



Bedrijfstakonderzoek
BTO 2022.061 | November 2022

**Invloed van historische ingrepen in
de waterhuishouding en
veranderingen in landgebruik op
freatische grondwaterstanden**

Een literatuurstudie

Rapport

Invloed van historische ingrepen in de waterhuishouding en veranderingen in landgebruik op freatische grondwaterstanden; een literatuurstudie.

BTO 2022.061 | November 2022

Dit onderzoek is onderdeel van het collectieve Bedrijfstakonderzoek van KWR, de waterbedrijven en Vewin.

Opdrachtnummer

402045_176

Projectmanager

Ir. Martin van der Schans

Opdrachtgever

BTO - Thematisch onderzoek - Bronnen en omgeving

Auteur(s)

Dr. ir. Gijsbert Cirkel, Dr. Henk Krajenbrink

Kwaliteitsborger(s)

Dr. ir. Ruud Bartholomeus

Projectbegeleidingsgroep

Jan -Jaap Buijse (Vitens), Jan-Phillip Witte (FWE), Jeroen Castelijns (Brabant Water), Florian Knappers (Oasen)

Verzonden naar

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

Keywords

Historische hydrologie, waterhuishouding, grondwaterstandsverlagingen, beekverbetering, ruilverkavelingen

Jaar van publicatie
2022

Meer informatie
Dr. ir. Gijsbert Cirkel
T 06-20614497
E Gijsbert.cirkel@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

November 2022 ©

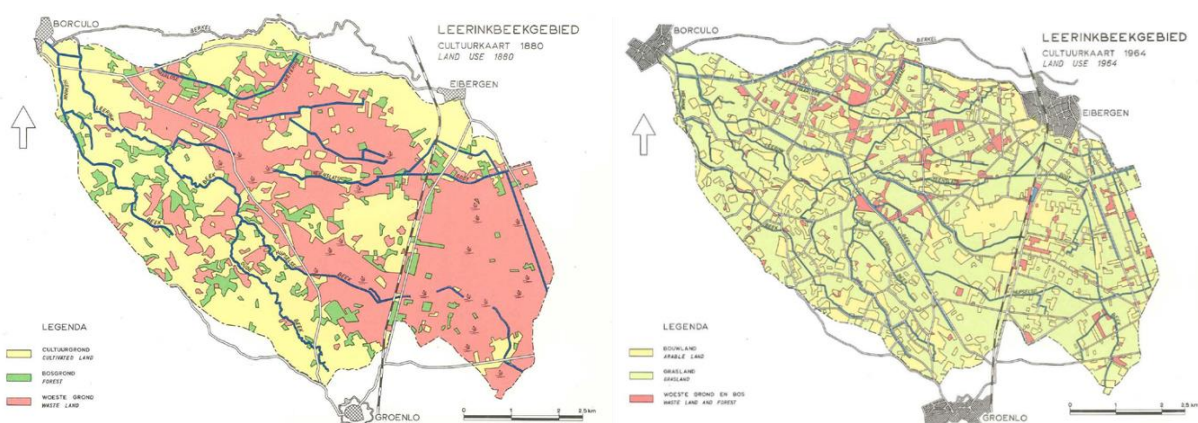
Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen,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

Managementsamenvatting

Effecten van historische ingrepen in de waterhuishouding en landgebruiksveranderingen op de freatische grondwaterstanden

Dr. ir. Gijsbert Cirkel en Dr. Henk Krajenbrink

Het winnen van grondwater heeft, afhankelijk van de geohydrologische situatie in meer of mindere mate invloed op de freatische grondwaterstanden en daarmee op de vochtinhouding van de bodem. Bij de locatiekeuze en inrichting van nieuwe winvelden voor drinkwaterproductie wordt getracht deze invloed te minimaliseren of te compenseren. Veel winningen bestaan echter al decennia. Bij het vaststellen van de invloed op freatische standen wordt doorgaans uitgegaan van de huidige waterhuishouding, landschapsinrichting en klimatologische omstandigheden. Dit terwijl deze aspecten sinds de start van de winning waarschijnlijk sterk veranderd zijn. Deze beknopte literatuurstudie richt zich op het in beeld brengen van relevante veranderingen in waterhuishouding en landgebruik en het waar mogelijk kwantificeren van de invloed van deze veranderingen op de freatische standen in pleistoceen Nederland. Deze inzichten kunnen handvatten bieden voor maatregelen om droogte te bestrijden.



Zowel het landgebruik als de waterhuishouding in de pleistocene zandgebieden is sterk veranderd in de afgelopen eeuw. Dit voorbeeld laat zien dat het areaal woeste grond (heide en bos) sterk is afgenomen ten gunste van landbouwgrond en stedelijk gebied. Daarnaast is de af- en ontwatering sterk geïntensiveerd.

Belang: Inzicht in effecten veranderingen waterhuishouding cruciaal

De hoge zandgronden zijn de afgelopen jaren geconfronteerd met forse droogte, maar hebben al tientallen jaren te kampen met verdroging. Deze verdroging is mede veroorzaakt door in de afgelopen eeuw uitgevoerde aanpassingen aan het af- en ontwateringssysteem gericht op het snel afvoeren van overtollig water en optimaliseren van landbouwproductie. Daarnaast is -in dezelfde periode- het aantal en de omvang van grondwaterwinningen ten behoeve van drinkwaterproductie toegenomen. De effecten van

deze ontwikkelingen aan de daling van de freatische grondwaterstand zijn niet makkelijk te scheiden en de vraag doet zich voor of het effect van een grondwateronttrekking anders is in de historische situatie (minder intensief ontwaterd) dan in de huidige (intensief ontwaterd). Ook is het de vraag of door herstel naar de historische waterhuishoudkundige situatie water langer vast kan worden gehouden om daarmee droogte te mitigeren. Deze studie richt zich op het in beeld brengen en waar mogelijk kwantificeren van deze historische veranderingen.

Aanpak: Literatuurstudie

Binnen dit onderzoek is gezocht naar studies waarin de ingrepen in de waterhuishouding en landgebruiksverandering zijn geëvalueerd. Hieruit is getracht af te leiden wat de dimensies van de oorspronkelijke situatie waren, welke veranderingen zijn doorgevoerd en welke effecten dit had op de freatische grondwaterstanden.

Resultaten: informatie is schaars maar wijst op forse effecten van de ingrepen

Uit de studie blijkt dat sinds het einde van de 19e eeuw, maar in het bijzonder sinds 1950, dus ten tijde van de aanvang van de meeste drinkwaterwinningen, substantiële veranderingen hebben plaatsgevonden in de waterhuishouding. Over exacte dimensies van het watersysteem voorafgaand aan de grootschalige ingrepen is slechts zeer beperkt informatie beschikbaar. De best onderbouwde schattingen hiervoor worden gegeven door Van der Gaast & Massop (2009). In deze studie is gebruik gemaakt van de door bovengenoemde auteurs geïnventariseerde dimensies. De wijzigingen in de waterhuishouding in de afgelopen eeuw hebben een fors verlagend effect gehad op de freatische grondwaterstanden. Zowel de (schaarse) metingen als de modelsimulaties wijzen op verlagingen van meerdere decimeters. De effecten zijn hierbij het grootst op de hoogste (ondiepste) grondwaterstanden en, minder groot, maar nog steeds aanzienlijk op de laagste standen. Het is echter niet zo dat door herstel van de historische hydrologische kenmerken droogte niet meer een probleem zal vormen. Ook moet men zich realiseren dat wateroverlast voor de ingrepen grootschalig en frequent voorkwam.

Toepassing: inzicht in historische waterhuishouding

Uit het onderzoek komt naar voren dat met het terugbrengen van de historische dimensies van het watersysteem water waarschijnlijk beter kan worden vastgehouden en freatische grondwaterstanden op een hoger peil kunnen worden gebracht. Omdat dergelijke aanpassingen ook gepaard kunnen gaan met wateroverlast en het landgebruik inmiddels sterk veranderd is, is echter maatwerk nodig. De geïnventariseerde informatie kan gebruikt worden om numerieke modellen te parameteriseren. Hiermee kan het effect van de ingrepen in meer detail worden onderzocht. Ook kan hiermee worden onderzocht of herstel van de historische waterhuishouding ingezet kan worden als mitigerende maatregel rond grondwaterwinningen.

Het Rapport

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Invloed van historische ingrepen in de waterhuishouding en veranderingen in landgebruik op freatische grondwaterstanden; een literatuurstudie* (BTO 2022.061). Een modelstudie waarbij gebruik is gemaakt van de in deze studie geïnventariseerde informatie is beschreven in BTO 2022.062.

Inhoud

<i>Managementsamenvatting</i>	3
Inhoud	5
1 Inleiding	6
1.1 Aanleiding	6
1.2 Doel en onderzoeksvragen	7
2 Periode tot de ruilverkaveling	8
2.1 Veranderingen in de waterhuishouding	8
2.2 Veranderingen in landgebruik	10
2.3 Invloed op de freatische grondwaterstanden	11
3 Vanaf de ruilverkavelingen tot heden	12
3.1 Waterhuishoudkundige ingrepen	12
3.2 Veranderingen in landgebruik	16
3.3 Stijging van gewasopbrengsten	17
3.4 Berekening	18
3.5 Overige ingrepen	18
3.6 Totaal effect veranderingen op de grondwaterstanden	19
3.7 Klimaatverandering	20
4 Conclusies & aanbevelingen	21
4.1 Conclusies	21
4.2 Aanbevelingen	22
5 Referenties	23

1 Inleiding

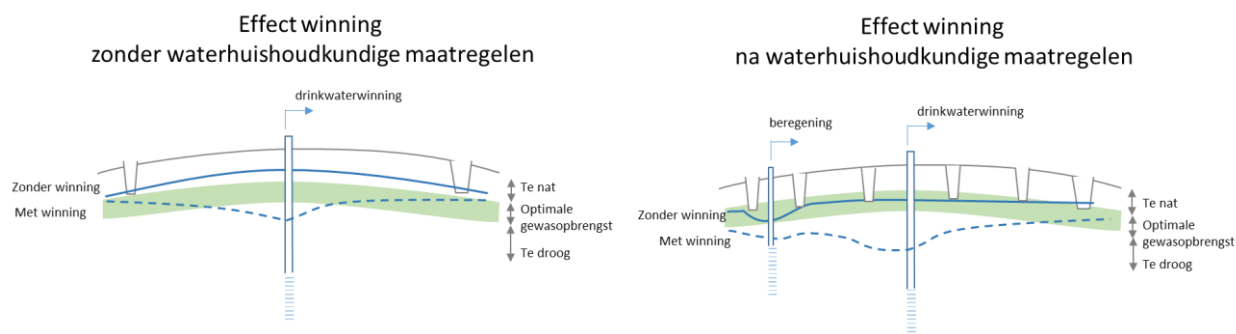
1.1 Aanleiding

Het winnen van grondwater heeft, afhankelijk van de geohydrologische situatie, in meer of mindere mate invloed op de freatische grondwaterstanden en daarmee op de vochthuishouding van de bodem. Bij de locatiekeuze en inrichting van nieuwe winvelden voor drinkwaterproductie wordt getracht deze invloed te minimaliseren of te compenseren. Zo kunnen andere gebruiksfuncties binnen de invloedssfeer van een grondwaterwinning aanspraak maken op compensatie, indien kan worden aangetoond dat hun activiteiten negatief worden beïnvloed door de effecten van de winning. Veel winningen bestaan echter al decennia. Bij het vaststellen van de invloed wordt doorgaans uitgegaan van de huidige waterhuishouding, landschapsinrichting en klimatologische omstandigheden. Dit terwijl deze aspecten sinds de start van de winning sterk veranderd zijn.

Veranderingen in de waterhuishouding en landschapsinrichting zijn een diffuus proces, waaraan in beperkte mate een duidelijk startpunt in de tijd is te koppelen. Het landschap en de waterhuishouding zijn al aan verandering onderhevig sinds de mensen zich vestigden. Vanaf de 17e eeuw zijn veengebieden afgegraven en gebieden ingepolderd. Veranderingen in de waterhuishouding van de hoge zandgronden zijn sterk toegenomen vanaf de jaren '30 en hebben een hoge vlucht hebben genomen vanaf grofweg 1950 tot 1980. Zo is in het kader van de ruilverkaveling de ontwateringsdiepte in veel gebieden vergroot en is de afvoer van overtollige neerslag in natte perioden versneld. De landbouw heeft een ander karakter gekregen als gevolg van optimalisatie van teelttechnieken en verandering in gewaskeuze. Daarnaast is het landgebruik in bredere zin veranderd door onder andere de toename van het areaal bos in natuurgebieden en door verstedelijking. Tot slot is klimaatverandering van invloed op de grondwateraanvulling en de verschillende landgebruiksfuncties. Recent is bijvoorbeeld duidelijk geworden dat door klimaatverandering de frequentie van droogte zeker in Oost-Nederland toeneemt (Philip et al. 2020). Hiermee komt ook de waterbeschikbaarheid voor landbouw steeds meer onder druk te staan.

Vanaf 1980 kwam langzaam aan meer besef van de negatieve kanten van de doorgevoerde maatregelen en veranderingen in landgebruik voor o.a. grondwaterafhankelijke natuur. In reactie hierop zijn op verschillende locaties hydrologische herstelmaatregelen ingezet. Deze ontwikkeling valt globaal samen met de start van veel grondwaterwinningen die inmiddels ook al tientallen jaren in bedrijf zijn. Hierbij is in veel gevallen de winningscapaciteit in de loop der tijd vergroot als reactie op de toegenomen watervraag door onder meer bevolkingstoename.

In de discussie over de invloed van waterwinning spelen dus meerdere effecten door elkaar, die niet altijd goed te ontrafelen zijn door bijvoorbeeld tijdreeksanalyse. Voor een voorbeeld waarbij is getracht de verschillende invloeden in beeld te brengen en te vergelijken met tijdreeksen wordt verwezen naar Kanen-Verlinden (2013). In deze rapportage komt de complexiteit duidelijk naar voren. Toch is het ontrafelen van deze invloeden van belang om te komen tot een robuuster watersysteem i.e. beter toegerust op weersextremen zoals droogte en zware regenval. Een grondwaterwinning kan bij een andere waterhuishoudkundige inrichting of ander landgebruik mogelijk een minder sterke invloed hebben dan in de huidige situatie. De vraag is dan ook welk effect ingrepen in de waterhuishouding en veranderingen in het landgebruik hebben op de freatische grondwaterstanden en hoe deze ingrepen de doorwerking van grondwateronttrekking beïnvloeden. Zijn we bijvoorbeeld door de gelijktijdige ontwikkelingen die allemaal een verlagend effect hebben niet onbedoeld naar een voor alle sectoren te laag grondwaterregime gezakt? Met andere woorden: in hoeverre had de af- en ontwatering zoals uitgevoerd in het kader van bijvoorbeeld de ruilverkaveling minder ver doorgevoerd kunnen worden als rekening was gehouden met veranderingen in grondwateronttrekkingen, klimaat en gewassen? In *Figuur 1* is deze gedachtegang conceptueel weergegeven.



Figuur 1 Conceptueel effect van een winning op het grondwater met en zonder waterhuishoudkundige maatregelen

1.2 Doel en onderzoeksvragen

In deze beknopte literatuurstudie worden de belangrijkste veranderingen per categorie (ingrepen in de waterhuishouding en veranderingen in het landgebruik in pleistoceen Nederland) behandeld en wordt een inschatting gedaan van de invloed op de grondwaterstand. We maken hierbij een onderscheid tussen de perioden vóór en na de start van de ruilverkaveling, waarbij de nadruk ligt op de periode vanaf de start van de ruilverkaveling (ca. 1950) tot heden. Uiteraard is deze scheiding een kunstmatige grens. Beekverbeteringswerken liepen door tot in de jaren '60 en in de jaren '50 waren veel ruilverkavelingen nog niet gestart. Ten slotte gaan we naast de inventarisatie van effecten in op methodes om de verschillen met de historische situatie te kwantificeren.

We onderzoeken hierbij specifiek het volgende:

- Welke waterhuishoudkundige aanpassingen zijn in pleistoceen Nederland doorgevoerd in de periode vanaf ca. 1900 en wat is bekend over effecten van deze waterhuishoudkundige aanpassingen op het watersysteem
- Wat zijn realistische dimensies van het oppervlaktewatersysteem voorafgaande aan de grootschalige waterhuishoudkundige 'verbeterings'werken¹?
- Wat is het effect van de wijzigingen in het oppervlaktewatersysteem op freatische grondwaterstanden?

¹ De term 'verbeteringswerken' wordt gebruikt voor de uitgevoerde werkzaamheden aan het watersysteem om overstroming te verminderen en de landbouwproductie te kunnen verhogen.

2 Periode tot de ruilverkaveling

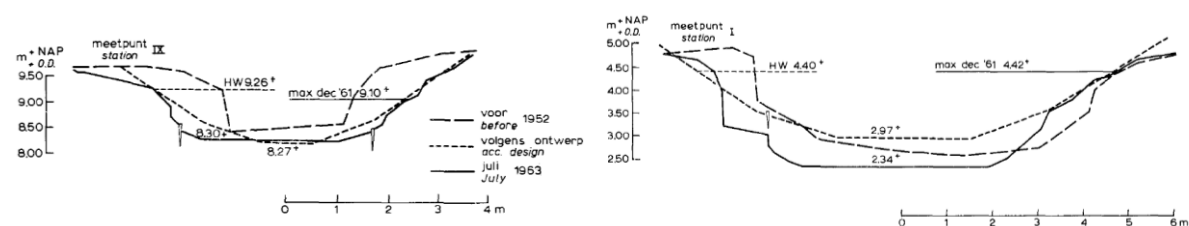
2.1 Veranderingen in de waterhuishouding

Significante veranderingen in landgebruik en –inrichting in de hoge delen van Nederland vonden plaats vanaf de tweede helft van de 19e eeuw, met de ontginning van de ‘woeste gronden’ als belangrijkste kenmerk (Van de Ven, 1993; Knol et al., 2003; Querner, 2014; Van der Woud, 2020). Op grote schaal zijn tot dan toe extensief begraasde heidegebieden in cultuur gebracht en geschikt gemaakt voor landbouw. Bijkomend probleem was de regelmatige inundatie van grote arealen landbouwgrond. Massop (2019) concludeert op basis van historische literatuur dat 20-25% van het oppervlak in de Achterhoek en Twente kampte met wateroverlast. Om de afwatering van de ontgonnen gebieden te vergroten en periodiek optredende inundaties terug te dringen, zijn vanaf het einde van de 19e eeuw in verschillende stadia beekverbeteringen doorgevoerd (Querner, 2014; Bon, 1967; Colenbrander et al., 1970; Van der Gaast & Massop 2007; Massop, 2019), waarbij beken werden verdiept, rechtgetrokken en onderling verbonden (Figuur 5). Tevens zijn in deze periode diverse grote kanalen gegraven om de gebieden af te wateren, zoals bijvoorbeeld de kanalen in Groningen en Drenthe (Van de Ven, 1993), het valleikanaal in de Gelderse vallei en diverse kanalen in de Achterhoek.

De waterhuishoudkundige effecten van de beekverbeteringswerken en aanleg van afwateringskanalen zijn slechts zeer beperkt gedocumenteerd en geëvalueerd (Landinrichtingsdienst, 1988). Een uitzondering hierop zijn de studies van Bon naar de afwatering in het stroomgebied van de Lunterse beek (o.a. Bon, 1967) en Baakse beek (o.a. Bon, 1968). In deze studies is een voor die tijd uitgebreide evaluatie uitgevoerd van de afvoeren, grondwaterstanden en ontwerpnormen. Hierbij moet men bedenken dat het numeriek doorrekenen van ruimtelijke effecten van ontwerpkeuzes technisch nog niet mogelijk was.

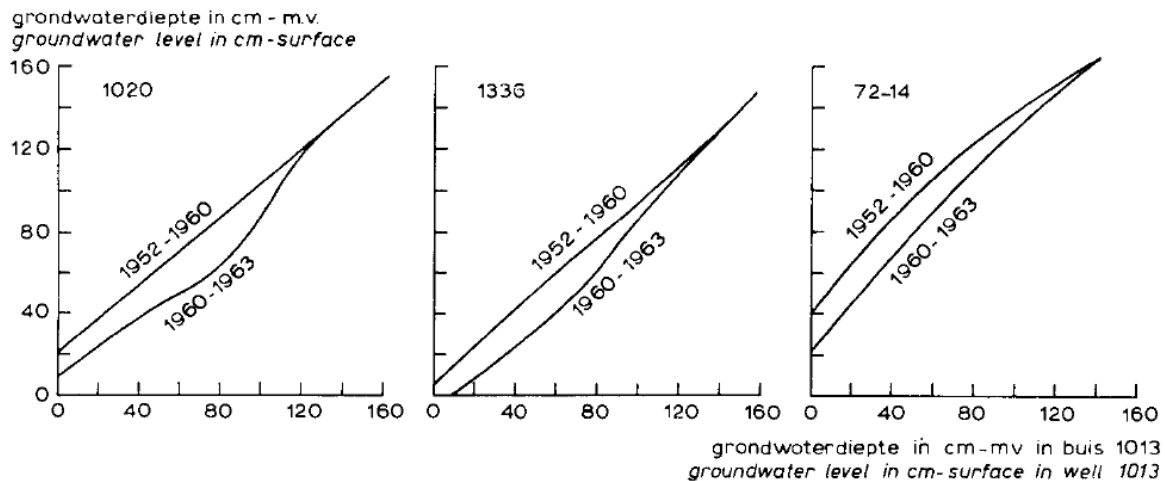
Bon plaatst in deze studies een aantal kritische kanttekeningen bij de gehanteerde droogleggingsnormen. Bon (1967) geeft aan dat de toenmalige vaststelling van de drooglegging bij beekverbeteringen is gebaseerd op ervaringen in poldergebieden en laat zien dat deze niet goed bruikbaar zijn voor hellende zandgebieden. De gedachte was namelijk dat met een grote drooglegging voldoende ontwatering in het aanliggende gebied kon worden bereikt waardoor droogleggingen van 50-80 cm en soms zelfs 100 cm zijn gehanteerd. Hierdoor kwam men tot zeer diepe leidingen die in de zomer tot verdroging leiden. Deels is dit vervolgens weer gedeeltelijk opgelost door stuwen te plaatsen. In het geval van de Lunterse beek laat Bon (1967) zien dat de bovenloop 40-50 cm minder diep uitgegraven had kunnen worden.

Een tweede punt waar Bon op wijst is onderschatting van de na ‘verbetering’ optredende afvoer. In het Lunterse beek gebied zijn na gedeeltelijke verbetering al afvoeren opgetreden die de oorspronkelijke normen met 100% overtroffen. Hierdoor zijn door erosie veranderingen in het dwarsprofiel van de beek ontstaan (Figuur 2). Het ging hierbij zowel om verruiming als om verdieping van het profiel.



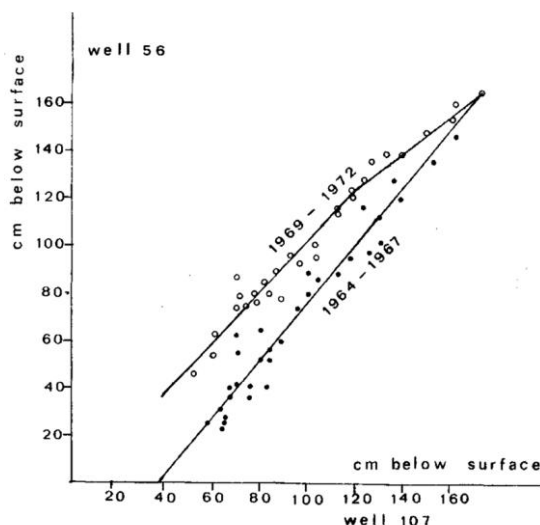
Figuur 2 Oorspronkelijk profiel, ontwerpprofiel en uiteindelijk profiel voor de Nederwoudse beek (links) en Lunterse beek (rechts) (Bon, 1967). Door onderschatting van de afvoeren na doorgevoerde aanpassingen is door erosie verruiming en verdieping van de beekprofielen ontstaan.

De ‘verbetering’ van het Lunterse beek stroomgebied heeft uiteraard invloed gehad op de grondwaterstanden. Bon (1967) laat dit zien door grondwaterstandsmetingen in het gebied (pb 1013) te vergelijken met controlebuizen buiten het gebied zowel voor (1952-1960) als na de beekverbetering (1960-1963) (Figuur 3). De beekverbetering heeft een verlaging tot meer dan 20 cm veroorzaakt op ondiepe grondwaterstandsfluctuaties. Diepe grondwaterstanden zijn veel minder sterk beïnvloed door de lokale beekverbetering doordat bij dergelijke standen het grondwatervniveau onder de bodem van de lokale waterloop zakt. Hierbij moet opgemerkt worden dat regionale uitstralingseffecten door het gebruik van een controlebuis niet goed zichtbaar zijn.



Figuur 3 Verlaging van de grondwaterstand op meetpunt 1013 als gevolg van de beekverbetering (Bon, 1967)

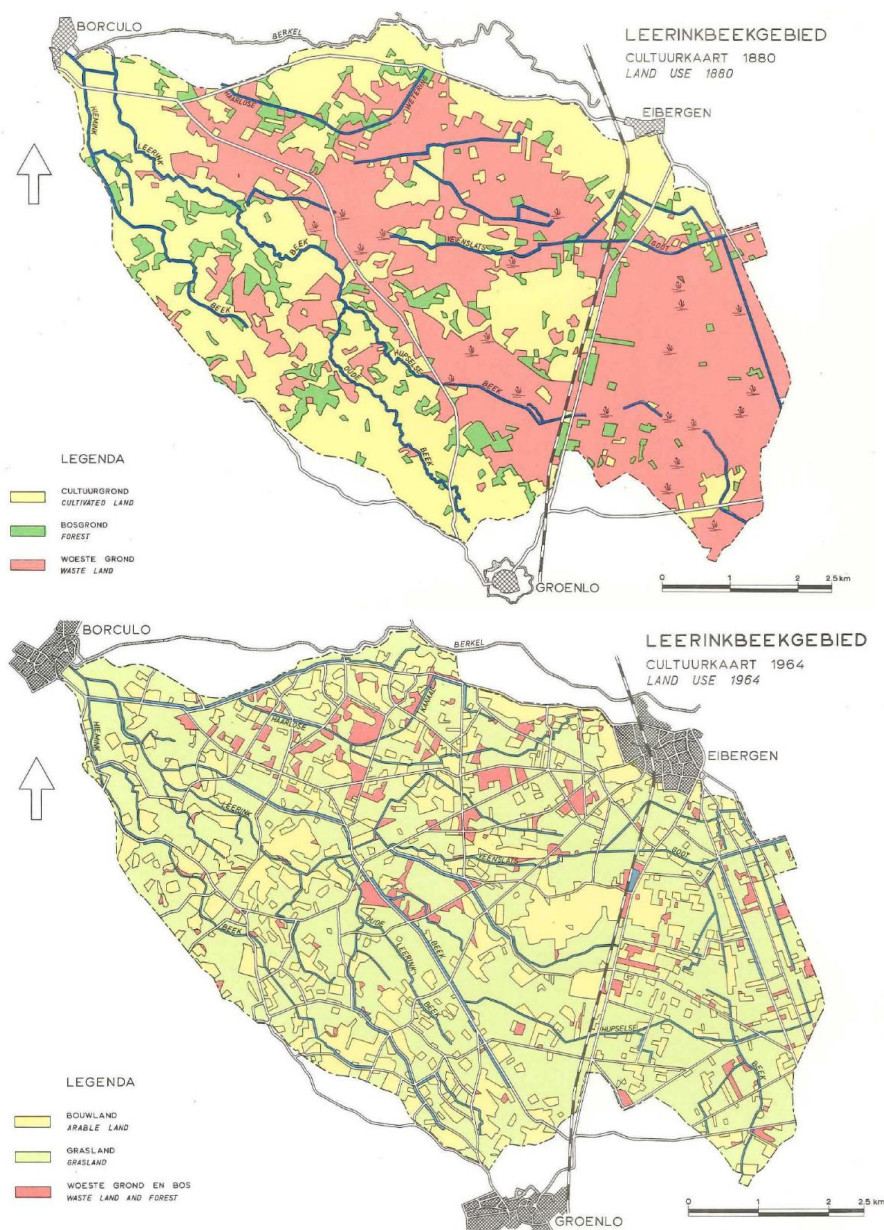
Een vergelijkbare analyse (Figuur 4) is uitgevoerd door Piet Warmerdam voor de effecten van de beekverbetering van de Hupsel op lokale grondwaterstanden (Warmerdam, 1967). Warmerdam vergelijkt hier grondwaterstanden in een niet verbeterd stuk (pb 56) met standen in het verbeterde stuk (pb 107), zowel voor als na de ingreep. Zichtbaar is dat voor de ‘verbetering’ van de Hupsel in 1967, de ondiepe grondwaterstanden in het verbeterde stuk aanmerkelijk hoger waren (20-40 cm). Ook hier is zichtbaar dat de diepe grondwaterstanden minder sterk worden beïnvloed door de lokale beekverbetering. Ook hier geldt weer de eerder genoemde kanttekening, hoewel regionale effecten gezien de lokale hydrogeologie van de Hupsel (ondiep tertiaire klei) minder aanneemelijk zijn.



Figuur 4 Vergelijking van grondwaterstanden onder invloed van de beekverbetering van de Hupsel (pb 107) met grondwaterstanden buiten het invloedsgebied (pb 56)

2.2 Veranderingen in landgebruik

Nederland heeft in de afgelopen 100 jaar een ware transformatie doorgemaakt. In de periode 1900-1950 worden de veranderingen in het landgebruik gekenmerkt door onder meer een sterke afname van het areaal heide, veengebieden en in mindere mate bos en een toename van gras en in mindere mate wegen en stedelijk gebied (Massop & Van der Gaast, 2009). In de loop van de 20e eeuw nam de hoeveelheid bos weer licht toe, bijvoorbeeld in droge natuurgebieden, waar in de jaren '30 een groot deel van de heide is veranderd in bos of landbouwgrond (Witte et al., 2015). Tevens nam het areaal naaldbos sinds 1850 sterk toe (Knol et al., 2003). Een voorbeeld van het verdwijnen van woeste grond en heide en omzetting naar landbouwgrond is weergegeven in Figuur 5.



Figuur 5 Verandering van het landgebruik en intensivering van het afwateringsstelsel in het Leerinkbeekgebied. Boven de situatie in 1880 en onder de situatie in 1964 (Colenbrander et al., 1970)

2.3 Invloed op de freatische grondwaterstanden

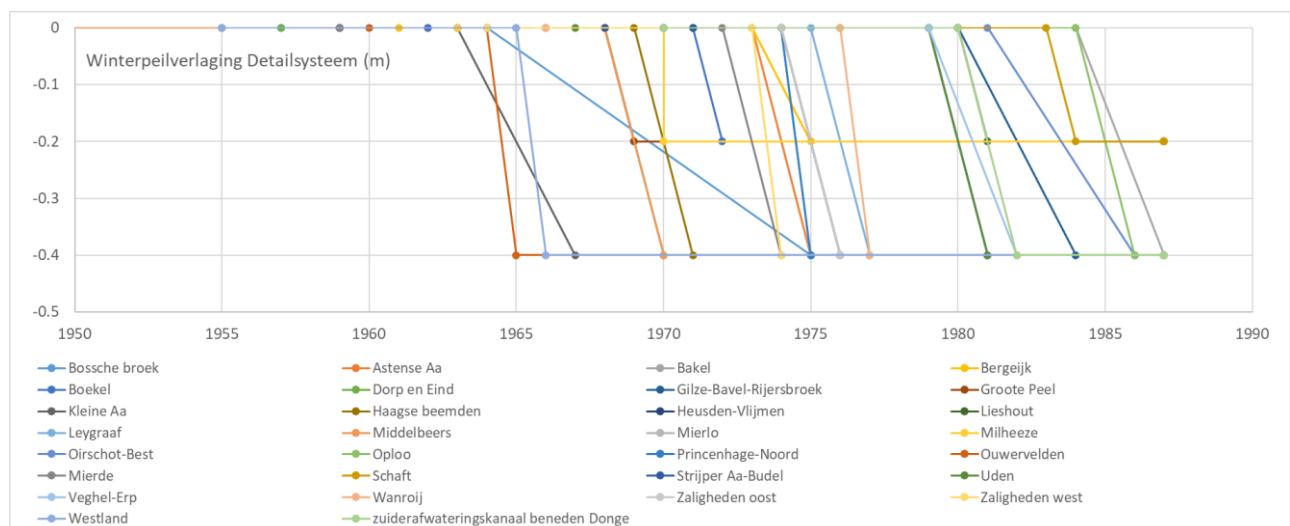
De beschreven veranderingen resulteren in lagere grondwaterstanden en een afgenomen grondwateraanvulling. Beekverbeteringen en de aanleg van afwateringskanalen hadden als voornaamste doel het versneld ontwateren van de ontgonnen gebieden en het tegengaan van lokale overstromingen in de winter. De effecten van veranderd landgebruik zijn minder eenduidig. Enerzijds zal de afname van heide, dat relatief weinig verdampt, door andere begroeiing (o.a. bos) een verlaging van de grondwateraanvulling tot gevolg hebben gehad. Anderzijds zal de toename van gras ten opzichte van bos juist hebben geleid tot een afname van verdamping. Bij het geschikt maken van grond voor landbouw werden ook andere ingrepen gedaan die van invloed waren op de waterhuishouding, zoals het egaliseren van oppervlak en het doorbreken van ondiepe scheidende lagen (Massop & Van der Gaast, 2009). Reconstructie van de waterhuishouding van voor 1950 en de invloed van beekverbeteringswerken en kanalisaties is erg lastig door de zeer beperkte beschikbaarheid van kwantitatieve informatie over afvoeren en (grond)waterstanden. Lokaal zijn door de 'verbeterings'werken grondwaterstandsverlagingen tot enkele dm opgetreden zoals blijkt uit de spaarzame literatuur. Ook kan gesteld worden dat te diepe droogleggingsnormen zijn gehanteerd voor vooral de bovenlopen en delen van middenlopen van beeksystemen. De uitstraling en het samengestelde effect van de maatregelen op grondwaterstanden zijn niet of nauwelijks te kwantificeren op basis van historische data.

3 Vanaf de ruilverkavelingen tot heden

3.1 Waterhuishoudkundige ingrepen

De belangrijkste waterhuishoudkundige ingrepen na de Tweede Wereldoorlog werden gedaan in het kader van de ruilverkaveling, die met name tussen 1950 en 1980 plaatshad. De ingrepen worden doorgaans gecategoriseerd als A1-, A2- en A3-werken, een indeling die verband houdt met de wijze van subsidiëring (Landinrichtingsdienst, 1988; Querner, 2014). A1-werken zijn werken in ruilverkavelingsverband, doorgaans in opdracht van ruilverkavelingscommissies, waarbinnen ingrepen in de hoofdwaterlopen en het detailafwateringssysteem zijn te onderscheiden. A2-werken zijn de gesubsidieerde waterschapswerken; dit betreft voornamelijk peilveranderingen in (hoofd)waterlopen. A3-werken omvatten alle gesubsidieerde particuliere cultuurtechnische werken, zoals de aanleg van buisdrainage op perceelsschaal. Op een kaartje van Jurgens et al. (1986), dat is opgenomen in de rapportage van Witte (2017), is te zien dat de landinrichtingswerken al begin 20e eeuw zijn begonnen, maar in een stroomversnelling kwamen tussen 1955 en 1974 en tot in de jaren '80 doorliepen. Beekverbeteringen, die al aan het eind van de 19e eeuw waren begonnen, werden tussen 1950 en 1970 geïntensiveerd, aangezien de afwatering alsnog onvoldoende bleek in combinatie met de grootschalige ruilverkaveling (Querner, 2014). Ten opzichte van 1850 zijn aan het eind van de 20e eeuw de dimensies van waterlopen toegenomen met een factor 2.5 en de berging met een factor 10 (Van de Ven, 1993; Massop & Van der Gaast, 2009).

Toen in de jaren '80 van de vorige eeuw meer aandacht kwam voor mogelijke verdrogende effecten is door de Landinrichtingsdienst Tilburg in 1988 een nota gepubliceerd van ingrepen in Noord-Brabant, waaruit blijkt dat tot halverwege de jaren '80 circa 1000 km² landoppervlak opnieuw is ingericht, en dat nadien nog zeker eenzelfde oppervlak gereed is gekomen (Landinrichtingsdienst, 1988). De eerste gebieden werden heringericht vanaf de jaren '60, met een sterke stijging in de jaren '70 en '80. In alle beschreven projecten werd eerst het hoofdwatersysteem aangepakt en vervolgens het detailontwateringssysteem. In de nota is een schatting gemaakt van de gemiddelde peileffecten in het oppervlaktewatersysteem van de landinrichtingsprojecten. Het ging hierbij vrijwel exclusief om peilverlagingen. Naar oppervlakte van de verschillende peilgebieden gewogen gemiddeld is in het hoofdwatersysteem het peil gedaald met 31 cm in de winter en 8 cm in de zomer. In het detailontwateringssysteem is het peil gedaald met 38 cm in de winter en 23 cm in de zomer. In Figuur 6 is als voorbeeld voor de verschillende Noord-Brabantse ruilverkavelingsgebieden het geschatte peileffect weergegeven in het detailontwateringssysteem en wanneer deze verlaging is ingegaan.

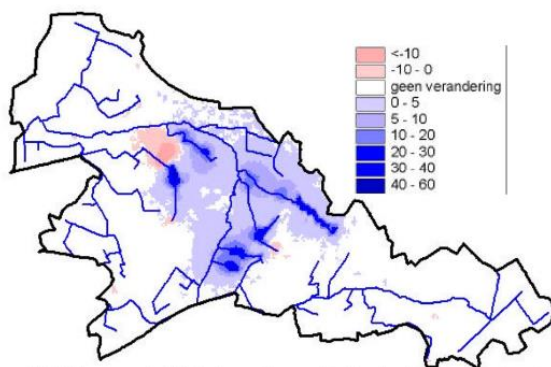


Figuur 6 Geschatte verandering winterpeil voor verschillende Brabantse ruilverkavelingsgebieden (Landinrichtingsdienst, 1988)

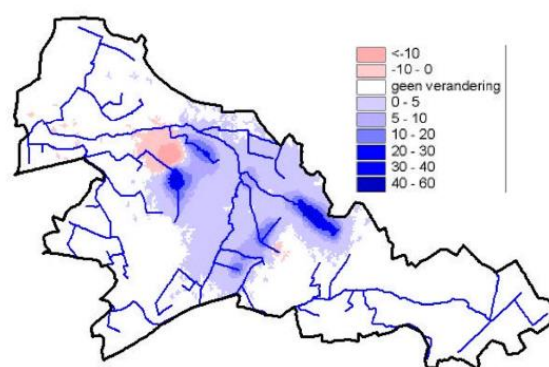
De waterhuishoudkundige ingrepen in het kader van de ruilverkaveling hebben geleid tot een substantiële verlaging van de grondwaterstand. Van de drie categorieën zijn de A1-werken het best beschreven en de A3-werken het minst, wat zijn weerslag heeft op de kennis van de effecten op de grondwaterstand en –aanvulling (Landinrichtingsdienst, 1988; Werkgroep Achtergrondverlaging, 2017). Niettemin kan op basis van gedocumenteerde werken, zoals het overzicht uit Noord-Brabant (Landinrichtingsdienst, 1988), worden geschat welk effect de ingrepen op de grondwaterstand hebben gehad. Het effect van de ingrepen in Noord-Brabant op de grondwaterstanden in de zandgebieden wordt geschat op een gewogen gemiddelde GHG-verlaging van 23 cm en een GLG verlaging met gemiddeld 10 cm (Landinrichtingsdienst, 1988). In gebieden met meer dan 50% wateraanvoer is het GLG effect lager met een daling van 5 cm.

Vanaf begin jaren '90 van de vorige eeuw zijn modelstudies uitgevoerd om effecten van aanpassingen in de waterhuishouding op de grondwaterstanden te kwantificeren. Van Bakel (*in prep*) geeft een overzicht van een aantal van deze studies, maar geeft daarbij aan dat bij modelstudies altijd het principe 'garbage in is garbage out' van toepassing is. Juist de historische situatie is moeilijk te achterhalen, waardoor het hierbij altijd gaat om scenario's. Querner et al. (1994) hebben met Simgro onderzoek gedaan naar de effecten van verlaging van de ontwateringsbasis voor drie stroomgebieden. In het geval dat de ontwateringsbasis 30 cm is verlaagd geeft dit volgens hun berekeningen een GHG verlaging van 25-36 cm en een GLG verlaging van 16-23 cm. Dit zijn duidelijk grotere effecten op vooral de GLG dan geschat door de landinrichtingsdienst voor de Brabantse gebieden. Andere studies laten beperktere GLG effecten zien zoals Van Bakel & Van Walsum (1993) waarbij door 'ontnormaliseren' de GHG stijgt met maximaal 10 cm en de GLG slechts enkele cm. Cirkel et al. (2003) onderzochten de effecten van het verondiepen (naar 75 cm-mv) van een aantal gegraven sloten ('waterleidingen') in de bovenloop van de Stortelersbeek. Deze sloten waren door het verdwijnen van drempels en stuwen diep ingesneden. Lokaal rond de sloten geeft dit stijgingen van GHG en GLG van enkele tientallen cm. Meer regionaal zijn verhogingen van GLG en GHG van enkele cm berekend (Figuur 7). Zoals al aangegeven is het probleem bij de modelstudies dat de uitgangssituatie vaak niet goed bekend is. Bijvoorbeeld hoe diep de sloten waren voor de landinrichtingswerken en of er überhaupt wel sloten aanwezig waren. De meest systematische methode om de historische waterhuishouding te reconstrueren en de effecten hiervan op de grondwaterstanden en waterbalans te kwantificeren is uitgewerkt door Van der Gaast en Massop (2007). Massop (2019) geeft op basis van een uitwerking voor de Baakse beek aan dat hydrologische modellen op basis van beschikbare historische informatie gedeeltelijk kunnen worden geparameteriseerd voor de historische situatie. Voor sommige parameters is echter onvoldoende informatie beschikbaar en is men afhankelijk van schattingen. Een voorbeeld hiervan is het ontbreken van goede hoogte-informatie, waardoor het moeilijk is om historische maaiveldsberging in te schatten. Ten slotte is volgens Massop (2019) toetsing van rekenresultaten slechts beperkt mogelijk door het ontbreken van kwantitatieve historische data zoals afvoeren en grondwaterstanden.

Verandering GHG:



Verandering GLG:



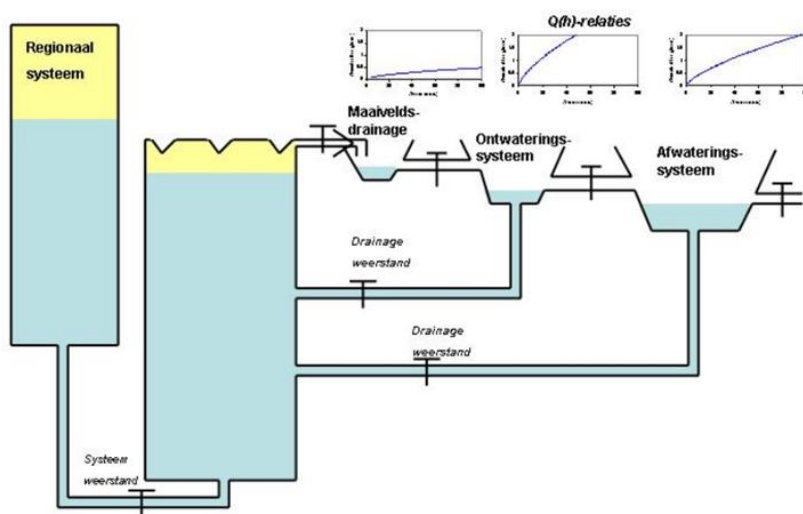
Figuur 7 Verandering GHG en GLG als gevolg van het verondiepen van een aantal sloten in de bovenloop van de Stortelersbeek (Cirkel et al., 2003)

Van der Gaast en Massop (2007) hebben voor het doorrekenen van de historische situatie gebruik gemaakt van de systematiek die is ontwikkeld voor de studie 'hydrologie op basis van karteerbare kenmerken' (van der Gaast et al. (2006) (Figuur 8). Voordeel hiervan is dat kan worden aangesloten bij ontwerpnormen uit bijvoorbeeld het Cultuurtechnisch vademecum (1988) maar ook dat gebruik kan worden gemaakt van $Q(h)$ -relaties uit de literatuur over de historische situatie zoals beschreven door o.a. Bon (1968, 1971). Daarnaast sluit de methodiek aan bij beschikbare informatie over de historische waterhuishoudkundige situatie en kunnen zaken als maaiveldberging en wateraanvoer en verandering in gewasgroei meegenomen worden.

Voor de historische hydrologiestudie is het Baakse beek stroomgebied ingedeeld in tijdsonafhankelijke schematisatie-eenheden op basis van hydrotypen en bodemfysische eenheden. Voor elk van deze eenheden zijn vervolgens SWAP-modellen opgesteld op basis van karteerbare kenmerken voor de huidige situatie en met aanpassingen voor de historische situatie. Hierbij is de onderrandvoorwaarde steeds gekalibreerd aan de hand van de GxG voor vijf verschillende grondwatertrappen die voorkomen binnen een bepaalde schematisatie-eenheid.

De op de huidige situatie gekalibreerde modellen zijn vervolgens aangepast aan geïnventariseerde historische gegevens, die zijn vertaald naar de systematiek van 'hydrologie op basis van karteerbare kenmerken'. Het gaat hierbij bijvoorbeeld om streefpeilen, $Q(h)$ -relaties en drainageweerstand. Een voorbeeld hiervan is de vertaling van historische slootafstanden naar drainageweerstand via een afgeleide factor per schematisatie-eenheid (

Tabel 1).



Figuur 8 Modelschematisatie zoals gebruikt in het project Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken (Van der Gaast et al. 2006)

Tabel 1 Geïnventariseerde historische slootafstanden en berekende bijbehorende drainageweerstand. Overgenomen uit: Van der Gaast en Massop (2007)

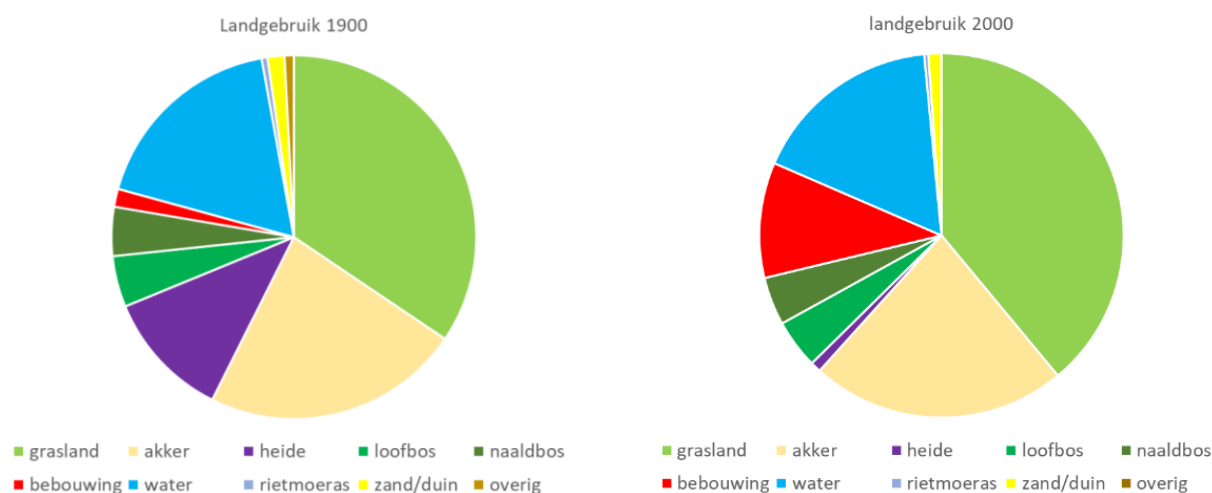
Schematisatie-eenheid	Factor	Slootafstand (m)		Drainageweerstand (d)	
		ontwatering	afwatering	ontwatering	afwatering
2901013	1.7	196	1038	333	1765

2901012	1.5	828	2573	1242	3860
2901009	1.7	517	2609	879	4435
2900319	1.5	196	890	294	1335
2900312	1.5	731	2717	1097	4076
2900313	1.7	239	993	406	1688
2900309	1.7	464	2669	789	4537

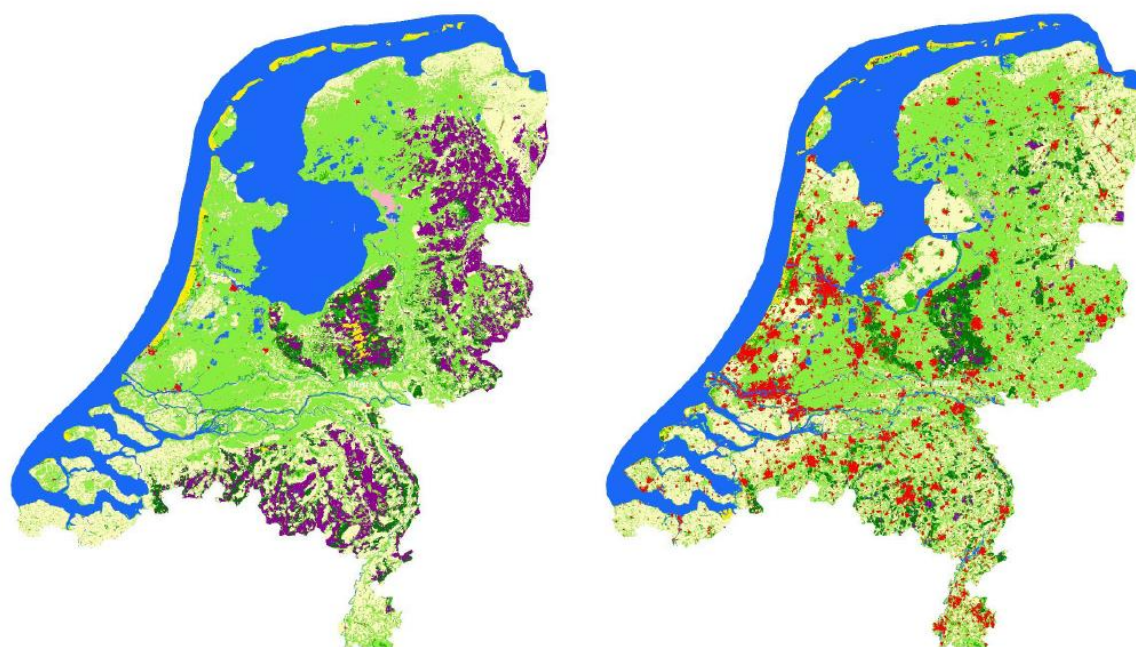
Voor de hydrologische onderrand is er door Van der Gaast en Massop (2007) voor gekozen om alleen de diepe stijghoogte aan te passen (systeemweerstand blijft gelijk). Hierbij is uitgegaan van een maximale stijging van 40 cm bij Gt II afnemend tot een stijging van 10 cm bij Gt VII. Lastig punt hierbij is dat de diepe stijghoogtes niet onafhankelijk zijn van de aanpassingen in het freatisch systeem; veranderingen in wegzijging en kwel beïnvloeden immers de diepe stijghoogtes. Van der Gaast en Massop (2007) geven dan ook aan dat nader onderzoek hiernaar wenselijk is.

3.2 Veranderingen in landgebruik

Sinds 1950 hebben diverse veranderingen plaatsgevonden in het landgebruik in de hoge delen van Nederland. Na een eerdere afname van het areaal bos, is dit tussen 1950 en 1980 weer enigszins toegenomen, vooral loofbos (Querner et al., 1994). Een studie in de provincie Noord-Brabant (Witte et al., 2015) laat zien dat het areaal bos in natuurgebieden is toegenomen van 62% rond 1950 tot 85% in 2010. Deze toename is ten koste gegaan van het oppervlak open terrein (heide) wat juist sterk is afgenomen. Daarnaast beschrijft de studie een toenemende verstedelijking in de provincie van 5 tot 17% tussen 1960 en 2005, hetgeen vooral ten koste is gegaan van landbouwgrond. De toegenomen verstedelijking is ook in andere hoge delen van Nederland opgetreden (o.a. Querner et al., 1994; Knol et al., 2003; Knol et al., 2004). Over de totale periode 1900-2000 is vooral het areaal heide en zand/duin sterk gekrompen. Regionaal zijn de verschillen nog extremer. In de zandprovincies is verhoudingsgewijs het percentage heide en zand nog veel sterker gekrompen ten gunste van grasland en akkerbouw (Knol et al., 2004) (Figuur 9, Figuur 10). In de provincie Gelderland is bijvoorbeeld het oppervlak heide afgenomen van 730 km² in 1900 naar 147 km² in 2000 en is het oppervlak grasland toegenomen van 1702 naar 2506 km². Het percentage bos in de zandprovincies bleef redelijk gelijk. Er is echter ook een ruimtelijke verschuiving zichtbaar waarbij bos verdwijnt uit agrarisch gebied, maar sterk toeneemt op voormalige heidegronden.



Figuur 9 Nederlands landgebruik als percentage van het oppervlak in 1900 en 2000 (data uit Knol et al., 2004)

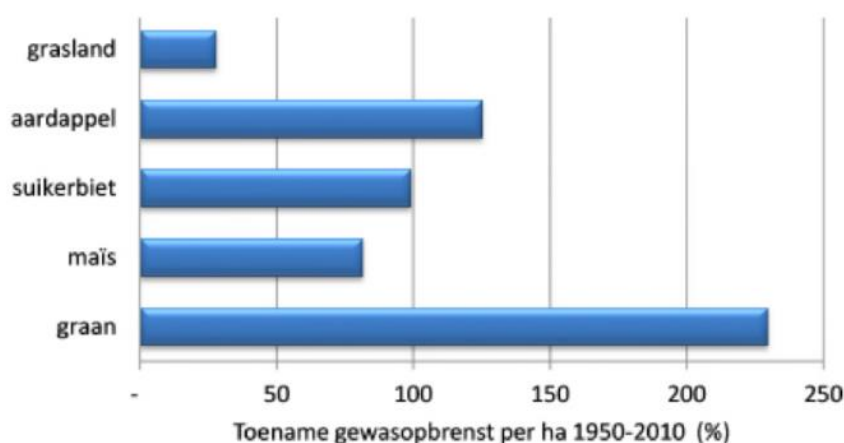


Figuur 10 Landgebruik in Nederland rond 1900 (links) en in 2000 (LGN4) (Knol et al., 2004)

De toename van bos ten opzichte van open terrein in natuurgebieden zal overwegend een verlaging van de grondwaterstand tot gevolg hebben gehad, aangezien bos meer verdampt dan open vegetatietypen als gras en heide. Witte et al. (2015) schatten in dat de grondwateraanvulling in deze gebieden hierdoor is afgenomen van 238 naar 202 mm/jaar. De toename van stedelijk gebied leidt vooral tot een verminderde grondwateraanvulling, doordat een deel van de neerslag direct wordt afgevoerd via het riool en niet richting het grondwater. Echter, de verdamping in bebouwd gebied is meestal lager dan in het landelijk gebied, wat netto een potentiële verhoging van de grondwateraanvulling oplevert (Witte et al., 2015). Niettemin is de inschatting dat de combinatie van de toename van stedelijk gebied en bosareaal een verlaging van de grondwaterstand tot gevolg heeft gehad.

3.3 Stijging van gewasopbrengsten

Parallel aan de veranderingen in landinrichting en waterhuishouding als gevolg van de ruilverkaveling is de landbouw in Nederland sinds 1950 sterk geïntensiveerd. Door verbeterde teelttechnieken en ontwatering is de gewasopbrengst in de afgelopen decennia sterk gestegen. Querner et al. (1994) beschrijven een stijging van de opbrengst van granen en aardappelen van ca. 65% van de jaren 1950 tot de jaren 1980. Voor de provincie Noord-Brabant komen Witte et al. (2015) tot een verdriedubbeling van de opbrengst van granen en een verdubbeling van aardappelen en suikerbieten, alsmede een kleinere toename in de grasproductie (Figuur 11). Deze toename in gewasopbrengst heeft tot een verhoging van de verdamping in het groeiseizoen en zodoende een verlaging van de grondwaterstand (GLG) geleid. Deze factor is daarom wel benoemd als de belangrijkste veroorzaker van 'achtergrondverlaging' (Van Bakel & De Wit, 1995; Witte et al., 2015; Werkgroep Achtergrondverlaging, 2017). In combinatie met veranderingen in landgebruik is ingeschat dat grondwaterstanden in Noord-Brabant gemiddeld tussen 23 en 33 cm zijn gedaald als gevolg van een geschatte afname van de grondwateraanvulling van 78 mm/jaar (Witte et al., 2015). De auteurs geven hierbij aan dat het eerste getal waarschijnlijk aan de lage kant is en het tweede getal waarschijnlijk te hoog. Een conservatieve schatting op basis van deze resultaten en bestaande literatuur is dat ca. de helft van de geschatte 30 cm achtergrondverlaging kan worden verklaard uit toegenomen gewasproductie en veranderingen in landgebruik.



Figuur 11 Toename gewasopbrengst per ha voor de provincie Noord-Brabant (Witte et al. 2015)

Witte et al (2015) onderzocht tevens het effect van de afgenomen grondwateraanvulling op de grondwaterstandsverlaging door drinkwaterwinningen. De conclusie was dat naarmate de gewasproductie in de landbouw toeneemt en het stedelijk gebied uitbreidt (en daarmee de aanvulling afneemt), grondwaterwinning resulteert in een grotere daling van de grondwaterstand.

3.4 Beregening

Om in droge tijden het gewas toch van voldoende water te voorzien, zetten agrariërs beregening in. Het water kan worden onttrokken aan zowel het oppervlaktewater als het grondwater. Rond 1950 werd in hoog Nederland nog niet of nauwelijks gebruikt gemaakt van beregening, maar in de afgelopen decennia is het gebruik in zwang geraakt en toegenomen, vooral sinds de droge zomer van 1976 (Witte et al., 2015; Werkgroep Achtergrondverlaging, 2017). De afgelopen droge jaren (2018-2020) is beregening sterk toegenomen (Projectteam Droogte Zandgronden Nederland, 2021). Vanwege het lokale karakter van beregening zijn de hoeveelheden en de invloed op het grondwater moeilijk te kwantificeren (Werkgroep Achtergrondverlaging, 2017). De bron van de beregening is

daarbij een belangrijke factor. Indien wordt onttrokken uit oppervlaktewater, kan dit lokaal tot extra grondwateraanvulling en een verhoogde grondwaterstand (GLG) leiden. Indien berekening uit het grondwater wordt onttrokken, kan dit juist leiden tot verlaging van de grondwaterstand. Een ingewikkelde factor in de inschatting van het effect is het feit dat de hoeveelheid berekening door het jaar heen en tussen jaren onderling sterk verschilt, afhankelijk van weersomstandigheden. De gemiddelde cumulatieve hoeveelheid per jaar is doorgaans klein in vergelijking met drinkwateronttrekking (Pronk et al., 2021), maar aangezien berekening zich meestal concentreert in enkele droge weken per jaar, kan de tijdelijke verlaging aanzienlijk zijn (Witte et al., 2015).

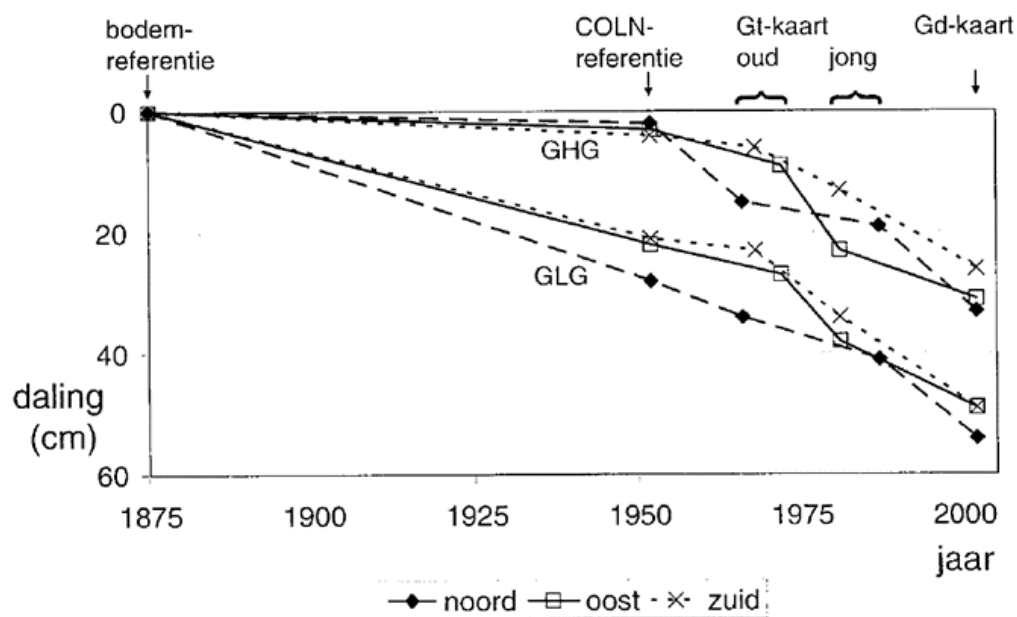
3.5 Overige ingrepen

Naast bovengenoemde veranderingen en ontwikkelingen die in diverse studies zijn genoemd, zijn er nog andere ingrepen die van invloed zullen zijn op de regionale grondwaterstand en –aanvulling. Een ontwikkeling van de afgelopen decennia die goed bekend is, is de toename van het aantal en de capaciteit van permanente grondwateronttrekkingen, vooral in de eerste decennia na de Tweede Wereldoorlog. Querner et al. (1994) schetsen een ruime verdubbeling van de onttrekking ten behoeve van drinkwater tussen 1957 en 1981 van 333 tot 845 miljoen m³/jaar, waarna de hoeveelheid afnam tot 770 miljoen m³/jaar in 1986. Vewin (2017) laat zien dat de productie van drinkwater uit grondwater toenam van ca. 200 miljoen m³ in 1950 tot ca. 800 miljoen m³ in 1990. Na een periode van lichte daling en stabilisatie op ca. 760 miljoen m³ is de grondwateronttrekking voor drinkwater inmiddels weer stijgende en bereikte 810 miljoen m³ in 2019 (Vewin, 2022). De totale grondwateronttrekking (zowel zoet, brak als zout) voor drinkwater en ‘ander water’ (o.a. industrie en landbouw) in Nederland bedraagt inmiddels ruim 1.1 miljard m³ (Vewin, 2022).

In de literatuur worden daarnaast ingrepen in het landschap genoemd, die veelal moeilijk te kwantificeren en nog weinig onderzocht zijn. Zo zal de drooglegging van de Flevopolders halverwege de 20e eeuw een aanzienlijke invloed op de regionale grondwaterstand hebben gehad (Werkgroep Achtergrondverlaging, 2017; Witte et al., 2019). De daling van de grondwaterstand als gevolg van de verlaging van de drainagebasis is in delen van Nederland met een venige bovengrond versterkt door een soms aanzienlijke maaiveld daling (Witte et al., 2015). Lokale ingrepen zoals het doorbreken van scheidende lagen bij de aanleg van tunnels zullen (zeer) plaatselijk de grondwaterstand hebben beïnvloed (Witte et al., 2019). Tot slot wordt de grondwaterstand in delen van de grensstreek beïnvloed door ingrepen buiten de landsgrenzen. Een voorbeeld hiervan is de grootschalige bruinkoolwinning in Duitsland, die door de benodigde ontwatering een aanzienlijke verlaging van de grondwaterstand in de omgeving Roermond veroorzaakt (Witte et al., 2015).

3.6 Totaal effect veranderingen op de grondwaterstanden

Het totale effect van alle in deze literatuurstudie beschreven ontwikkelingen (veranderingen in af- en ontwatering, veranderingen in landgebruik, toename onttrekkingen, inpolderingen, vervening, etc.) is door Knotters en Jansen (2005) onderzocht door historische kaartbeelden van grondwatertrappen met elkaar te vergelijken. Hieruit hebben zij een beeld gereconstrueerd van de (freatische) grondwaterstands dalingen over ruim 100 jaar. De auteurs geven echter wel aan dat het hierbij gaat om regionale veranderingen omgeven met een hoge mate van onzekerheid, zeker over de periode van voor 1950. Uit de analyse komt een daling naar voren van meerdere decimeters voor zowel GHG als GLG. Opvallend is de geringe daling van de GHG voor 1950. De auteurs geven echter aan dat de duur van periodes met hoge standen waarschijnlijk al voor 1950 is afgenomen.



Figuur 12 Op basis van karteringen geschatte daling van GHG en GLG voor drie zandregio's (Knotters & Jansen, 2005)

3.7 Klimaatverandering

Een grootschalige ontwikkeling die in toenemende mate de grondwaterstand in Nederland beïnvloedt, is de mondiale klimaatverandering. Een belangrijk aspect hieraan is de voorspelde en al deels opgetreden toename van de jaarlijkse neerslag en referentieverdamping (Waterwijzer Landbouw, 2018). Voor een inschatting van de invloed op de grondwateraanvulling en -standen is niet alleen de jaarlijkse verandering van belang, maar ook veranderingen in seizoenspatronen. In alle KNMI'14-klimaatscenario's neemt de totale neerslag op jaarbasis toe, met name in de winter (KNMI, 2014), wat naar verwachting tot een toename van grondwateraanvulling in de winter en stijging van de GHG zal leiden. In twee van de vier scenario's, G_h en W_h , worden echter drogere zomers voorspeld, waarbij de combinatie van afgenomen neerslag en toegenomen verdamping tot een afname van de grondwateraanvulling en daling van de GLG kan leiden. Recent modelonderzoek van het KNMI in samenwerking met universiteit Utrecht laat een significante trend zien naar meer droogte in het binnenland (Philip et al. 2020). Hoe veranderende weerspatronen gaan doorwerken op de freatische grondwaterstanden is sterk afhankelijk van de interactie met de vegetatie. Als sterke droogtestress optreedt in de zomer zal de actuele verdamping reduceren. Dit in combinatie met een toenemende hoeveelheid neerslag kan dit resulteren in een hogere grondwateraanvulling ondanks dat het klimaat droger lijkt te worden (Bartholomeus et al., 2010). In de komende decennia zal de invloed van klimaatverandering verder toenemen, dus het is zaak dit aspect mee te nemen in huidig en toekomstig onderzoek naar grondwaterstandsverlaging.

4 Conclusies & aanbevelingen

4.1 Conclusies

In deze paragraaf geven we puntsgewijs antwoorden op de in paragraaf 1.2 geformuleerde onderzoeksvragen:

- *Welke waterhuishoudkundige aanpassingen zijn in pleistoceen Nederland doorgevoerd in de periode vanaf ca. 1900 en wat is bekend over effecten van deze waterhuishoudkundige aanpassingen op het watersysteem?*

Uit de literatuurstudie blijkt dat sinds het einde van de 19e eeuw, maar in het bijzonder sinds 1950, dus ten tijde van de aanvang van de meeste drinkwaterwinningen, substantiële veranderingen hebben plaatsgevonden in de waterhuishouding. Het gaat hierbij om het 'verbeteren' van beeksystemen ter bestrijding van langdurige inundaties en (deels later) het uitvoeren van ruilverkavelingswerken (zogenaamde A1-, A2- en A3-werken). Het ging bij het laatste om respectievelijk ingrepen in de hoofdwaterlopen en het detail-afwateringssysteem, het aanpassen van peilen in (hoofd)waterlopen en ten slotte om ontwatering en drainage op perceelsschaal. Kwantitatieve informatie over beekverbeteringswerken is zeer beperkt. Uit de relatief goed gedocumenteerde werken aan de Lunterse beek blijken te diepe droogleggingen zijn gehanteerd, omdat gebruik werd gemaakt van normen voor poldergebieden. De bovenloop van de Lunterse beek had bijvoorbeeld 40-50 cm minder diep uitgegraven kunnen worden. Van de ruilverkavelingswerken is meer informatie beschikbaar. Voor Noord-Brabantse ruilverkavelingsgebieden blijkt dat het (gewogen gemiddeld) peil in het hoofdwatersysteem in vrij afwaterende gebieden is gedaald met 31 cm in de winter en 8 cm in de zomer. In het detailontwateringssysteem is het peil gedaald met 38 cm in de winter en 23 cm in de zomer. De meeste van bovengenoemde ingrepen hebben een verlagend effect gehad op de grondwaterstanden, maar de exacte impact is moeilijk te kwantificeren, omdat de situatie voor de ingrepen maar beperkt is beschreven en in de meeste gevallen geen evaluatie van de ingrepen is uitgevoerd. Lokaal zijn door de 'verbeterings'werken grondwaterstandsverlagingen tot enkele dm opgestreden op ondiepe grondwaterstandsfluctuaties. Diepere grondwaterstanden (> ca. 1 m-mv) zijn in de gevonden studies veel minder sterk beïnvloed door de lokale beekverbetering. Aandachtspunt hierbij is echter dat regionale uitstralingseffecten door het gebruik van een controlebuis mogelijk niet goed zichtbaar zijn. Uit een evaluatie van de verdrogende werking van de Brabantse ruilverkavelingen komt een GHG-verlaging naar voren van gemiddeld 23 cm en een GLG-verlaging van gemiddeld 10 cm. In gebieden met wateraanvoer is het GLG effect lager. Ook modelstudies wijzen op effecten variërend van enkele cm tot meerdere dm afhankelijk van de lokale omstandigheden. Overall kan geconcludeerd worden dat de ingrepen een verlagend effect hebben gehad op vooral de ondiepe grondwaterstanden.

- *Wat zijn realistische dimensies van het oppervlaktewatersysteem van voor de grootschalige waterhuishoudkundige 'verbeterings'werken?*

Over exacte dimensies van het watersysteem voorafgaand aan de grootschalige ingrepen is slechts beperkt informatie beschikbaar. De best onderbouwde schattingen hiervoor worden gegeven door Van der Gaast & Massop (2009) op basis van historische metingen en kaartmateriaal van het Baakse beek stroomgebied. In deze studie is gebruik gemaakt van de door bovengenoemde auteurs opgestelde parameterisaties van het oppervlaktewaterstelsel.

- *Wat is het effect van de wijzigingen in het oppervlaktewatersysteem op freatische grondwaterstanden?*

De effecten van ingrepen in de waterhuishouding op freatische grondwaterstanden zijn moeilijk te kwantificeren, omdat de situatie van voor de ingrepen maar beperkt is beschreven en in de meeste gevallen geen evaluatie van de ingrepen is uitgevoerd. Uit de beperkt beschikbare studies komen verlagingen van de ondiepe grondwaterstanden tot enkele decimeters naar voren. De effecten op de diepere standen zijn beperkter met enkele cm tot enkele decimeters. Het GHG-effect lijkt dus aanmerkelijk groter dan het GLG-effect. Modelstudies bevestigen dit beeld: scenario's voor 'ontnormaliseren' en verondiepen van ontwatering resulteren in forse stijgingen (decimeters) van de freatische grondwaterstanden. Tevens is duidelijk dat de meeste ingrepen en veranderingen geen duidelijk startmoment in de tijd kennen, maar een geleidelijk proces vormen dat voor een deel nog steeds gaande is.

Aangezien het freatische grondwatersysteem een niet-lineair karakter kan hebben, is het van belang dat bij het bepalen van de optredende verlaging, bijvoorbeeld als gevolg van een drinkwaterwinning, de volgtijdelijkheid van de beschreven ingrepen en verandering correct wordt meegenomen. Deze volgtijdelijkheid kan mogelijk de bijdrage van iedere afzonderlijke ingreep/verandering aan de totale verlaging beïnvloeden (Werkgroep Achtergrondverlaging, 2017). In Witte et al. (2015) is het effect van een andere grondwateraanvulling (situatie 1950) onderzocht, voor andere ingrepen is dit veel lastiger omdat de waterhuishoudkundige situatie voor de landinrichtingswerken zeer beperkt is gedocumenteerd en bijvoorbeeld informatie over veranderingen in maaiveldsvorm en veranderingen in bodemeigenschappen vrijwel ontbreekt. Dit geldt eveneens voor het berekenen van de invloed van eventuele compenserende maatregelen die erop gericht zijn de invloed van een winning te mitigeren.

4.2 Aanbevelingen

- Het Lunterse beek stroomgebied lijkt een van de weinige gebieden in Nederland waar structureel onderzoek is verricht zowel vóór en na de aanpassingen aan het oppervlaktewaterstelsel. In deze studie is geput uit de rapportage van Bon (1967). Wellicht is er in de archieven nog ruwe data beschikbaar die in meer detail geanalyseerd kan worden.
- Uit de studie blijkt dat zowel de waterhuishoudkundige aanpassingen als de veranderingen in het landgebruik een aanzienlijk effect hebben op de freatische standen. Het effect van de veranderingen in landgebruik en gewasgroei is door Witte et al. (2015) modelmatig onderzocht. Uit deze studie kwam voor de Brabantse situatie een daling van ca. 3 dm naar voren. Aanbevolen wordt om ook de effecten van aanpassingen in de waterhuishouding modelmatig te onderzoeken. Dit omdat het lokaal (deels) terugdraaien van deze aanpassingen mogelijk gebruikt kunnen worden als mitigatie van verlagingseffecten door grondwaterwinning. Voor de parameterisatie van de modellen kan gebruik worden gemaakt van de door Van der Gaast en Massop (2007) uitgevoerde inventarisatie. Wel moet bedacht worden dat de toegenomen gewasproductie deels is ontstaan door de ontwatering.

5 Referenties

Bartholomeus, R.P., Voortman, B., Witte, J.P.M (2010) De toekomstige grondwateraanvulling. H₂O 17 35-37

Bon, J. (1968) De afvoer en berging in verband met beekverbetering, toegelicht aan het stroomgebied van de Lunterse beek, ICW-mededeling 107, Wageningen

Bon, J. (1971) Afvoernormen., ICW-nota631 ICW, Wageningen

Cirkel, D.G., E.P Querner, P.J.J.F. Torfs & H.A.J. van Lanen (2003). Effecten van verdrogingsbestrijdende maatregelen en klimaatverandering op extreem hoge afvoeren. Een modelstudie met SIMGRO voor het Stortelersbeekgebied. Alterra-rapport 844.

Colenbrander, H. J., H. Wassink, T. Blok en E. W. Schierbeek (1970) Hydrologisch onderzoek in het Leerinkbeekgebied. Commissie ter bestudering van de waterbehoefte van de Gelderse Landbouwgronden. Tweede Interimrapport Werkgroep I. Provincie Gelderland

Daldegan Balduino, C. (2020) Preventing hydrological drought in the Pleistocene uplands – a modeling experiment with managed aquifer recharge. MSc thesis, Utrecht University, Utrecht.

Harbaugh, A. W. (2005). MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—the Ground-Water Flow Process. <https://pubs.usgs.gov/tm/2005/tm6A16/PDF.htm>

Jurgens, C.R., G. Steenhuis, G.J. Klein Koerkamp & J.R. Klootwijk (1986). Deel 20. Landinrichting, Atlas van Nederland. Staatsuitgeverij.

Kanen-Verlinden, A.J.J. (2013) Lange tijdreeksanalyse in het kader van KRW en RWSR. Rapportnr. 9X3355.A0 Royal Haskoning DHV Maastricht

KNMI (2014). KNMI'14-klimaatscenario's. URL: <http://www.klimaatscenario's.nl>.

Knol, W.C., H. Kramer & G.J. Dorland (2003). Ontwikkelingen in het grondgebruik in Oost-Nederland en de West-Duitse grensregio: tijdreeksen grondgebruik van 1850 tot 1990. Alterra-rapport 822, Alterra, Wageningen.

Knol, W.C., H. Kramer & H. Gijsbertse (2004) Historisch Grondgebruik Nederland: een landelijke reconstructie van het grondgebruik rond 1900. Alterra-rapport 573. Wageningen.

Knotters, M. & Jansen, P.C. (2005) Honderd jaar verdroging in kaart. Stromingen 11 (4) pp19-32

Kroes J.G., J.C. van Dam, R.P. Bartholomeus, P. Groenendijk, M. Heinen, R.F.A. Hendriks, H.M. Mulder, I. Supit, P.E.V. van Walsum (2017) SWAP version 4 : theory description and user manual Wageningen Environmental Research, Wageningen.

Landinrichtingsdienst (1988). Indicatieve kwantificering van effecten van cultuurtechnische ingrepen in de periode 1955-1985 op freatische grondwaterstanden in het zandgebied van de provincie Noord-Brabant. Landinrichtingsdienst, Tilburg.

Massop, H.Th.L. & J.W.J. van der Gaast (2009). Historical water management in the river basin of the Baaksche Beek and the adaptations to the water system as a result of change in land use. *Physics and Chemistry of the Earth* 34, 192-199.

Massop, H. Th.L. (2019) Historische data en hydrologie van de Baakse Beek Stromingen 33 (2019), Nr 1

Philip, S.Y., Kew, S.F., van der Wiel, K., Wanders, N. and van Oldenborgh, G.J. (2020). "Regional differentiation in climate change induced drought trends in the Netherlands." *Environmental Research Letters* 15(9): 094081.

Projectteam Droogte Zandgronden Nederland (2021). Eindrapport project 'Droogte Zandgronden Nederland'(Fase 3): Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden- en Oost-Nederland: het verhaal – analyse van droogte 2018 en 2019 en bevindingen.

Pronk, G., Stofberg, S., Van Dooren, T., Dingemans, M., Frijns, J., Koeman-Stein, N., Smeets, P., Bartholomeus, R., 2021. Increasing Water System Robustness in the Netherlands: Potential of Cross-Sectoral Water Reuse. *Water Resources Management*: 1-15

Querner, E.P., W.H.B. Aarnink & C.C.P. van Mourik (1994). Scenariostudie naar de verandering van grondwateraanvulling en grondwaterstanden tussen de jaren vijftig en tachtig; ingrepen in de waterhuishouding doorgerekend in drie voorbeeldgebieden met het model SIMGRO. Rapport 308, DLO-Staring Centrum, Wageningen.

Querner, E.P. (2014). Beekverbeteringen in hoog Nederland van belang bij analyse gemeten grondwaterstanden. *Stromingen* 20(2), 5-10.

STOWA (2018). Waterwijzer Landbouw: instrumentarium voor kwantificeren van effecten van waterbeheer en klimaat op landbouwproductie. Rapport 48, STOWA, Amersfoort, ISBN 978-90-5773-812-8

Van den Akker, C. (2015) De logaritmische U/h relatie in vrij afwaterende gebieden; interne notitie. Werkgroep Achtergrondverlaging

Van Bakel, P.J.T. (in prep) Literatuuronderzoek naar de effecten van ruilverkavelingen en andere waterhuishoudkundige maatregelen op de grondwaterstanden in het vrij afwaterende deel van Nederland, Werkgroep Achtergrondverlaging, concept notitie

Van Bakel, P.J.T. & P.E.V. van Walsum (1993). Gebiedsvisie stroomgebied van de Voorste Stroom, Achterste Stroom en Beerze , 1993. Hydrologisch deelrapport. Tauw Infra Concult B.V.

Van Bakel, P.J.T. & P.A.J.W. de Wit (1995). Zijn de toegenomen landbouwopbrengsten een der oorzaken van verdroging in Nederland? *H2O* 28(25), 770-773.

Van der Gaast, J.W.J. & H.Th.L. Massop (2007) Reconstructie van de historische hydrologie. Pilotstudie voor een stroomgebied in hoog Nederland. Wageningen, Alterra-rapport 1466.

Van der Gaast, J.W.J., H.Th.L. Massop, H.R.J. Vroon & I.G. Staritsky (2006) Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken. Wageningen, Alterra-rapport 1339.

Van der Giessen, A. (1980). Grondwaterstandsverlagingen tengevolge van onttrekkingen voor kunstmatige beregening en de drinkwatervoorziening. ICW-nota 1183, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen.

Van de Ven, G.P. (1993). Leefbaar laagland. Geschiedenis van de waterbeheersing en landaanwinning in Nederland. Utrecht, Stichting Matrijs, ISBN 90-5345-031-9.

Van Walsum, P. E. V, & Veldhuizen, A. A. (2011). MetaSWAP_V7_2_0 Rapportage van activiteiten ten behoeve van certificering met Status A. <https://edepot.wur.nl/193958>

Vewin (2017). Drinkwaterstatistieken 2017. Vereniging van waterbedrijven in Nederland (Vewin), Den Haag.

Warmerdam, P.M.M. (1967) Hydrological effects of drainage improvement in the Hupselse beek catchment area in the Netherlands, Nota 64 Department of Hydraulics and Catchment Hydrology, Agricultural University Wageningen, The Netherlands

Werkgroep Achtergrondverlaging (2017). Zicht op achtergrondverlaging. Nederlandse Hydrologische Vereniging (NHV).

Werkgroep herziening Cultuurtechnisch Vademecum, (1988) Cultuurtechnisch vademecum, Cultuurtechnische vereniging, Utrecht

Witte, J.P.M., W.J. Zaadnoordijk, D.G. Cirkel, I. Leunk & H.F.M. Aarts (2015). Grondwateraanvulling en achtergrondverlaging in de provincie Noord-Brabant. BTO 2015.055, KWR, Nieuwegein.

Witte, J.P.M. (2017). Reactie op het LTO-rapport over stationaire grondwaterstroming naar permanente putten. KWR 2017.093, KWR, Nieuwegein.

Witte, J.P.M., W.J. Zaadnoordijk & J.J. Buyse (2019). Forensic Hydrology Reveals Why Groundwater Tables in The Province of Noord Brabant (The Netherlands) Dropped More Than Expected. Water 11(3), 14p.
DOI:10.3390/w11030478

Woud, A. Van der (2020) Het landschap, De mensen Nederland 1850-1940 Prometheus 448 p