstand van de beek. Het gebied waar kwel ook tot in de wortelzone komt zal kleiner zijn dan deze zone, maar dit kan niet met het grondwatermodel berekend worden.



Figuur 3.2 Kwel (positief) en wegzijging (negatief) in de winter (links) en zomersituatie (rechts).

Figuur 3.3 geeft de bandbreedte in berekende grondwaterstanden voor drie kenmerkende locaties in het stroomgebied; dit is de maandelijks gemiddelde en het 5 en 95 percentiel van de maandelijks grondwaterstand gedurende de hele modelperiode. Grondwaterstanden rond de monding van de beek (locatie A, waar de Chaamse Beek in de Mark uitmondt) kennen relatief weinig seizoensmatige dynamiek, de grondwaterstand wordt hier sterk beïnvloed door de aanwezige ontwatering. In het overgangsgebied is juist een sterke seizoensdynamiek zichtbaar. Grondwaterstanden zijn hier ondiep, maar minder direct beïnvloed door het oppervlaktewater. De respons op neerslag en verdamping is hier het meest direct. In het hoge infiltratiegebied is de seizoensmatige dynamiek juist weer klein, het kost tijd voordat infiltrerend regenwater het grondwater bereikt, veranderingen worden hierdoor gedempt. De hoogste grondwaterstanden treden hier gemiddeld 1 of 2 maanden later op dan in het overgangsgebied.



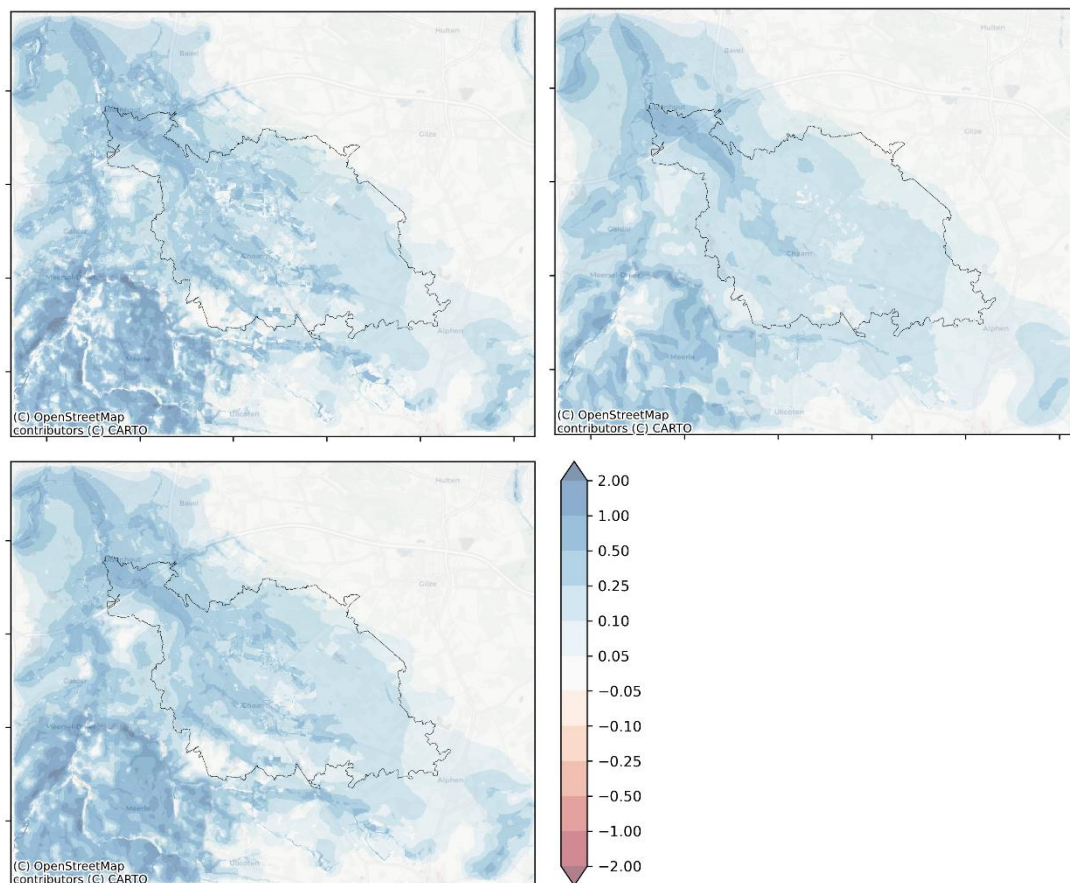
Figuur 3.3 Variatie bandbreedte grondwaterstand (mNAP, horizontale rode lijn is maaiveldhoogte) op verschillende locaties in het stroomgebied in de referentiesituatie. Het oranje vlak is de 5 tot 95 percentiel van de grondwaterstanden per maand, de rode lijn binnen het vlak is de gemiddelde grondwaterstand per maand. Locatie A (linksboven) bevindt zich nabij de monding van de Chaamse beek (zie kaart rechtsonder), locatie B (rechtsboven) op de overgangszone van het lagere kwel- en hogere infiltratiegebied, locatie C (linksonder) bevindt zich in het infiltratiegebied.

3.2 Resultaat variant “maatregelen voor het vergroten van de sponswerking”

Deze paragraaf beschrijft de resultaten van de variant “maatregelen voor het vergroten van de sponswerking”, zoals beschreven in paragraaf 2.2.2.1.

3.2.1 Grondwaterstanden

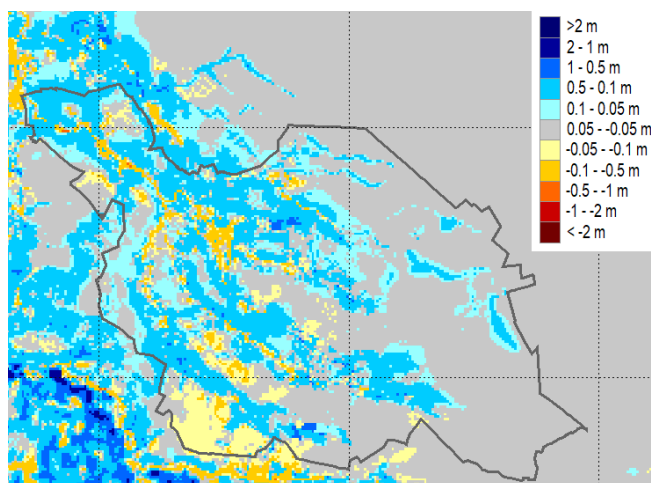
Door de genomen maatregelen wordt de grondwaterstand in het hele stroomgebied flink verhoogd (Figuur 3.4). Dit betreft zowel hoge als (in mindere mate) lage grondwaterstanden. De verhoging van de grondwaterstand is merkbaar in het gehele stroomgebied, en loopt op tot lokaal meer dan een meter. De verhoging van het oppervlaktewaterpeil bedraagt op deze locaties ook meer dan een meter (Figuur 2.9). Het is evenwel zeker niet zo dat de verhoging van de grondwaterstand overal gelijk op gaat met de geïmplementeerde verhoging van het oppervlaktewaterpeil. In de infiltrerende gebieden neemt de grondwaterstand beduidend minder toe dan het oppervlaktewaterpeil.



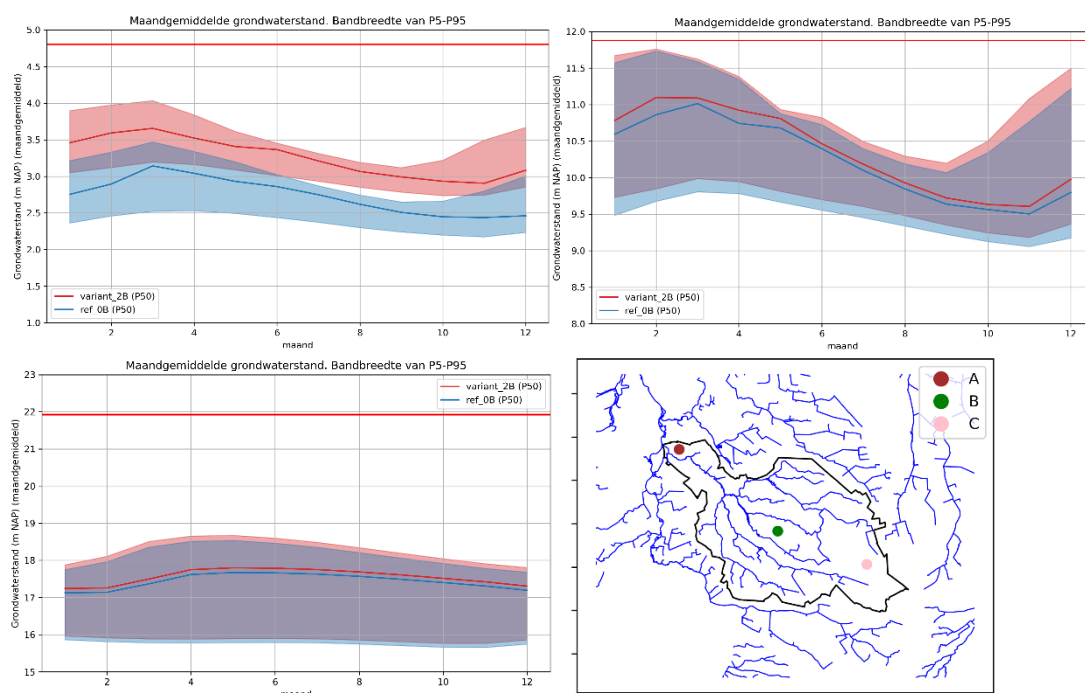
Figuur 3.4 Verandering van de Gemiddelde Hoogste Grondwaterstand (GHG, linksboven), Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG, rechtsboven) en Gemiddelde Voorjaarsgrondwaterstand (onder) ten opzichte van de referentiesituatie.

Sponswerking impliceert het vullen van een spons in natte tijden, waarna het vastgehouden water in droge tijden beschikbaar is om natuurgebieden natter te maken en de basisafvoer hoger te houden en de waterbeschikbaarheid voor de landbouw te verhogen. Figuur 3.6 geeft het jaarlijkse verloop van de grondwaterstand voor drie locaties in het stroomgebied voor de situatie met sponswerking maatregelen en de referentiesituatie. Zoals ook al duidelijk bleek uit de grondwaterkarakteristieken (Figuur 3.4), zorgen de sponswerking maatregelen voor een gebiedsbrede verhoging van de grondwaterstand. De verhoging van de GHG is op de meeste plekken groter (10-50 cm) dan de verhoging van de GLG (Figuur 3.5). Het jaarlijkse verloop van de grondwaterstand op de drie locaties in Figuur 3.6 lijkt wel een evenredige toename te hebben in de zomer en de winter, deze drie locaties liggen toevallig op een plek waar de dGHG niet hoger is dan de dGLG.

Ook al is de toename in GHG groter dan de toename in GLG, er is in deze studie nog wel een vrij groot effect van maatregelen in de zomer. Waarschijnlijk wordt dit relatief grote effect in de zomer veroorzaakt doordat de meeste grote waterlopen worden verhoogd (zowel de Chaamse Beek als de Mark), waardoor de regionale ontwateringsbasis zowel in de winter als zomer wordt opgehoogd.



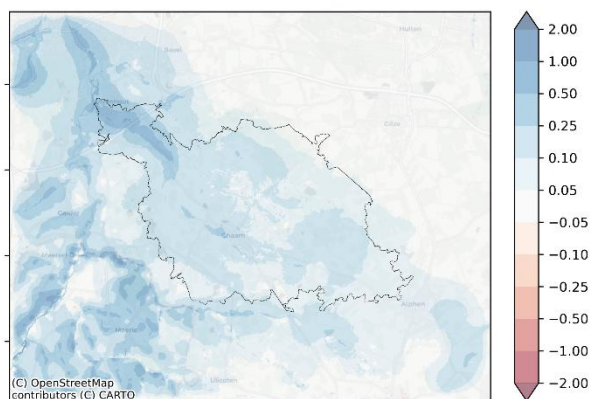
Figuur 3.5 Verskil tussen effect op de GHG en de GLG. Bij een blauwe kleur is het effect op de GHG groter dan het effect op de GLG.



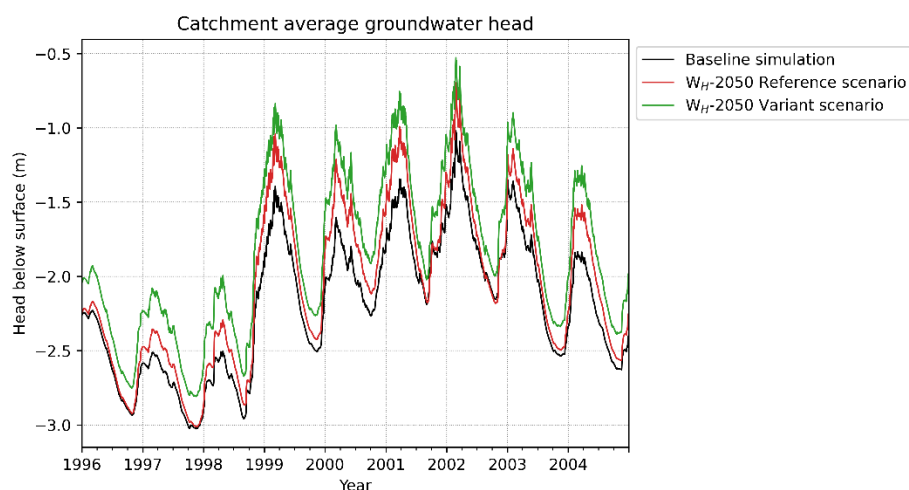
Figuur 3.6 Variatie bandbreedte grondwaterstand (mNAP, rode lijn is maaiveldhoogte) op verschillende locaties in het stroomgebied bij Sponswerking maatregelen (variant_2B) en de referentiesituatie (ref_0B). Locatie A (linksboven) bevindt zich nabij de monding van de Chaamse beek (zie kaart rechtsonder), locatie B (rechtsboven) op de overgangszone van het lagere kwel- en hogere infiltratiegebied, locatie C (linksonder) bevindt zich in het infiltratiegebied.

In Figuur 3.7 wordt het effect van de sponsmaatregelen op de LG3 (het gemiddelde van de drie laagste grondwaterstanden) in 2003 getoond. Dit effect is kleiner dan het effect op de GLG, wat betekent dat deze sponsmaatregelen in een droge zomer minder effectief zijn dan gemiddeld in de zomer. Dit komt overeen met eerdere studies (zie bijvoorbeeld De Louw et al., 2022). Het effect van een verhoging van de drainagebasis neemt namelijk af bij dalende grondwaterstanden.

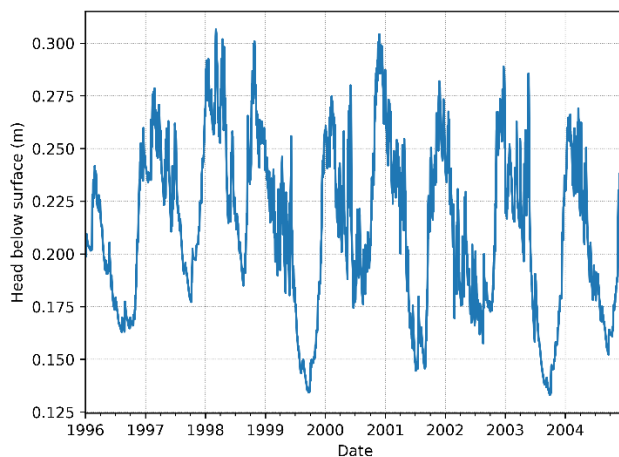
In Figuur 3.8 wordt de gemiddelde grondwaterstand van het hele stroomgebied getoond voor de referentiesituatie (zowel in huidig klimaat als bij sterke klimaatverandering) en het scenario met sponsmaatregelen. Figuur 3.9 toont het verschil tussen de referentie en het scenario (effect van de sponsmaatregelen). Hieruit wordt duidelijk dat de maatregelen een groter effect hebben in de winter dan in de zomer. Het effect van de sponsmaatregelen in een droog jaar als 2003 is iets kleiner (een gemiddelde stijging van ongeveer 15 cm in de zomer) dan de jaren ervoor (met meer gemiddelde neerslagwaardes), zoals ook duidelijk werd uit Figuur 3.7.



Figuur 3.7 Verandering van de LG3 in 2003 als gevolg van de sponsmaatregelen ten opzichte van de referentiesituatie.



Figuur 3.8 Gemiddelde grondwaterstand in het stroomgebied voor de referentiesituatie onder huidig klimaat ("Baseline simulation", zwart), referentiesituatie onder KNMI'14 WH-klimaat ("Wh 2050 Reference scenario", rood) en het scenario met sponsmaatregelen ("Wh 2050 Variant scenario", groen). Kopie figuur uit Wittman et al (2025, in prep.)

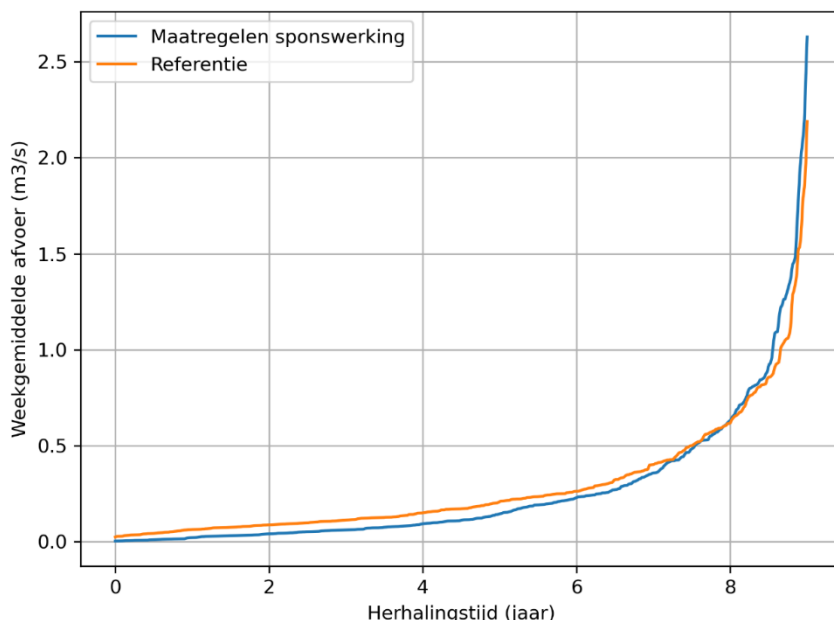


Figuur 3.9 Kopie uit Wittman et al (2025, in prep.): Verschil tussen de gemiddelde grondwaterstand in het hele stroomgebied voor de referentie en scenario met sponsmaatregelen (beide onder KNMI'14 WH klimaatscenario), oftewel het effect van de sponsmaatregelen.

3.2.2 Afvoer

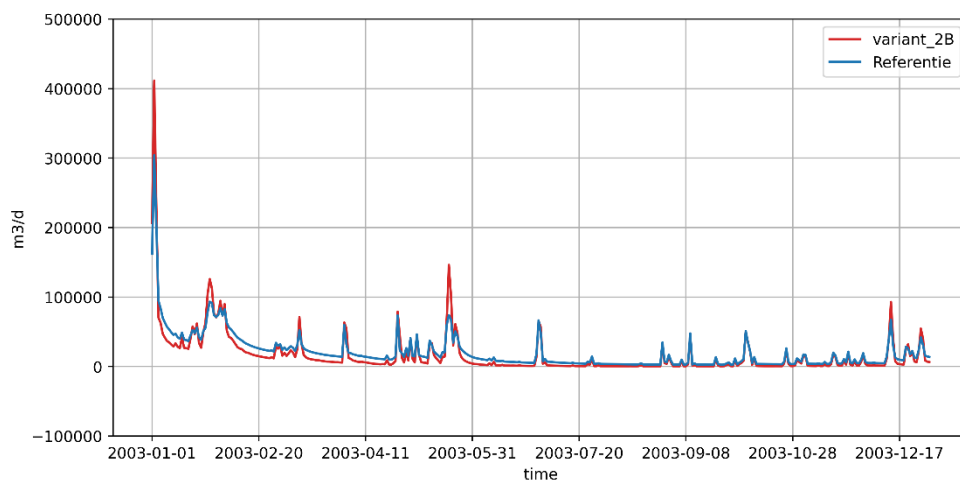
Door de implementatie van de sponswerking maatregelen verandert de afvoer karakteristiek. De herhalingsstijd van de afvoeroverschrijding is gegeven in Figuur 3.10¹. In de figuur is zichtbaar dat de afvoer karakteristiek door de maatregelen verschuift naar een lagere basisafvoer, met hogere pieken in natte perioden. De laagste afvoeren nemen daarbij af tot bijna nul. Voor de aquatische natuurdoelen (KRW) is juist een voldoende hoge basisafvoer nodig, dus deze set aan maatregelen is ongunstig voor de aquatische natuur. Deze verschuiving is het resultaat van de vernatting van het gebied, vooral door het instellen van hogere beekwaterpeilen (hogere drainagebasis). Door de hogere gehanteerde peilen in het oppervlaktewater ligt de drainagebasis van het systeem hoger. Bij een hogere (en dus ondiepere) drainagebasis zal de drainage van grondwater daardoor eerder stoppen bij eenzelfde grondwaterstand. Daardoor wordt de grondwaterafvoer naar de beek geremd en neemt de basisafvoer af. Tegelijkertijd is het systeem natter, en kan er bij piekbuien meer snelle afvoer plaatsvinden, zoals oppervlakkige afstroming. Vanaf een herhalingsstijd van eens in de acht jaar neemt de afvoer toe, daaronder neemt de afvoer juist af. Al met al laten de resultaten zien dat het tegenovergestelde effect bereikt is (met de gebruikte set aan maatregelen van variant 2B) dan waarschijnlijk gewenst is bij de implementatie van sponsmaatregelen: de basisafvoer neemt af en de piekafvoer neemt toe. Er dient dus onderzocht te worden welke aanvullende maatregelen mogelijk zijn om ook de basisafvoer te laten toenemen en de piekafvoer te laten afnemen.

¹ Merk op dat de figuur de totale berekende afvoer van het grondwater naar het oppervlaktewater toont, en niet de daadwerkelijke beekafvoer. De figuur negeert het aandeel van neerslag direct op het beekoppervlak en het effect van berging in het oppervlaktewater (deze componenten worden niet berekend met het toegepaste grondwatermodel). Dit betreft overigens maar een zeer klein deel van de afvoer.



Figuur 3.10 Herhalingstijd overschrijding berekende grondwaterafvoer Chaamse beken voor Maatregelen sponswerking en de referentiesituatie.

Figuur 3.11 geeft het verloop van de afvoer in het droge jaar 2003. Na een normale winter (zie ook Tabel 2-2 in paragraaf 2.3) en dito voorraadvorming, is er in het scenario Variant 2B over het jaar meestentijds sprake van een lagere afvoer dan in de referentiesituatie. Alleen bij snelle piekafvoeren ligt de afvoer in de situatie met maatregelen hoger dan in de referentiesituatie. Hierbij is het belangrijk om nogmaals te benadrukken dat er hier maar naar één set aan maatregelen gekeken is, mogelijk is het met een andere combinatie van maatregelen wel mogelijk om de basisafvoer te verhogen en piekafvoer te verlagen. De hogere ontwateringsbasis in het maatregelscenario verlagen de afvoer van grondwater naar het ontwateringssysteem, terwijl bij piekneerslagen door de hogere grondwaterstanden het snelle ontwateringssysteem meer wordt aangesproken.

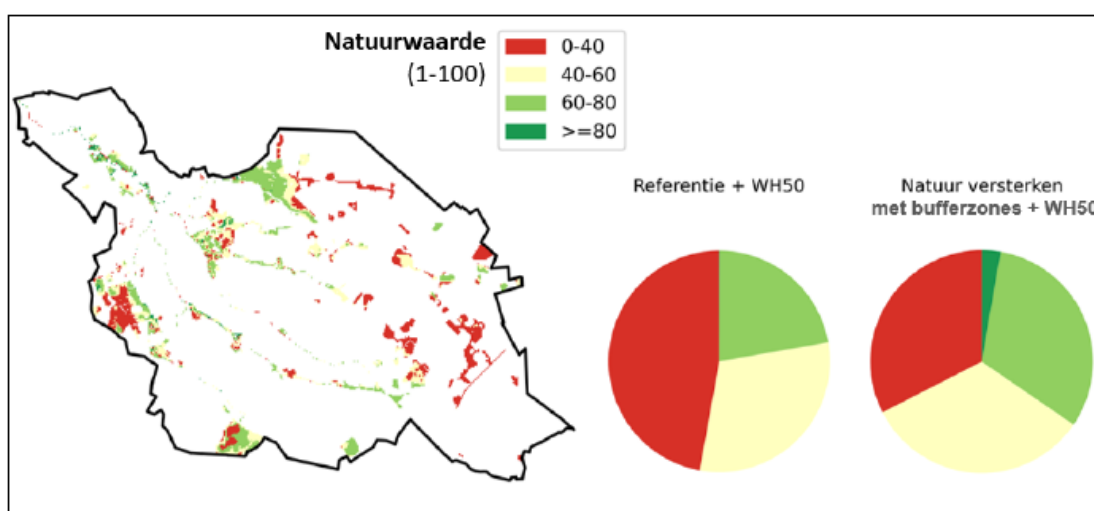


Figuur 3.11 Verloop afvoer bij Sponswerking maatregelen (variant_2B) en de referentiesituatie (ref_0B) voor het droge jaar 2003.

3.2.3 Terrestrische natuur

Voor verder inzicht in de werking van sponswerking maatregelen op de grondwatersituatie in grondwaterafhankelijke natuurgebieden is binnen KLIMAP ook de Waterwijzer Natuur (onderdeel PROBE) ingezet (Clevers & Nijp, 2023). Met PROBE kan worden bepaald hoe veranderingen in klimaat, al dan niet in combinatie met waterbeheer, doorwerken op de vegetatie. Door rekening te houden met interacties tussen klimaat, water, bodem, en vegetatie, worden klimaatrobuuste standplaatscondities gesimuleerd. Hierdoor is PROBE zeer geschikt voor toekomstverkenningen. De verandering in botanische natuurwaarde (berekend door PROBE) is gebruikt om vast te stellen of de sponsmaatregelen een positief of negatief effect hebben op de natuurgebieden in het stroomgebied. Dit is beschreven in Hendriks et al. (2024), gebaseerd op de resultaten uit Clevers & Nijp (2023).

Als gevolg van de vernatting die optreedt door de sponsmaatregelen, kunnen er andere natuurtypes voorkomen in het gebied, welke doorgaans een hogere natuurwaarde hebben. De analyses uit Clevers & Nijp (2023) en Hendriks et al. (2024) (zie Figuur 3.12) laten zien dat de natuurwaarde binnen de huidige natuurgebieden met korte vegetatie (de bosgebieden met houtige vegetatie zijn buiten beschouwing gelaten) toeneemt als gevolg van de sponsmaatregelen.

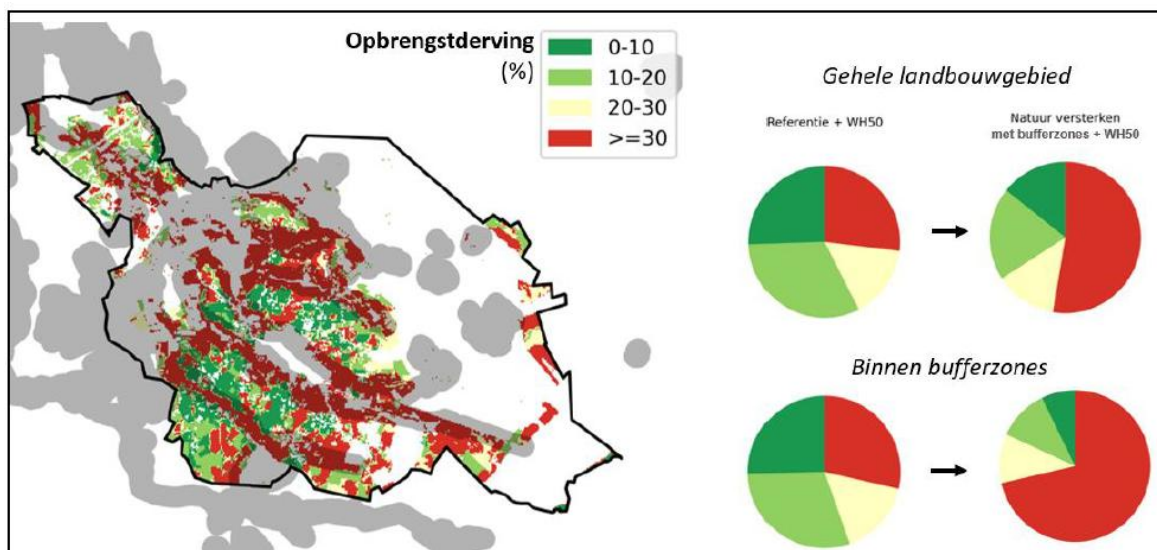


Figuur 3.12 Resultaten van de berekeningen van de natuurwaarde in de huidige natuurgebieden met korte vegetatie. De kaart laat de natuurwaarde in de referentiesituatie (bij KNMI'14 WH scenario) zien en de taartdiagrammen tonen de fractie van het natuurgebied met een bepaalde klasse van de natuurwaarde, voor links: referentie (met klimaatscenario) en rechts: het scenario met sponsmaatregelen (met klimaatscenario). Kopie figuur uit Hendriks et al. (2024).

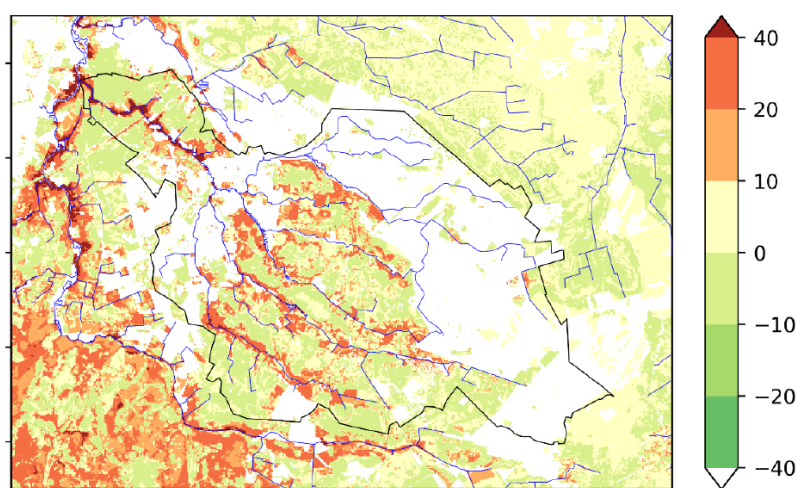
3.2.4 Landbouw

Voor verder inzicht in de werking van sponswerking maatregelen op de opbrengst van de landbouw is binnen KLIMAP ook de Waterwijzer Landbouw toegepast (Schoonderwoerd et al., 2024a; Hendriks et al. 2024). Met behulp van de Waterwijzer Landbouw kan de mate van opbrengstderving van de landbouw (in %) in beeld worden gebracht. De opbrengstderving is verschil tussen de gewasopbrengst (in euro's of in kilo's) onder optimale omstandigheden en de opbrengst onder de 'werkelijke' (gemodelleerde) omstandigheden. De landbouwkundige opbrengstderving wordt bepaald door rekening te houden met te droge en te natte omstandigheden. Te natte omstandigheden beïnvloeden hierbij zowel de duur van het groeiseizoen (door indirecte effecten, zoals uitstel van voorbereidende werkzaamheden of vertraagde kieming) als de gewasontwikkeling gedurende het groeiseizoen (zuurstofstress).

Figuur 3.13 toont de opbrengstderving in het scenario met sponsmaatregelen (variant 2B) en laat zien (zoals ook beschreven in Schoonderwoerd et al., 2024a; Hendriks et al. 2024) dat de opbrengstderving in de landbouw als gevolg van de maatregelen toe zal nemen. De droogteschade neemt af, maar de natschade neemt toe. In het scenario met sponsmaatregelen valt bijna driekwart van het landbouwgebied binnen de bufferzones binnen de categorie met een opbrengstderving van meer dan 30%. Figuur 3.14 toont de ruimtelijke verandering in opbrengstderving in de situatie met sponsmaatregelen ten opzichte van de referentiesituatie. Dit figuur laat ook zien dat de opbrengstderving in de gebieden rondom de beken toeneemt, maar daarbuiten ook iets afneemt.



Figuur 3.13 Resultaten van de berekeningen van de opbrengstderving in het gehele landbouwgebied en het gebied in de bufferzones. De kaart laat de opbrengstderving zien voor de situatie met de sponswerking maatregelen (bij KNMI'14 WH scenario). De bovenste taartdiagrammen tonen de fractie van het landbouwgebied met een bepaalde klasse van de natuurwaarde, voor links: referentie (met klimaatscenario) en rechts: het scenario met sponsmaatregelen (met klimaatscenario). De onderste taartdiagrammen tonen hetzelfde, maar dan voor alléén het landbouwgebied binnen bufferzones. Kopie figuur uit Hendriks et al. (2024).



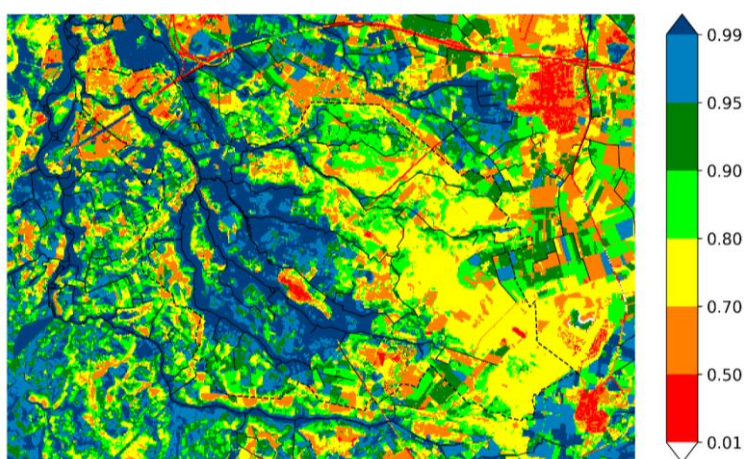
Figuur 3.14 Verandering in langjarig gemiddelde opbrengstderving in variant 2B ten opzichte van de referentiesituatie (beide onder klimaatscenario KNMI'14-WH). Kopie uit Schoonderwoerd et al. (2024a).

Een andere manier om naar de landbouwopbrengst in de zomer te kijken, zonder gebruik te maken van de Waterwijzer Landbouw, is een analyse van de verdamping. Het grondwatermodel berekent op basis van het vochtgehalte van de wortelzone hoeveel een gewas verdampt en berekent daarnaast ook wat de potentiële verdamping is bij voldoende waterbeschikbaarheid. Wanneer de actuele gewasverdamping lager is dan de potentiële gewasverdamping, is er onvoldoende water aanwezig in de wortelzone. De gewasgroei is min of meer evenredig te veronderstellen met de ratio tussen de actuele en potentiële verdamping (Ta/Tp) en de gewasgroei is optimaal als de actuele verdamping gelijk is aan de potentiële verdamping.

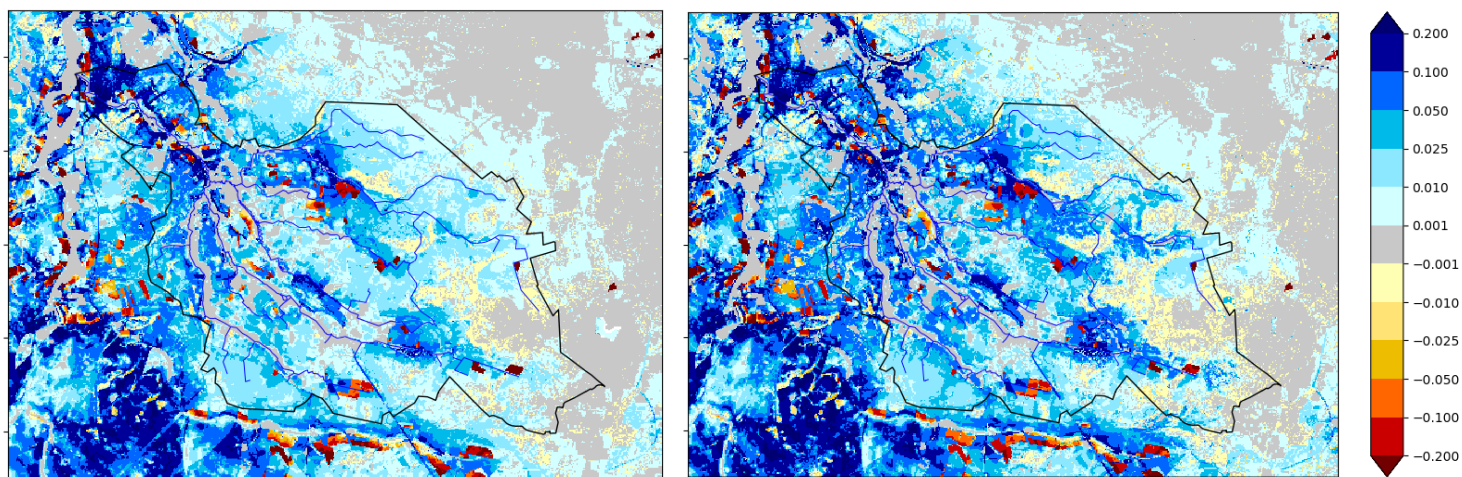
In Figuur 3.15 wordt het langjarig gemiddelde van Ta/Tp in het scenario met sponsmaatregelen getoond. Figuur 3.16 toont de verandering ten opzichte van de referentiesituatie, zowel op het langjarig gemiddelde als de situatie in 2003. Voor beide figuren geldt dat het effect op vegetatie in het gehele gebied getoond wordt, niet alleen in het landbouwgebied. Ta/Tp neemt in een groot deel van het gebied toe als gevolg van de sponsmaatregelen. Dat betekent dat er meer optimale gewasgroei kan plaatsvinden. In 2003 is de toename in Ta/Tp wat groter dan voor het langjarig gemiddelde geldt. Dat komt omdat de langjarig gemiddelde Ta/Tp in de referentiesituatie al beter op orde is dan in 2003; er is dan dus geen extra effect meer te behalen. Op enkele plekken treed een afname in Ta/Tp op, dit zijn gebieden waar beregening plaatsvindt in de referentiesituatie, maar in de bufferzones in het scenario niet meer.

We hebben in deze studie niet in beeld gebracht hoe de beregeningsbehoefte verandert als gevolg van de toename in Ta/Tp . Uit een eerdere studie (De Louw et al., 2022) is wel gebleken dat een verhoging van de gehele ontwateringsbasis van 30 cm voor het gebied van Waterschap De Dommel maar voor een afname van de totale beregeningsbehoefte van 7-8% zorgt.

De resultaten van de Waterwijzer Landbouw en de Ta/Tp laten zien dat de condities in de zomer voor optimale gewasgroei iets toenemen, maar dat de flinke vernatting als gevolg van de maatregelen voor een totale opbrengstderving zorgt. Dit komt vooral omdat de natschade (berekend door de WWL) toeneemt. De sponsmaatregelen uit dit scenario kunnen dus lokaal een positief effect voor de landbouw hebben, doordat de opbrengst in de zomer toeneemt, maar zorgen op de schaal van het stroomgebied voor een negatief effect, doordat de natschade sterk toeneemt. Ook zijn de maatregelen effectiever voor een droge zomer dan het langjarig gemiddelde.



Figuur 3.15 Langjarig gemiddelde Ta/Tp in de variant met sponsmaatregelen. Een waarde van 1 geeft optimale verdamping weer.



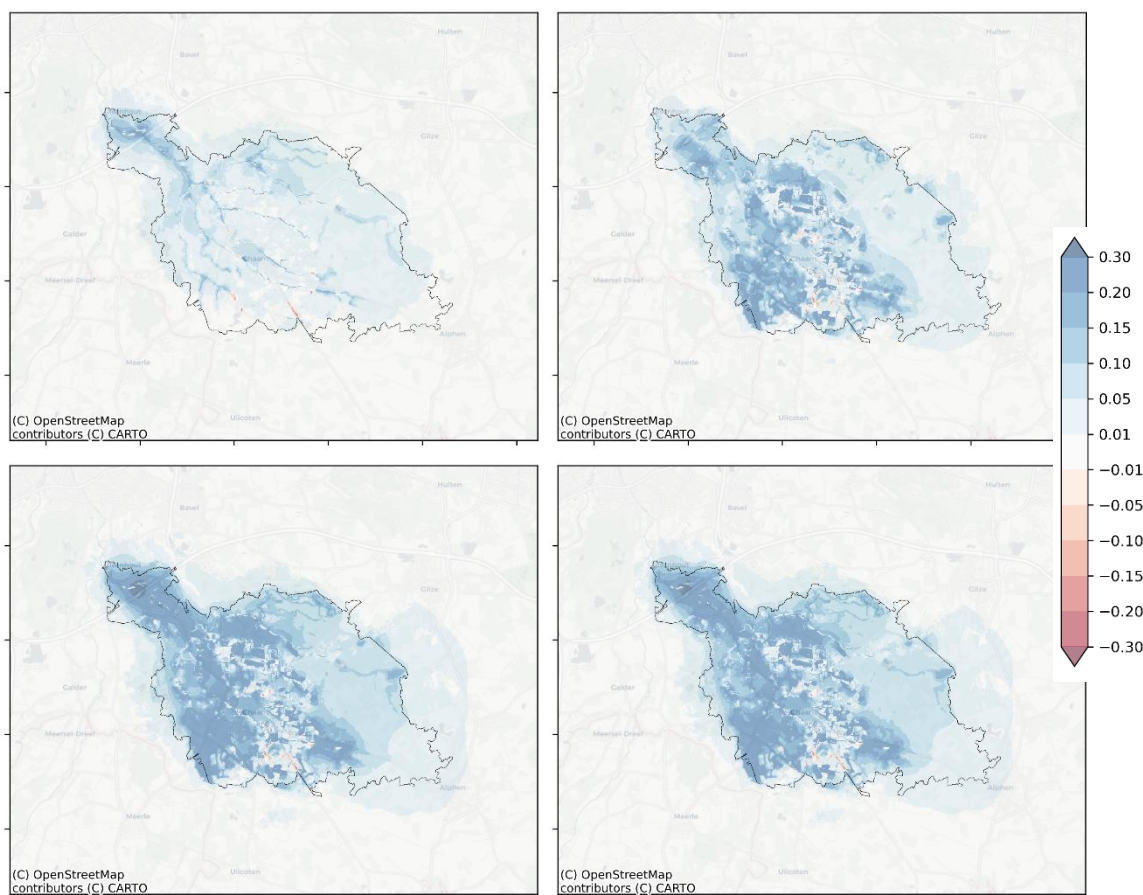
Figuur 3.16 Verandering in Ta/Tp in de variant met sponsmaatregelen ten opzichte van de referentiesituatie. Links: langjarig gemiddeld (1995-2005), rechts: 2003.

3.3 Resultaat varianten 'systeemwerking van ontwateringsmaatregelen'

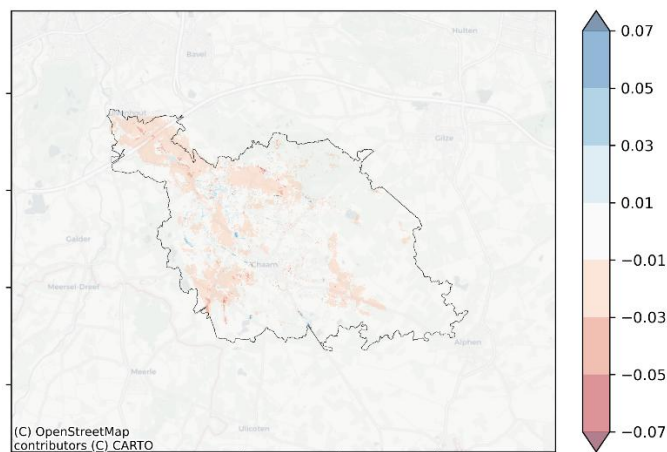
Deze paragraaf beschrijft de resultaten van de “varianten voor het onderzoeken van de systeemwerking”, zoals beschreven in paragraaf 2.2.2.2. De varianten zijn onderzocht binnen de Chaamse Beken, maar door de inzichten die met deze varianten worden opgedaan kunnen wel conclusies getrokken worden over de werking van ontwateringsmaatregelen in andere gebieden op de Hoge Zandgronden van Nederland (zoals andere beekdalen).

3.3.1 Grondwater

Met verschillende scenario's is het effect van de ruimtelijke ligging van maatregelen onderzocht. Figuur 3.17 en Figuur 3.19 geven de berekeningsresultaten voor de verandering in respectievelijk de Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand en Gemiddeld Laagste Grondwaterstand, voor het verhogen van de hoofdwatgangen (linksboven), de detailontwatering (rechtsboven) en de combinatie van beide maatregelen (linksonder). De plot rechtsonder geeft het opgetelde effect van beide afzonderlijke maatregelen.

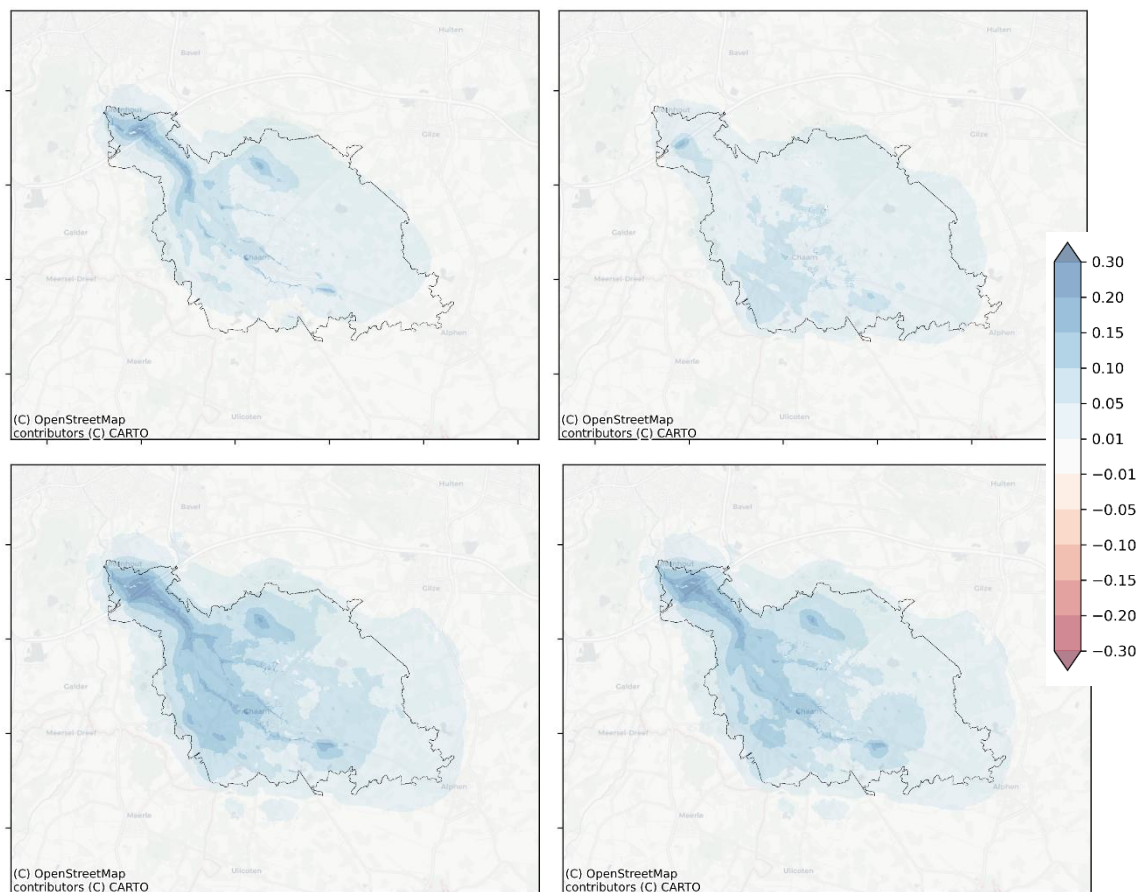


Figuur 3.17 Verschil in Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) met de referentiesituatie voor Verhogen hoofdwatgangen (linksboven), Verhogen detailwatgangen (rechtsboven), Verhogen hoofd- en detailwatgangen (linksonder), Opgeteld effect afzonderlijke maatregelen verhogen hoofd- en detailwatgangen (rechtsonder) (allemaal ten opzichte van de referentiesituatie).

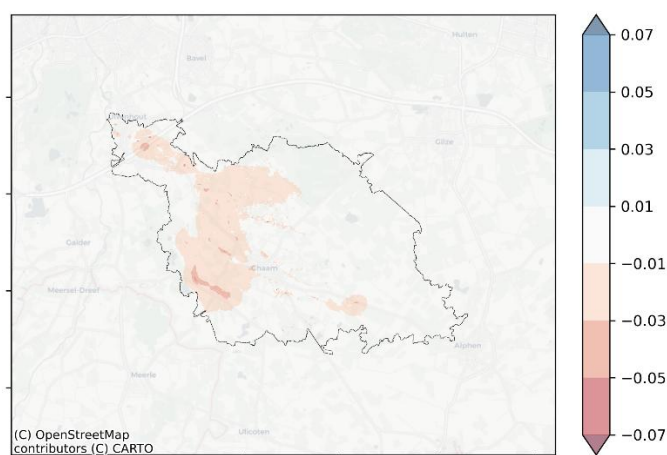


Figuur 3.18 Verschil tussen effect op de GHG van “Opgeteld effect afzonderlijke maatregelen verhogen hoofd- en detailwatergangen” (Figuur 3.17, rechtsonder) en “Verhogen hoofd- en detailwatergangen” (Figuur 3.17, linksonder). Een rode kleur geeft aan dat het effect van “Verhogen hoofd- en detailwatergangen” groter is.

Figuur 3.17 geeft de berekeningsresultaten voor de verandering van de Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand. De verhoging van de hoofdwaterlopen (linksboven) heeft een beperkt effect op de GHG. Dit komt doordat het aanpassen van ontwatering maar een beperkte ruimtelijke uitstraling heeft en dus is het effectgebied van een verhoging van de hoofdwaterlopen op grotere afstand van de beken maar beperkt. Daarbij is de detailafwatering bij hoge grondwaterstanden overal actief en niet verhoogd. Het gaat daardoor meer water afvoeren en heeft daarmee een dempend effect op de verhoging van de grondwaterstand. Wanneer juist de detailafwatering wordt verhoogd (rechtsboven) is een sterk ruimtelijk effect zichtbaar op de hoogste grondwaterstanden, deze worden over een groot gebied met meer dan 20 cm verhoogd. Het gecombineerde effect voor beide maatregelen is vrijwel gelijk aan de optelling van het effect van de afzonderlijke maatregelen (Figuur 3.18). Het opgetelde effect is lokaal maximaal 3 cm lager. Voor de gebieden waar de ophoging gelijk is, komt de GHG in beide scenario's ongeveer op maaiveldniveau, waardoor in beide gevallen de maximale hoogte bereikt. In de gebieden met een iets diepere GHG vindt er een iets hogere stijging plaats van de GHG bij het gecombineerde scenario ten opzichte van het opgetelde effect. De Gemiddelde Voorjaars Grondwaterstand (GVG) laat min of meer hetzelfde beeld zien als de GHG.

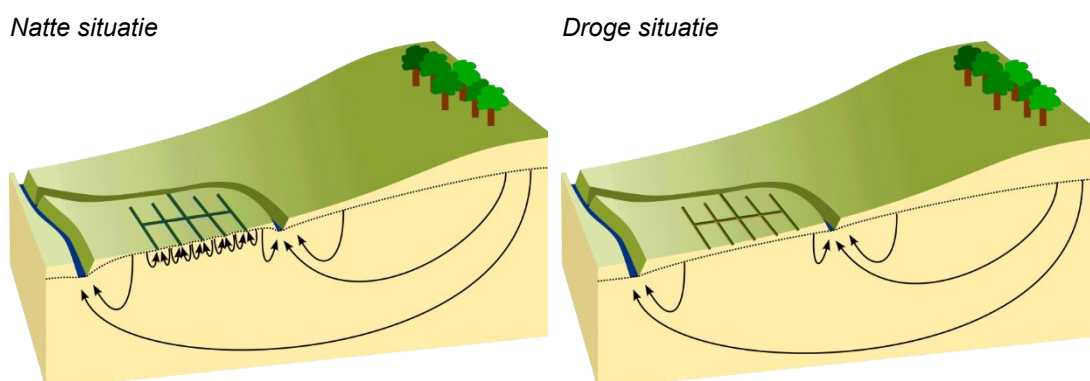


Figuur 3.19 Verschil in Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG) met de referentiesituatie voor Verhogen hoofdwatgangen (linksboven), Verhogen detailwatgangen (rechtsboven), Verhogen hoofd- en detailwatgangen (linksonder), Opgeteld effect afzonderlijke maatregelen verhogen hoofd- en detailwatgangen (rechtsonder).



Figuur 3.20 Verschil tussen effect op de GLG van “Opgeteld effect afzonderlijke maatregelen verhogen hoofd- en detailwatgangen” (Figuur 3.17, rechtsonder) en “Verhogen hoofd- en detailwatgangen” (Figuur 3.17, linksonder). Een rode kleur geeft aan dat het effect van “Verhogen hoofd- en detailwatgangen” groter is.

Figuur 3.19 geeft de berekeningsresultaten voor de verandering van de Gemiddeld Laagste Grondwaterstand. Het verhogen van de ontwateringsdiepte van ofwel de hoofdwatgangen, ofwel de detailontwatering geeft een ruimtelijk verschillend effect op de grondwaterstand. Wanneer de ontwatering met 30 cm wordt verhoogd in de hoofdwatgangen, stijgt de GLG in het benedenstroomse deel van het stroomgebied van zo'n 20 cm tot 5 cm op ongeveer 1 kilometer van de hoofdwatgangen (Figuur 3.19, linksboven). Meer bovenstrooms blijft het effect beperkt tot korte afstand van de watgang. Wanneer het detailwatersysteem met 30 cm wordt verhoogd, stijgt de GLG met name in het overgangsgebied en het benedenstroomse deel van het stroomgebied (Figuur 3.19, rechtsboven), met zo'n 5 tot 10 cm. **De verhoging van de GLG is over het algemeen lager bij de verhoging van het detailwatersysteem dan bij verhoging van de hoofdwatgangen.** Dit komt doordat de detailwatgangen vrij ondiep liggen en een ontwateringsdiepte hebben boven de GLG, oftewel de detailwatgangen staan droog in de zomer. Dit wordt schematische weergegeven in Figuur 3.21.

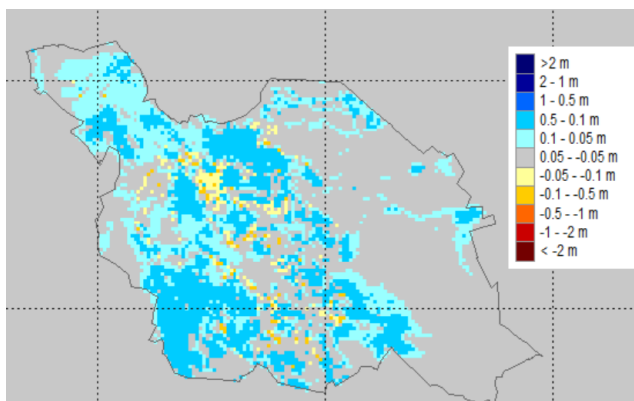


Figuur 3.21 Schematische doorsnede natte (links) en droge (rechts) situatie. In de droge situatie is de grondwaterstand tot onder het detailontwateringssysteem gezakt. De hoofdwatgangen zijn nog wel watervoerend, maar het detailontwateringssysteem 'doet niet meer mee' in de geohydrologie van het systeem.

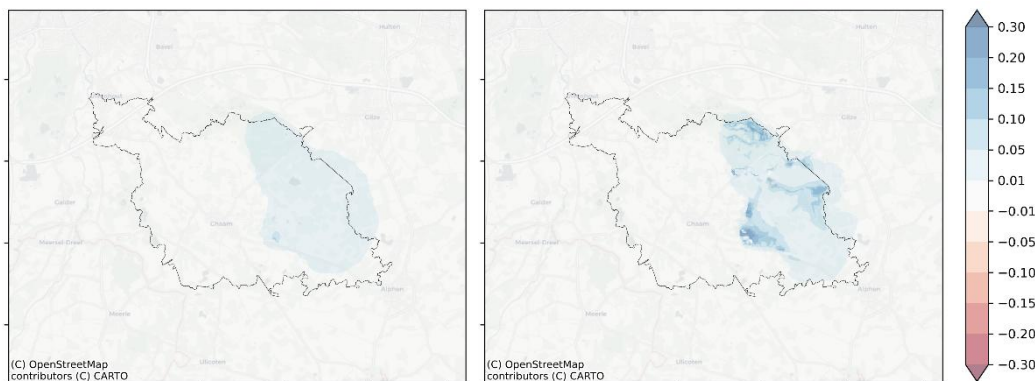
Figuur 3.20 geeft het verschil tussen het opgetelde effect op de GLG van de aanpassing van het detailwater en de hoofdwatlopen en het gecombineerde scenario. **Het gecombineerde effect van deze twee maatregelen is daarbij iets groter dan het opgetelde effect van de twee maatregelen afzonderlijk** (Figuur 3.19 rechtsonder). Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat bij alléén de aanpassing van de ontwateringsdiepte van de detailwatgangen, de hoofdwatgangen meer water gaan afvoeren. Dit doet het effect van de ophoging van de ontwateringsbasis gedeeltelijk teniet. Wanneer beide systemen gezamenlijk worden aangepakt, wordt voorkomen dat het water op een andere manier wordt afgevoerd. Daarbij geldt dat ook nog een aanpassing buiten het stroomgebied (zoals bijvoorbeeld een ophoging van de Mark) doorgevoerd moet worden om te voorkomen dat het grondwater alsnog via dit regionale systeem afgevoerd wordt.

Figuur 3.22 laat het verschil zien tussen het effect op GHG en GLG voor het gecombineerde scenario 'Verhogen hoofd- en detailwatgangen'. Het effect is in een groot gebied groter in de winter (GHG) dan in de zomer (GLG). Dit komt omdat het in de winter/ voorjaar lukt om de grondwaterstand omhoog te krijgen, maar gedurende het jaar raak je dit effect kwijt. Dit komt waarschijnlijk omdat het extra vastgehouden water weer wegstroomt naar de gebieden waar geen aanpassingen hebben plaatsgevonden, buiten het stroomgebied. Deze verschillen tussen GHG en GLG zijn groter dan bij het sponswerkingsscenario in de vorige paragraaf (3.2). In dat scenario was in een groter gebied de regionale ontwateringsbasis van het hoofdwatersysteem opgehoogd. Het verschil met de resultaten uit de vorige paragraaf

bevestigt het idee **dat je het totale ontwateringssysteem op regionale schaal moet aanpakken, incl. de beken** (en rivieren). Als de aanpassing maar in een kleiner gebied wordt toegepast, dan zakt het grondwater altijd toch weer richting die veel lagere regionale ontwateringsbasis.



Figuur 3.22 Verskil tussen effect op de GHG en de GLG voor het scenario “Verhogen hoofd- en detailwatergangen”. Bij een blauwe kleur is het effect op de GHG groter dan het effect op de GLG.



Figuur 3.23 Effect van verhogen hoofd- en detailwatergangen in alleen het infiltratiegebied op de GLG (links) en de GHG (rechts).

Wanneer de hoofd- en detailontwatering alleen in het infiltratiegebied wordt verhoogd (Figuur 3.23), is het effect op met name de GLG beperkt (< 5 cm). De grondwaterstand is in dit gebied met diepere grondwaterstanden onder de slootbodembodem (ook van de hoofdwatgangen) gezakt, en verhoging van de ontwateringsmiddelen heeft daarmee geen effect meer op de grondwaterstand. In natte omstandigheden is dit anders: de verhoging van de hoofd- en detailwatergangen verhoogt de GHG rond de hoofdwatgangen in het infiltratiegebied. Detailontwatering is in dit gebied beperkt aanwezig en valt ook in nattere omstandigheden geregeld droog. Er is geen effect op de grondwaterstand in het lage deel van het stroomgebied. **De reikwijdte van maatregelen is dus beperkt, een aanpassing van de ontwatering in het infiltratiegebied heeft alleen effect daar waar de maatregel getroffen wordt.**

3.3.2 Afvoer

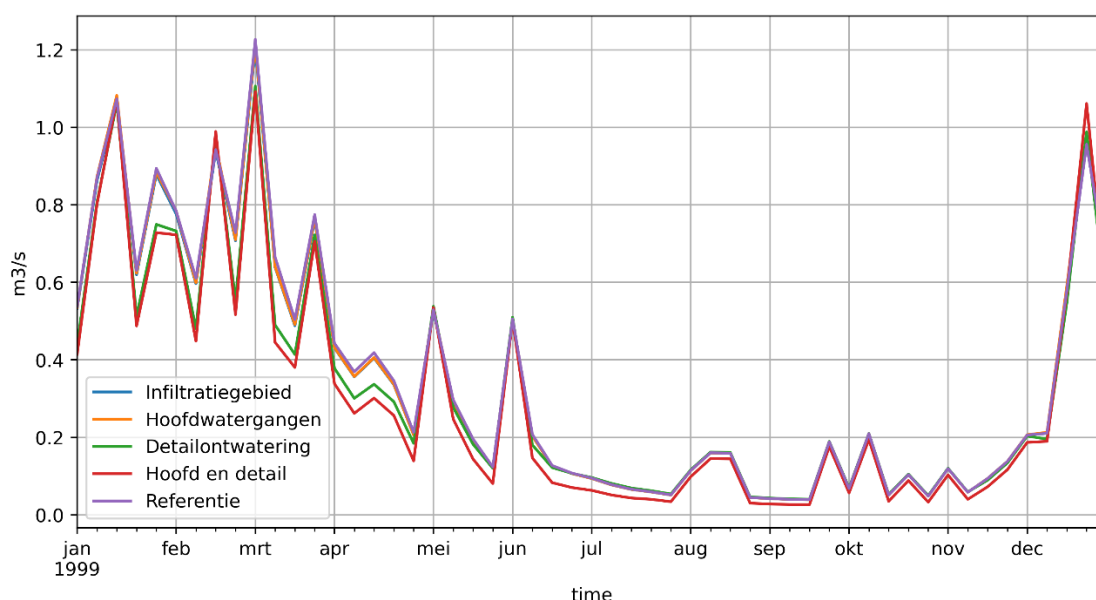
Het verhogen van de ontwatering heeft ook effect op de afvoer van de verschillende watergangen. Niet alleen de totale afvoer uit het stroomgebied wordt beïnvloed, maar ook de verdeling van de afvoer over de verschillende typen ontwateringsmiddelen en verschil tussen zomer en winter. Figuur 3.24 geeft de afvoer in de verschillende scenario's in het jaar 1999.

Figuur 3.25 geeft het aandeel van de verschillende typen ontwateringsmiddelen in de totale afvoer van het stroomgebied voor de verschillende scenario's. Voor deze scenario's geldt dat de modeluitvoer één keer iedere zeven dagen is weggeschreven. Hierdoor mist er informatie over de afvoer in de tussenliggende dagen.

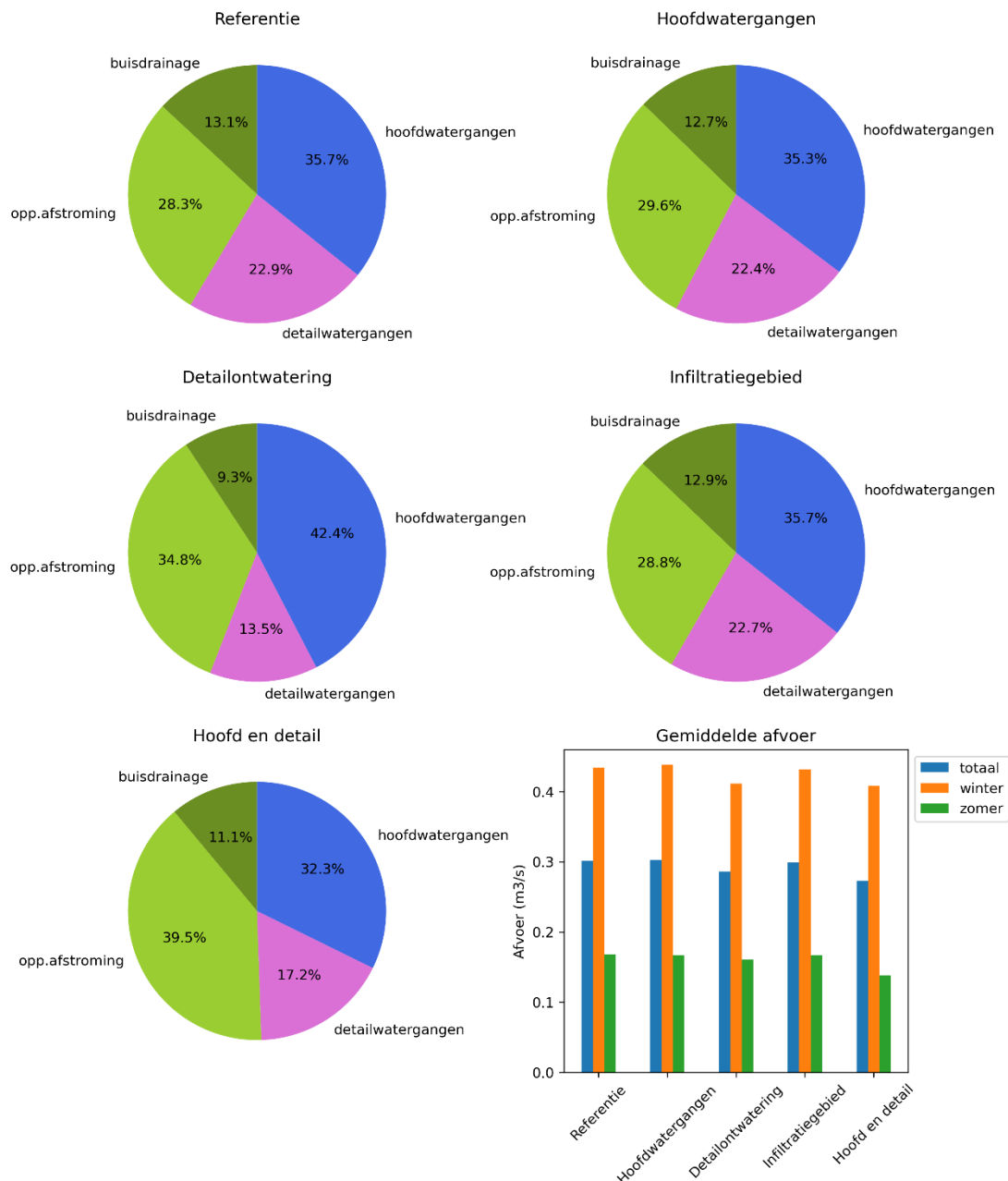
Voor de verschillende varianten valt het volgende op.

- In de referentiesituatie wordt al bijna een derde van de afvoer als oppervlakkige afstroming afgevoerd. Dit wordt veroorzaakt doordat er gebieden zijn waar in de referentiesituatie het grondwater al tot het maaiveld komt.
- Bij het verhogen van de hoofdwatgangen en het verhogen in alleen het infiltratiegebied is er weinig invloed op de verdeling van de totale gebiedsafvoer gedurende het jaar, de grafiek van de afvoer gedurende het jaar is vrijwel gelijk aan de afvoer in de referentiesituatie (Figuur 3.24). Ook verandert er weinig in de afvoerdeling over de verschillende systemen (Figuur 3.25), behalve dat er iets meer oppervlakkige afstroming plaatsvindt en de overige ontwatering iets minder afvoert.
- Bij het verhogen van de detailwatgangen vermindert de totale afvoer van het stroomgebied, zowel in de zomer als de winter. Bij lage totale afvoeren (zie bijv. juni-okt in 1999, in Figuur 3.24), is de totale gebiedsafvoer in scenario 'verhoging detailontwatering' gelijk met de referentie. Er wordt dan een groter aandeel afgevoerd door de hoofdwatgangen en een kleiner aandeel door de detailwatgangen en buisdrainage (Figuur 3.25).
- Bij een verhoging van zowel de detailwatgangen als de hoofdwatgangen neemt totale gebiedsafvoer het meeste af. Het aandeel oppervlakkige afstroming neemt hierbij het meeste toe van alle varianten, het aandeel van de overige systemen neemt af.

Dat de totale afvoer bijna het gehele jaar afneemt betekent dat meer water via het grondwater het stroomgebied uitstroomt, dit zal uiteindelijk waarschijnlijk door het regionale watersysteem buiten het stroomgebied (met name de Mark) afgevoerd worden.

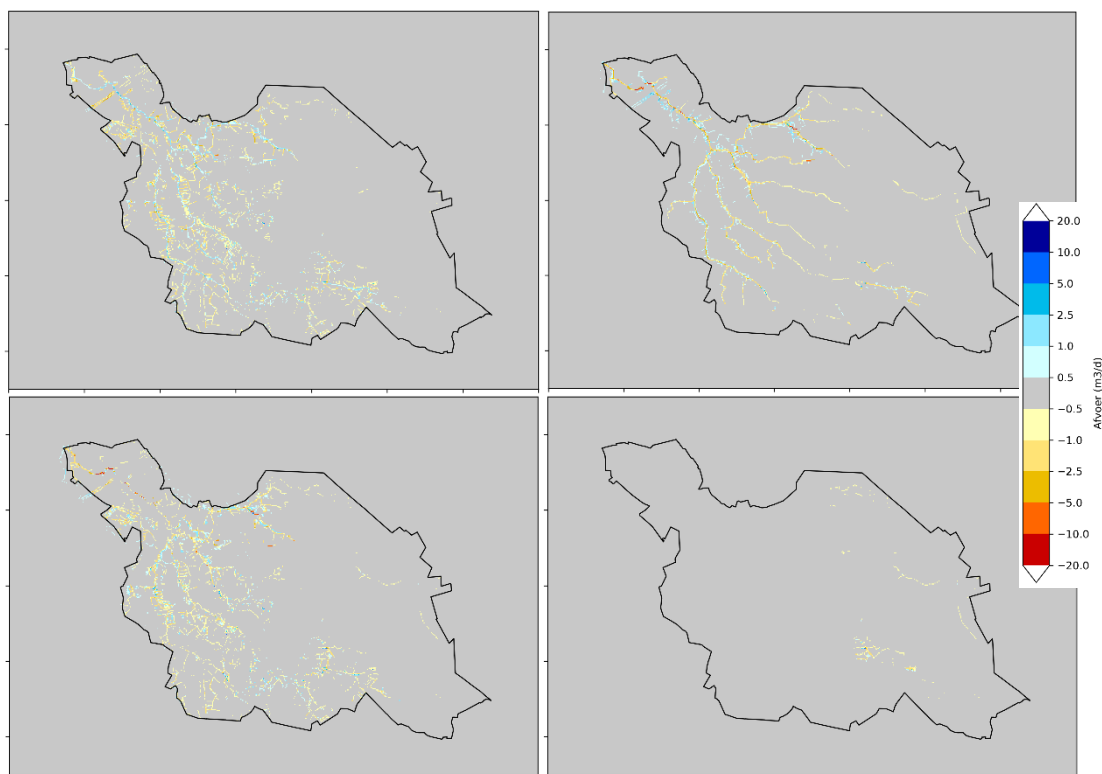


Figuur 3.24 Totale gebiedsafvoer in het jaar 1999 voor de verschillende scenario's. De grafieken van 'infiltratiegebied' en 'hoofdwatgangen' overlappen met de referentie.



Figuur 3.25 Aandeel ontwateringssystemen in de afvoer, voor de referentiesituatie (linksboven), bij verhogen van de hoofdwatertgangen (rechtsboven), verhogen van de detailontwatering (links midden), verhogen hoofd- en detailwatergangen in het infiltratiegebied (rechts midden) en verhogen hoofd- en detailwatergangen in hele stroomgebied (linksonder). Rechtsonder geeft de jaar-, zomer- en wintergemiddelde afvoer voor de verschillende scenario's.

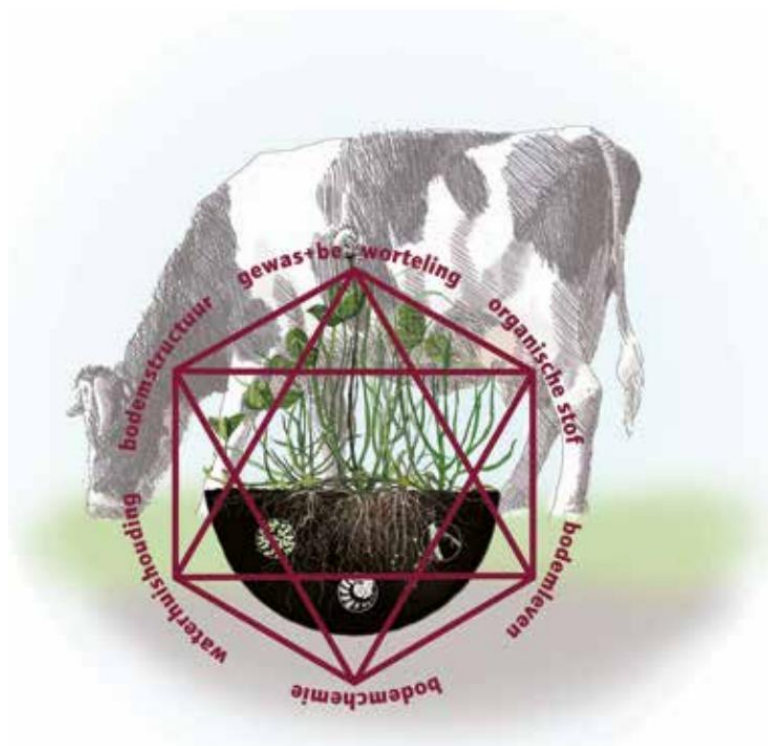
De verschuiving in afvoercomponenten is ook ruimtelijk in beeld te brengen. Figuur 3.26 geeft de ruimtelijke verandering in grondwaterafvoer in de winterperiode voor de verschillende maatregelen. Wanneer peilverhoging alleen in de detailwatergangen wordt toegepast, neemt de afvoer naar de detailwatergangen af en naar de hoofdwatgangen toe, en vice versa. Wanneer het peil in zowel detail- als hoofdwatgangen wordt verhoogd is een heterogener beeld zichtbaar, waarbij de afvoer veelal afneemt maar niet overal. Daarnaast neemt ook buiten het stroomgebied de afvoer heel licht toe, maar deze toename is kleiner dan 0.5 m³/d. Implementatie in alleen het infiltratiegebied laat weinig effect zien, omdat waterlopen hier meestentijds droog zijn gevallen.



Figuur 3.26 Verandering gemiddelde afvoer grondwater naar ontwateringssysteem in de winterperiode ten opzichte van de referentiesituatie bij het verhogen van detailwatergangen (linksboven), het verhogen van hoofdwatgangen (rechtsboven), het verhogen van zowel detail- als hoofdwatgangen (linksonder) en het verhogen van detail- en hoofdwatgangen in het infiltratiegebied (rechtsonder).

3.4 Gezonde bodem

Een goede, gezonde bodem is goed doorlaatbaar, heeft een goede structuur en bevat veel open ruimtes (Schipper et al. 2015). Er zijn verschillende elementen van een gezonde bodem welke onderling verbonden zijn en gezamenlijk een gezonde bodem vormen: organische stof, bodemstructuur, gewas en beworteling, bodemleven, bodemchemie en waterhuishouding (Van Eekeren et al., 2018, zie ook Figuur 3.27). De opzet van deze studie was ten eerste om te onderzoeken wat de relatie is tussen de hoeveelheid organisch stof in de bodem en de sponswerking van het systeem, door middel van literatuuronderzoek. Omdat organische stof één van de onderling verbonden elementen van een gezonde bodem is, wordt ook kort stilgestaan bij de andere elementen en de mogelijke relatie met sponswerking. In dit literatuuronderzoek is dus gekeken naar (3.4.1) de processen die de relatie tussen organische stof en sponswerking bepalen, (3.4.2) de processen die de relatie een gezonde bodem en sponswerking bepalen, (3.4.3) welke maatregelen kunnen worden toegepast om organische stof en sponswerking te vergroten en (3.4.4) wat kan worden geleerd uit de internationale literatuur.



Figuur 3.27 De 6 elementen van een gezonde bodem (Van Eekeren et al., 2018).

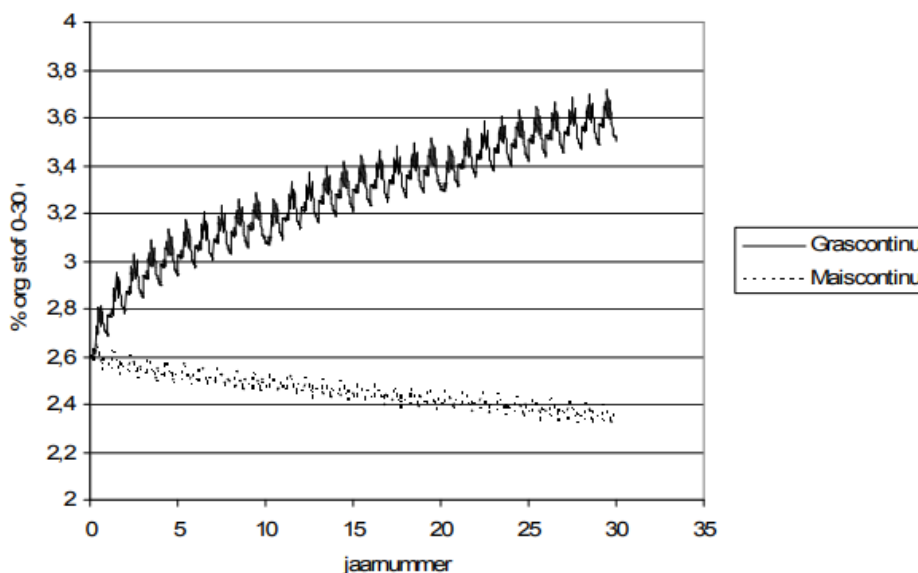
3.4.1 Relatie tussen organische stofgehalte en sponswerking

Het organische stofgehalte is een belangrijk bodemkenmerk voor de mate waarin bodems water kunnen vasthouden. Hoe meer organische stof in de bodem, hoe meer poriën er zijn waarin bodemvocht vastgehouden wordt. Vooral op de relatief arme zandgronden zorgt meer organische stof voor meer waterretentie (klei en veen hebben van nature al een goed watervasthoudend vermogen). Er zijn meerdere schattingen wat betreft waterbeschikbaarheid: voor relatief arme zandbodems geldt dat 1% meer organische stof (bijv. van een gehalte van 2 naar 3%) zorgt voor 4-6 mm extra waterberging in de bouwvoor (0-30cm) (Schipper et al., 2015), een toename van 0.5-1% naar 2% voor 3-4 mm in de bovenste 20cm (STOWA, 2021). Wanneer het initiële organische stofgehalte hoger is (>3%) leidt een toename van 1% tot nog maar 1 mm extra waterberging (STOWA, 2021). Ter vergelijking: één beregeningsgift is ongeveer 20mm, dus de toename in waterbergend vermogen in dit voorbeeld is beduidend kleiner dan één beregeningsgift. Echter, wanneer er

nog regelmatig een regenbui valt, kan de extra waterbeschikbaarheid (van bijv. 4 mm in de bouwvoor) meerdere keren opnieuw benut worden waardoor een beregeningbeurt mogelijk toch langer uitgesteld of soms overgeslagen kan worden (STOWA, 2021).

Het organische stofgehalte in de bodem is een dynamisch evenwicht; afhankelijk van het landgebruik breekt jaarlijks zo'n 2% van de bodemvoorraad persistent organische stof (humus) af (Hanegraaf et al., 2019; STOWA, 2021). Deze afbraak is belangrijk, want er komen hierdoor geleidelijk voedingsstoffen beschikbaar voor de gewassen. Tegelijk is het van belang de afbraak te compenseren door ook voor aanvoer van organisch materiaal te zorgen.

Figuur 3.17 geeft een voorbeeld van hoe het organische stofgehalte in de bouwvoor (0-30 cm) zich onder invloed van het landgebruik kan ontwikkelen (Van Eekeren et al., 2011). Het uitgangspunt is een typische dekzandgrond met 2,6% organisch stof. Bij blijvend grasland neemt het organische stofgehalte langzaam toe, doordat een relatief groot deel van het gewas in de vorm van afstervende wortels in de bodem achterblijft. Blijvend grasland is het beste voor de opbouw van organische stof, maar zelfs dan duurt het ca. 30 jaar voordat het organische stofgehalte is gestegen van 2,6 naar 3,6%. Bij maisteelt en bij veel andere intensieve landbouwgewassen neemt het organische stofgehalte juist af; er blijven weinig gewasresten achter en is er meer afbraak bijvoorbeeld door het ploegen.



Figuur 3.28 Verloop van het organisch stofgehalte berekend met NDICEA voor permanent grasland en permanente maisteelt (bron: Van Eekeren et al., 2011)

3.4.2 Relatie een verbeterde bodemkwaliteit en sponswerking

Door Schipper et al. (2015) is onderzoek gedaan naar de hydrologische effecten van een verbeterde bodemkwaliteit. Hierbij is niet alleen naar het effect van organische stofgehalte in de bodem gekeken, maar naar het effect van een set aan eigenschappen van bodemverbetering, zoals een verbeterde bewortelingsdiepte en een verbetering van vochtberging en doorlatendheid van de bodem. Belangrijk is hierbij om te benadrukken dat er bepaalde aannames gedaan zijn wat een verbeterde bodem inhoudt (verbetering bodemstructuur, hogere verzadigde doorlatendheid, gunstigere vochtbergingsrelatie, grotere bewortelingsdiepte, hogere infiltratiecapaciteit), oftewel er is gekeken naar het verschil tussen een goede bodem ten opzichte van een slechte bodem op hydrologische parameters. Er is in deze studie dus géén onderzoek gedaan naar het verband tussen bodemverbeterende maatregelen en of deze ook inderdaad tot deze verbetering van de bodemparameters leiden. Bijvoorbeeld de infiltratiecapaciteit is verhoogd van 10 mm/d naar 20 mm/d, maar hierbij

wordt ook de aanbeveling gedaan dat deze onzekere parameter beter gekwantificeerd dient te worden. Er is zowel een perceelsmodel (SWAP-WOFOST-ANIMO) als een stroomgebiedsmodel (MODFLOW-MetaSWAP) toegepast.

Uit Schipper et al. (2015) bleek onder meer dat de verandering in de hydraulische eigenschappen van de bodem (de pF-curve) beperkte invloed hebben op de sponswerking van de bodem. Veel meer invloed heeft de verandering van de bewortelingsdiepte en de infiltratiecapaciteit (zie ook Figuur 3.18). In deze studie is aangenomen dat een verhoogde bodemkwaliteit zorgt voor een diepere beworteling en een verhoging van de infiltratiecapaciteit. Hierbij geldt bij een verbeterde bodem dat niet alleen het organische stofgehalte is toegenomen, maar dat ook andere eigenschappen van de bodem zijn verbeterd, zoals een vermindering van verdichting van de bodem. Er is gekeken naar het verschil tussen een slechte en goede bodem op piekafvoeren, GxG, en droogte/beregeningsbehoefte/gewasverdampingreductie.

De resultaten lieten zien dat door verbeterde bodems de piekafvoeren naar het oppervlaktewater met de helft af kunnen nemen (referentie vs. verbeterd), waarbij vooral de verhoging van de infiltratiecapaciteit ervoor zorgt dat oppervlakkige afstroming bij buien met een hoge neerslagintensiteit (in de zomer) afneemt. In de winter verandert de oppervlakkige afstroming weinig, omdat deze in de winter vooral veroorzaakt wordt doordat de grondwaterstand boven maaiveld komt.

Wat betreft verdroging: uit de modelberekeningen kwam nauwelijks een effect op langjarig gemiddelde grondwaterstanden (GHG/GLG) naar voren, omdat deze voornamelijk door drainage beïnvloed worden. Wel laten de berekeningen zien dat er meer water wordt vastgehouden in de onverzadigde zone. Als gevolg daarvan treed er minder droogteschade aan gewassen op. Tevens zorgt vooral de toegenomen bewortelingsdiepte bij een verbeterde bodem dat de beregeningsbehoefte (zowel langjarig gemiddeld, als in een droge zomer) afneemt: afhankelijk van het type bodem was de afname in beregeningsbehoefte op perceelsniveau zo'n 50 tot 90 mm. Andere eigenschappen van een goede bodem (organische stofgehalte en verbeterd bodemleven) hebben volgens de berekeningen een beperkt effect op droogteschade en beregeningsbehoefte. Wel geven de auteurs aan dat deze eigenschappen nodig zijn om ook een diepere beworteling te bewerkstelligen en om bodemverdichting te verhelpen. Wat betreft waterkwaliteit was het modelinstrumentarium nog niet voldoende geschikt, maar de modelresultaten gaven wel aan dat een verbeterde bodem waarschijnlijk voor minder uitspoeling en afspoeling van nutriënten zorgt.

In aanvulling op deze onderzoeksresultaten merken we op dat een toename van het vochtbergend vermogen van de bodem (in de onverzadigde zone) en een toename in bewortelingsdiepte van gewassen mogelijk zou kunnen leiden tot een afname van de grondwataanvulling. Er wordt immers meer water vastgehouden en gebruikt in het ondiepe profiel. Mogelijk werkt dit verdrogend op het grondwatersysteem, maar dit is verder niet onderzocht en/of beschreven in Schipper et al. (2015). De toegenomen infiltratiecapaciteit kan daarentegen ook weer leiden tot meer grondwataanvulling (en minder oppervlakkige afstroming en/of laterale afstroming over verdichte bodemlagen). Uit Schipper et al. (2015) bleek wel dat de langjarig gemiddelde grondwaterstanden (GHG/GLG) nauwelijks beïnvloed zijn, dus met deze set aan bodemparameters is geen significante verdroging vastgesteld.

	Referentie	Verdicht	Verbeterd
	Standaard worteldiepte Maïs 60 cm / gras 25 cm	Ondiepere beworteling Maïs 35 cm / gras 15 cm	Diepere beworteling maïs 80 cm / gras 35 cm*
	Vocht- en doorlatendheid karakteristieken voor zwak lemig fijn zand en lichte zavel afgeleid uit het Bodem	Vocht- en doorlatend- heid karakteristieken die representatief zijn voor een duidelijk verdichte laag	Vocht- en doorlatend- heid karakteristieken die representatief zijn voor bodems met een verhoogd
	Informatie Systeem. Voor beide geldt dat al enige mate van verdichting is opgetreden	net onder de ploegzool (op zo'n 30 a 50 cm diepte) en bij gras net onder de wortelzone)	organisch stofgehalte (verhoging ca 1,5 %), beter bodemleven en waar verdichting geheel is opgeheven.

* Voor droge bodems zijn grotere worteldieptes aangenomen, nl. maïs 100 cm en gras 40 cm.

Figuur 3.29 Scenario's voor bodemkwaliteit doorgerekend door Schipper et al., 2015.

3.4.3 Maatregelen verhogen organische stofgehalte

Het verhogen van het organische stofgehalte kan door de afbraak te verminderen en/of door de aanvoer te verhogen. Het verminderen van de afbraak kan bijvoorbeeld door niet of minder te ploegen (niet-kerende grondbewerking), geen grasland te scheuren en met de inzet van vanggewassen. De aanvoer verhogen kan bijvoorbeeld met zoveel mogelijk grasteelt, meer gewasresten achterlaten, gebruik van organische stofrijke mestsoorten (vaste stalmest, compost), organische stofrijke groenbemesters, of hergebruik biomassa uit sloot- en oevermaaisel.

Tabel 3-1 en Tabel 3-2 geven de jaarlijkse aanvoer van effectieve organische stof (=organische stof die na een jaar nog aanwezig is) van verschillende gewassen en verschillende mestsoorten. Tabel 3-1 laat zien dat meerjarig gras voor de grootste aanvoer zorgt en intensievere gewassen zoals maïs en aardappelen zorgen voor weinig aanvoer. Qua organische mestsoorten (Tabel 3-2) levert drijfmest het minst organische stof op en vaste stalmest en compost veel meer. Aandachtspunt is dat het juist mestsoorten met veel persistent organische materiaal (vaste stalmest, compost) geld kosten om aan te voeren. Het organische stofarme drijfmest levert juist geld op om aan te voeren (negatieve mestprijs). Een aandachtspunt bij het gebruik van compost is dat verschillen in de compost-soort en overdosering ook tot extra uitspoeling kan leiden (De Weert et al., 2020).

Tabel 3-1 Jaarlijkse aanvoer van effectieve organische stof via grasteelt en gewasresten (Van Eekeren et al., 2011).

Gewas	Effectieve organische stof (kg per ha)
Gras 1 jaar oud	875
Gras 2 jaar oud	2275
Gras 3 jaar oud en ouder	3675
Snijmaïs ondergronds	525
Aardappelen	875
Tarwe stoppels en stro	2550

Tabel 3-2 Jaarlijkse aanvoer van effectieve organische stof via gewasresten (Van Eekeren et al., 2011).

Mestsoort	Effectieve organische stof (kg per ha)
Drijfmest rundvee	33
Drijfmest varkens	20
Vaste mest rundvee	77
Vaste mest vleeskuikens	183
Champost	89
GFT-compost	183

Hoe het verhogen van het organische stofgehalte in de akkerbouwpraktijk is te realiseren is onderzocht op proefboerderij Vredepeel (Hospers-Brands & Van der Burgt, 2013). Bij een gangbare gewasrotatie voor zandgronden met lage aanvoer van organisch materiaal (gebruik kunstmest) nemen de voorspelde organische stofgehaltes af. Bij een normale aanvoer organische stof en bij een biologische teelt (gebruik dierlijke mest) stijgt het organische stofgehalte heel licht en bij een jaarlijkse toepassing van 10 ton GFT-compost stijgt het organische stofgehalte in dezelfde teeltsystemen sneller (van 3,7 naar 4% in 6 jaar).

Binnen de veehouderij is zoveel mogelijk permanent grasland de beste manier om organische stofgehaltes te verhogen en de bodemgezondheid te optimaliseren. Voor de bodemkwaliteit minder gunstige praktijken binnen de veehouderij-sector zijn het scheuren (onderploegen) van grasland, teelt van maïs, aardappel en andere intensieve gewassen, het vervangen van dierlijke mest door kunstmest en het gebruik van zware landbouwmachines op natte grond.

Binnen de akkerbouw staat de bodemkwaliteit veelal meer onder druk door het intensievere landgebruik. Het verlies aan organische stof is te bijvoorbeeld te verminderen door niet of minder intensief te ploegen (bijv. ondiep ploegen, niet-kerende groundbewerking) en jaarronde gewasbedekking. Vaak is extra aanvoer van organisch stof nodig om de gehalten op peil te houden. Dat kan door bijvoorbeeld vaste stalmest, gewasresten en compost in te passen in het bemestingsplan

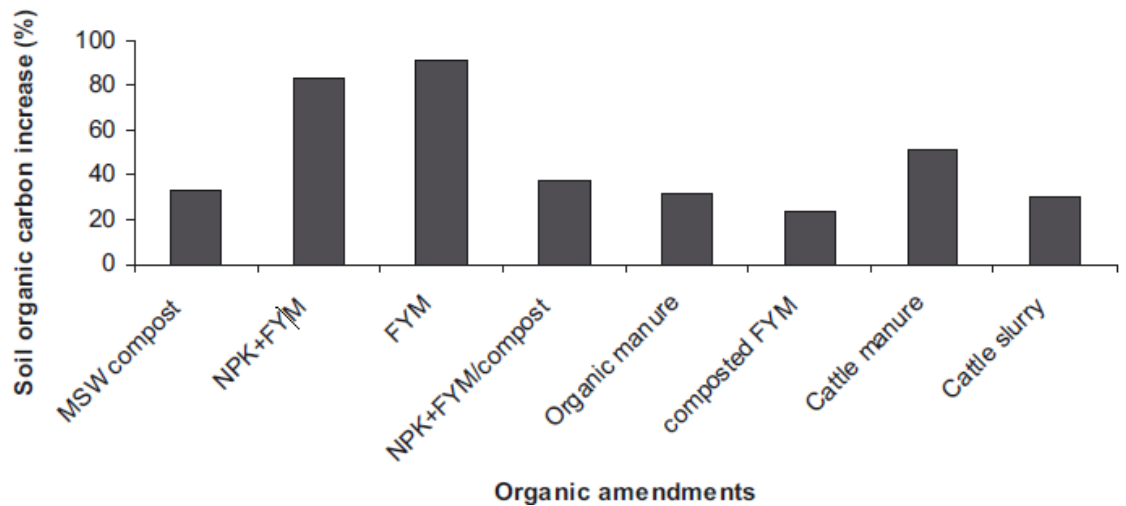
3.4.4 Internationale literatuur

Hier volgt een opsomming van internationale literatuur over organisch stofgehalte en het waterbergend vermogen van de bodem. In verschillende studies is onderzocht hoe het organisch stofgehalte verhoogd kan worden en hoe effectief deze maatregel is voor de waterberging.

De verschraling van landbouwbodems door het gebruik van gewasbeschermingsmiddelen, ploegen en irrigatie is geen specifiek Nederlands probleem. In Europa is 61% van de bodems in een slechte conditie volgens de EUSO² soil health dashboard (EUSO, 2024). De meest voorkomende reden van een slechte bodemkwaliteit is het verlies aan organische stof (53%), gevolgd door verlies aan biodiversiteit (37%).

Diacono & Montemurro (2009) hebben in een overzichtsstudie de resultaten van lange-termijn (3-60 jaar) experimenten met bodemverbeteraars samengevat. Uit hun analyse kwam bijvoorbeeld naar voren dat het organische stofgehalte met 24-92% te verhogen is door over lange perioden organische stofrijke meststoffen aan te voeren (zie Figuur 3.30). Dit resulteert ook in een betere bodemkwaliteit (chemisch, biologisch, aggregaatstabiliteit), een hogere stikstofopname-efficiëntie en meer gewasopbrengst.

² European Union Soil Observatory

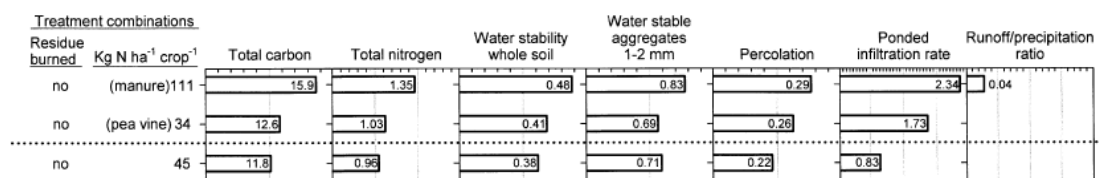


Figuur 3.30 Toename in organische stofgehaltes na langdurige toepassing van verschillende meststoffen/ bodemverbeteraars in verschillende studies (bron: Diacono & Montemurro (2009). MSW=GFT, FYM=farmyard manure.

Lal (2020) heeft een review gepubliceerd over studies (met name in de VS) waarin het effect van een hoger organische stofgehalte op het watervasthoudend vermogen onderzocht is. Hieruit volgt dat het gehalte voor planten beschikbare vochtgehalte met 1-4mm per 10cm (ofwel ca. 2%) bodemdikte toeneemt met elke procent extra organisch stof. Daarbij geldt dat het effect het grootst is in bodems met weinig organisch materiaal in de uitgangssituatie. Dit is dus vergelijkbaar met de Nederlandse vuistregels, welke in paragraaf 3.4.1 besproken zijn.

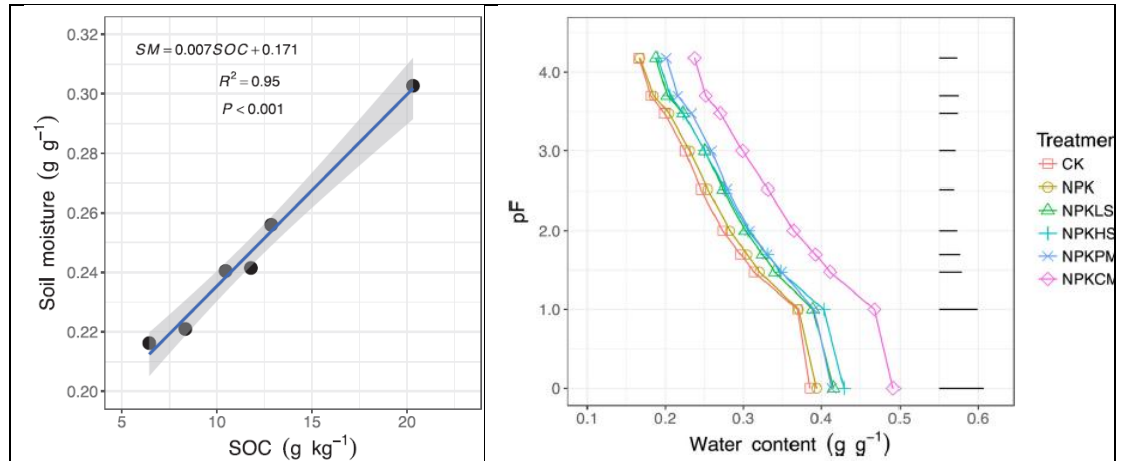
Williams et al. (2017) toonden aan dat een biologische bedrijfsvoering in akkerbouw bijdraagt aan het watervasthoudend vermogen van de bodem op basis van een lange termijn (40 jaar) experiment in Nebraska (USA). Door een betere bodemstructuur (betere aggregaatvorming, minder verdichting, hogere porositeit) na langdurige biologische bedrijfsvoering (geen kunstmest, geen pesticiden) was de infiltratiecapaciteit 10x hoger dan op de conventionele percelen.

Resultaten van een 70 jaar durende proef op graanakkers in Oregon (USA) zijn beschreven door Wuest et al. (2005). Op een deel van de percelen werd het organische stofgehalte verhoogd door aanvoer van dierlijke mest en gewasresten (erwtenschillen). Deze percelen hadden naast een hoger organische stofgehalte ook meer aggregaatstabiliteit, een betere bodembioïologie en een meer dan 2 keer hogere infiltratiecapaciteit (zie Figuur 3.31). De verbeterde infiltratie werd door Wuest et al. (2005) vooral gelinkt aan de verbeterde aggregaatstabiliteit.



Figuur 3.31 Resultaten van Wuest et al (2005) met betere bodemkwaliteit en meer infiltratiecapaciteit in bodems (0 – 15 cm) waar al 70 jaar organische stof is aangevoerd via dierlijke mest (manure) en gewasresten (erwtenschillen, pea vines). Total carbon en Total nitrogen zijn een maat voor de hoeveelheid organische stof, Water stability whole soil, Water stable aggregates 1-2mm en percolation zijn indicatoren voor de aggregaatstabiliteit. Resultaten voor behandelingen inclusief het verbranden van gewasresten (verboden in Nederland) zijn hier weggelaten.

Zhou et al., 2020 vergeleken het vochtvasthoudend vermogen van bodems na langdurige behandeling met alleen kunstmest en met kunstmest in combinatie met dierlijke mest en stro. Het verhoogde organische stofgehalte en de betere bodemstructuur zorgde voor meer vochtvasthoudend vermogen (zie Figuur 3.32). De aanvoer van organisch materiaal had geen effect op het niet-plantbeschikbare watergehalte ($pF > 5.5$). Overigens staat stro bekend als relatief snel afbrekend organisch materiaal en zijn varkensmest en koemest mestsoorten met een relatief laag gehalte aan effectieve organische stof (zie ook Tabel 3-2).



Figuur 3.32 Rechts: Relatie tussen organische stofgehalte (SOC) en bodemvochtgehalte. Links: verschuiving van de pF-curve bij verschillende behandelingen. CK= controle, NPK=alleen kunstmest, NPKLS=NPK+stro, NPKHS=NPK+extra stro, NPKPM=NPK+varkensmest, NPKCM=NPK+koemest (bron: Zhou et al., 2020).

Verschillende internationale studies gaan over het toepassen van zuiveringsslib (e.g. Mujdeci et al., 2019) en adsorberende polymeren (e.g. Taban & Naeini, 2006) voor het verbeteren van het vochtvasthoudend vermogen van bodems. Dit kan echter leiden tot persistente verontreiniging van de bodem met zware metalen, organische verontreinigingen en niet of slecht afbreekbare plastics.

Uit de internationale literatuur blijkt dat het organische stofgehalte verhoogd kan worden door langdurige (tientallen jaren) maatregelen te treffen. Wanneer het organisch stofgehalte verhoogd is, kan de bodem meer water vasthouden. Daarnaast blijkt uit meerdere studies (Williams et al. 2017; Wuest et al., 2005) dat een verbeterde bodemkwaliteit door maatregelen (zoals biologische bedrijfsvoering, aanvoer organische stof) ook zorgen voor betere bodemaggregaatvorming en daarmee ook een hogere infiltratiecapaciteit. Een verhoging van het vochtbergend vermogen en toename van de infiltratiecapaciteit is daarmee ook een verbetering van de sponswerking van het perceel, waarbij wateroverlast verminderd kan worden omdat water beter de bodem in kan, en droogte verminderd kan worden omdat er meer vocht beschikbaar is voor de gewassen.

4 Discussie

4.1 Effecten maatregelen sponswerking en seizoenseffecten – Chaamse Beken

Sponswerking impliceert het opslaan van water in tijden van wateroverschot (vullen van de spons), en het weer leveren van water in droge tijden (uitknijpen van de spons).

De maatregelen die zijn onderzocht voldoen maar beperkt aan dit concept van sponswerking. Door het verhogen van het waterpeil wordt de afvoer van grondwater geremd en wordt meer water vastgehouden in de bodem. Dit effect treedt evenwel jaarrond op, ook in de zomerperiode wordt afvoer geremd. Grondwaterstanden nemen hierdoor jaarrond toe (met de grootste toename in de winter), maar de basisafvoer in de zomerperiode neemt af ten opzichte van de situatie zonder maatregelen. De basisafvoer wordt dus niet 'gestut' door de sponswerking maatregelen (leeglopende spons), in tegendeel, de basisafvoer zakt juist verder weg.

De set van geïmplementeerde maatregelen hebben hiermee zowel positieve als negatieve effecten op de verschillende functies. Het verhogen van de grondwaterstand (positief voor terrestrische natuur en landbouw) geeft een lagere basisafvoer (negatief voor aquatische natuur) en hogere piekafvoer (negatief voor wateroverlast). Verder onderzoek zou uitgevoerd moeten worden bij welke set van maatregelen zowel de grondwaterstand als de basisafvoer verhoogd kan worden en waarbij ook de toegenomen kans op overstromingen en wateroverlast bij piekbuien voorkomen wordt. Er kan hierbij bijvoorbeeld gekeken worden naar het beter benutten van de potentiële grondwaterbuffer onder het infiltratiegebied, naar de effecten van grondwateronttrekkingen, of naar een andere verhouding in aanpassingen van de ontwatering in het hoofdwatersysteem en detailwatersysteem. Ook kan de mogelijkheid tot tijdelijke waterberging op het maaiveld onderzocht worden. Voor landbouw geldt daarbij dat er een afweging is tussen nat- en droogteschade. De geïmplementeerde maatregelen blijken niet specifiek genoeg om tegemoet te komen aan de verschillende en vaak tegengestelde belangen van de verschillende functies.

Het seizoenale effect is verschillend in de variant 'maatregelen voor het vergroten van sponswerking' en in de verschillende varianten 'systeemwerking'. In de eerste variant is een pakket aan maatregelen toegepast, waarbij onder andere in het grootste deel van het modelgebied (binnen én buiten het stroomgebied) de ontwateringsdiepte van de hoofdwaterlopen is verhoogd. In de varianten 'systeemwerking' is alleen binnen het stroomgebied een aanpassing gedaan in de ontwatering.

Het effect van de maatregelen is groter in de GHG dan in de GLG. De grondwaterstandstijging die bereikt wordt in de winter ebt dus langzaam weg naar de zomer. Dit effect was duidelijker in de varianten 'systeemwerking' (paragraaf 3.3) dan in de variant 'vergroting sponswerking' (paragraaf 3.2). Doordat binnen de systeemwerking-varianten alleen een gedeelte van de ontwatering binnen het stroomgebied wordt aangepakt, en buiten het stroomgebied niets veranderd, neemt de afvoer in de ongewijzigde ontwatering toe waardoor het effect op de grondwaterstanden gedurende het jaar afneemt. Bij de variant 'vergroting van sponswerking' is de aanpassing van de ontwatering regionaal aangepakt (de beken buiten het stroomgebied zijn ook verhoogd). Hierdoor kan de verhoging van de grondwaterstand mogelijk beter behouden blijven gedurende het jaar, maar ook hier is voor het grootste deel van het gebied de stijging van de GHG groter dan de GLG.

De respons van het grond- en oppervlaktewatersysteem houdt uiteraard verband met de gekozen implementatie van maatregelen. Wellicht is met meer differentiatie, in type maatregelen, locatie en tijd, meer sponswerking in het systeem te brengen. Hier is een eerste stap mee gemaakt door te kijken naar differentiatie tussen toepassing in hoofdwaterlopen en detailwaterlopen, en de toepassing in alleen het infiltratiegebied. Maar meer, en andere, differentiatie verdient verder onderzoek. De mogelijke rol van organische stof is in voorliggend onderzoek met literatuuronderzoek reeds verkend. De rol van de ligging van maatregelen in het stroomgebied is met enkele varianten verkend (zie volgende paragraaf). Hoe tijdsafhankelijkheid (bijvoorbeeld het variëren van het waterpeil gedurende het jaar) sponswerking zou kunnen verbeteren is nog een open vraag.

De maatregelen en de effecten op de natuur en landbouw in het gebied zijn onderzocht met één scenario in één stroomgebied. Er zijn ook nog andere sponsmaatregelen denkbaar en ook kunnen dezelfde maatregelen in een ander gebied mogelijk anders uitwerken. De opgaven kunnen per gebied verschillen, waar er soms bijvoorbeeld meer sprake is van droogteproblematiek en soms meer van wateroverlast. Het is aan te bevelen om bij de toepassing in andere gebieden opnieuw een afweging te maken welke opgaven belangrijk zijn, welke maatregelen worden doorgerekend en hierbij ook verschillende sets aan maatregelen door te rekenen.

4.2 Ruimtelijke systeemwerking

Met verschillende varianten is de invloed van de ruimtelijke implementatie van ontwateringsmaatregelen onderzocht. De maatregelen zijn onderzocht binnen de Chaamse Beken, maar door de inzichten die met deze varianten worden opgedaan kunnen wel conclusies getrokken worden over de werking van ontwateringsmaatregelen in andere gebieden op de Hoge Zandgronden van Nederland (zoals andere beekdalen). Uit de resultaten blijkt dat maatregelen elkaar beïnvloeden via het grondwatersysteem. Bij het verhogen van de ontwateringsbasis van de detailwatergangen stroomt grondwater meer af richting de hoofdwatergangen en andersom. Als vernattingsmaatregel werkt verhoging van de ontwateringsbasis het beste wanneer deze in zowel hoofd- als detailwatergangen wordt geïmplementeerd. De gecombineerde maatregel werkt dan zelfs beter dan de som van beide afzonderlijke maatregelen. Dit komt omdat bij de verhoging van de ontwatering in alléén de hoofd- of detailwatergangen gedeeltelijk teniet gedaan wordt doordat het gedeelte van het oppervlaktewatersysteem waar geen aanpassing gedaan wordt sterker gaat ontwateren. Wanneer beide systemen gezamenlijk worden aangepakt, wordt voorkomen dat het water op een andere manier wordt afgevoerd.

De verhoging van de hoofdwaterlopen heeft een beperkt effect op de GHG. Dit komt doordat het aanpassen van ontwatering maar een beperkte ruimtelijke uitstraling heeft en dus is het effectgebied van een verhoging van de hoofdwaterlopen op grotere afstand van de beken maar beperkt. Daarbij is de detailafwatering is bij hoge grondwaterstanden overall actief en niet verhoogd, en gaat daardoor meer water afvoeren en heeft daarmee een dempend effect op de verhoging van de grondwaterstand. Wanneer juist de detailafwatering wordt verhoogd is een sterk ruimtelijk effect zichtbaar op de hoogste grondwaterstanden, deze worden over een groot gebied met meer dan 20 cm verhoogd. Doordat er een groot aantal slootjes worden aangepast bij aanpassing van detailwater, kan een over een groter gebied effect bereikt worden. Echter, voor verhoging van de GLG heeft een aanpassing van het detailwater minder effect, omdat het extra vastgehouden water uit de winter toch weer wordt afgevoerd door de niet-aangepaste hoofdwaterlopen.

Door het uitzakken van de grondwaterstand onder de watergangen heeft het verhogen van de watergangen in het infiltratiegebied weinig effect op het grondwatersysteem. De periode dat de watergangen in verbinding staan met het grondwater en dus het grondwatersysteem

beïnvloeden is kort. Verhogen van ontwatering heeft immers alleen effect als de watergangen deel uitmaken van het grondwatersysteem.

Uit de verkenning blijkt dat bij het implementeren van sponswerking maatregelen verder moet worden gekeken dan de lokale situatie. Dit omdat de werking van maatregelen wordt beïnvloed door (hydrologische) omstandigheden in de nabije omgeving, en maatregelen elkaar ook onderling beïnvloeden. Voor het implementeren van sponswerking maatregelen is dan ook een regionale gebiedsvisie nodig, waarin maatregelen gezamenlijk worden genomen.

4.3 Gezonde bodem

Organische stof vormt één van de elementen van een gezonde bodem, samen met bodemstructuur, gewas en beworteling, bodemleven, bodemchemie en waterhuishouding. Vooral op van nature arme zandgronden hebben gezonde bodems een hogere infiltratiecapaciteit en een beter vochtvasthoudend vermogen. Een gezonde bodem kan daarmee een rol spelen in de weerbaarheid tegen klimaatextremen, met name tegen wateroverlast bij piekbuien met een hoge intensiteit (in de zomer) en het verminderen van droogteschade in de landbouw. Een gezonde bodem is vooral effectief om problematiek op perceelsschaal te verminderen, voor hydrologische effecten op landschapssysteemschaal zijn aanvullende maatregelen in het oppervlaktewatersysteem nodig. In Schipper et al. (2015) werd bijvoorbeeld een beperkt effect van een verbeterde bodem op de langjarig gemiddelde grondwaterstanden (GLG, GHG) vastgesteld. Het door bodemverbetering extra vastgehouden water werd alsnog afgevoerd door het ontwateringsstelsel dat niet was aangepast. De combinatie van bodemverbetering met andere hydrologische sponsmaatregelen zou mogelijk een elkaar versterkend effect hebben op landschapsschaal. Het hydrologische effect van organische stof lijkt vooral gerelateerd aan de grotere aggregaatstabiliteit, wat de bodem weerbaarder maakt tegen verslemping en verdichting. Het voorkomen van verslemping en verdichting en verbeteren van de infiltratiecapaciteit kan ook door middel van andere maatregelen, zoals het gebruik van lichtere landbouwmachines, het niet berijden van het land in natte omstandigheden, teeltmaatregelen en andere maatregelen waarmee de bodemstructuur behouden of hersteld wordt (De Louw et al., 2024).

Het verhogen van het organische stofgehalte kan door de afbraak te verminderen en/of door de aanvoer te verhogen. Het verhogen van het organische stofgehalte en het optimaliseren van de bodemgezondheid is een langdurig proces. Het kan bijvoorbeeld 30 jaar duren voordat het organische stofgehalte gestegen is van 2% naar 3%. Andersom kan bij een intensieve teelt (ploegen, gewasbeschermingsmiddelen, kunstmest) de bodem binnen 1 teeltseizoen sterk degraderen en weer jaren nodig hebben om te herstellen.

5 Conclusies en aanbevelingen

In deze studie is onderzocht in hoeverre maatregelen als het verwijderen van detailontwatering, peilverhoging en beregeningsverboden kunnen bijdragen aan sponswerking in een voor de Nederlandse hoge zandgronden representatief stroomgebied. Er is een scenario doorgerekend waarbij detailontwatering is verwijderd in een buffer van 200m rond grondwaterafhankelijke natuurgebieden, binnen dezelfde buffer is landbouwberegening niet langer toegestaan, en de ontwateringsbasis van de grotere waterlopen zijn in het grootste deel van het modelgebied (óók buiten het stroomgebied) verhoogd tot 30 cm onder maaiveld. Dit laatste betekent een verhoging van de ontwateringsbasis van soms meer dan een meter.

De geïmplementeerde maatregelen zorgen voor een stijging van de grondwaterstand, die het grootste is in de winter (GHG) en minder groot is in de zomer (GLG). De verhoging van de grondwaterstand is het hoogst rond de beken in het benedenstroomse deel. In het hoger gelegen infiltratiegebied is het effect van de maatregelen op de grondwaterstand kleiner. Dit komt doordat de grondwaterstand een belangrijk deel van het jaar dieper ligt dan de bodem van de waterlopen in het infiltratiegebied. De waterlopen vallen droog en maken geen deel meer uit van het grondwatersysteem. In de afvoer karakteristiek is te zien dat de basisafvoer door de hogere ontwateringsbasis meer geremd wordt, afvoeren in de droge perioden worden lager. Dit komt omdat de verhoging van de grondwaterstand kleiner is dan de verhoging van het ontwateringsniveau waardoor grondwater minder lang wordt afgevoerd. Er wordt dus in de zomerperiode effectief grondwater vastgehouden. Door de hogere grondwaterstanden neemt (met name in het winterhalfjaar) de oppervlakkige afstroming en snelle ontwatering juist sterk toe en daarmee de afvoer na piekbuien.

De grondwaterafhankelijke natuur profiteert van de geïmplementeerde maatregelen: een stijging van de grondwaterstanden in het voorjaar en de zomer zorgt voor betere condities voor de natuur. Berekeningen met de Waterwijzer Natuur laten ook zien dat de natuurwaarde als gevolg van de vernatting zal toenemen. Aquatische natuur heeft daarentegen te maken met afnemende afvoeren in droge perioden, en daardoor vaker droogvallende waterlopen, stilstaand water en een lagere waterkwaliteit. Voor de landbouw kan in de zomer meer optimale verdamping plaatsvinden, wat vertaald kan worden in hogere gewasproductie. Echter, de natschade als gevolg van de gestegen grondwaterstanden neemt ook sterk toe. Met name in de bufferzones waar de maatregelen genomen zijn is daarom een toename in totale opbrengstderving te zien. Voor een droge zomer als 2003 (ten opzichte van het langjarig gemiddelde) is het effect van maatregelen op de grondwaterstand kleiner, maar is er wel een grotere verbetering als gevolg van de maatregelen te zien wat betreft een meer optimale verdamping (T_a/T_p) in de landbouw, wat vertaald kan worden naar hogere gewasopbrengsten.

Verkenning van het effect van een verschillende ruimtelijke ligging van maatregelen geeft aan hoe maatregelen elkaar via het grondwatersysteem onderling beïnvloeden. Als vernattingsmaatregel werkt verhoging van de ontwateringsbasis het beste wanneer deze in zowel hoofd- als detailwatergangen wordt geïmplementeerd. Bij alléén een verhoging van de detailwatergangen wordt er namelijk meer afgevoerd door het hoofdwatersysteem. Er is dan wel een verhoging in de GHG te zien, maar dit effect raak je gedurende het jaar kwijt waardoor de verhoging van de GLG beperkt blijft. Bij alléén een aanpassing van de hoofdwatergangen kan alleen het gebied dichtbij de hoofdwatergangen beïnvloed worden. Ook is er (bij de verschillende maatregelvarianten) meer oppervlakkige afstroming als gevolg van de gestegen grondwaterstanden, die vaker tot aan het maaiveld komen. Ook is gebleken

dat het gecombineerde effect van maatregelen groter is dan de som van de afzonderlijke maatregelen. Verhoging van de ontwateringsbasis in het infiltratiegebied heeft – doordat watergangen meestentijds droogvallen – weinig effect op de grondwatersituatie.

Een gezonde bodem bestaat uit verschillende elementen: organische stof, bodemstructuur, gewas en beworteling, bodemleven, bodemchemie en waterhuishouding. Gezonde bodems hebben een hogere infiltratiecapaciteit en een beter vochtvasthoudend vermogen. Hiermee kunnen op perceelsschaal problemen op het gebied van waterbeschikbaarheid en wateroverlast verminderd worden. Op landschapsschaal is het effect van maatregelen op het gebied van bodemverbetering kleiner, en zijn aanvullend andere (hydrologische) maatregelen nodig om de sponswerking op landschapsschaal te vergroten.

Het komen tot een afgewogen maatregelpakket dat de sponswerking in een gebied vergroot, door het opslaan en later weer afgeven van water, is daarmee een complexe puzzel die in ruimtelijke samenhang moet worden gelegd.

Aanbevolen wordt te onderzoeken of het – met de lessen uit voorliggend onderzoek – mogelijk is te komen tot (een geheel van) maatregelen die niet alleen de grondwaterstand verhogen, maar tegelijkertijd ook zorgen voor een hogere basisafvoer en een afname in piekafvoer. Het beter benutten van de potentiële grondwaterbuffer onder het infiltratiegebied kan hier een rol in spelen, al bleek peilverhoging niet de juiste manier om deze buffer te vergroten. Het is verder aan te bevelen het gekoppelde grond- en oppervlaktewatersysteem integraal te beschouwen, om ook de rol van uitzakkende peilen in het oppervlaktewater beter mee te nemen. Als laatste wordt aanbevolen om ook het gecombineerde effect van bodemverbeteringsmaatregelen (zoals bijvoorbeeld in Schipper et al. (2015) is berekend) en watersysteemmaatregelen (zoals onderzocht in de huidige studie) te onderzoeken.

Referentielijst

Bij12. (2024). *Natuurtypen*. <https://www.bij12.nl/onderwerp/natuursubsidies/index-natuur-en-landschap/natuurtypen/>

Clevers, S., & Nijp, J. J. (2023). *Klimaatadaptatie in de praktijk: Een toepassing van de Waterwijzer Natuur op stroomgebied Chaamse Beken*. www.kwrwater.nl

De Louw, P., E. Schoonderwoerd, C. van Strien, J. van Bakel, A. Veldhuizen, F. Gerritsen, M. Heinen, D. van Deijl (2024) Maaiveldafvoer in Twente in beeld. Deltares-rapport 11207359-006

De Weert, J., J. Rozemeijer, A. Cinjee, E. van Vilsteren, M. Heinen, W. de Groot, 2020. *Bodemverbeterende maatregelen: Pilot met toevoegen organisch materiaal. Effecten op nitraatuitspoeling naar het grondwater*. Deltares-Rapport 1220765-000-BGS-0022.

Diacono, M. F. Montemurro, 2009. *Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review*. Agron. Sustain. Dev. 30 (2010) 401–422.

EUSO, 2024. *EUSO Soil Degradation Dashboard*. <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/esdacviewer/euso-dashboard/>

Hanegraaf, M., W. van Geel, W. van de Berg, J. de Haan, 2019. *Afbraaksnelheid bodem organische stof. Tussenrapportage. Perceelsspecifieke schatting uit bodemparameters*. Wageningen Research.

Hendriks, D., K. Peerdeman, E. Schoonderwoerd & A. Jeuken (2024) KLIMAP - Verkenning klimaatrobuuste inrichting watersysteem Chaamse beken. Deltares & Waterschap Brabantse Delta.

KNMI. (2014). *KNMI '14 klimaatscenario's voor Nederland* (p. 36).

Lal, R., 2020. *Soil organic matter and water retention*. Agronomy Journal, DOI: 10.1002/agj2.20282.

Mujdeci, M., Simsek, S. & Uygur, V., 2019. *The effects of organic amendments on soil water retention characteristics under conventional tillage system*. Fresenius Environmental Bulletin. 26. 6205-6211.

Schipper, P., P. Groenendijk, N. van Eekeren, M. van Zanen, J. Rozemeijer, G. Janssen, B. Zwart, 2015. *Goede grond voor een duurzaam watersysteem*. STOWA rapport 2015-19.

Schoonderwoerd, E., Peerdeman, K., Vink, K., Hendriks, D., Jeuken, A., Roelofsen, F., & Mulder, M. (2024a). *KLIMAP-Chaamse beken - Kwantificeren watersysteem en landbouw en natuur*.

Schoonderwoerd, E., Kingma, V., Dahm, R., de Louw, P., Uke, M. & Penning, E. (2024b). *Sponswerking van landschappen in Nederland. Casestudie Chaamse Beken*. Deltares rapport 11208012-000-ZWS-0005

STOWA, 2021. Deltafact *Belang van bodemorganische stof voor het waterbeheer*.

Wuest, S.B., T.C. Caesar-TonThat, Sara F. Wright, John D. Williams, 2005. *Organic matter addition, N, and residue burning effects on infiltration, biological, and physical properties of an intensively tilled silt-loam soil*, Soil and Tillage Research 84
<https://doi.org/10.1016/j.still.2004.11.008>.

Taban, M. & Naeini, S., 2006. *Effect of Aquasorb and Organic Compost Amendments on Soil Water Retention and Evaporation with Different Evaporation Potentials and Soil Textures*. Communications in Soil Science and Plant Analysis 37.
<https://doi.org/10.1080/00103620600770383>.

Van Eekeren, N., Zaneveld-Reijnders, J., 2011. *Bewust herstel van de natuurlijke buffercapaciteit van de bodem; Inhoudelijk rapportage*. ZLTO/LBI.

Van Eekeren, N., J. Deru, N. Hoekstra, J. de Wit., 2018. *Carbon Valley. Organisch stofmanagement op melkveebedrijven*.

Williams, D.M., H. Blanco-Canqui, C. A. Francis, T. D. Galusha, 2017. *Organic Farming and Soil Physical Properties: An Assessment after 40 Years*. Agronomy Journal 109-2.
<https://doi.org/10.2134/agronj2016.06.0372>.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>

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