A network diagram with various sized light blue circles connected by thin white lines, set against a solid blue background. The circles vary in size, with some being significantly larger than others, and they are interconnected in a complex, non-linear fashion.

Bedrijfstakonderzoek
BTO 2024.015 | April 2024

Inzicht in het watersysteem door toepassing van een systeemmodel

Bedrijfstakonderzoek

KWR

Bridging Science to Practice

Colofon

Inzicht in het watersysteem door toepassing van een systeemmodel

BTO 2024.015 | April 2024

Opdrachtnummer

403664

Projectmanager

Dr. Klaasjan Raat

Opdrachtgever

Dit onderzoek is mogelijk gemaakt door het programma Water in de Circulaire Economie (WICE), onderdeel van het Bedrijfstakonderzoek van de drinkwatersector, het Deltaprogramma Zoetwater (DPZW) van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, en de Provincie Noord-Brabant. Het onderzoek is tot stand gekomen in samenwerking met NWO Perspectief-project AquaConnect – ‘Key technologies for safeguarding regional water provision in fresh water stressed deltas’ (TTW P19-45).

Auteurs

Dr. Sija F. Stofberg en dr. ir. Marjolein H.J. van Huijgevoort

Kwaliteitsborger

Dr. ir. Ruud Bartholomeus

Verzonden naar

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten en samenwerkingspartners en is openbaar.

Keywords

Watersysteem, systeemdenken, systeemgrenzen, waterhergebruik, watertransitie

Jaar van publicatie
2024

Meer informatie
Sija Stofberg

E sija.stofberg@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR

April 2024 ©

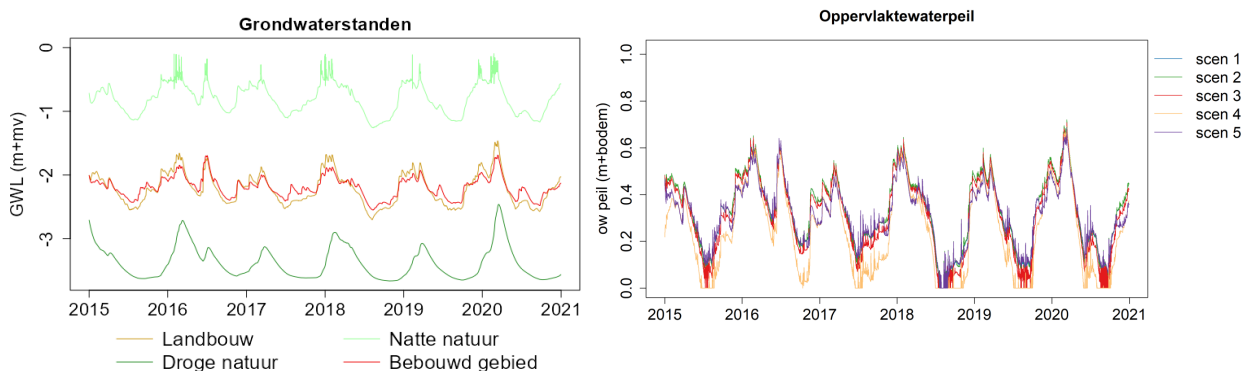
Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden vervoelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier.

Managementsamenvatting

Systemmodel Watersysteemverkenner kan inzicht geven in het watersysteem en effecten van maatregelen helpen inschatten

Auteurs Sija Stofberg en Marjolein van Huijgevoort

Om goed om te gaan met de gevolgen van klimaatverandering en toenemend watergebruik zijn in Nederland ingrijpende maatregelen in het watersysteem nodig. Om de effecten van deze maatregelen te kunnen inschatten, kan een nieuw ontwikkeld systeemdynamisch model worden gebruikt, waarin zowel het hydrologische als het antropogene systeem en de interacties tussen deze deelsystemen worden meegenomen. Het systeemdynamisch model 'de Watersysteemverkenner' is toegepast voor een gebied op de zuidelijke hoge zandgronden om de effecten van verschillende interventies tegen droogteproblematiek in beeld te brengen. De resultaten laten zien dat de effecten van maatregelen kunnen verschillen als gevolg van omgevingskenmerken en onderstrepen dat systeembegrip belangrijk is bij de keuze voor maatregelen. De Watersysteemverkenner kan snel inzicht geven in het watersysteem en de interacties, ook al heeft het model beperkingen als relatief grote vereenvoudigingen en is het nog niet gevalideerd. Verdere ontwikkeling en toetsing is gewenst om de Watersysteemverkenner te kunnen inzetten bij verdere verkenningen naar maatregelen in watersystemen.



Voorbeelden van resultaten uit de Watersysteemverkenner voor grondwaterstanden per landgebruiktype (links) en het oppervlaktewaterpeil voor verschillende scenario's (rechts)

Belang: Verkennen van effecten van maatregelen op het watersysteem

Klimaatverandering en een toename in watergebruik zorgen voor steeds meer uitdagingen in het waterbeheer in Nederland. Om het watersysteem robuuster te maken, zijn ingrijpende maatregelen nodig. Om de effecten van deze maatregelen goed te kunnen inschatten, is het belangrijk om zowel het hydrologische (grondwater, oppervlaktewater) als het antropogene (waterketen, watergebruik) systeem en de interacties tussen deze deelsystemen te beschouwen. Veel van de nu toegepaste modellen nemen deze interacties niet of zeer beperkt mee, of

hebben zeer lange rekentijden, waardoor ze minder goed geschikt zijn om de effecten en eventuele bijwerkingen van veel verschillende maatregelen te vergelijken. Systeemdynamische modellen zouden kunnen helpen om een eerste grove inschatting van de effecten van maatregelen te krijgen.

Aanpak: Ontwikkeling en toepassing systeemmodel Watersysteemverkenner

Binnen het WiCE project "Ingrediënten voor een Watertransitie" is een systeemdynamisch model ontwikkeld: de Watersysteemverkenner (Stofberg & van Huijgevoort, 2024). Dit model wordt in deze

studie toegepast voor een gebied in Noord-Brabant ("casus Zuid"). Met de Watersysteemverkenner is de dynamiek van het watersysteem op de zuidelijke hoge zandgronden in beeld gebracht. Ook is onderzocht hoe verschillende droogtmaatregelen kunnen doorwerken in het watersysteem en hoe dit samenhangt met omgevingskenmerken. De volgende maatregelen zijn onderzocht:

- hergebruik van RWZI-effluent in de landbouw
- infiltratie van RWZI-effluent in grondwater-onafhankelijke natuur
- verhogen van slootbodems en
- infiltratie van oppervlaktewater in grondwateronafhankelijke natuur tijdens de wintermaanden

Daarnaast is tijdens de toepassing van de Watersysteemverkenner verkend in hoeverre en op welke manier deze methode van nut kan zijn en wat er nodig zou zijn voor verdere toepassing.

Resultaten: Positieve effecten voor grondwateraanvulling

De resultaten met de Watersysteemverkenner laten zien dat alle onderzochte maatregelen tegen droogteproblematiek op de zuidelijke hoge zandgronden mogelijk (licht of sterk) positief kunnen bijdragen aan de diepere grondwateraanvulling. Tegelijkertijd kan infiltratie van oppervlaktewater in de winter ook bijdragen aan het verminderen van het aantal dagen met te lage afvoeren. Deze maatregel is daarom mogelijk geschikter dan de andere onderzochte maatregelen in (relatief landelijke) gebieden waar lage beekafvoer een aandachtspunt is. Wanneer dit laatste minder van belang is (bijvoorbeeld doordat er al relatief veel basisafvoer is), kan verhoging van slootbodems een veel groter effect hebben op grondwaterbuffering, doordat deze maatregel leidt tot een structurele verhoging van grondwaterstanden. In een vervolgstap kan dit verder uitgewerkt worden met een ruimtelijk expliciet model, om voor een specifiek gebied in meer detail het effect van de meest kansrijke maatregelen inzichtelijk te maken.

De resultaten laten daarnaast zien dat de effecten van maatregelen afhangen van de eigenschappen van de omgeving (drainageweerstand, ondergrond, landgebruik), waarbij bepaalde maatregelen in

gebieden met bepaalde omgevingskenmerken een gunstiger of juist ongunstiger effect kunnen hebben.

Toepassing: Inzicht in het watersysteem en effecten van maatregelen

Vergeleken met andere methoden kan de Watersysteemverkenner snel processen in het watersysteem simuleren, waarbij feedbackrelaties tussen processen worden meegenomen. In verband met de relatief grote vereenvoudigingen en het feit dat er (nog) geen gedegen validatie heeft plaatsgevonden, zijn de resultaten indicatief. De resultaten hebben echter wel meerwaarde, doordat een indruk verkregen wordt van de relatieve omvang van effecten van maatregelen en (een deel van de) mogelijke interacties ('bijwerkingen') in het watersysteem.

De resultaten laten duidelijk zien dat maatregelen verschillend kunnen uitwerken bij verschillende omgevingskenmerken, als gevolg van de interacties in het watersysteem. Systeemdenken maakt dit soort interacties zichtbaar zonder dat de noodzaak voor simulaties met ruimtelijk gedistribueerde modellen (en lange reketijden). Om deze methode in het vervolg goed te kunnen inzetten, is verdere ontwikkeling en toetsing van de Watersysteemverkenner gewenst.

Rapport

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Inzicht in het watersysteem door toepassing van een systeemmodel* (BTO 2024.015), en behoort tot een reeks rapporten waarvan het overzicht is beschreven in *Interventies in het watersysteem* (BTO 2024.017).

Inhoud

Colofon	2
<i>Managementsamenvatting</i>	3
Inhoud	6
1 Inleiding	7
2 Modelbeschrijving	8
3 Methoden	11
3.1 Inleiding	11
3.2 Gebiedsbeschrijving	12
3.3 Toepassing systeemmodel	15
3.4 Simulaties	17
4 Resultaten	19
4.1 Huidige situatie	19
4.2 Interventies	24
4.3 Gevoeligheidsanalyse – omgevingskenmerken	30
4.4 Gevoeligheidsanalyse - interventies in relatie tot omgevingskenmerken	35
5 Discussie	41
5.1 Mogelijkheden en beperkingen van de Watersysteemverkenner	41
5.2 Maatregelen in watersystemen op de zuidelijke hoge zandgronden	42
5.3 Uitdagingen voor de toepassing van watersysteemdenken	43
6 Conclusies en aanbevelingen	45
6.1 Conclusies	45
6.2 Aanbevelingen	45
7 Referenties	47

1 Inleiding

In Nederland spelen grote uitdagingen op het gebied van waterbeheer. Van oudsher is het waterbeheer in Nederland gericht op het afvoeren van het overschot aan water. Echter, recente droogtes (bijv., 2018-2020, 2022) hebben duidelijk gemaakt dat het watersysteem ook kwetsbaar is voor watertekorten. Door klimaatverandering en een toename van watergebruik zullen droogte en watertekorten in de toekomst vaker voorkomen. Om het watersysteem robuust in te richten zijn ingrijpende maatregelen nodig (Bartholomeus et al., 2023a; Bartholomeus et al., 2023b).

Om de effecten van deze maatregelen goed in te schatten is het belangrijk om naar het hele watersysteem te kijken en zowel het hydrologische (grondwater, oppervlaktewater) als het antropogene (waterketen, watergebruik) systeem en de interacties tussen deze deelsystemen te beschouwen (Krajenbrink et al., 2021; Stofberg et al., 2023a; Stofberg et al., 2023b). Systeemdynamische modellen kunnen gebruikt worden om een eerste grove inschatting van effecten van maatregelen te krijgen. Een uitgebreide beschrijving van systeemdenken en systeemdynamisch modelleren met betrekking tot watersystemen is opgenomen in WiCE rapport BTO 2024.017 (Stofberg et al., 2024). In deze studie wordt de toepassing van een systeemdynamisch model beschreven. Binnen het WiCE project “Ingrediënten voor een Watertransitie” is een systeemdynamisch model ontwikkeld: de Watersysteemverkenner (Stofberg & van Huijgevoort, 2024). Dit model wordt in deze studie gebruikt om inzicht te geven in het watersysteem en de effecten van interventies te duiden. Het model is toegepast in een case study: casus ‘Zuid’.

Casus Zuid richt op een gebied in Noord-Brabant. Net zoals andere gebieden met hoge zandgronden, heeft deze provincie te maken met vraagstukken rondom waterbeschikbaarheid tijdens droge perioden. Deze vraagstukken komen onder andere tot uiting in dalende grondwaterstanden, verminderde diepe grondwateraanvulling en periodiek lage afvoeren. In relatie tot deze vraagstukken worden maatregelen overwogen. Hierbij kan gedacht worden aan hergebruik van restwater (Bartholomeus et al., 2019; Bartholomeus et al., 2018; Cirkel et al., 2017; Krajenbrink et al., 2021; Pronk et al., 2021; Stofberg et al., 2021) of aan ingrepen in het landschap (Adviescommissie Droogte, 2022; Bartholomeus et al., 2023b; Stofberg & Brakkee, 2022; van den Eertwegh et al., 2019).

In dit onderzoek is de Watersysteemverkenner toegepast om de dynamiek van het watersysteem op de zuidelijke hoge zandgronden in beeld te brengen en te verkennen hoe verschillende droogtemaatregelen, waarmee de waterketen en het -systeem meer worden verbonden, kunnen doorwerken in het watersysteem en hoe dit samenhangt met omgevingskenmerken. Daarnaast wordt de toepassing van de Watersysteemverkenner in deze casus gebruikt om te verkennen in hoeverre en op welke manier deze methode van nut kan zijn en wat er nodig zou zijn voor verdere toepassing.

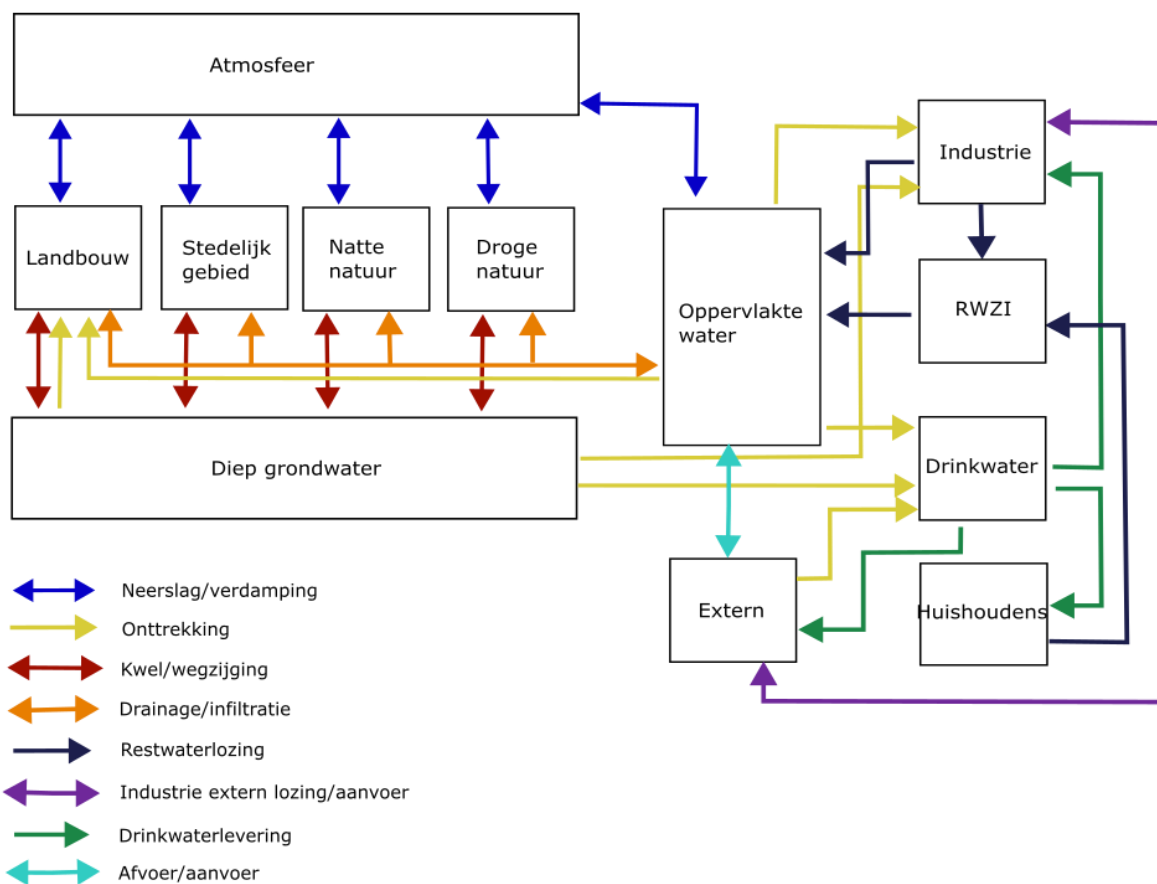
Hoofdstuk 2 geeft een beknopte beschrijving van het model. In Hoofdstuk 3 worden de methoden beschreven, waarna in Hoofdstuk 4 de resultaten worden toegelicht. Daarna volgt de discussie (Hoofdstuk 5) en de conclusies (Hoofdstuk 6).

2 Modelbeschrijving

We hebben binnen WICE een systeemdynamisch model ontwikkeld om het watersysteem te beschrijven en effecten van maatregelen te verkennen: de Watersysteemverkenner. De Watersysteemverkenner is een simulatietool gemaakt om het gedrag van regionale watersystemen, zoals kleine stroomgebieden en polders, en de mogelijke (doorwerking van) effecten van maatregelen daarin te leren kennen (Figuur 2-1).

De Watersysteemverkenner is vooral bedoeld om met beperkte rekentijd een grof beeld te verkrijgen van de dynamiek die op kan treden in watersystemen als gevolg van interactie van verschillende deelsystemen in het hydrologische en antropogene watersysteem. In tegenstelling tot veel gebruikte gedetailleerde, ruimtelijke modellen, worden interacties tussen verschillende onderdelen van het watersysteem en waterketen expliciet meegenomen, waardoor de doorwerking van eventuele maatregelen inzichtelijk gemaakt kan worden. Het model is een sterk vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid, waardoor het niet geschikt is om een voorspelling te doen van specifieke situaties. We geven hier een beperkte beschrijving van het model, een uitgebreide omschrijving is hier te vinden in de documentatie van het model (Stofberg & van Huijgevoort, 2024).

Het model simuleert de interacties tussen het hydrologische en antropogene systeem. Voor het hydrologische systeem wordt een studiegebied opgedeeld in vier verschillende landgebruikstypen: landbouw, stedelijk gebied, natte natuur en droge natuur. Per landgebruikstype wordt één grondwaterstand bepaald. Voor het antropogene systeem worden de industrie, RWZI's, drinkwatervoorziening en watergebruik door huishoudens meegenomen. Elke sector (landbouw, drinkwatervoorziening, industrie) kan water onttrekken uit grond- of oppervlaktewater en water lozen op oppervlaktewater (RWZI, industrie) indien van toepassing in het gebied.



Figuur 2-1. Schematische weergave van de Watersysteemverkenner.

Er zijn verschillende interventies in het watersysteem mogelijk in het model. De maatregelen zijn gericht op droogte en verdeeld in drie categorieën: minder watergebruik, meer water vasthouden en aanvullen, en hergebruik.

Minder watergebruik

- Onttrekkingsverbod uit het oppervlaktewater voor de landbouw: er mag geen water meer onttrokken worden door de landbouw uit het oppervlaktewater.
- Onttrekkingsverbod uit het grondwater voor de landbouw: er mag geen water meer onttrokken worden door de landbouw uit het grondwater.
- Campagne voor het verminderen van drinkwatergebruik tijdens droogte: de piekvraag naar drinkwater tijdens een droge periode neemt af.

Meer water vasthouden en aanvullen

- Afkoppelen van stedelijk gebied van het riool voor de opvang van regenwater: regenwater wordt niet opgevangen via het riool, maar infiltreert in het stedelijk gebied.
- Verhoging van de oppervlaktewaterpeilen: via een stuw worden de peilen hoger gezet.
- Verhoging van de slootbodem.
- Hermeandering om de oppervlaktewaterafvoer te vertragen: deze maatregel is alleen toepasbaar in vrij afwaterende gebieden.

- Infiltratie van oppervlaktewater in hoger gelegen natuur tijdens de wintermaanden: deel van het oppervlaktewater wordt geïnfiltreerd in de winter. De hoeveelheid wordt bepaald via een invoerparameter.

Hergebruik

Hierbij wordt uitgegaan van hergebruik van RWZI effluent. De droogweerafvoer kan worden ingezet als vervanging van grondwateronttrekkingen in verschillende sectoren: landbouw, industrie, drinkwatervoorziening. Daarnaast kan effluent geïnfiltreerd worden in grondwateronafhankelijke natuurgebieden. Bij de verdeling van het effluent over de verschillende maatregelen mag de inzet nooit boven de 100% komen.

Op dit moment wordt in de Watersysteemverkenner geen rekening gehouden met de waterkwaliteit, maar richt het model zich alleen op de kwantitatieve effecten van maatregelen. Voor de kwaliteit van RWZI-effluent wordt uitgegaan van het concept van de RWZI als Waterfabriek (Krajenbrink et al., 2021), waarbij de aanname is dat de kwaliteit geschikt is voor hergebruik.

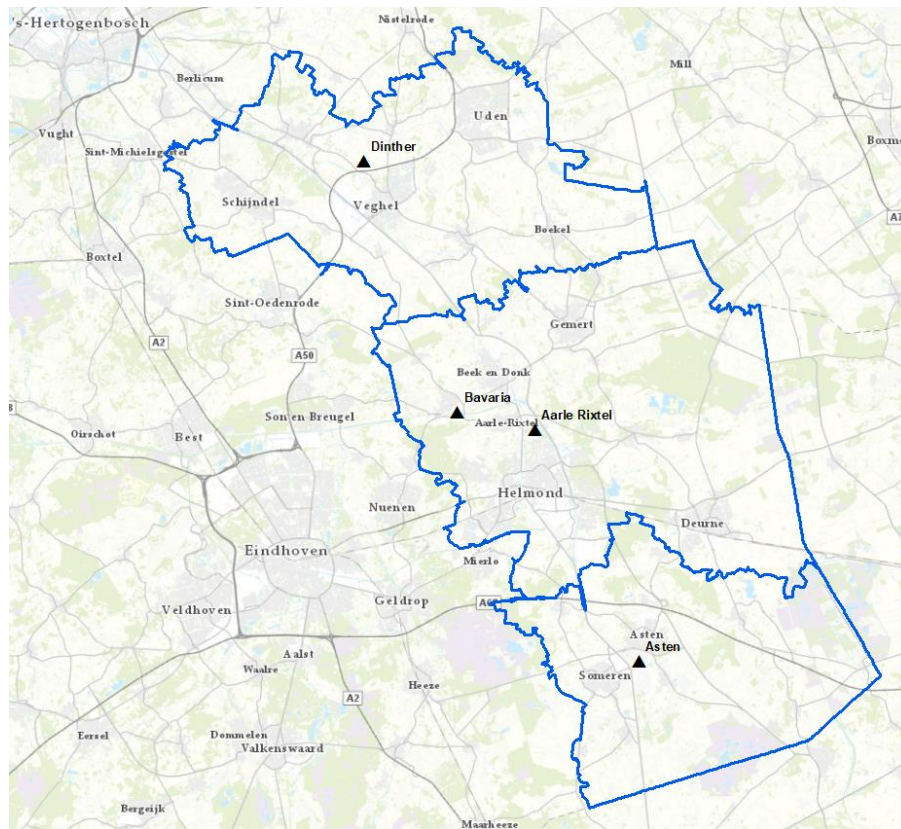
3 Methoden

3.1 Inleiding

We gaan voor casus Zuid uit van het gebied van de casus Hoog Nederland uit het project “RWZI als Waterfabriek voor een robuuste watervoorziening” (Krajenbrink et al., 2021). Binnen dat project zijn alle relevante gegevens opgevraagd, we maken hier zoveel mogelijk gebruik van deze eerder opgevraagde gegevens. Het casusgebied omvat de aanvoergebieden van drie verschillende RWZI’s (Asten, Aarle-Rixtel en Dinther). Het gebied beslaat in totaal een oppervlak van 714 km². Het is een landelijk gebied met een aanzienlijk areaal landbouw. Het stedelijk gebied bestaat onder andere uit de plaatsen Helmond, Aarle-Rixtel, Asten, Someren, Deurne, Gemert, Veghel, Uden en Schijndel. Met name de plaatsen Helmond, Veghel en Uden hebben een belangrijk aandeel industriegebied. Rondom Helmond en ten noorden van Asten komen grote bosgebieden voor, zoals de Stippelberg. Het gebied wordt doorsneden door de rivier de Aa, die in noordwestelijke richting afwatert. Tevens zijn enkele gegraven kanalen aanwezig, zoals de Zuid-Willemsvaart en het Wilhelminakanaal.

Er is in het gebied al eerder onderzoek gedaan naar waterhergebruik. Door de aanwezigheid van industrie en RWZI’s is er effluent beschikbaar voor hergebruik. Op dit moment wordt een deel van het industriële effluent al hergebruikt in de landbouw, maar een groot deel van het totaal beschikbare effluent wordt snel afgevoerd via het oppervlaktewater. In het gebied spelen problemen met de waterbeschikbaarheid in droge perioden en met dalende grondwaterstanden. Hergebruik van effluent om het grondwatergebruik terug te dringen of voor infiltratie in het gebied biedt mogelijkheden om de waterbeschikbaarheid te verbeteren. Om inzicht te krijgen in de kwantitatieve effecten van deze maatregelen, ook in verhouding tot andere maatregelen, is de Watersysteemverkenner (Stofberg & van Huijgevoort, 2024) toegepast.

De Watersysteemverkenner is ingesteld met een aantal basiseigenschappen van het studiegebied. Aangezien het model relatief grof is en er geen (afdoende) kalibratie en validatiestappen zijn toegepast, kunnen de modelresultaten niet gezien worden als een simulatie van het gebied, maar slechts als een *indicatie van de patronen* die in een dergelijk gebied kunnen ontstaan.



Figuur 3-1. Begrenzing van het casusgebied voor casus Zuid met de locatie van de RWZI's.

3.2 Gebiedsbeschrijving

Landgebruik

De specifieke oppervlaktetes voor landgebruik zijn berekend uit landgebruikskarten (Bestand Bodemgebruik 2015), waarbij voor de invoer van het model het volgende onderscheid is gemaakt:

- Stedelijk: bebouwd gebied en bedrijfsterrein (11.9%)
- Landbouw: landbouw en glastuinbouw (63.8%). In het casus gebied gaat het vooral om gras en mais.
- Oppervlaktewater (1.2%)
- Natuur en overig: alle overgebleven landgebruikstypen, namelijk bos, droog natuurlijk terrein, hoofdweg, nat natuurlijk terrein, semi-bebouwd, spoorweg, vliegveld (23.1%).

Binnen het landgebruik natuur wordt een verdeling gemaakt tussen natte natuur en droge natuur. De verdeling tussen natte en droge natuur is gebaseerd op de beheertypenkaart (Natuurbeheerplan Noord-Brabant), waarbij de volgende beheertypen onder natte natuur vallen: N12.02 Kruiden- en faunarijk grasland, N14.01 Rivier- en beekbegeleidend bos, N10.02 Vochtig hooiland, N14.02 Hoog- en laagveenbos, N06.04 Vochtige heide, N16.04 Vochtig bos met productie, N17.06 Vochtig en hellinghakhout, N12.06 Ruigteveld, N14.03 Haagbeuken- en essenbos, N05.04 Dynamisch moeras, N06.03 Hoogveen, N06.01 Veenmosrietland en moerasheide, N10.01 Nat schraalland, N17.03 Park- of stinzenbos, N17.05 Wilgengriend. In het studiegebied komt dit neer op 72% droge natuur en 28% natte natuur.

Drinkwatervoorziening

In het casusgebied zijn verschillende pompstations voor drinkwaterwinning aanwezig. De stations Vlieden, Helmond, Lieshout, Veghel en Schijndel vallen binnen het gebied. In de periode 2018-2019 is door deze stations gemiddeld 35 miljoen m³ per jaar onttrokken (gegevens Brabant Water, zoals gerapporteerd in Krajenbrink et al. (2021)). Niet al het onttrokken drinkwater wordt geconsumeerd binnen het casusgebied, omdat een deel naar

buiten het gebied wordt getransporteerd. Voor een nauwkeuriger inschatting van het drinkwatergebruik is gebruik gemaakt van gegevens van Brabant Water over de drinkwaterlevering. Voor de periode 2015-2017 is het totale gebruik ingeschat op 22.1 miljoen m³ per jaar. Het gebruik in 2019 bedroeg circa 26.6 miljoen m³. Van deze hoeveelheden is in het project "RWZI als Waterfabriek voor een robuuste watervoorziening" ingeschat dat circa 2.9 miljoen m³/jaar bestemd is voor grootindustriële toepassingen (drinkwatergebruik > 100 000 m³/jaar). De rest is bestemd voor huishoudelijke, klein-zakelijke en overige toepassingen.

De totale drinkwatervraag in het model wordt bepaald door het aantal inwoners in het gebied en het gemiddelde gebruik per persoon, de industriële watervraag, een factor die aangeeft hoeveel van het onttrokken water buiten het gebied wordt gebruikt (Factor_locally_produced, tabel 3-1) en een factor die het watergebruik van zakelijke niet-industriële klanten t.o.v. het watergebruik van huishoudens bepaalt (dw_businesses_rel_to_pop, tabel 3-1). De factor voor watergebruik buiten het gebied is ingeschat op basis van de totale onttrokken hoeveelheid en het watergebruik in het gebied zelf (35 miljoen m³/22.1 miljoen m³). Om in het model tot een schatting van de totale watervraag binnen het gebied te komen die overeenstemt met de data, is de factor voor zakelijk niet-industrieel gebruik geschat op 0.4 op basis van exploratieve modelsimulaties.

Landbouw

Voor de berekening in het model wordt uitgegaan van het gebruik van grondwater en niet van oppervlaktewater. Bij het waterschap zijn geen onttrekkingsgegevens beschikbaar voor het oppervlaktewater en er wordt bovendien in droge periodes een beregeningsverbod uit oppervlaktewater ingesteld. Op basis van beschikbare gegevens van het waterschap worden de grondwateronttrekkingen voor berekening geschat op 10.5 miljoen m³/jaar (gemiddeld voor 2015-2017). De gemelde onttrokken hoeveelheid in 2019 bedraagt 19.5 miljoen m³. Aangezien deze gemelde jaarpogaven mogelijk niet compleet zijn en kleine onttrekkingen niet hoeven worden gemeld, ligt de daadwerkelijk onttrokken hoeveelheid voor berekening naar verwachting hoger. We rekenen desalniettemin met de beschikbare getallen.

In het model wordt de beregeningsbehoefte bepaald op basis van de hoeveelheid beschikbaar vocht in de bodem en gewaseigenschappen. Om tot een schatting van de totale beregeningshoeveelheden te komen die overeenstemt met de data, is voor het oppervlak waar irrigatie plaats kan vinden (Fraction_area_irr, tabel 3-1) een waarde gekozen van 0.25 op basis van exploratieve modelsimulaties.

Industrie

Het watergebruik van de industrie is eerder beschreven in Krajenbrink et al. (2021):

Binnen het casusgebied bevinden zich drie industriële grondwateronttrekkingen die vergunningplichtig zijn krachtens de Waterwet (vergund onttrekkingsdebiet > 150 000 m³/jaar). Grote onttrekkingen zijn de brouwerij Bavaria in Lieshout, die in de periode 2015-2017 gemiddeld 2.8 miljoen m³/jaar heeft onttrokken, en Friesland Campina in Veghel, die gemiddeld 1.1 miljoen m³/jaar heeft onttrokken. Daarnaast zijn er diverse kleinere gemelde onttrekkingen in het gebied aanwezig. In totaal bedraagt de ingeschatte hoeveelheid onttrokken grondwater voor industriële doeleinden voor de periode 2015-2017 circa 4.1 miljoen m³/jaar. Er is geen informatie beschikbaar over onttrekkingen uit oppervlaktewater, maar de inschatting is dat dit onderdeel verwaarloosbaar is in het casusgebied. Er is sprake van wateraanvoer van buiten het gebied naar Friesland Campina (via aanvoer van het ruwe product), deze aanvoer is geschat op 1.7 miljoen m³/jaar.

In totaal komt de watervraag voor industrie volgens deze gegevens uit op 8.7 miljoen m³/jaar (drinkwater, grondwater en extern). Er is bekend dat 3.6 miljoen m³/jaar geloosd wordt naar de RWZI door Friesland Campina en 1.86 miljoen m³/jaar via een IAZI op de Goorloop door Bavaria. Deze laatste stroom is in het model opgenomen als rechtstreekse lozing op het oppervlaktewater. Overige informatie over lozingen is niet beschikbaar. Dat leidt tot de volgende fracties voor industrieel water als invoer voor het model:

- Fractie extern: 1.7/8.7
- Fractie oppervlaktewater: 0/8.7
- Fractie drinkwater: 2.9/8.7
- Fractie grondwater: 4.1/8.7
- Fractie totaal restwater: (3.6+1.86)/8.7
- Fractie RWZI van totaal restwater: 3.6/(3.6+1.86)

RWZI

De eigenschappen van de RWZI's zijn eerder beschreven in Krajenbrink et al. (2021):

In het casusgebied zijn drie RWZI's aanwezig voor de verwerking van afvalwater. Gegevens over effluent-debiten in de periode 2015-2017 zijn ontleend aan het waterschap. RWZI Asten loost per jaar 5.0 miljoen m³ effluent op de Aa. RWZI Aarle-Rixtel produceert gemiddeld 24.4 miljoen m³ effluent per jaar, eveneens geloosd op de Aa. RWZI Dinther produceert gemiddeld 17.5 miljoen m³/jaar; dit effluent wordt geloosd op de Beekgraaf, die afwatert op de Aa nabij Veghel. De totale hoeveelheid geloosd effluent uit RWZI's bedraagt zodoende gemiddeld bijna 47 miljoen m³/jaar. In het droge jaar 2019 was de hoeveelheid effluent met 46.2 miljoen m³ vrijwel gelijk. Waterschap Aa & Maas heeft recentelijk op jaarbasis de verhouding DWA:RWA (Droogweerafvoer versus Regenwaterafvoer) voor de RWZI's berekend. De percentages DWA van de totale influentstroom zijn als volgt: 65% voor Asten, 73% voor Aarle-Rixtel, en 77% voor Dinther. Deze DWA-stroom bestaat hoofdzakelijk uit huishoudelijk afvalwater, maar ook uit industriële lozingen en 'rioolvreemd water' zoals drainage, inloop van oppervlakte- of grondwater, en grondwatersaneringen.

De berekende hoeveelheid effluent naar de RWZI's wordt in het model bepaald door het drinkwatergebruik, rechtstreekse lozingen vanuit industrie, rioolvreemd water en afvoer van regenwater via het riool. Op basis van exploratieve modelsimulaties bleek dat een factor van 0.3 voor het deel van het stedelijk gebied waarvan neerslag afgevoerd wordt naar riool (Factor_prec_sewage, tabel 3-1) tot een realistische inschatting van de hoeveelheid effluent leidde.

Grond- en oppervlaktewatersysteem

De eigenschappen van de ondergrond zijn eerder beschreven in Krajenbrink et al. (2021):

De ondergrond in een groot deel van het casusgebied bestaat tot op vrij grote diepte uit overwegend zandige afzettingen (TNO, 2024). De bovenste 20 m bestaan uit dekzand (formatie van Boxtel) met lokaal een enkele kleilaag. Daaronder bevinden zich hoofdzakelijk zandige afzettingen met enkele dunne kleilagen (formaties van Beegden en Sterksel) tot een diepte van circa 75 m-mv. In het oosten van het casusgebied hebben de zandpakketten een geringere dikte en komt klei ondieper voor. In de beekdalen komen lokaal holocene afzettingen voor. Door het ontbreken van een afscheidende deklaag zal het neerslagoverschot voor een groot deel infiltreren en deels via het oppervlaktewatersysteem worden afgevoerd. In het grootste deel van het gebied treedt wegzijging op, met uitzondering van de beekdalen. Op basis van het maaiveldverloop (hoogst in het zuidoosten, laagst in het noordwesten) is de verwachting dat de regionale grondwaterstroming noordwestelijk is gericht. Echter, gezien de complexiteit van het systeem worden in deze studie geen verdere schattingen gedaan van de precieze richting en het volume van de regionale grondwaterstroming. Het casusgebied watert over het algemeen onder vrij verval af richting het noordwesten. De belangrijkste natuurlijke waterloop is de rivier de Aa, die ten noordwesten van Veghel het casusgebied uit stroomt. Daarnaast kent het gebied verschillende gegraven kanalen, waaronder de Zuid-Willemsvaart, die een deel van de oude loop van de Aa volgt. Gedurende de 20^e eeuw is in het kader van de ruilverkaveling het watersysteem uitgebreid en de drainagebasis verlaagd, waardoor in de winter het neerslagoverschot sneller het gebied uit wordt geleid.

Diepere stijghoogten

Voor diepere stijghoogten is gebruik gemaakt van een isohypsenkaart (Geologische Dienst Nederland, 2024).

3.3 Toepassing systeemmodel

Uit de beschikbare gegevens vanuit het eerdere project zijn de waarden voor de invoerparameters voor de Watersysteemverkenner afgeleid. De invoerparameters zijn in detail beschreven in Stofberg & van Huijgevoort (2024). In Tabel 3-1 zijn alle waarden zoals toegepast voor casus Zuid weergegeven.

Tabel 3-1 Overzicht van alle invoerparameters voor de Watersysteemverkenner voor casus Zuid.

Aanduiding	Waarde ¹	Eenheid	Toelichting
<i>Algemene eigenschappen</i>			
P	Data Eindhoven	mm/d	Neerslag van KNMI
ETref	Data Eindhoven	mm/d	Referentieverdamping van KNMI
Timestep	0.5	d	Tijdstap model
Total area	713750505	m ²	Totale oppervlakte studiegebied
Urban_per	11.9	%	Percentage stedelijk gebied van totale oppervlakte
Agriculture_per	63.8	%	Percentage landbouw van totale oppervlakte
Surface_water_per	1.2	%	Percentage oppervlaktewater van totale oppervlakte
Nature_dry_per	72	%	Percentage droge natuur van totale natuuroppervlakte
Level_sea	0	m	Zeeniveau; wordt gebruikt als referentieniveau
Level_sw_base	17	m	Bodemhoogte oppervlaktewater
Level_surf_agri	18.7	m	Maaiveldhoogte landbouw
Level_surf_urban	18.7	m	Maaiveldhoogte stedelijk gebied
Level_surf_nature_wet	16	m	Maaiveldhoogte natte natuur
Level_surf_nature_dry	20	m	Maaiveldhoogte droge natuur
Sw_level_ini	17.5	m	Beginwaarde oppervlaktepeil t.o.v. referentieniveau
Head_gwdeep	16.3	m	Gemiddelde stijghoogte eerste watervoerend pakket (wvp1, op basis van isohypsenkaart)
Niveaubovenwaterbodem_agri	2.6	m	Verskil maaiveldhoogte landbouw en bodem oppervlaktewater
niveaubovenwaterbodem_urban	2.6	m	Verskil maaiveldhoogte stedelijk gebied en bodem oppervlaktewater
niveaubovenwaterbodem_nature_wet	1.3	m	Verskil maaiveldhoogte natte natuur en bodem oppervlaktewater
niveaubovenwaterbodem_nature_dry	3.6	m	Verskil maaiveldhoogte droge natuur en bodem oppervlaktewater
Talud	1/5	-	Talud oppervlaktewater

<i>Industrie</i>			
Demand_ind_mj	0.0122	m ³ /m ² /j	Totale jaarlijkse watervraag industrie
Fraction_ext	0.195	-	Fractie watervraag externe bron
Fraction_dw	0.33	-	Fractie watervraag drinkwater
Fraction_gw	0.47	-	Fractie watervraag grondwater
Fraction_restwater	0.63	-	Fractie aangevoerd water dat restwater wordt
Fraction_wwtp	0.66	-	Fractie aangevoerd water dat naar RWZI gaat
<i>RWZI</i>			
Sewage_cap_m	0.015	m/d	Rioolcapaciteit stedelijk gebied
Limit_overflow_m	0.9*0.015	m/d	Grens riooloverstort
Factor_prec_sewage	0.3	-	Deel van stedelijk gebied waarvan neerslag afgevoerd wordt naar riool
Reusepotentialfactor	0.9	-	Deel van influent dat potentieel hergebruikt kan worden
<i>Stedelijk gebied</i>			
St	Zand	-	Bodemtype: zand, veen of klei
Drainageres	200	d	Drainageweerstand
Ct	Stad	-	Gewastype
Dis_gr	0.2	-	Deel van stadsoppervlak dat groen is
Depth_sewage	2.7	m	Diepte riolering
Drainageres_sewage	1200	d	Drainageweerstand riolering
<i>Landbouw</i>			
St	Zand	-	Bodemtype: zand, veen of klei
Drainageres	180	d	Drainageweerstand
Fraction_area_irr	0.25	-	Deel van het oppervlak waar irrigatie plaats kan vinden
Irr_ineff	1.4	-	Hoeveelheid benodigd water om 1 eenheid effectieve irrigatie te verkrijgen, als gevolg van verliesposten.
Fraction_irr_sw	0	-	Fractie van irrigatie uit oppervlaktewater
Irr_gw_source	Freatisch	-	Ottrekking uit diep of freatisch gw
Ct	Gras	-	Gewastype
<i>Natte natuur</i>			
St	Veen	-	Bodemtype: zand, veen of klei
Ct	Natte natuur	-	Gewastype
Drainageres	120	d	Drainageweerstand, aanname dat dit type natuur in relatief sterke verbinding met het oppervlaktewater staat
<i>Droge natuur</i>			
St	Zand	-	Bodemtype: zand, veen of klei

Ct	Droge natuur	-	Gewastype
Drainageres	1200	d	Drainageweerstand
<i>Diep grondwater</i>			
D	10	m	Schatting effectieve dikte dieper grondwaterpakket
c	600	d	Weerstand naar dieper grondwater
S	$3 \cdot 10^{-5}$	m ⁻¹	Elastische berging per m pakketdikte
<i>Drinkwatervoorziening</i>			
Loss_per	9	%	Verlies bij productie en distributie
Use_pp	0.130	m ³ /d	Gebruik per persoon
Fraction_sw	0	-	Deel van drinkwatervraag uit oppervlaktewater
Factor_locally_produced	1.5	-	Deel van drinkwatervraag dat lokaal geproduceerd wordt (factor >1 betekent dat er water geëxporteerd wordt)
Daily_pars1	1 ⁻⁸	-	Parameters voor berekenen van
Daily_pars2	-3 ⁻⁶	-	dagelijkse factor watervraag t.o.v.
Daily_pars3	0.0028	-	jaarlijkse vraag
dw_businesses_rel_to_pop	0.4	-	Watergebruik zakelijke niet-industriële klanten t.o.v. watergebruik huishoudens
Population	260544	-	Aantal inwoners
<i>Interventies</i>			
Maxinf_ow	0.003	m/d	Maximale infiltratiecapaciteit voor infiltreren oppervlaktewater in droge natuur
Maxinf_partofow	0.25		Maximale fractie van oppervlaktewater dat onttrokken wordt ten behoeve van infiltratie

¹dikgedrukte waarden zijn toegespitst op het casus gebied.

3.4 Simulaties

Met de Watersysteemverkenner kunnen effecten van interventies in het watersysteem bepaald worden. In het casusgebied is droogte een belangrijk thema, waarbij zowel grondwaterstanden, diepere grondwateraanvulling en beekafvoer tijdens droge perioden belangrijke aandachtspunten zijn.

Voor deze casus hebben we gekozen voor de volgende scenario's:

1. Referentiesituatie
2. Hergebruik van effluent in landbouw
3. Hergebruik van effluent voor infiltratie in grondwateronafhankelijke gebieden
4. Verhogen van slootbodems met 30 cm
5. Infiltreren van oppervlaktewater in grondwateronafhankelijke natuur tijdens de wintermaanden

Naast het verkennen van de referentiesituatie en verschillende maatregelen, wordt verkend hoe de resultaten samenhangen met enkele omgevingskenmerken, namelijk de drainageweerstand (combinatie van o.a.

bodemeigenschappen en ontwateringsmaatregelen), de weerstand naar het diepere grondwater (kenmerk ondergrond) en het aandeel stedelijk gebied. Ook wordt verkend of (en hoe) de effecten van de maatregelen kunnen afhangen van de omgevingskenmerken.

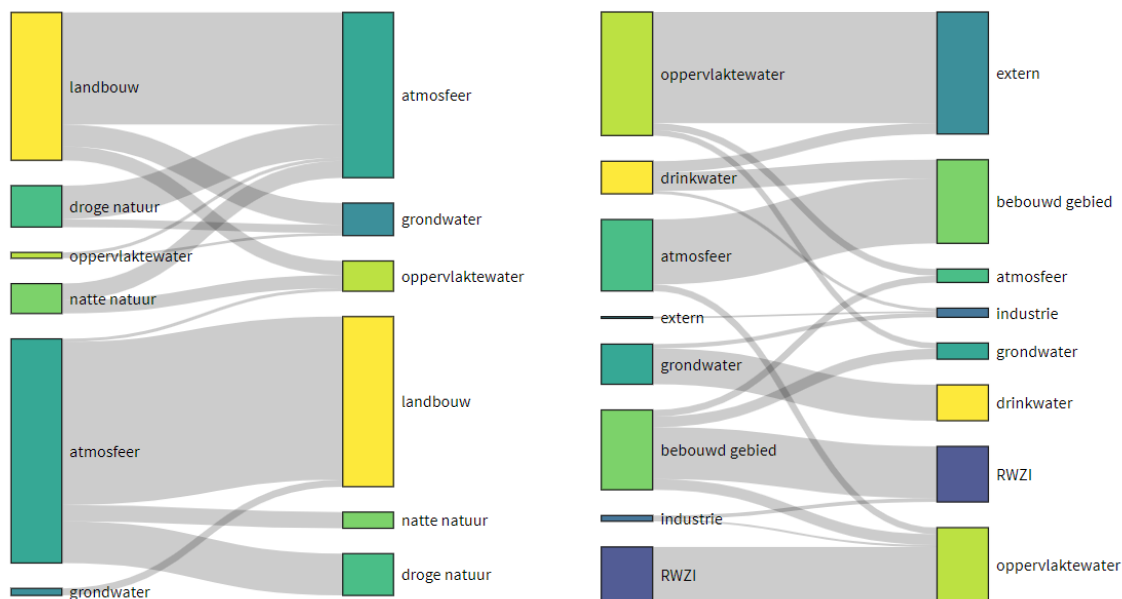
In de eerste gevoeligheidsanalyse zijn de volgende invoerwaarden gevarieerd: drainageweerstand (van het stedelijk en landbouwgebied, aangezien deze door mensen aangelegd zijn), weerstand naar het diepere grondwater (hele gebied), en het relatieve aandeel van stedelijk gebied en natuurgebied (ten koste/bate van landbouwgebied). De parameters zijn gevarieerd met 10%, 25%, 50%, 75%, 100%, 125%, 150%, 175%, 200%, 300% en 500% van hun oorspronkelijke waarde. Het relatief brede bereik is gekozen omdat deze parameters in werkelijkheid sterk kunnen variëren en voorbereidende simulaties lieten zien dat er sprake was van niet-lineaire verbanden.

In de tweede gevoeligheidsanalyse zijn de vijf bovengenoemde scenario's toegepast op de verschillende gevarieerde parameters uit de eerste gevoeligheidsanalyse.

4 Resultaten

4.1 Huidige situatie

Om een beeld te krijgen van de huidige situatie is een simulatie gedaan voor de periode 2015-2020. Figuur 4-1 en Tabel 4-1 geven een overzicht van alle gesimuleerde waterstromen in de Watersysteemverkenner voor het jaar 2017. Voor een deel van de stromen geldt dat deze als invoer in het model gebruikt worden, zoals neerslag. Andere stromen worden in het model bepaald op basis van algemene vergelijkingen en karakteristieken van het gebied, bijvoorbeeld het totale drinkwatergebruik en daaraan gekoppeld het influent naar de RWZI. De gesimuleerde stromen kunnen in dat laatste geval vergeleken worden met de beschikbare meetgegevens. De gesimuleerde stromen komen niet exact overeen met de observaties vanwege de sterke vereenvoudiging in het model, maar er is wel sprake van een redelijke inschatting in het model. De gemeten totale hoeveelheid geloosd effluent uit RWZI's, bijvoorbeeld, is 47 miljoen m³/jaar, in het model komt de schatting uit op 52.8 miljoen m³/jaar. De totale onttrekking voor drinkwater was in de periode 2018-2019 gemiddeld 35 miljoen m³ per jaar, in het model wordt in 2017 34.1 miljoen m³ onttrokken. Grondwateronttrekkingen voor beregening worden op basis van gegevens van het waterschap geschat op 10.5 miljoen m³/jaar (gemiddeld voor 2015-2017), in het model wordt in 2017 14.3 miljoen m³/jaar onttrokken.



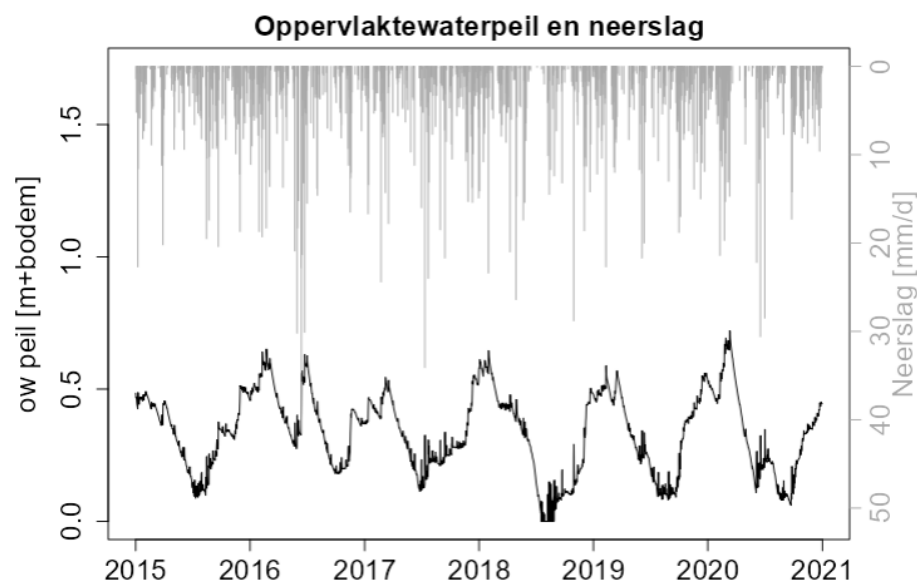
Figuur 4-1. Overzicht van de waterstromen in de Watersysteemverkenner voor casus Zuid voor 2017. Links) Stromen gericht op landgebruikstypen landbouw, natte natuur en droge natuur, rechts) stromen gericht op het stedelijk gebied en de waterketen. De dikte van de grijze vlakken geven de relatieve volumes, elk grijs vlak geeft een stroom van links naar rechts aan. Verschillen in omvang tussen de blokjes links en rechts zijn te verklaren door verschillen in berging (bijvoorbeeld variatie in berging in het grondwater en de onverzadigde zone bij landbouw) en verliezen die niet zijn weergegeven (bijvoorbeeld verliezen bij drinkwaterproductie en distributie).

Tabel 4-1. Omvang van de waterstromen in de Watersysteemverkenner voor casus Zuid voor 2017. Blauw geeft stromen aan die als invoer gegeven worden, oranje geeft stromen aan die vergeleken kunnen worden met beschikbare meetgegevens.

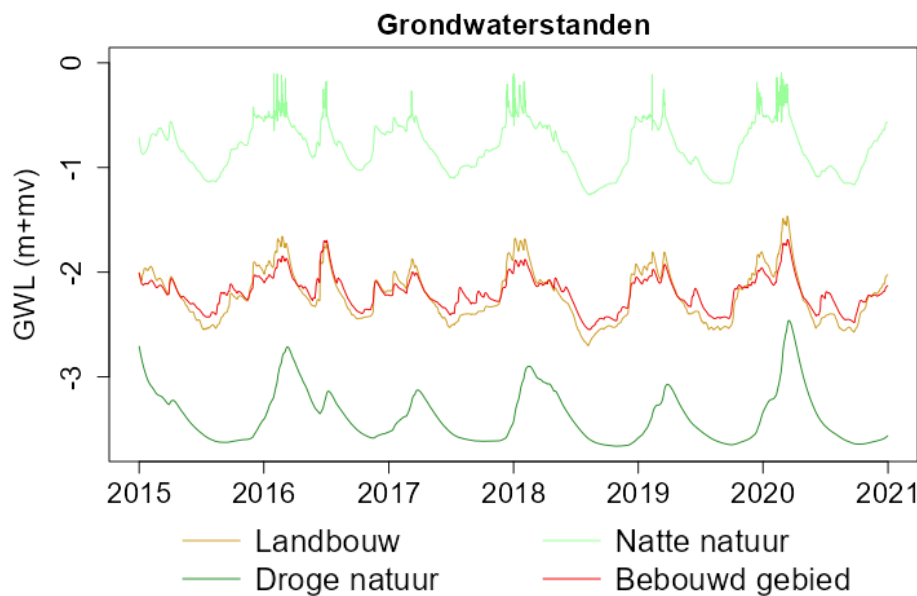
Omvang waterstroom (miljoen m ³ /jaar)	Scenario 1
Afvoer oppervlaktewater naar extern	105.6
Drinkwaterlevering industrie	2.9
Drinkwaterlevering stedelijk gebied	17.8
Drinkwaterlevering extern	10.3
Externe aanvoer naar industrie	1.7
Externe aanvoer oppervlaktewater	0
Externe wateraanvoer drinkwater	0
Industrie lozing op oppervlaktewater	1.9
Industrie lozing op RWZI	3.6
Industrielozing op extern water	0
Neerslag op droge natuur	84.4
Neerslag op landbouw	329.1
Neerslag op natte natuur	32.8
Neerslag op oppervlaktewater (direct)	6.2
Neerslag op stedelijk gebied	61.7
Onttrekking drinkwater uit grondwater	34.1
Onttrekking drinkwater uit oppervlaktewater	0
Onttrekking industrie uit grondwater	4.1
Onttrekking industrie uit oppervlaktewater	0
Onttrekking landbouw uit grondwater	14.3
Onttrekking landbouw uit oppervlaktewater	0
RWZI influent uit stedelijk gebied	49.2
RWZI lozing op oppervlaktewater	52.8
Uitstroom droge natuur naar oppervlaktewater	-7
Uitstroom landbouw naar oppervlaktewater	28.4
Uitstroom natte natuur naar oppervlaktewater	26.5
Uitstroom stedelijk gebied naar oppervlaktewater	10.3

Omvang waterstroom (miljoen m ³ /jaar)	Scenario 1
Verdamping droge natuur	67.1
Verdamping landbouw	226.3
Verdamping stedelijk gebied	6.4
Verdamping uit natte natuur	33.9
Verdamping uit oppervlaktewater	6.4
Wegzijing droge natuur naar dieper grondwater	16.5
Wegzijing landbouw naar dieper grondwater	43.9
Wegzijing natte natuur naar dieper grondwater (negatief is kwel)	-30.2
Wegzijing oppervlaktewater naar dieper grondwater	5.4
Wegzijing stedelijk gebied naar dieper grondwater	10

Naast de totale hoeveelheden per jaar voor de waterstromen geeft het model ook tijdreeksen weer voor verschillende hydrologische variabelen, zoals het oppervlaktewaterpeil (Figuur 4-2) en de grondwaterstanden (Figuur 4-3). Deze tijdreeksen geven een enkele waarde voor een gebied en zijn daarom niet rechtstreeks te vergelijken met peilbuisobservaties.

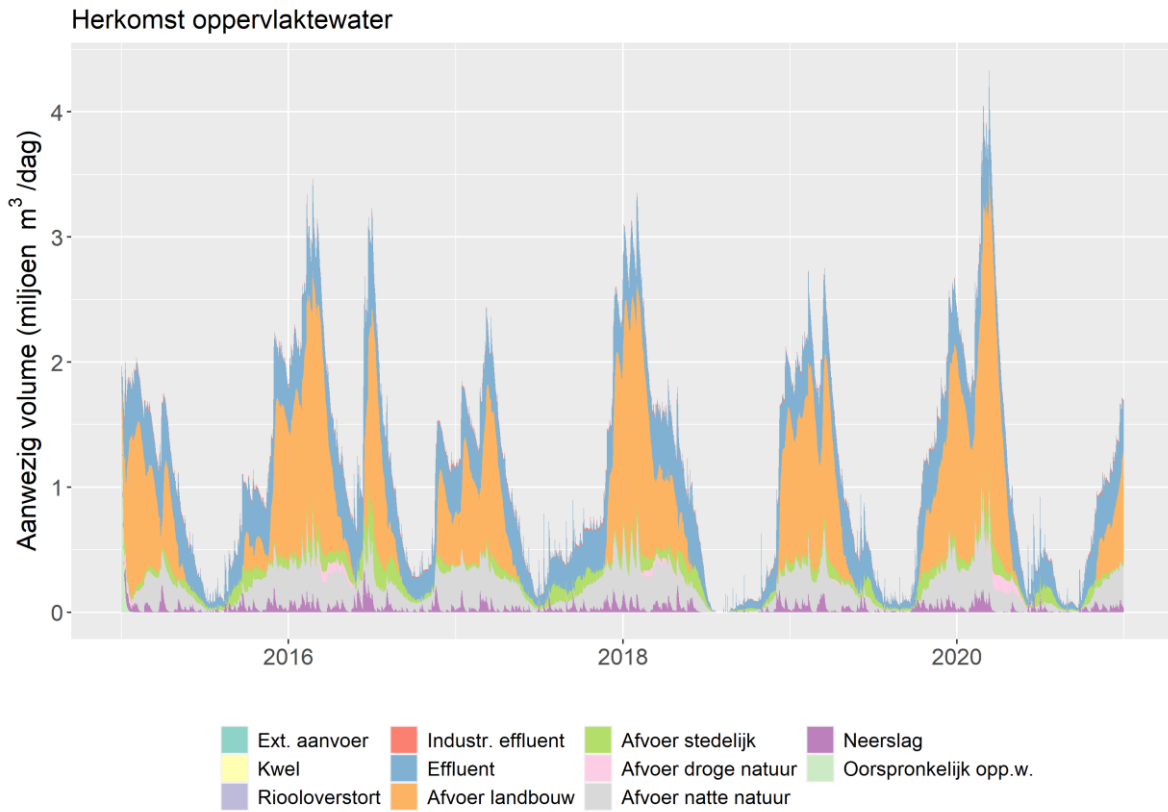


Figuur 4-2. Gesimuleerde oppervlaktewaterpeil en gemeten neerslag voor de periode 2015-2020.

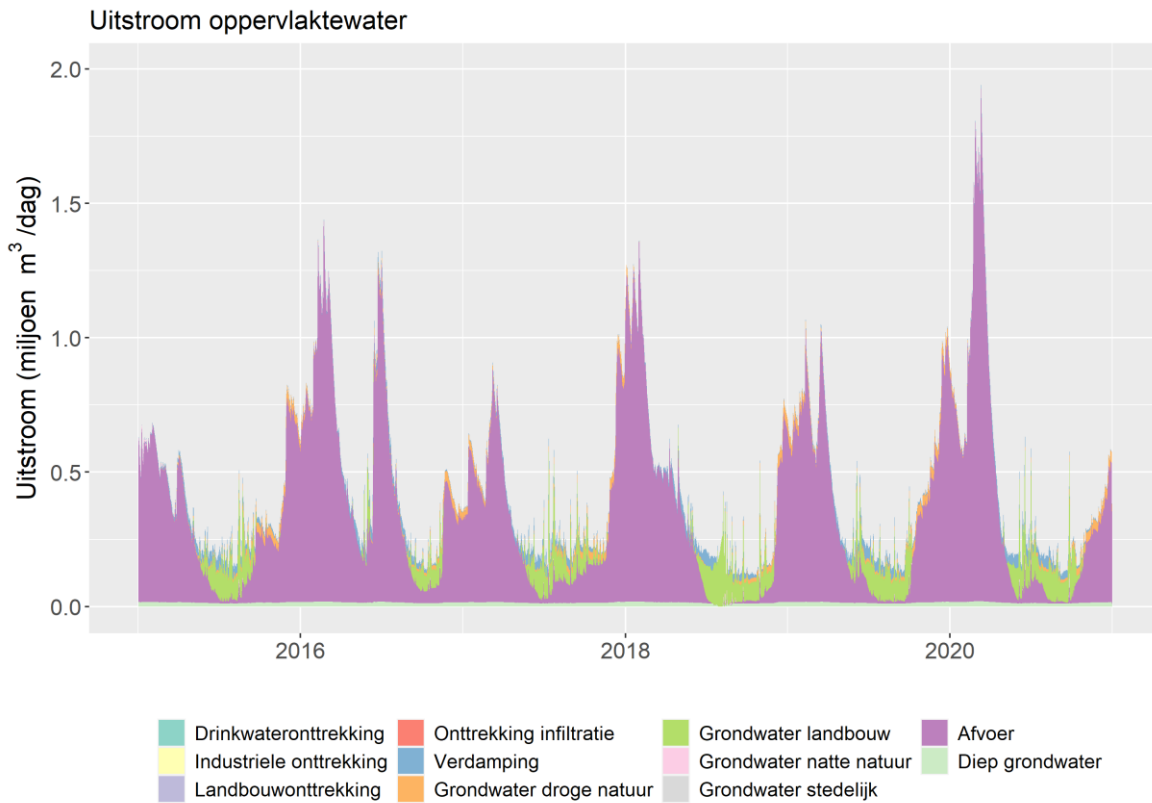


Figuur 4-3. Gesimuleerde grondwaterstanden voor de vier landgebruikstypen voor de periode 2015-2020.

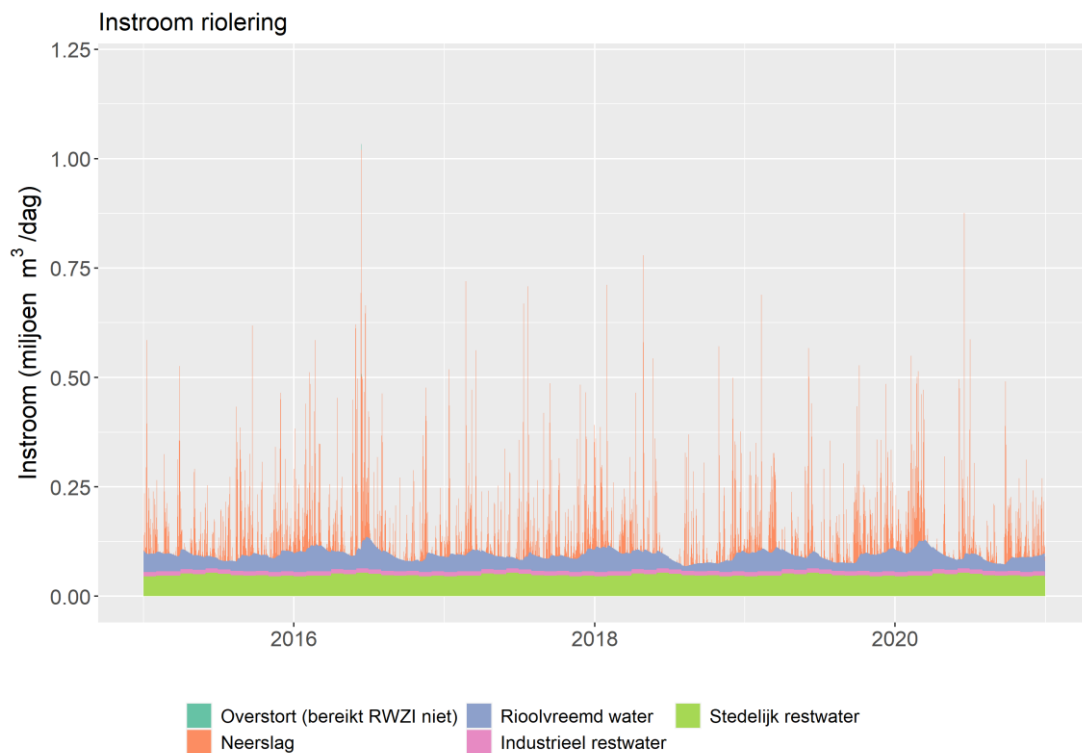
Het model geeft met name inzicht in het watersysteem door het verloop van de herkomst van water over de tijd weer te geven. Zo kan gedurende de periode duidelijk gemaakt worden welke bron de grootste bijdrage levert aan het oppervlaktewater (Figuur 4-4), waar dat water vervolgens terechtkomt (Figuur 4-5) en wat de herkomst is van het RWZI effluent (Figuur 4-6). Het meeste water bereikt het oppervlaktewater vanuit de landbouw en natte natuur, en als effluent via de RWZI. De bijdrage vanuit landbouw is vooral groot in de winter, in de zomer bestaat het oppervlaktewater voor een relatief groter deel uit effluent. Het meeste water wordt vervolgens afgevoerd naar buiten het gebied, zeker in de winter. In de zomer spelen ook verdamping en infiltratie vanuit het oppervlaktewater naar het ondiepe grondwater een grote rol. De variatie in totale hoeveelheid RWZI effluent wordt voornamelijk bepaald door de neerslag. De hoeveelheden rioolvreemd water, stedelijk restwater en industrieel restwater zijn redelijk constant door de tijd heen.



Figuur 4-4. Overzicht van de herkomst van het oppervlaktewater.



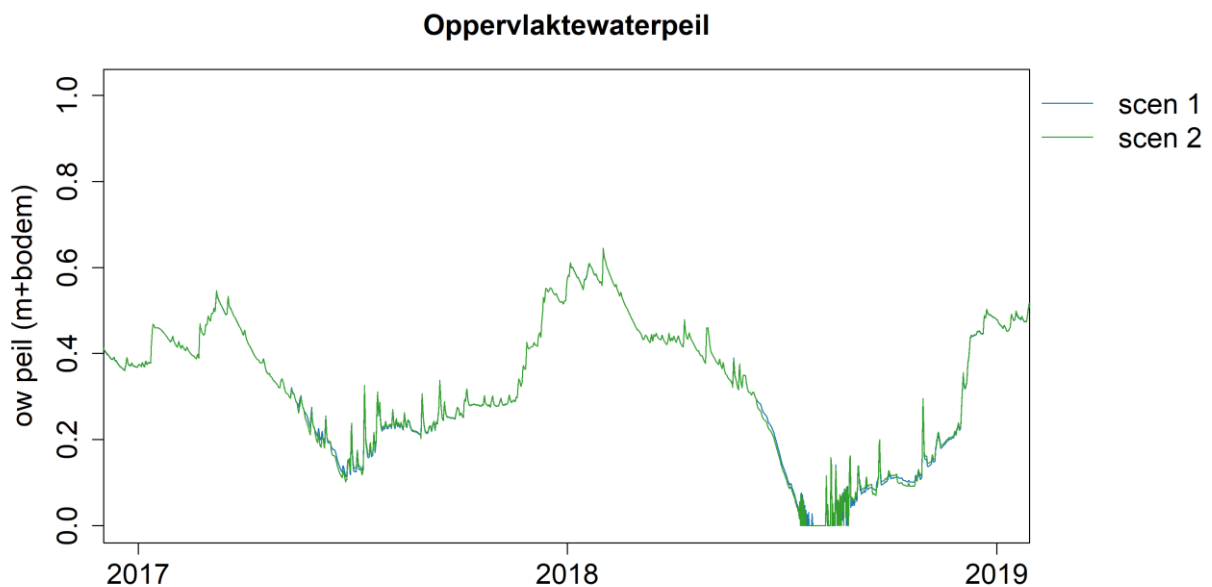
Figuur 4-5. Overzicht van de uitstroom van het oppervlaktewater.



Figuur 4-6. Overzicht van de bronnen van influent naar de RWZI.

4.2 Interventies

De effecten van de interventies op de jaarlijkse waterstromen in 2017 zijn gegeven in Tabel 4-2 en voor de hele periode 2015-2020 in Figuur 4-7 tot en met

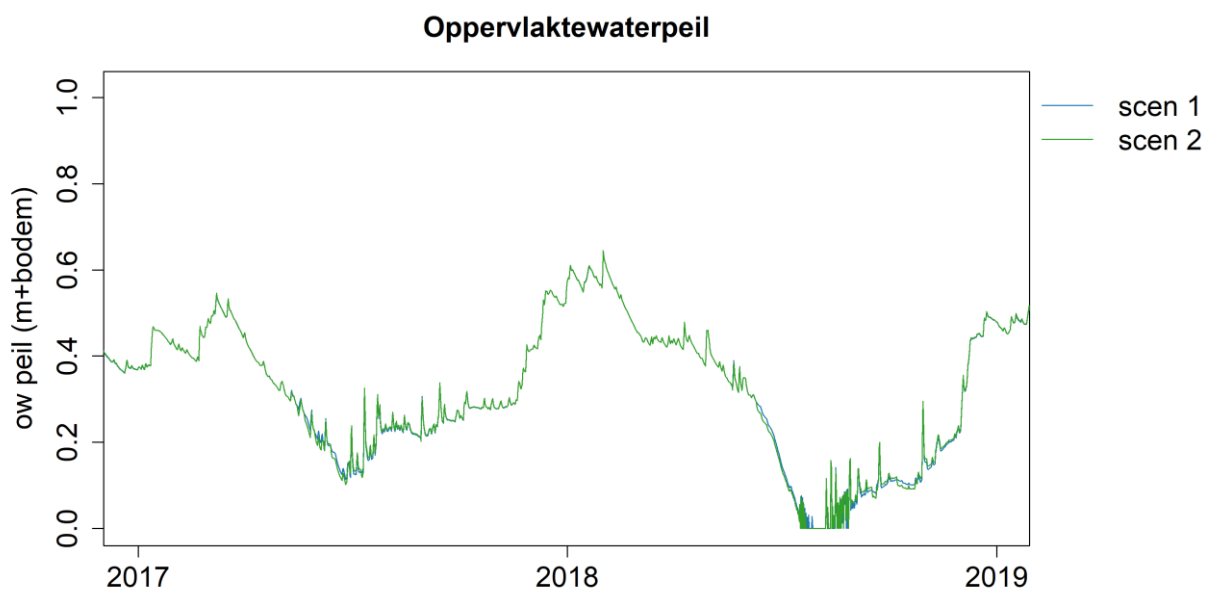


Figuur 4-13. De verschillen worden aangegeven ten opzichte van de huidige situatie (scenario 1). Hieronder beschrijven we per scenario in het kort de verschillen.

Scenario 2: Hergebruik effluent in landbouw

Door de partiële vervanging van grondwater met effluent nemen de onttrekking van grondwater voor irrigatie in de landbouw (Figuur 4-10) en de RWZI lozing naar het oppervlaktewater af. Ondanks dat er minder effluent op het oppervlaktewater wordt gebracht, blijft de totale

hoeveelheid afgevoerd water gelijk, doordat de afvoer vanuit de landbouw toeneemt (vanwege hogere grondwaterstanden en een lager oppervlaktewaterpeil). De oppervlaktewater-afvoerpatronen over de tijd veranderen een klein beetje tijdens de zomerperiodes, door een licht dempend effect van het grondwatersysteem in de landbouwgebieden (



Figuur 4-13). Tijdens zomerperiodes zakt de grondwaterstand iets minder diep uit dan in het referentiescenario (Figuur 4-8). Dit verklaart de lagere beregeningsvraag (Figuur 4-10) en de toegenomen diepere grondwateraanvulling (Figuur 4-9).

Scenario 3: Hergebruik effluent voor infiltratie in grondwateronafhankelijke gebieden

Door de infiltratie van effluent in droge natuur stijgt de grondwaterstand voor dit landgebruikstype, met name in de winter (Figuur 4-7). Hierdoor neemt de verdamping van droge natuur toe, evenals de uitstroom naar het oppervlaktewater en de wegzijging naar het diepere grondwater. Door het hergebruik van het effluent gaat er minder water naar het oppervlaktewater (afname RWZI lozing op oppervlaktewater), waardoor er ook minder afvoer naar buiten het gebied is (Figuur 4-11). Het oppervlaktewaterpeil daalt door de verminderde wateraanvoer, met name tijdens droge periodes, wanneer effluent een relatieve grote bijdrage levert aan de afvoer van het oppervlaktewater (Figuur 4-12). Door het lagere oppervlaktewaterpeil ontstaat er een sterkere gradiënt tussen grondwaterstand en drainagebasis. Hierdoor dalen de grondwaterstanden in alle andere landgebruikstypen (Figuur 4-7, Figuur 4-8), neemt de uitstroom van grondwater naar het oppervlaktewater toe en de wegzijging naar het diepere grondwater af (Figuur 4-9).

Scenario 4: Verhoging slootbodems met 30 cm

Het verhogen van de slootbodems zorgt voor een afname van de afvoer (Figuur 4-11), omdat er minder water vanuit het grondwater naar het oppervlaktewater stroomt (afname uitstroom naar oppervlaktewater voor alle landgebruikstypen). De waterloop valt ook vaker droog (Figuur 4-12), waardoor er minder water rechtstreeks verdamppt uit het oppervlaktewater. Door de hogere drainagebasis stijgen de grondwaterstanden in alle landgebruikstypen (Figuur 4-7), hierdoor is er meer water beschikbaar voor de vegetatie en neemt de verdamping toe. Er wordt daardoor minder grondwater onttrokken voor irrigatie in de landbouw (Figuur 4-10). De hogere grondwaterstanden leiden ook tot meer aanvulling van het diepere grondwater en minder kwel in de natte natuur (Figuur 4-9). In het stedelijk gebied neemt de bijdrage van rioolvreemd water aan het totale RWZI effluent toe door de hogere grondwaterstanden, hierdoor neemt de RWZI lozing op oppervlaktewater ook toe.

Scenario 5: Infiltratie van oppervlaktewater in grondwateronafhankelijke natuurgebieden tijdens de wintermaanden

Door de onttrekking van oppervlaktewater daalt het oppervlaktewaterpeil in de winter (Figuur 4-12) en de totale afvoer. De grondwaterstand in grondwaterafhankelijke natuur stijgt door de infiltratie (Figuur 4-7), net als de verdamping, de wegzijging naar dieper grondwater (Figuur 4-9) en de uitstroom naar oppervlaktewater (Figuur 4-11). In de andere landgebruikstypen daalt de grondwaterstand (Figuur 4-7), neemt de uitstroom naar het oppervlaktewater toe door het lagere oppervlaktewaterpeil (Figuur 4-11) en nemen de verdamping en wegzijging naar dieper grondwater af (Figuur 4-9).

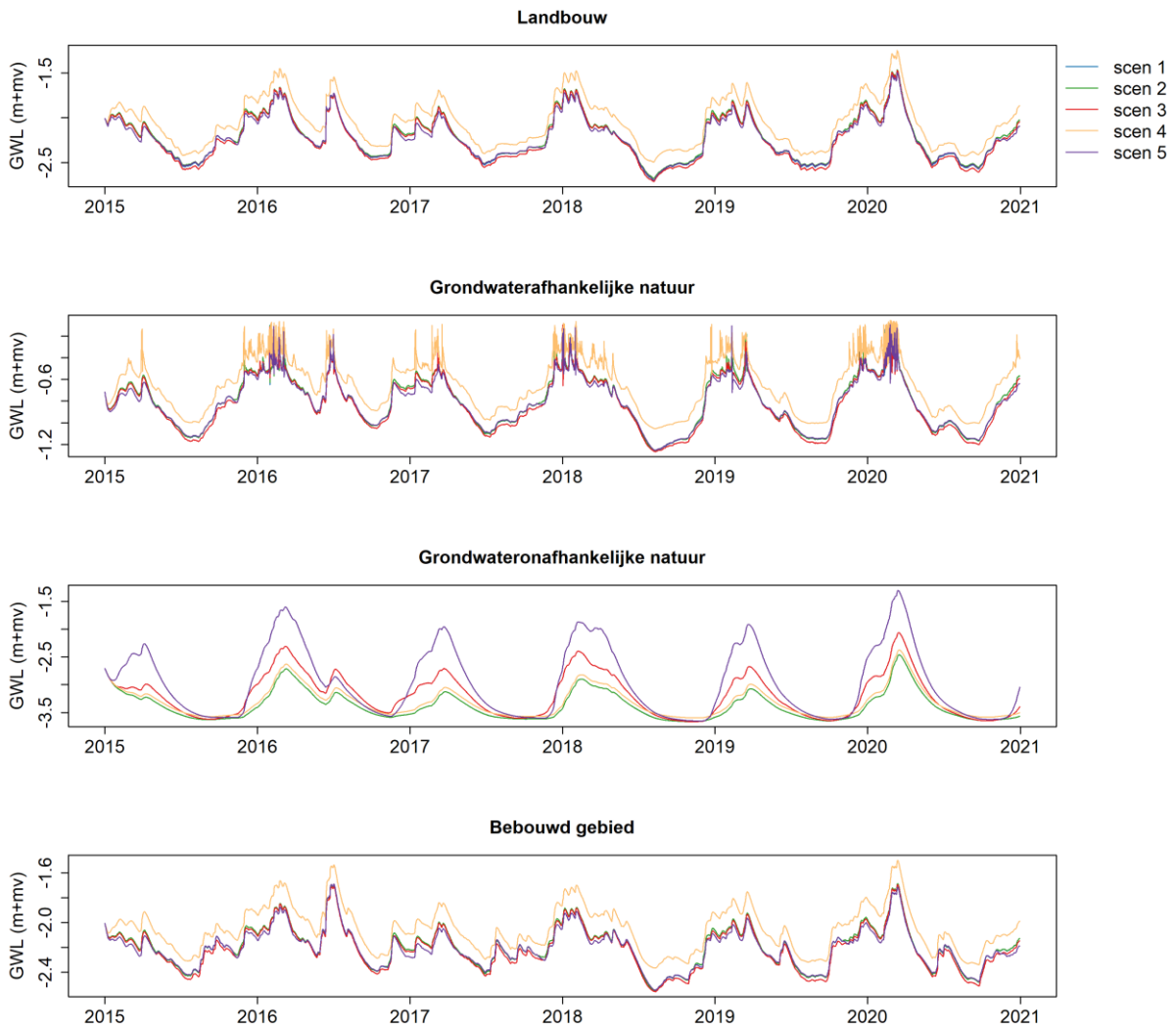
Verschillen met betrekking tot grondwaterstanden, grondwateraanvulling en afvoer tijdens droge perioden

De onderzochte interventies, behalve scenario 3, dragen allemaal bij aan de verhoging van grondwaterstanden, wat met name in natuurgebieden, maar ook tijdens droge perioden in landbouwgebieden, vaak gewenst is. Bij de beperkte daling van de grondwaterstanden van natte natuurgebieden in scenario 3 moet opgemerkt worden dat eventuele toename van kwel als gevolg van een toename van diepere stijghoogten niet plaatsvindt in het model. Ten opzichte van het referentiescenario leiden de vier onderzochte interventies allemaal tot een toename van de grondwateraanvulling in de infiltratiegebieden, waarbij scenario 5 leidt tot de sterkste toename. Voor scenario's 3, 4 en 5 geldt dat de afvoer van oppervlaktewater uit het gebied daalt, omdat er meer water in het gebied vastgehouden wordt, ten goede komt aan verdamping en/of vertraagd wordt afgevoerd via het grondwater. De interventies hebben echter een zeer beperkt positief, of zelfs negatief, effect op het optreden van lage beekafvoeren.

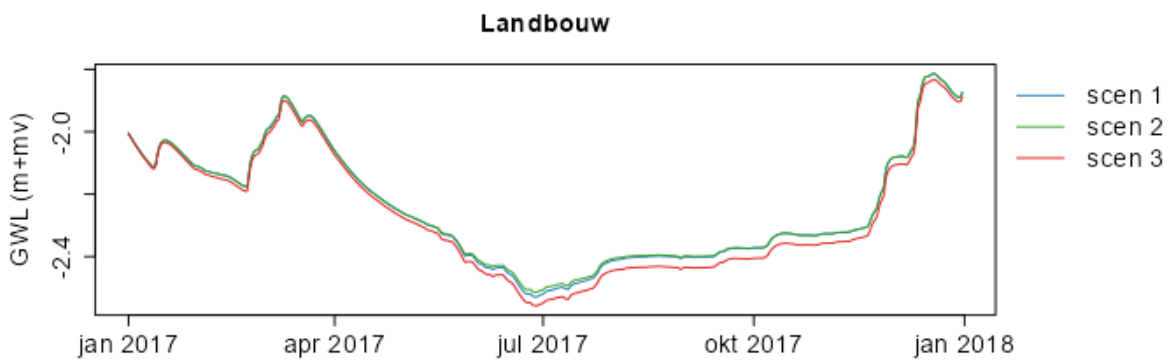
Tabel 4-2. Overzicht van alle waterstromen voor de verschillende scenario's voor het jaar 2017 in miljoen m³. Oranje geeft een afname in de waterstroom t.o.v. scenario 1 aan, paars geeft een toename t.o.v. scenario 1 aan. Waterstromen zonder verschillen zijn niet weergegeven.

Omvang waterstroom (miljoen m ³ /jaar)	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5
	Referentie	Effluent in landbouw	Effluent geïnfiltreerd	Verhoging slootbodems	Oppervlakte- water geïnfiltreerd
Verdamping landbouw	226.3	225.8	226.1	227.6	226.1
Uitstroom landbouw naar oppervlaktewater	28.4	31.2	34.3	-12.9	33.3
Wegzijging landbouw naar dieper grondwater	43.9	44.6	38	82.8	38.2
Verdamping uit oppervlaktewater	6.4	6.4	6.4	5.4	6.4
Wegzijging oppervlaktewater naar dieper grondwater	5.4	5.4	5.2	6	5.2
Onttrekking landbouw uit grondwater	14.3	10.8	14.3	13.9	14.3
Verdamping uit natte natuur	33.9	33.9	33.9	34	33.9
Uitstroom natte natuur naar oppervlaktewater	26.5	26.5	27.1	23.5	26.9
Wegzijging natte natuur naar dieper grondwater	-30.2	-30.2	-30.8	-26.2	-30.8
Verdamping droge natuur	67.1	67.1	73.5	67.2	70

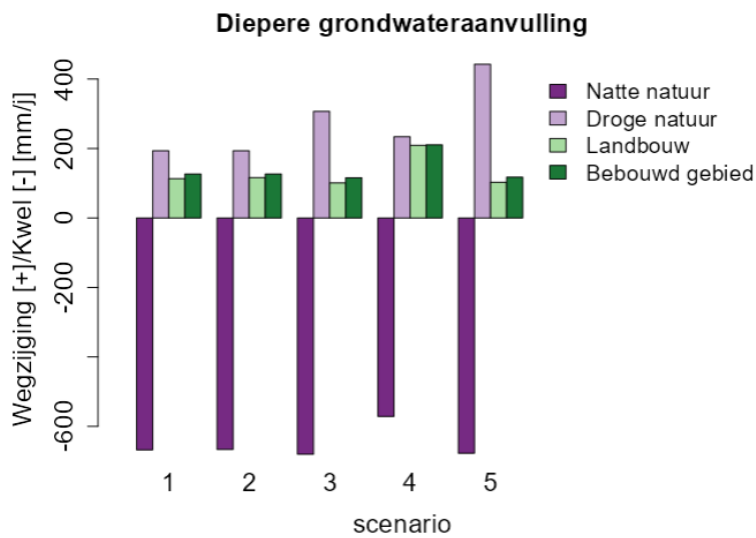
Omvang waterstroom (miljoen m ³ /jaar)	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5
	Referentie	Effluent in landbouw	Effluent geïnfiltreerd	Verhoging slootbodems	Oppervlakte- water geïnfiltreerd
Uitstroom droge natuur naar oppervlaktewater	-7	-7	1.4	-11.4	9.4
Wegzijing droge natuur naar dieper grondwater	16.5	16.5	31.4	20.8	47.4
RWZI influent uit stedelijk gebied	49.2	49.2	48.7	52.3	48.7
Uitstroom stedelijk gebied naar oppervlaktewater	10.3	10.3	11.7	0.5	11.5
Wegzijing stedelijk gebied naar dieper grondwater	10	10	9.1	16.4	9.1
RWZI lozing op oppervlaktewater	52.8	50	21.9	55.9	52.3
Afvoer oppervlaktewater naar extern	105.6	105.6	91.3	50	78



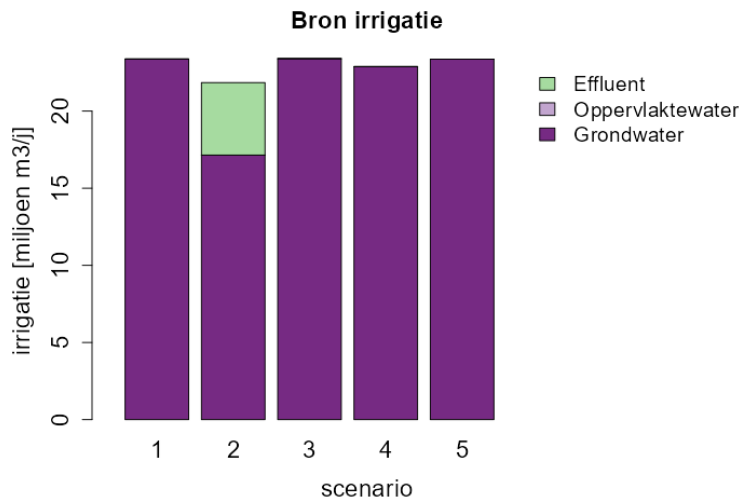
Figuur 4-7. Grondwaterstanden voor de verschillende scenario's per landgebruikstype.



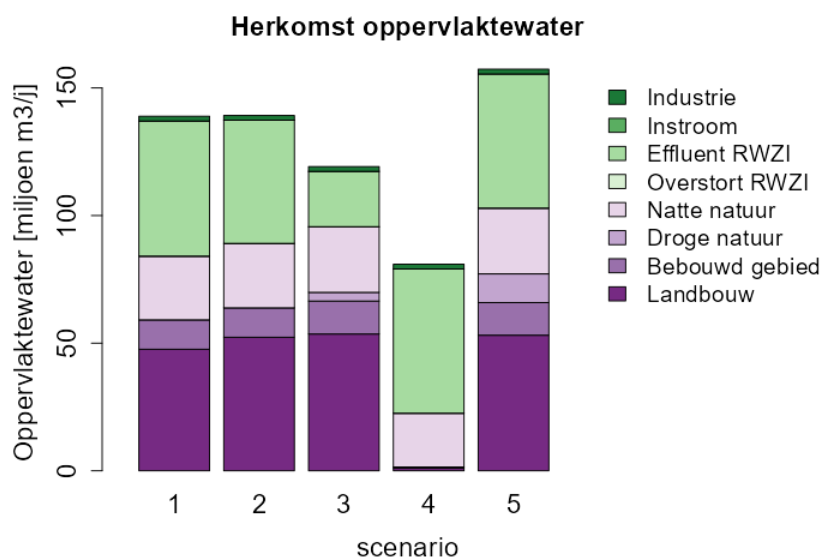
Figuur 4-8. Grondwaterstanden voor scenario's 1-3 in de periode 2017-2018 (kleine verschillen beter zichtbaar dan in Figuur 4-7).



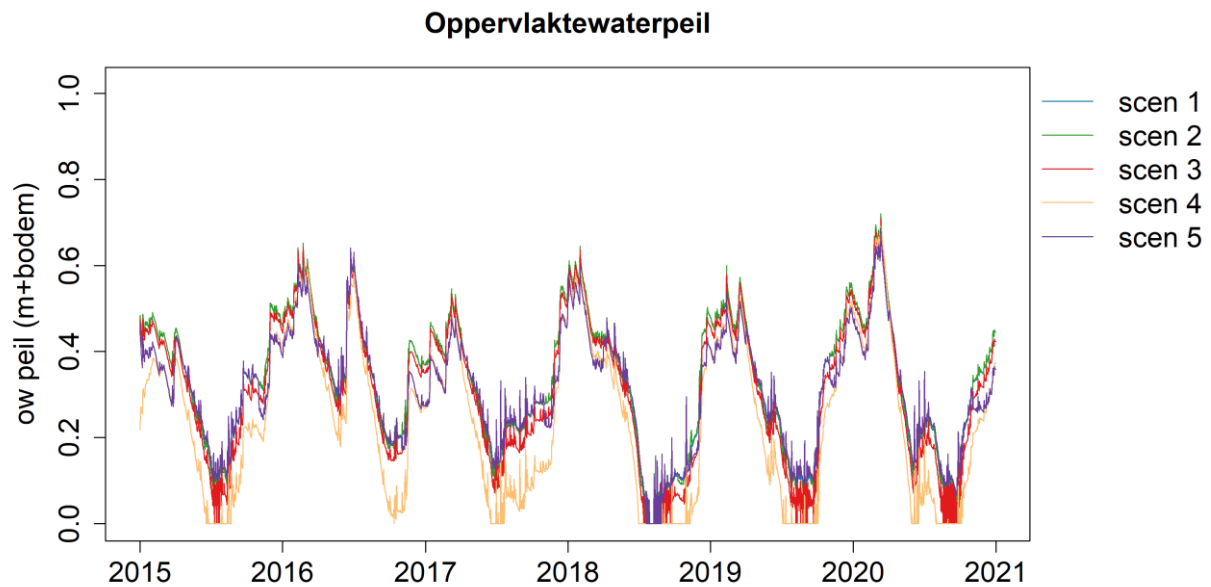
Figuur 4-9. Interactie met het diepere grondwater (wegzijing of kwel) per landgebruikstype voor alle scenario's gemiddeld per jaar over de periode 2015-2020.



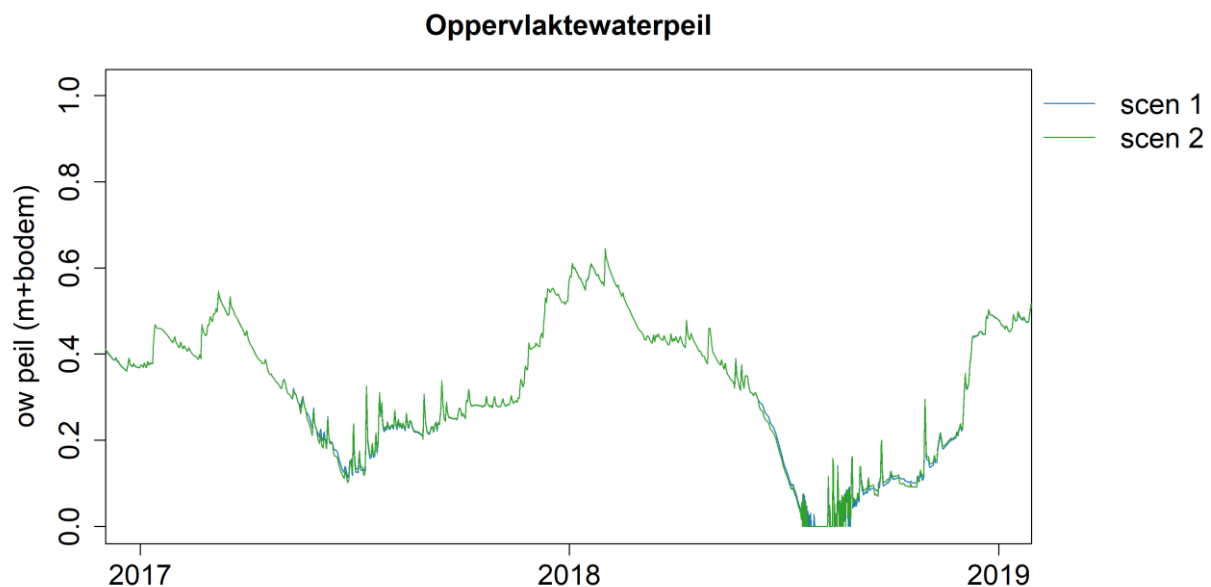
Figuur 4-10. Gemiddelde jaarlijkse irrigatie per scenario voor de periode 2015-2020.



Figuur 4-11. Herkomst van het oppervlaktewater per scenario voor de periode 2015-2020. Onttrekkingen worden hier niet meegenomen.



Figuur 4-12. Oppervlaktewaterpeil voor de verschillende scenario's.



Figuur 4-13. Oppervlaktewaterpeil in scenario's 1 en 2 in 2017-2018.

4.3 Gevoeligheidsanalyse – omgevingskenmerken

In dit hoofdstuk verkennen we eerst hoe verdrogingskenmerken samenhangen met de landschapseigenschappen en het landgebruik. Vervolgens worden de effecten van verschillende maatregelen bij verschillende omstandigheden/landschapskenmerken vergeleken. Hiertoe zijn enkele gevoeligheidsanalyses uitgevoerd met modelsimulaties over de jaren 2017-2018. Bij de uitvoer is gekeken naar het aantal dagen dat lage afvoer plaatsvindt, waarbij lage afvoer wordt gedefinieerd als een afvoer die lager is dan het tiende percentiel van de afvoer in de referentiesituatie.

Figuur 4-14 geeft de resultaten van de eerste gevoeligheidsanalyse (zonder de interactie tussen gewijzigde parameters) weer. Wat opvalt is dat het optreden van lage afvoer op een niet-lineaire wijze afhankelijk is van de verschillende parameters.

Drainageweerstand

Het verband tussen drainageweerstand en het aantal dagen met lage afvoer vertoont een opvallend niet-lineair patroon. In het algemeen geldt dat een hogere drainageweerstand leidt tot een afname van het optreden van lage afvoeren, en andersom. Dit is conform verwachting, doordat hogere drainageweerstanden bijdragen aan meer buffering in het grondwater, waardoor basisafvoer tijdens droge periode langer kan doorgaan.

Er is echter een zone waar een lokaal minimum optreedt, waar een lagere drainageweerstand tot minder lage afvoeren leidt. Uit verdere inspectie van de modelresultaten bij verschillende drainageweerstanden (Figuur 4-15) bleek dat de lagere weerstanden leidden tot een toename van grondwateraanvulling vanuit het oppervlaktewater zodra de grondwaterstand zakt tot onder het niveau van het oppervlaktewater waardoor in droge perioden de grondwaterstand uiteindelijk minder ver uitzakt, terwijl het oppervlaktepeil in die perioden juist lager is.

Diepere grondwateraanvulling wordt positief beïnvloed door een hogere drainageweerstand, doordat dit leidt tot het beter vasthouden van water in de ondergrond, en daarmee tot hogere grondwaterstanden in perioden met neerslagoverschot, die langer aanhouden. Ook hier is echter sprake van een knik bij lage waarden voor de drainageweerstand, welke (net als bij de resultaten voor lage afvoeren hierboven) verband lijkt te houden met de verbeterde aanvulling van het grondwater vanuit het oppervlaktewater.

Bij deze resultaten moet opgemerkt worden dat dit proces in werkelijkheid naar verwachting niet zo (sterk) optreedt, maar dat deze verband houdt met de vereenvoudiging in het model. In werkelijkheid vindt ontwatering namelijk op verschillende niveaus plaats (greppels, buisdrainage, sloten, beek) en zullen ondiepere ontwateringsmiddelen in droge tijden droogvallen, waardoor de effectieve drainageweerstand niet zulke lage waarden bereikt. Hierdoor zullen eventuele afvoer naar het oppervlaktewater en eventuele wegzijging vanuit oppervlaktewater (afvoerende beek) naar het grondwater veel minder bepalend zijn.

Weerstand diepere grondwater

Zoals te verwachten is in een gebied waar veel infiltratie plaatsvindt, leidt een lagere weerstand naar de ondergrond tot een toename van de diepere grondwateraanvulling (Figuur 4-14). In de lager gelegen natte natuurgebieden nemen kwelstromen ook toe (Figuur 4-18), maar gezien het beperkte relatieve oppervlak van het kwelgebied is er netto sprake van een toename van de wegzijging naar het diepere grondwater.

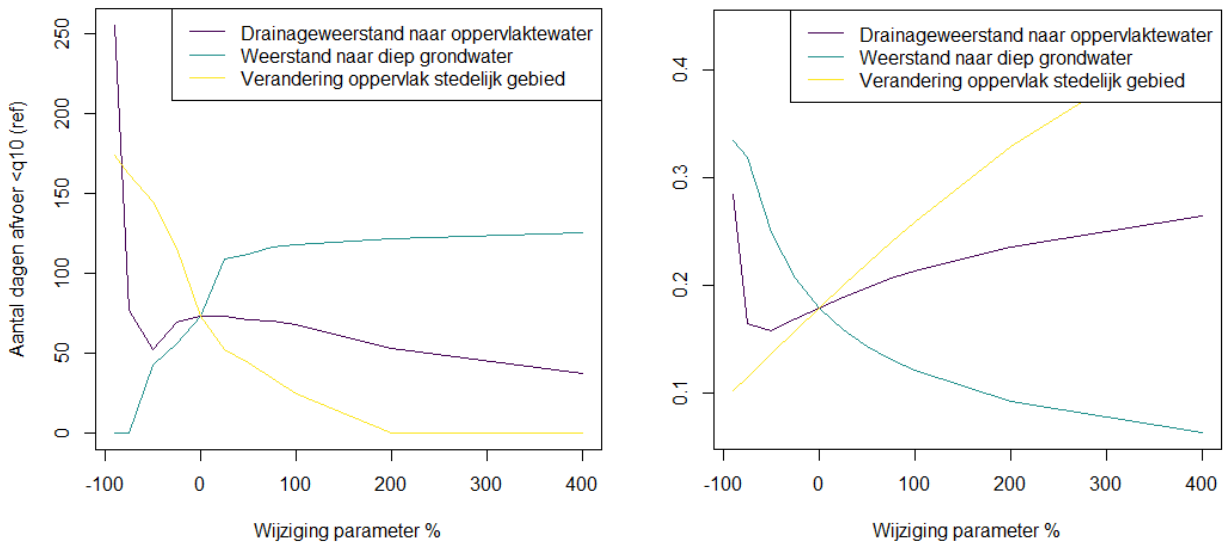
De toename van de diepere grondwateraanvulling lijkt echter niet te leiden tot een vermeerdering van perioden van lage afvoeren (Figuur 4-16, Figuur 4-17, Figuur 4-18). Hoewel er enerzijds minder wordt afgevoerd naar het oppervlaktewater uit de verschillende typen landgebruik (afgezien van grondwaterafhankelijke natuur), neemt het aandeel van het oppervlaktewater uit kwelstromen juist toe, waardoor lage afvoeren minder vaak voorkomen. Anderzijds lijkt bij toename van de weerstand na een bepaalde drempel het aantal dagen met lage afvoeren niet verder toe te nemen.

Verandering van landgebruik: stedelijk gebied

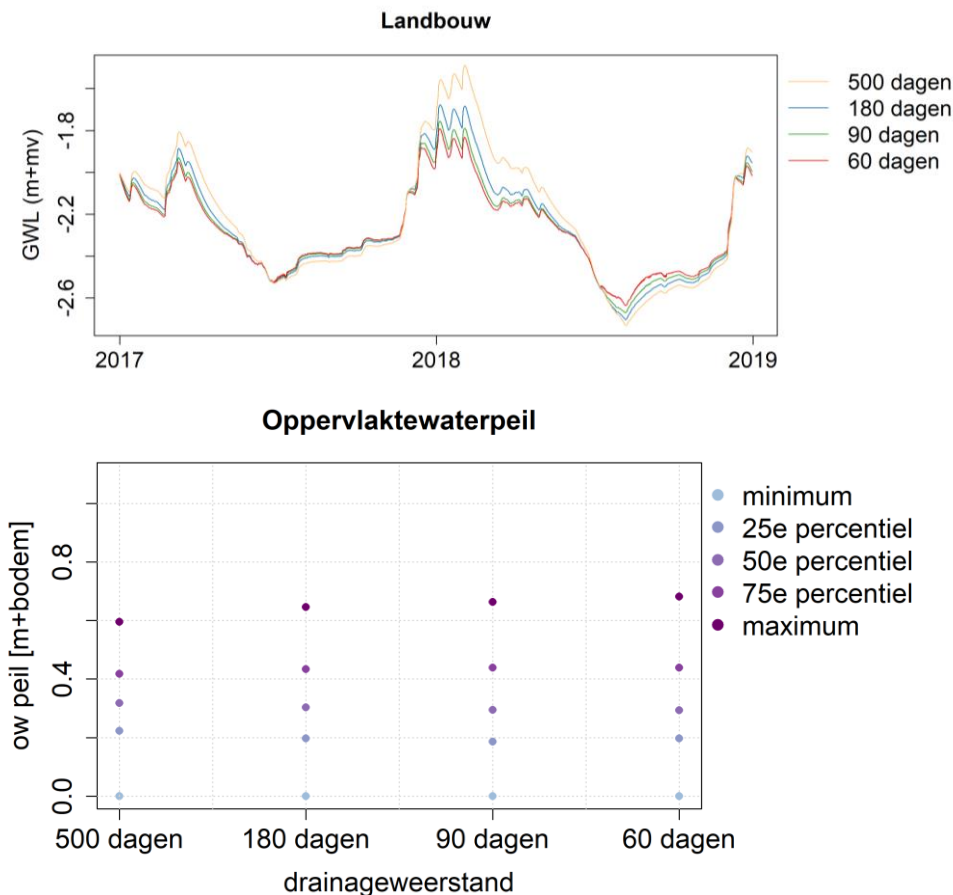
Door het relatieve oppervlak van het stedelijk gebied te variëren (Figuur 4-14), verandert zowel het landgebruik (in dit geval landgebruik dat grotendeels verhard en gerioleerd is) als het aantal inwoners (en daarmee de drinkwatervraag en het aanbod van restwater).

Bij een toename van het stedelijk gebied wordt een toename van diepe grondwateraanvulling berekend. Daarnaast wordt een afname van lage afvoeren gezien. Deze afname is te verklaren door de toename van de hoeveelheid effluent die continu op het oppervlaktewater wordt geloosd (Figuur 4-19). Dit laatste leidt tot hogere

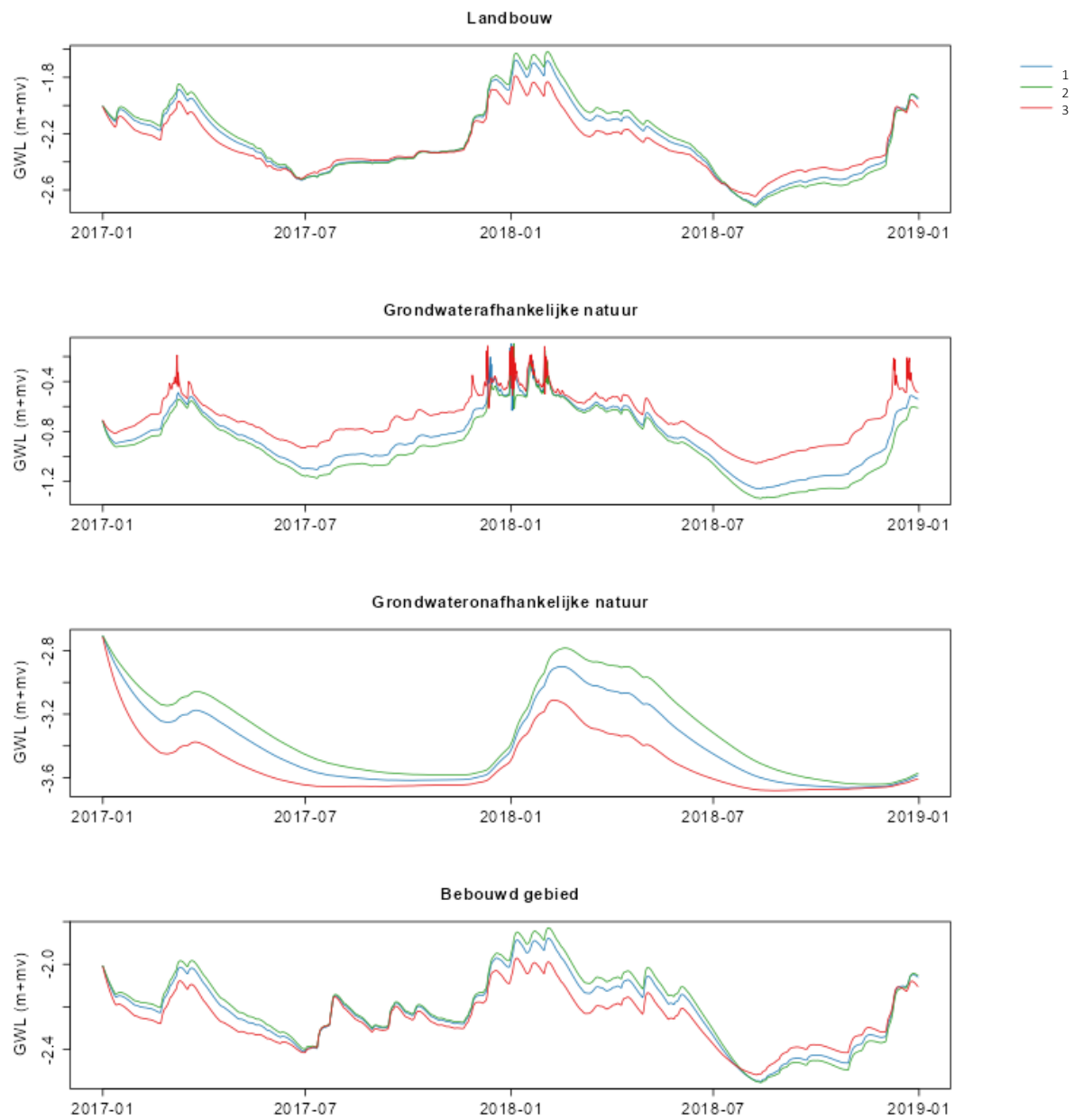
oppervlaktewaterstanden tijdens drogere perioden (Figuur 4-20), en zorgt er voor dat grondwaterstanden minder snel uitzakken. Hierdoor neemt ook de diepe grondweraanvulling toe, wat op voorhand wellicht niet snel verwacht werd, aangezien een toename van verhard oppervlak doorgaans geassocieerd wordt met verminderde grondweraanvulling. Dit betekent echter niet dat de stijghoogte van het diepere grondwater toeneemt, omdat de onttrekking voor drinkwater ook toeneemt, met een netto daling tot gevolg. Aangezien het model slechts een korte periode doorrekent, leidt dit (vooralsnog) niet tot zichtbare veranderingen in de kwelstromen.



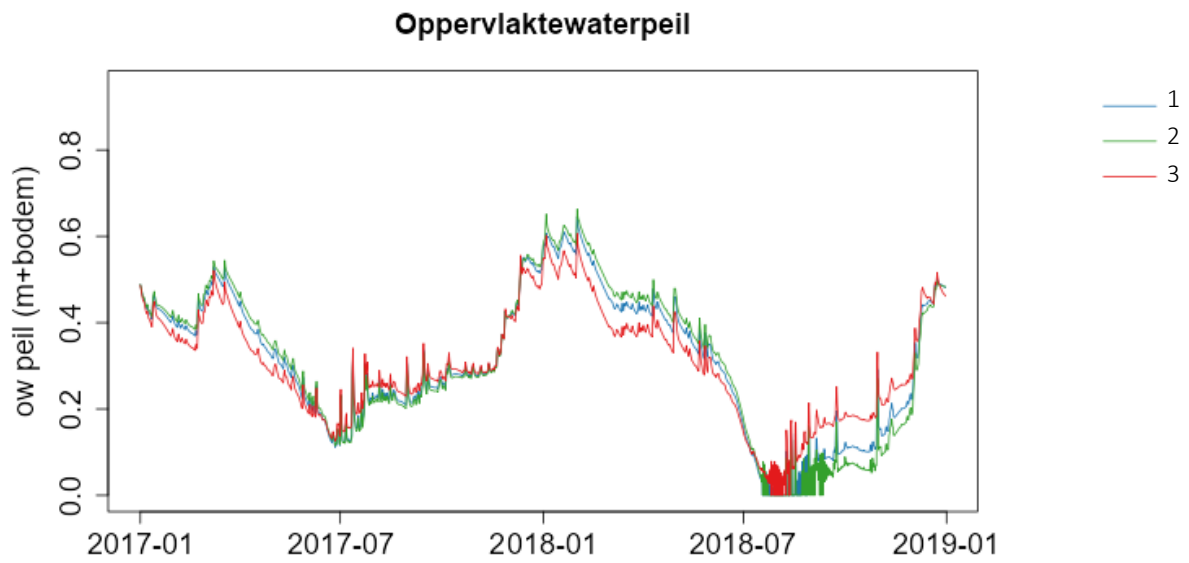
Figuur 4-14. Effect van drainageweerstand, weerstandslaag in de ondergrond en landgebruik op het optreden van lage afvoeren (links) en diepere grondweraanvulling (rechts).



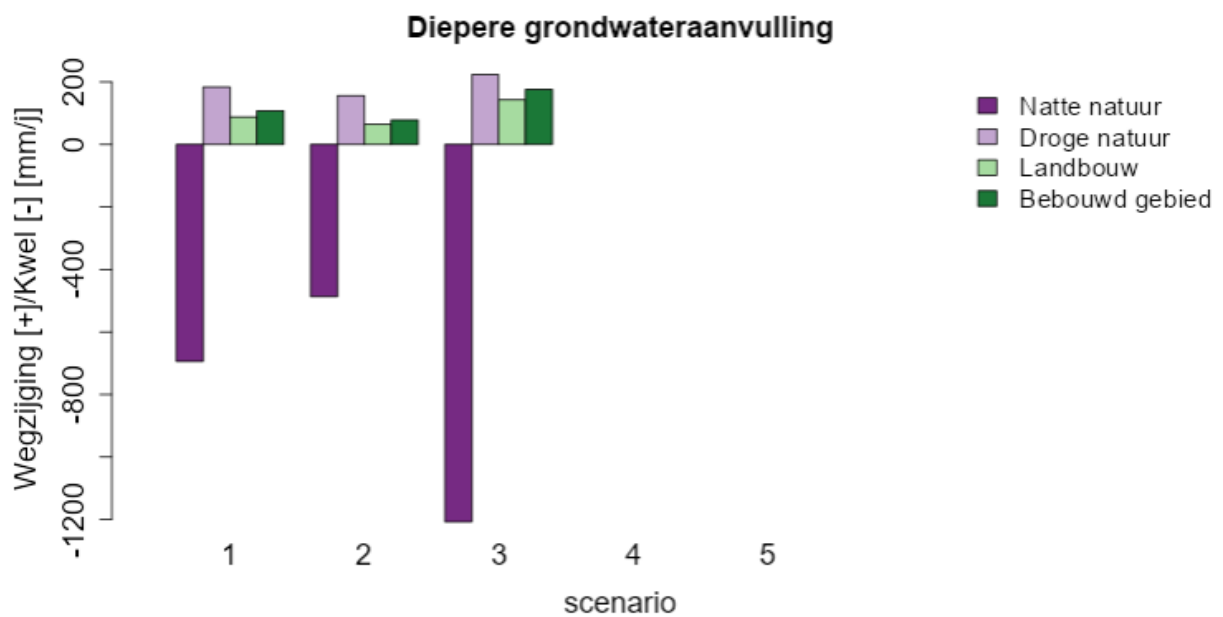
Figuur 4-15. Effect van drainageweerstand op grondwaterstanden en oppervlaktewaterpeilen.



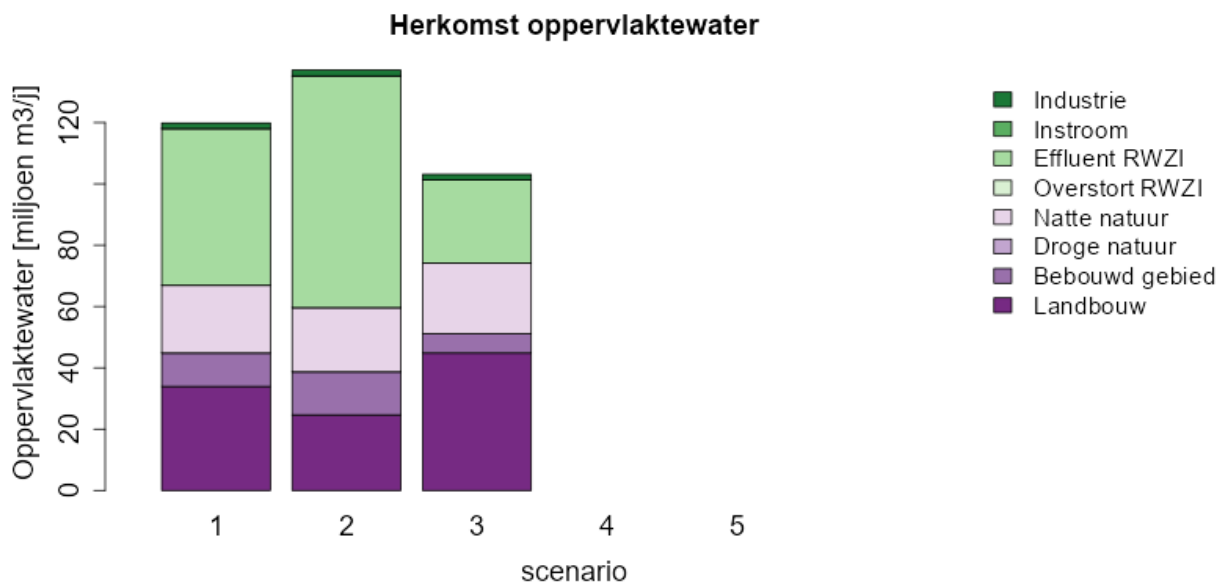
Figuur 4-16. Grondwaterpeilen in het referentiescenario (1), 50% toename weerstand dieper grondwater (2) en 50% afname weerstand naar dieper grondwater (3).



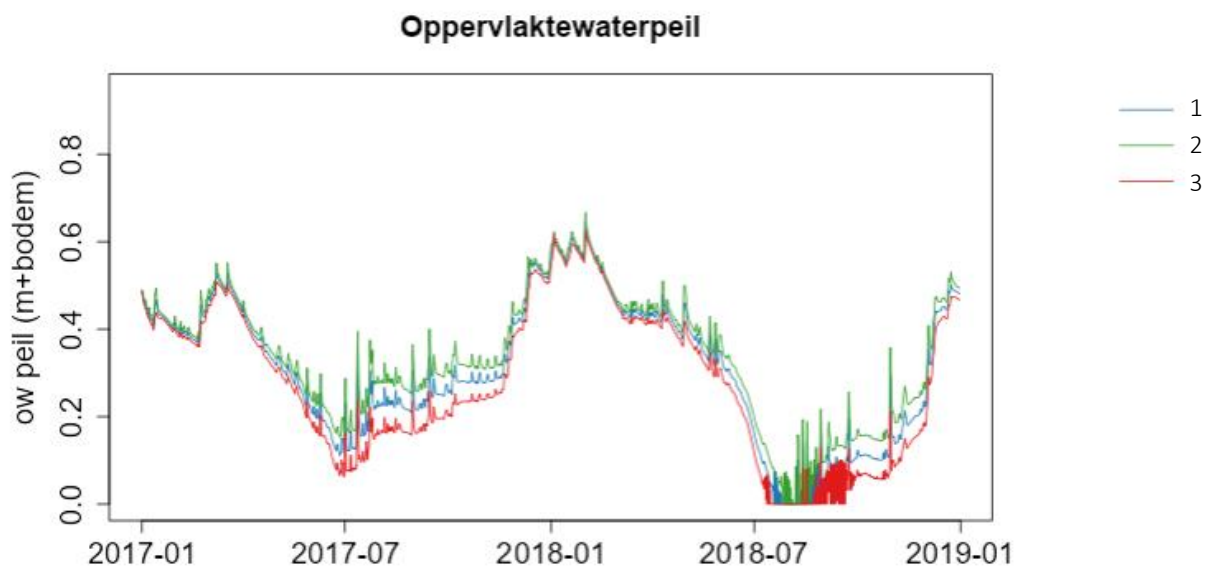
Figuur 4-17. Peil oppervlaktewater in het referentiescenario (1), 50% toename weerstand dieper grondwater (2) en 50% afname weerstand naar dieper grondwater (3).



Figuur 4-18. Grondwateraanvulling in het referentiescenario (1), 50% toename weerstand dieper grondwater (2) en 50% afname weerstand naar dieper grondwater (3).



Figuur 4-19. Herkomst oppervlaktewater in het referentiescenario (1), 50% toename stedelijk gebied, inclusief populatie (2) en 50% afname stedelijk gebied, inclusief populatie (3).



Figuur 4-20. Peil oppervlaktewater in het referentiescenario (1), 50% toename stedelijk gebied, inclusief populatie (2) en 50% afname stedelijk gebied, inclusief populatie (3).

4.4 Gevoeligheidsanalyse - interventies in relatie tot omgevingskenmerken

Temporele patronen van waterstromen in het watersysteem hangen samen met de omgevingskenmerken, zoals in paragraaf 4.3 duidelijk werd. In deze paragraaf wordt onderzocht of en hoe het effect van interventies kan veranderen als gevolg van omgevingskenmerken.

Om dit te onderzoeken is een gevoeligheidsanalyse gedaan waarbij de omgevingskenmerken uit paragraaf 4.3 zijn gevarieerd in combinatie met de interventies uit paragraaf 4.2.

In Figuur 4-21 - Figuur 4-24 worden de resultaten van de gevoeligheidsanalyses weergegeven. Zowel de invloed van een maatregel op de gevoeligheidsanalyse (Figuur 4-21 en Figuur 4-23) als het effect van de maatregelen bij verschillende omgevingskenmerken (Figuur 4-22 en Figuur 4-24, het verschil tussen de resultaten mét maatregel en

de resultaten zónder maatregel) worden belicht. Geen van de maatregelen lijkt een groot effect te hebben op de gevoeligheid voor omgevingskenmerken, behalve het verhogen van de slootbodems. Hieronder worden de resultaten in meer detail besproken.

Effluent naar landbouw

Hergebruik van effluent in de landbouw leidt in de meeste simulaties tot een zeer kleine (te verwaarlozen) verandering in het optreden van lage afvoeren. Wanneer er echter sprake is van gebieden met een grotere drainageweerstand, kan deze maatregel leiden tot een toename van het optreden van lage afvoeren met tientallen dagen. Dit wordt verklaard doordat deze vorm van hergebruik juist in droge perioden plaatsvindt. Tijdens droge perioden zullen grondwaterstanden in landbouwgebieden uitgezakt zijn, en kan het grondwater aangevuld worden vanuit het oppervlaktewater. In gebieden met een hoge drainage- (en dus ook intrek-) weerstand zal dit minder makkelijk plaatsvinden, en zal er minder oppervlaktewater ten goede komen aan het grondwater. Wanneer effluent dan rechtstreeks in de landbouw wordt gebruikt, zal dit een groter verschil maken, dan in situaties waarin het oppervlaktewater sowieso al gemakkelijk ten goede kwam aan het grondwater in landbouwgebieden. Overigens moet hierbij opgemerkt worden dat in de praktijk de drainage- en de intrekweerstand niet per se gelijk aan elkaar zijn, en dat drainage in het algemeen gemakkelijker gaat door de beschikbaarheid van drainagemiddelen die tijdens droge periode juist droogvallen.

Ook diepere grondwateraanvulling kan zeer licht toenemen als gevolg van hergebruik van effluent in de landbouw doordat de grondwaterstanden minder uitzakken. Hierbij geldt ook dat dit effect (zeer beperkt) groter is in geval van grotere waarden voor drainageweerstand, om dezelfde reden als hierboven is beschreven.

Effluent infiltreren

Het infiltreren van (vergezuiverd) effluent in grondwateronafhankelijke natuurgebieden lijkt vooral ten goede te komen aan grondwateraanvulling, vooral bij een toename van het stedelijk gebied (vanwege de toename aan beschikbaarheid van effluent). Zoals eerder opgemerkt betekent dit niet dat dit ook leidt tot netto minder druk op het grondwater, doordat ook de onttrekkingen toenemen bij een groei van het aantal inwoners. De maatregel leidt in alle simulaties tot een (lichte) toename van het optreden van lage afvoeren, welk effect iets groter is bij hoge drainageweerstanden en lagere weerstanden naar het diepe grondwater (dan komt er namelijk meer ten goede aan het diepere grondwater). Bij zeer lage waarden van de weerstand naar het diepe grondwater wordt dit effect echter teniet gedaan, doordat kwelstromen ook toenemen en daarmee ook de afvoer.

Slootbodems verhogen

Het verhogen van de slootbodems leidt, zoals eerder gezien, tot het (veel) vaker optreden van lage afvoeren, terwijl grondwaterstanden aanmerkelijk hoger zijn. Het effect op lage afvoeren is minder groot in situaties waar de drainageweerstand kleiner is (eventuele neerslag of irrigatie komt zeer snel tot afvoer) of juist veel groter is (langer effect van basisafvoer). Dit effect is ook kleiner in situaties waar de weerstand naar de diepere ondergrond heel groot is, waardoor hogere grondwaterstanden minder wegzijging tot gevolg hebben. Ook in gebieden met meer stedelijk gebied (en dus meer constante aanvoer van effluent naar het oppervlaktewater) heeft de verhoging van slootbodems een minder groot effect op lage afvoeren.

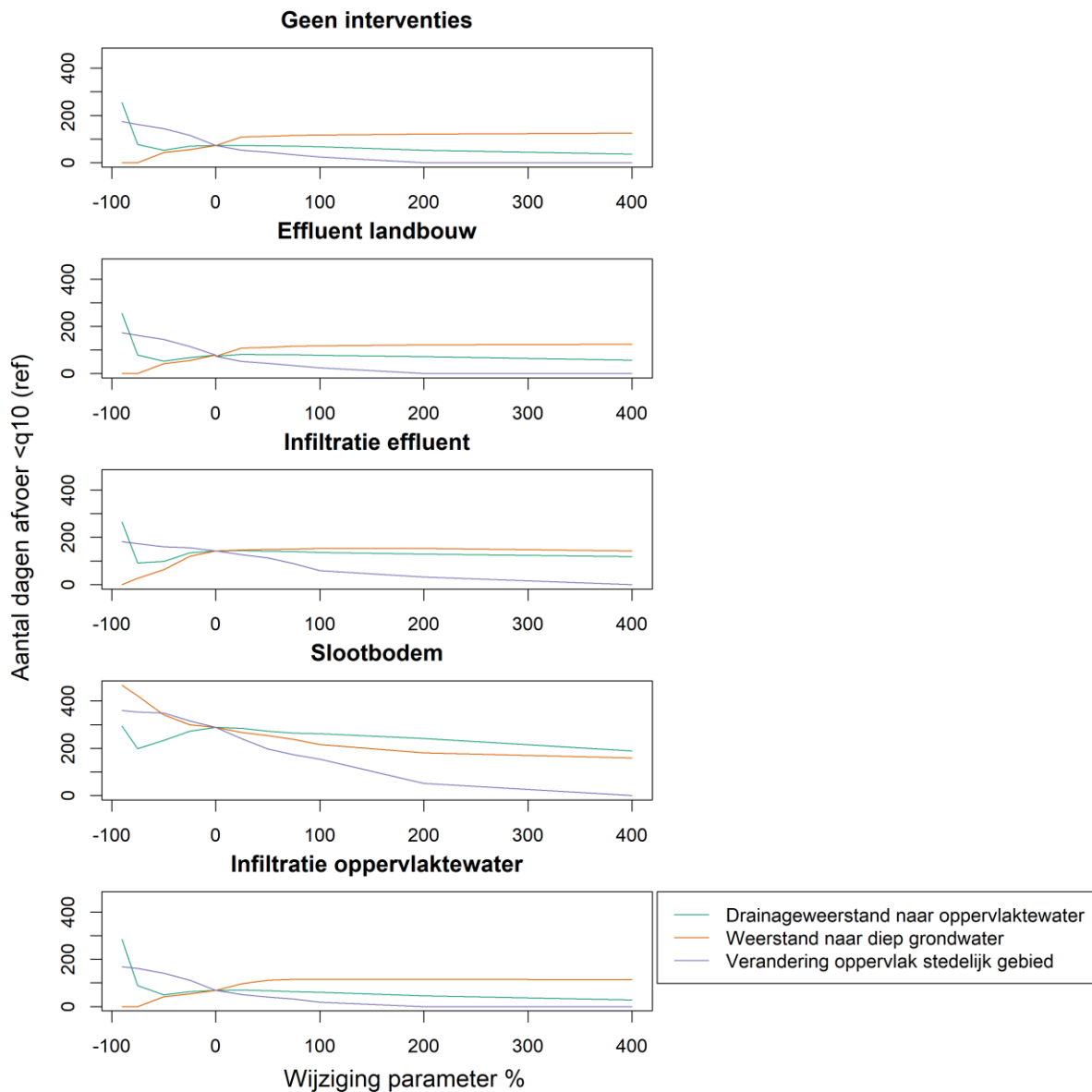
In tegenstelling tot de andere maatregelen lijkt het verhogen van de slootbodems te leiden tot een verandering van het effect van de weerstand van de ondergrond: bij het verhogen van de slootbodems leiden hogere waarden van de weerstand naar het diepere grondwater tot een relatieve vermindering van het aantal dagen met lage afvoer. Dit wordt verklaard doordat kwelstromen bij hogere slootbodems (in verhouding) een minder belangrijk aandeel van de afvoer vormen, waardoor afvoer vanuit het freatische systeem in verhouding meer van belang is.

Infiltratie oppervlaktewater

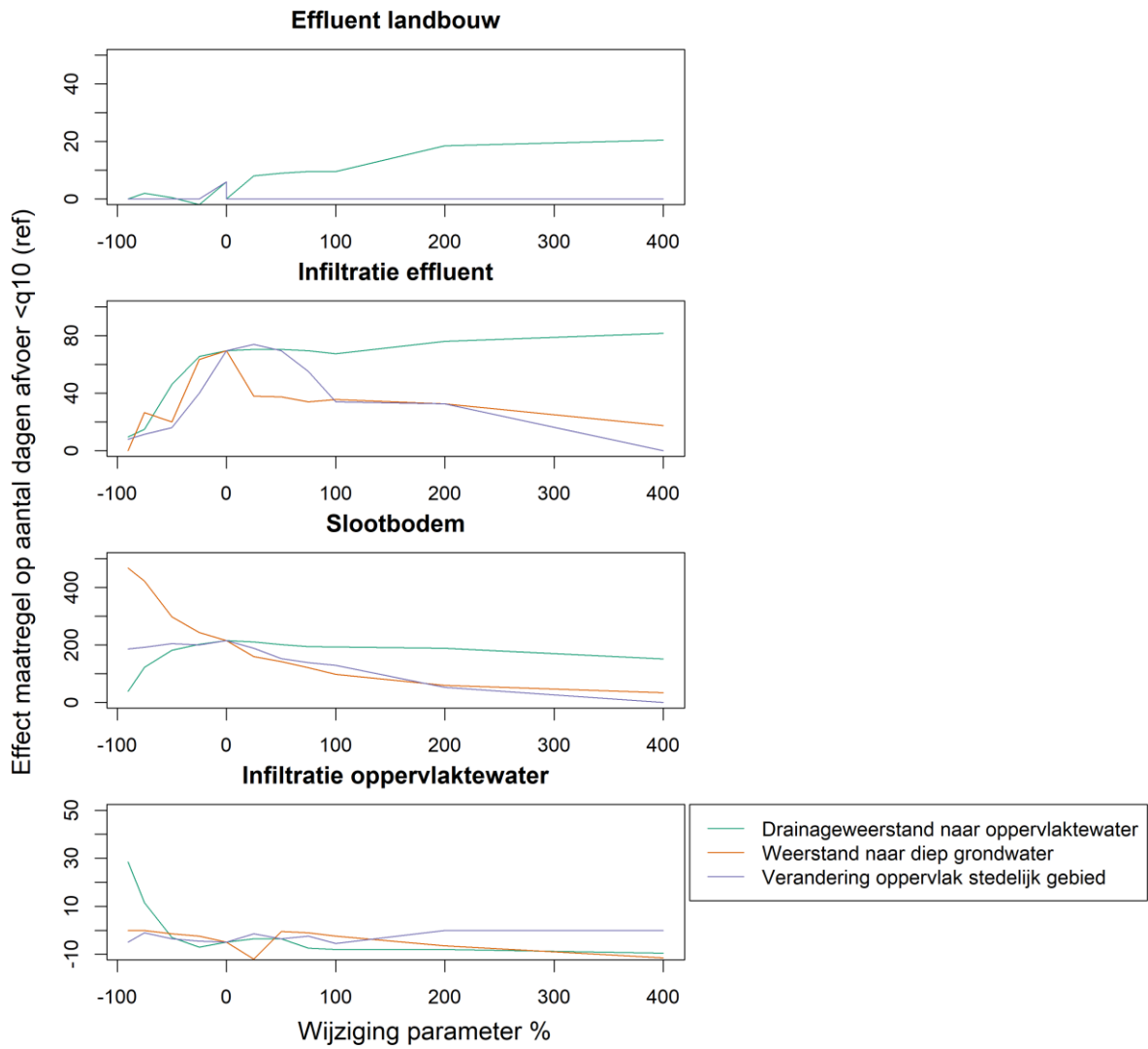
Seizoensinfiltratie van oppervlaktewater in grondwateronafhankelijke natuurgebieden leidt in het algemeen tot een (lichte) afname (enkele dagen) van het optreden van lage afvoer door de bijdrage aan de basisafvoer. Dit gunstige

effect is groter wanneer de drainageweerstand groter is (tragere afvoer) en wanneer de weerstand naar de diepe ondergrond groter is (tot ca. een tiental dagen). Andersom, wanneer de drainageweerstand erg laag is, kan deze maatregel leiden tot een toename van het aantal dagen dat lage afvoer plaatsvindt.

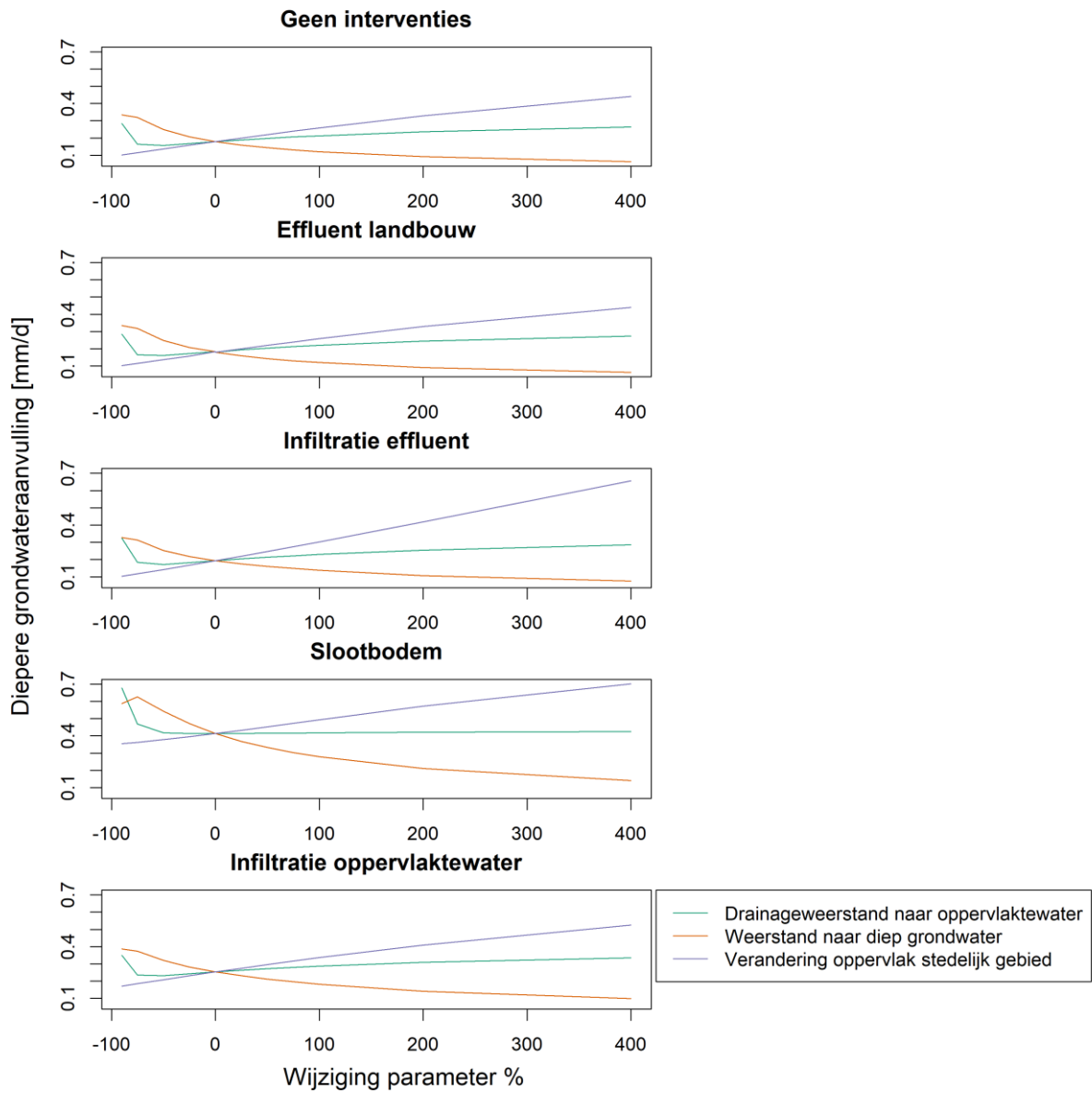
Deze maatregel leidt daarnaast, met het verhogen van de grondwaterstanden, ook tot een beperkte toename van diepe grondwateraanvulling, waarbij het effect iets kleiner is wanneer de weerstand naar het diepe grondwater groter is.



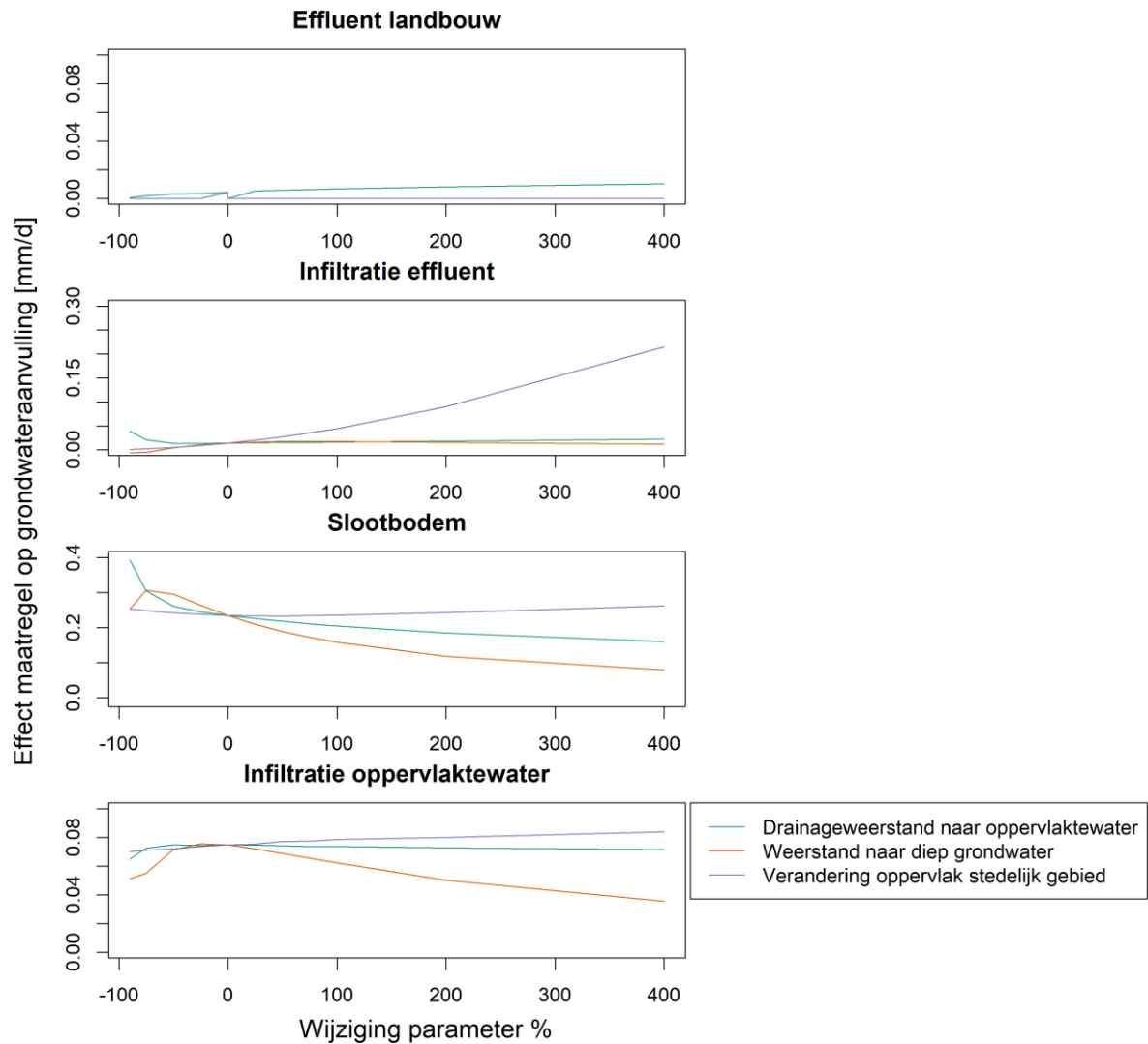
Figuur 4-21. Effect van verschillende omgevingskenmerken op lage afvoer, in combinatie met interventies in het watersysteem, waarbij er steeds één omgevingskenmerk tegelijk is aangepast.



Figuur 4-22. Effect van maatregelen (ten opzichte van referentie) op het optreden van lage afvoeren, bij verschillende omgevingskenmerken.



Figuur 4-23. Effect van verschillende omgevingskenmerken op diepere grondwateraanvulling, in combinatie met interventies in het watersysteem.



Figuur 4-24. Effect van maatregelen (ten opzichte van referentie) op diepere grondwateraanvulling, bij verschillende omgevingskenmerken.

5 Discussie

5.1 Mogelijkheden en beperkingen van de Watersysteemverkenner

Met de huidige versie van de Watersysteemverkenner is een eerste stap gezet naar een model waarmee waterstromen in het watersysteem en de waterketen gesimuleerd kunnen worden. Gezien de aannames van het model (relatief sterke vereenvoudiging) en de (vooralsnog) minimale validatie is het model vooral geschikt om verkenningen uit te voeren naar mogelijke interacties tussen watersysteem en waterketen, en de (ordegrootte van) effecten en doorwerking van maatregelen. Dit maakt het model een potentieel geschikt hulpmiddel voor verkenningen met betrekking tot de watertransitie, waar in veel Nederlandse regio's aan wordt gewerkt.

Hoewel verdere kalibratie en validatie in vervolgonderzoek gewenst zijn, worden voor nu de processen en uitkomsten kwalitatief beschouwd. De temporele variatie van evapotranspiratie, grondwaterstanden en oppervlaktewaterstanden volgde patronen zoals die verwacht worden in hydrologische systemen. Ook de afhankelijkheid van parameters volgde doorgaans logische patronen, hoewel de vereenvoudiging van het drainagesysteem ook leidde tot gedrag dat in werkelijkheid niet verwacht wordt, maar te verklaren was door de opzet van het model (toegelicht in 4.3). Dit kan aanleiding zijn om de modelopzet hierop aan te passen.

Eén van de aannames in het model is dat de interactie tussen de verschillende typen landgebruik voornamelijk plaatsvindt via het oppervlaktewater (peil), omdat het oppervlaktewaterpeil mede de grondwaterstand en eventuele kwelstromen bepaalt, en dat het proces bij deze interactie voor alle typen landgebruik gelijk is. Er is wel sprake van verschillende drainageweerstand per landgebruik om de verschillen in slootafstand, hoogteligging etc. te simuleren. In werkelijkheid heeft ook de ruimtelijke ligging van landgebruikstypen een grote invloed op de interactie met het oppervlaktewater. Landgebruikstypen bovenin een stroomgebied worden daardoor in realiteit veel minder beïnvloed door veranderingen benedenstrooms dan in het model het geval is. In het model zorgen gesimuleerde kwelstromen in natte natuur bijvoorbeeld voor een hoger oppervlaktewaterpeil, wat vervolgens weer ten goede kan komen aan het grondwater bij (doorgaans hoger gelegen) grondwateronafhankelijke natuurgebieden. In werkelijkheid zal dit water niet bovenstrooms terechtkomen. Daarnaast kan interactie tussen landgebruikstypen ook directer via andere wegen plaatsvinden, zoals via het (diepe of ondiepe) grondwater. Interactie via het ondiepe grondwater is niet opgenomen in het model. Het diepe grondwater in het model reageert zeer traag, waardoor effecten niet zichtbaar worden op de tijdschaal van de simulaties (vooralsnog enkele jaren). Zo leidt bijvoorbeeld een toename van grondwateraanvulling in hoger gelegen gebieden niet tot een toename van kwel in lager gelegen gebieden.

Ondanks de verschillende beperkingen die inherent zijn aan de eenvoudige opzet van het model, biedt het model verschillende mogelijkheden en inzichten. Zo worden temporele patronen van waterstromen en hoeveelheden (zoals grondwaterstanden, oppervlaktewaterstanden, evapotranspiratie) en de interactie daartussen duidelijk zichtbaar. In tegenstelling tot bijvoorbeeld in Sankey diagrammen (Krajenbrink et al., 2021) wordt met de uitvoer van dit model snel duidelijk hoe bijvoorbeeld seizoensvariaties zich tot elkaar verhouden.

Door het vergelijken van verschillende soorten uitvoer, is het mogelijk om te achterhalen waarom bepaalde processen plaatsvinden en hoe daardoor verschillende variabelen samenhangen. Ook is het vrij eenvoudig mogelijk om verschillende situaties en maatregelen te vergelijken, en te ontdekken hoe de effecten kunnen doorwerken in watersystemen.

5.2 Maatregelen in watersystemen op de zuidelijke hoge zandgronden

In gebieden waar droogte een vraagstuk is, zoals de zuidelijke hoge zandgronden, wordt actief nagedacht over maatregelen die bijdragen aan een verminderde druk op het grondwater of een toename van grondwateraanvulling, terwijl het daarnaast van belang is om zeer lage afvoeren of droogval van beken te voorkomen (Adviescommissie Droogte, 2022; Krajenbrink et al., 2021; van den Eertwegh et al., 2020).

De maatregelen die in dit rapport middels modelsimulaties zijn onderzocht (hergebruik van effluent in de landbouw, infiltratie van effluent in grondwateronafhankelijke natuurgebieden, verhogen van slootbodems en seizoensinfiltratie van oppervlaktewater in grondwateronafhankelijke natuurgebieden) kunnen allemaal leiden tot een (kleine of grote) toename van de grondwateraanvulling. Voor alle maatregelen behalve seizoensinfiltratie van oppervlaktewater geldt echter de bijwerking dat deze leiden tot het vaker optreden van lage afvoeren, wat in veel gevallen ongewenst is. Hergebruik van effluent in de landbouw leidt bijvoorbeeld tot minder afvoer, waarbij de verminderde uitzakking van het grondwater niet leidt tot een verbetering van de basisafvoer, omdat de grondwaterstanden hiervoor nog niet hoog genoeg zijn. Mogelijk dat een (hier niet onderzochte) combinatie van maatregelen (waarmee ook de grondwaterstanden verhoogd worden) gunstiger zou zijn. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat in de praktijk er een onderscheid gemaakt moet worden tussen afvoer vanuit bovenstroomse en benedenstroomse wateren. Verhogen van slootbodems zal leiden tot het vaker droogvallen van bovenstroomse oppervlaktewateren, maar kwelstromen kunnen benedenstreams tot een stabielere basisafvoer leiden. Dit kan een reden zijn om, zoals eerder genoemd, het model aan te passen door onderscheid aan te brengen tussen boven- en benedenstreams oppervlaktewater. Voor seizoensinfiltratie geldt dat dit kan leiden tot een vermindering van het aantal dagen met te lage afvoeren.

De resultaten laten daarnaast zien, dat de effecten van maatregelen afhangen van de eigenschappen van de omgeving (drainageweerstand, ondergrond, landgebruik), waarbij bepaalde maatregelen in gebieden met bepaalde omgevingskenmerken een gunstiger of juist ongunstiger effect kunnen hebben. Het model kan op deze manier benut worden om een eerste schifting te maken tussen zinnige of onzinnige maatregelen. Daarnaast is het mogelijk (hoewel dit nog niet getest is) om combinaties van maatregelen te onderzoeken, aangezien deze elkaar kunnen versterken of juist tegenwerken.

De huidige beperkingen van het model (5.1) in acht genomen, kunnen de volgende inzichten uit de resultaten voor de specifieke casus gehaald worden:

- Hoewel hergebruik van effluent in de landbouw de druk op het grondwater kan verminderen doordat er minder uit het grondwater onttrokken wordt voor irrigatie, leidt de verminderde onttrekking naar verwachting niet tot een toename van de basisafvoer tijdens droge perioden in de situatie waarin grondwaterstanden nog steeds dusdanig uitzakken dat er sprake is van inzijging in plaats van afvoer. (In dergelijke situaties zal deze maatregel het risico op het optreden van lage afvoeren juist vergroten).
- Het infiltreren van effluent in grondwateronafhankelijke gebieden kan bijdragen aan een grotere diepe grondwateraanvulling, maar ook hier geldt dat zolang de grondwaterstanden laag blijven (en de basisafvoer niet aanmerkelijk toeneemt), het risico op lage afvoeren juist toeneemt.
- Het grootste effect op de grondwateraanvulling wordt verkregen door het verhogen van de slootbodems, omdat hiermee grondwaterstanden aanmerkelijk hoger kunnen worden. Ook komen hierdoor lage afvoeren vaker voor. In gebieden waar er sprake is van een grote weerstand naar de ondergrond, een hoge drainageweerstand (van nature, of door mensen gewijzigd, bijvoorbeeld in combinatie met extensiever landgebruik) of bij de aanvoer van relatief veel effluent zullen lage afvoeren minder vaak optreden.
- Seizoensinfiltratie van oppervlaktewater heeft op beide criteria (grondwateraanvulling en het optreden van lage afvoeren) een gunstig effect: het leidt tot een toename van grondwateraanvulling en een afname van lage afvoeren.

- De resultaten laten zien dat de effecten van maatregelen onderhevig zijn aan wisselwerkingen in het watersysteem, dat de effecten in het watersysteem niet voor elk type watersysteem hetzelfde zullen zijn, en dat omgevingskenmerken kunnen uitmaken of het uiteindelijk effect van een maatregel gunstig of juist ongunstig is. Dit vraagt om nuance in het gesprek over maatregelen, en verder onderzoek naar welke maatregelen gunstig zijn in verschillende typen landschappen. Het lijkt ons goed om dit type modelresultaten als ondersteunend te zien aan de inhoudelijke discussie, waarin verschillende mogelijke voor- en nadelen van maatregelen worden afgewogen.

Echter:

- Gezien de mate van vereenvoudiging en het gebrek aan kalibratie en validatie zijn de modelresultaten indicatief wanneer specifieke locaties worden beoogd. De modelresultaten zijn geschikt om mogelijk interessante maatregelen en mogelijke bijwerkingen te identificeren, maar kunnen geen voorspellingen doen voor specifieke gebieden. Er kan bijvoorbeeld sprake zijn van andere (ruimtelijke) interacties, die alleen in ruimtelijk gedistribueerde modellen aan het licht komen. Dit is derhalve altijd een gewenste vervolgstap. Bij gebruik van ruimtelijk gedistribueerde modellen moet echter ook rekening gehouden worden dat hier bepaalde interacties soms niet in zijn opgenomen (veel van deze modellen werken bijvoorbeeld met voorgeschreven oppervlaktewaterstanden), die wel in de Watersysteemverkenner zitten.
- De wisselwerkingen tussen verschillende processen (zoals hergebruik effluent en afvoer) zijn gebaseerd op de aanname dat deze in hetzelfde (deel)stroomgebied plaatsvinden. In de praktijk kan het zijn dat dit in verschillende (deel)stroomgebieden plaatsvindt, waardoor ‘baten en lasten’ onevenredig worden verdeeld.
- De effecten op de lage afvoeren zijn gemiddeld voor een heel (deel)stroomgebied. In de praktijk kan het effect een stuk minder erg zijn als droogval van een beek plaatsvindt rondom hoger gelegen droge natuurgebieden (waar veel diepere grondwateraanvulling plaatsvindt) en kwelstromen in lager gelegen gebieden juist toenemen. Ook om deze reden is het verstandig om de eerste inzichten aan te vullen met ruimtelijk gedistribueerde simulaties (waarbij tevens opgemerkt moet worden dat de gebruikte modellen geschikt moeten zijn, aangezien dit niet voor alle regionale modellen geldt).

5.3 Uitdagingen voor de toepassing van watersysteemen denken

Watersysteemen denken, met behulp van de Watersysteemverkenner, biedt de mogelijkheid om effecten van maatregelen in het watersysteem te verkennen. Naast de specifieke, technische, verbeteringen die de Watersysteemverkenner nog zou kunnen gebruiken (5.1), liggen er ook nog uitdagingen op het gebied van de toepassing voor praktijkdoeleinden.

Ondanks de aangebrachte versimpelingen ten aanzien van het watersysteem, is het model nog steeds relatief complex, om daarmee voldoende recht te doen aan de belangrijkste interacties in het watersysteem. Bijvoorbeeld de sterke niet-lineariteit, zoals in de onverzadigde zone, betekent dat een relatief hoog detailniveau nodig is. Daarnaast zijn er veel verschillende (directe en indirecte) manieren, waarop interacties tussen processen kunnen plaatsvinden. Om de effecten van de maatregelen uit 4.2 te begrijpen, moesten diverse onderdelen van het watersysteem (inclusief tijdreeksen) onder de loep worden genomen. Hoewel de Watersysteemverkenner dit soort informatie eenvoudig beschikbaar maakt, kan het een uitdaging zijn om te bepalen welke informatie relevant is, en voor de interpretatie is soms relatief veel kennis van het watersysteem nodig. Het zou interessant kunnen zijn om verder te onderzoeken hoe dergelijke informatie toegankelijker kan worden gemaakt, allereerst voor experts, maar wellicht uiteindelijk ook voor niet-experts.

Daarnaast is het goed om te kijken hoe watersysteemen denken in de praktijk kan worden toegepast. In de casus die in dit onderzoek is beschouwd, is de uitdaging ‘droogteproblematiek’ genoemd en is vooral gekeken naar het optreden van lage afvoeren (een versimpeling van de gevarieerde afvoer over de tijd) en de gemiddelde

grondwateraanvulling over het gehele gebied. In de praktijk zijn vraagstukken echter veel complexer, met verschillende belanghebbenden, met verschillende bijbehorende belangen en wensen. Dit vraagt niet alleen iets van het proces dat er bij hoort (samenwerking tussen belanghebbenden), maar ook van de methode rondom de verkenning van maatregelen en de visualisatie en communicatie van resultaten. Een dergelijke methode zou ontwikkeld kunnen worden met behulp van een praktijkcasus en een klankbordgroep.

Daarnaast is de toepassing van watersysteemmodellen in serious games een mogelijkheid om verder uit te werken. Een eerdere (rudimentaire) versie van de Watersysteemverkenner is gebruikt in de serious game Aqua Ludens, waarbij het spel draait om het waterbeheer in Groningen (van Aalderen et al., 2023). Een van de doelen van dit spel is dat de deelnemers inzicht krijgen in de complexiteit en de verbondenheid in het watersysteem. Met een brede set invoerdata zou het mogelijk zijn om een spel te ontwikkelen, waarbij gespeeld kan worden met verschillende typen landschappen en situaties.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

In dit onderzoek zijn maatregelen ten aanzien van de waterbeschikbaarheid op de zuidelijke hoge zandgronden verkend met behulp van de Watersysteemverkenner.

Vergeleken met andere methoden kan de Watersysteemverkenner snel processen in het watersysteem simuleren, waarbij feedbackrelaties tussen processen worden meegenomen. In verband met relatief grote vereenvoudigingen en het feit dat er (nog) geen gedegen validatie heeft plaatsgevonden zijn de resultaten vooralsnog indicatief. De resultaten hebben echter wel meerwaarde, omdat inzicht wordt geboden in de samenhang tussen waterketen en watersysteem, en een indruk verkregen wordt van de relatieve omvang van effecten van maatregelen en (een deel van de) mogelijke interacties ('bijwerkingen') in het watersysteem.

Wat betreft maatregelen ten aanzien van droogteproblematiek op de zuidelijke hoge zandgronden, laten de resultaten zien dat alle onderzochte maatregelen mogelijk (licht of sterk) positief kunnen bijdragen aan de diepere grondwateraanvulling, maar dat seizoensinfiltratie daarnaast ook kan bijdragen aan het minder optreden van lage afvoer. Deze maatregel is daarom mogelijk geschikter dan de andere onderzochte maatregelen in (relatief landelijke) gebieden waar lage beekafvoer een aandachtspunt is. Wanneer dit laatste minder van belang is (bijvoorbeeld doordat er al relatief veel basisafvoer is), kan verhoging van slootbodems een veel groter effect hebben op grondwateraanvulling, doordat deze maatregel leidt tot een structurele verhoging van grondwaterstanden.

De resultaten laten duidelijk zien dat maatregelen verschillend kunnen uitwerken bij verschillende omgevingskenmerken, als gevolg van deze interacties in het watersysteem. Systeemdenken is een methode waarmee dit soort interacties zichtbaar gemaakt kunnen worden, zonder dat simulaties met ruimtelijk gedistribueerde modellen (met rekestijden in de orde van grootte van weken) nodig zijn. Om deze methode in het vervolg goed in te kunnen zetten, is verdere ontwikkeling en toetsing van de Watersysteemverkenner gewenst.

6.2 Aanbevelingen

Ten aanzien van maatregelen in het watersysteem wordt aanbevolen om rekening te houden met interacties tussen verschillende processen in watersysteem en waterketen en de invloed van omgevingskenmerken op deze processen. In de praktijk betekent dit dat de effecten van maatregelen kunnen verschillen per plek en is het aannemelijk dat combinaties van maatregelen onverwachte of ongewenste gevolgen kunnen hebben. Voor de watertransitie is het daarom van groot belang dat:

- de mogelijke effecten van maatregelen worden onderzocht in relatie tot de rest van het watersysteem.
- belanghebbenden in het watersysteem en de waterketen samenwerken, en dat gezamenlijke doelen en criteria worden geformuleerd, zodat versnipperd beleid (waarbij gunstige effecten mogelijk ongedaan gemaakt worden) voorkomen wordt.

Om het *watersysteendenken* in het kader van de watertransitie verder te brengen, wordt aanbevolen om de Watersysteemverkenner verder te ontwikkelen:

- Verdere kalibratie en validatie van het model, waarbij scherper wordt welke processen wel en niet goed meegenomen worden, en op welke punten verbetering van het model gewenst is. Omdat

databeschikbaarheid een probleem kan vormen, zou hierbij gebruik gemaakt kunnen worden van basisdata uit bestaande (ruimtelijk gedistribueerde) modellen, zoals het LHM.

- Verbeteren van de toegankelijkheid van de uitvoer van de Watersysteemverkenner door het verder ontwikkelen en testen van de interface.

Meer algemeen wordt daarnaast aanbevolen om:

- Een methode te ontwikkelen om onderzoek naar maatregelen in een watersysteem systematisch vorm te geven, met aandacht voor verschillende belangen en criteria, alsmede de effecten en eventuele (positieve of negatieve) bijwerkingen van maatregelen.

7 Referenties

- Adviescommissie Droogte, 2022. Zonder water, geen later, Provincie Noord Brabant.
- Bartholomeus, R.P., van der Wiel, K., van Loon, A.F., van Huijgevoort, M.H.J., van Vliet, M.T.H., Mens, M., Muurling-van Geffen, S., Wanders, N., Pot, W., 2023a. Managing water across the flood–drought spectrum: Experiences from and challenges for the Netherlands Cambridge Prisms: Water, 1: e2. DOI:10.1017/wat.2023.4
- Bartholomeus, R.P., van Huijgevoort, M.H.J., Rozema, J., van Loon, A.H., 2019. Watertekorten in landbouw terugdringen met hergebruik industrieel restwater, Water Matters, pp. 20-23. <https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/open/59481008>
- Bartholomeus, R.P., van Loon, A.H., van Huijgevoort, M.H.J., 2018. Hergebruik van industrieel restwater voor de watervoorziening van de landbouw. KWR 2018.089, KWR, Nieuwegein. <https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/open/56466965>
- Bartholomeus, R.P., Wanders, N., Pot, W.D., 2023b. Waterscape : Waterbeheer in een klimaat van extremen vraagt om een transformatie in watersysteem en water governance. Water Governance, [https://edepot.wur.nl/643312\(3\)](https://edepot.wur.nl/643312(3)): 24-33.
- Cirkel, D.G., van den Eertwegh, G., Stofberg, S.F., Bartholomeus, R.P., 2017. Kennisdocument Hergebruik van Restwater voor de Landbouwwatervoorziening. BTO 2017.009, KWR, Nieuwegein. <https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/open/55133088>
- Geologische Dienst Nederland, 2024. Grondwaterstanden in beeld. TNO. <https://www.grondwatertools.nl/gwsinbeeld/>
- Krajenbrink, H., Stofberg, S., Bartholomeus, R., 2021. RWZI als waterfabriek voor een robuuste watervoorziening, STOWA, Amersfoort. <https://www.stowa.nl/publicaties/rwzi-als-waterfabriek-voor-een-robuste-watervoorziening>
- Pronk, G.J., Stofberg, S.F., van Dooren, T.C.G.W., Dingemans, M.M.L., Frijns, J.A.G., Koeman-Stein, N.E., Smeets, P.W.M.H., Bartholomeus, R.P., 2021. Increasing Water System Robustness in the Netherlands : Potential of Cross-Sectoral Water Reuse (Open Access). Water Resources Management, <https://edepot.wur.nl/553272> <https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/Open/62932519>.
- Stofberg, S.F., Bartholomeus, R.P., van den Eertwegh, G.A.P.H., Raat, K.J., 2021. Hergebruik van gezuiverd restwater in de landbouw. Subirrigatie met RWZI effluent Haaksbergen 2015-2019. KWR 2021.026, KWR, Nieuwegein. <https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/open/62185245>
- Stofberg, S.F., Brakkee, E.A., 2022. Effecten watermaatregelen in beeld KWR 2022.074, KWR, Nieuwegein. <https://www.brabant.nl/-/media/29623fbd46104b5284683b2d9bd2ab9b.pdf>
- Stofberg, S.F., Koenders, M., Brakkee, E.A., Bartholomeus, R.P., 2023a. Gezamenlijke watersysteemverkenning als eerste stap in de toekomstige drinkwatervoorziening van Drenthe, H2O-Online. <https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/Open/70056390>
- Stofberg, S.F., Pronk, G.J., van Huijgevoort, M.H.J., Raat, K., Bartholomeus, R.P., 2023b. Werken aan waterbeschikbaarheid: inzichten en uitdagingen, H2O-Online. <https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/Open/70054602>
- Stofberg, S.F., van Huijgevoort, M., 2024. De Watersysteemverkenner, KWR, Nieuwegein.
- Stofberg, S.F., van Huijgevoort, M.H.J., Krajenbrink, H.J., Brakkee, E.A., 2024. Interventies in het watersysteem. Achtergrondkennis en methoden om de doorwerking van maatregelen in het regionale watersysteem te analyseren, KWR, Nieuwegein.
- TNO, 2024. DINOLOket. TNO. www.dinoloket.nl
- van Aalderen, N., Stofberg, S.F., van den Broeke, J., 2023. Serious game watersysteem Groningen - Aqua Ludens. BTO 2023.079, KWR, Nieuwegein. <https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/Open/71251304>
- van den Eertwegh, G. et al., 2020. Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden- en Oost-Nederland, het verhaal - analyse van droogte 2018 en 2019 en tussentijdse bevindingen Fase 2, (Rapport, managementsamenvatting + uitgebreide samenvatting), KnowH2O, KWR, Universiteit Wageningen, Deltares, Hoefsloot Spatial Solutions, FWE. <https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/open/61580110> <https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/open/61579916> <https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/open/61580277>

van den Eertwegh, G.A.P.H. et al., 2019. Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden- en Oost-Nederland. Rapportage Fase 1. ontwikkeling van uniforme werkwijze voor analyse van droogte en tussentijdse bevindingen, KnowH2O, KWR, Deltares, Universiteit Wageningen, Hoefsloot Spatial Solutions, FWE.
<https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/open/60038685>