

A photograph of a forest floor covered in lush green ferns and moss, with tall trees in the background. A white text box is overlaid on the upper right portion of the image.

Bedrijfstakonderzoek
BTO 2024.019 | Januari 2024

Effecten van bosuitbreiding en revitalisatie op drinkwaterwinningen en natuur

Bedrijfstakonderzoek

KWR

Bridging Science to Practice

Rapport

Effecten van bosuitbreiding en revitalisatie op drinkwaterwinningen en natuur

BTO 2024.019 | Januari 2024

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

Opdrachtnummer

402045/307

Projectmanager

Edu Dorland

Opdrachtgever

BTO - Thematisch onderzoek - Bronnen en omgeving

Auteurs

Esther Brakkee, Camiel Aggenbach, Henk Krajenbrink

Kwaliteitsborger

Edu Dorland i.o.m. Ruud Bartholomeus

Projectbegeleiding

Dick Groenendijk en Jeroen Groenendijk (PWN), Harrie van der Hagen (destijds Dunea), Bas van den Dries (Vitens) Erwin Stultiëns (WML), Martin de Haan (Brabant Water), Luc Geelen (Waternet), Jeroen Willemsen (Evides)

Verzonden naar

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.

Een jaar na publicatie is het openbaar.

Keywords

Bossenstrategie, verdamping, grondwateraanvulling, grondwaterkwaliteit, biodiversiteit

Jaar van publicatie
2024

Meer informatie
Camiel Aggenbach
T +31 6 22379320
camiel.aggenbach@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

Januari 2024 ©

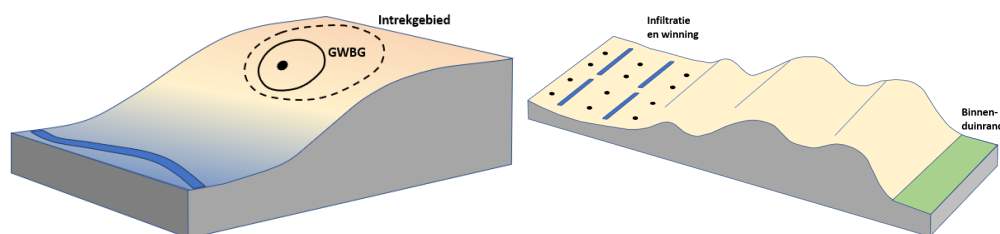
Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden veeleelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen,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

Managementsamenvatting

Bosuitbreiding en revitalisatie beïnvloeden drinkwaterwinningen en natuur

Auteurs Esther Brakkee, Camiel Aggenbach, Henk Krajenbrink

De landelijke Bossenstrategie zet in op uitbreiding en revitalisering van het Nederlandse bos. Hiervoor moeten waarschijnlijk ook gebieden met waterfuncties een bijdrage leveren, zoals intrekgebieden van waterwinningen. Om meer inzicht te krijgen in de invloed van bosmaatregelen op het watersysteem en de biodiversiteit rondom winningen zijn scenarioverkenningen uitgevoerd voor twee representatieve fictieve winlocaties: hoge zandgronden en duinwaterwinningen. Onderzocht is hoe uitbreiding en kwaliteitsverbetering ruimtelijk kan worden geoptimaliseerd voor het watersysteem en de biodiversiteit. Bosuitbreiding nabij binnenlandse freatische winningen kan zowel positieve als negatieve effecten hebben op de grondwateraanvulling, sterk afhankelijk van de locatie in het intrekgebied, het type bos en een eventuele koppeling met hydrologisch herstel. Het effect op grondwaterkwaliteit en biodiversiteit is overwegend positief. Revitalisering van duinbossen is kansrijk, maar er bestaat nog veel onduidelijkheid over de effectiviteit van de verschillende maatregelen. Geadviseerd wordt om afwegingen voor bosmaatregelen per gebied te maken, afhankelijk van de prioriteiten en opties op de locatie in kwestie. Nader onderzoek is nodig naar de precieze effecten van bosmaatregelen op het landschap, onder andere naar het verdampingsgedrag van verschillende bostypen.



Ruimtelijke scenario's van bosuitbreiding en -vitalisering zijn toegepast op twee fictieve locaties. Links: freatische winning op hoge zandgronden (binnenland); rechts: duinwaterwinning.

Belang: Ruimtelijke inpassing van bosmaatregelen kan de (drink)waterbeschikbaarheid beïnvloeden

In 2020 is de landelijke Bossenstrategie gepresenteerd, gericht op uitbreiding (10% in 2030) en revitalisering van het Nederlandse bos ten behoeve van klimaatmitigatie en versterking van biodiversiteit. Aan deze bosopgave moeten waarschijnlijk ook gebieden een bijdrage leveren die belangrijke waterfuncties vervullen, zoals intrekgebieden van drinkwaterwinningen. Bosuitbreiding kan op landschapsschaal zowel positieve als negatieve effecten hebben op grondwaterstand en -kwaliteit, maar over de precieze effecten is nog weinig bekend. De drinkwaterbedrijven willen weten wat de invloed is

van bosmaatregelen op het watersysteem en op de biodiversiteit rondom winningslocaties, zodat zij goed onderbouwd invloed kunnen uitoefenen bij de uitwerking van de plannen en toewijzing van gebieden voor bosuitbreiding.

Aanpak: Semi-kwantitatieve verkenning op basis van eenvoudige berekeningen en literatuur

We hebben een semi-kwantitatieve verkenning uitgevoerd om te achterhalen hoe uitbreiding en kwaliteitsverbetering van bos ruimtelijk kan worden geoptimaliseerd voor (drink)waterbeschikbaarheid en biodiversiteit in en rond waterwingebieden. Deze semi-kwantitatieve verkenning is gebaseerd op eenvoudige berekeningen en literatuuronderzoek.

De analyses zijn toegepast op twee fictieve winningslocaties met karakteristieken van twee typen winningen: *hoge zandgronden* (representatief voor freatische winningen in Oost- en Zuid-Nederland; focus op uitbreiding en revitalisering) en *duinwaterwinningen* (focus op revitalisering). Vervolgens hebben we verschillende ruimtelijke scenario's uitgewerkt om de effecten te bepalen van bosuitbreiding en revitalisering op grondwateraanvulling, grondwaterkwaliteit en biodiversiteit.

Resultaten: voor grondwateraanvulling positieve en negatieve effecten, voor biodiversiteit onzeker

Binnenlandse winningen (hoge zandgronden)

Bosuitbreiding op de hoge zandgronden zal in veel gevallen voor een lokale verlaging van de grondwateraanvulling zorgen als gevolg van extra verdamping. Naar verwachting is dit effect sterker op hogere posities in het landschap dan op lagere posities nabij waterlopen. De grootte van het effect is daarnaast afhankelijk van het type bos, het voorgaande landgebruik en de schaal van bosvorming. Er kan echter een positief netto effect op de grondwaterstand ontstaan door bosvorming in ontwaterde gebieden te combineren met hydrologische herstelmaatregelen (verminderen drainage, stoppen afwatering van laagten). Omdat de hogere zandgronden sterk worden ontwaterd, liggen hier grote kansen voor het vergroten van de grondwateraanvulling en revitalisering op biodiversiteit. Bosvorming zal in de meeste gevallen een positief effect hebben op grondwaterkwaliteit, vooral op voormalige landbouwgronden. Dit effect lijkt het grootst op hogere posities in het landschap, omdat uitspoeling van nutriënten hier het grootst is. Bosuitbreiding op landbouwgrond zal eveneens een positief effect hebben op de biodiversiteit, onder andere door het verbinden en bufferen van bestaand bos. De potenties zijn het hoogst in lagere, vochtigere en rijkere gebieden. Ook revitaliseringsmaatregelen kunnen positief zijn voor de biodiversiteit, maar van veel maatregelen zijn de precieze effecten nog slecht bekend.

Duinwaterwinningen

In de meeste duingebieden wordt geen

bosuitbreiding nagestreefd vanwege het belang van natuurtypen met een lage vegetatie. Er is nog relatief weinig aandacht voor de kansrijkere revitalisering van duinbossen, bijvoorbeeld door het gedeeltelijk omvormen van naaldbos in loofbos of door het opener maken van duinbossen. Over de effecten van deze en andere revitaliseringsmaatregelen op de boskwaliteit en biodiversiteit is echter nog weinig bekend.

Toepassing: afweging van bosmaatregelen moet op gebiedsschaal worden gemaakt

De eenvoudige verkenningen in deze studie laten zien dat bosuitbreiding in de omgeving van binnenlandse winningen zowel positieve als negatieve effecten kan hebben op de grondwateraanvulling. Vanuit het drinkwaterperspectief zien we echter kansen voor positieve effecten van bosmaatregelen, waarbij de locaties in het landschap, verminderen van structurele verdroging en de inrichting van nieuw te ontwikkelen bossen belangrijke factoren zijn. We adviseren om de afwegingen voor bosmaatregelen en de locatie ervan per gebied te maken, afhankelijk van de prioriteiten en opties op de locatie in kwestie.

Er zijn nog veel kennislacunes over de effecten van bosmaatregelen op het landschap. Nog veel is onzeker over:

- het verdampingsgedrag van verschillende bostypen en de daaraan gekoppelde grondwateraanvulling, met droogte en klimaatveranderingen als complicerende factoren;
- de effecten van bosaanplant in combinatie met verminderde drainage op de landschappelijke waterbalans, aanvullend op de uitgevoerde modelberekeningen;
- de ecologische status en herstelmogelijkheden van duinbossen;
- het effect van herstelmaatregelen op bosvitaliteit en biodiversiteit in het algemeen.

Rapport

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Ruimtelijke inpassing bosmaatregelen rond drinkwaterwinningen* (BTO 2023.010).

Meer informatie

Camiel Aggenbach
T +31 6 22379320
camiel.aggenbach@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

The logo for KWR (Knowledge and Water Research) features the letters 'KWR' in a bold, blue, sans-serif font. The 'K' and 'W' are connected, and the 'R' is slightly separated. The letters are a deep blue color.

Inhoud

Managementsamenvatting	2
Inhoud	4
1 Inleiding	6
1.1 Achtergrond: de Bossenstrategie en drinkwater	6
1.2 Bestaande verkenningen ruimtelijke effecten bos	6
1.3 Doel	7
1.4 Afbakening en opzet	8
2 Kenmerken van waterwinningslandschappen en ontwerp fictieve gebieden	10
2.1 Methode	10
2.1.1 Winningstype hoge zandgronden	10
2.1.2 Duinwaterwingebieden	11
2.2 Kenmerken winningen en omgeving	11
2.2.1 Hoge zandgronden: grondwaterbeschermingsgebieden	11
2.2.2 Hoge zandgronden: landschapsschaal	12
2.2.3 Duinwaterwingebieden	14
2.3 Ontwerp fictieve gebieden	16
2.3.1 Winningstype hoge zandgronden	16
2.3.2 Duinwaterwingebieden	18
3 Revitaliseringsmaatregelen	20
3.1 Maatregelen voor bodemherstel	20
3.2 Maatregelen in bosstructuur en -samenstelling	22
3.3 Maatregelen in hydrologie	23
4 Scenario's bosmaatregelen: methode	25
4.1 Ruimtelijke scenario's bosuitbreiding en -revitalisering	25
4.1.1 Scenario's	25
4.1.2 Oppervlak en locatie nieuw bos (hoge zandgronden)	26
4.1.3 Landschapscondities en bostypen	26
4.2 Effecten van bosuitbreiding en -herstel op waterfuncties en natuur	27
4.2.1 Effecten waterkwantiteit: grondwateraanvulling	27
4.2.2 Effecten waterkwantiteit: 'voorraadeffect'	28
4.2.3 Effecten waterkwaliteit: nitraatuitspoeling	29
4.2.4 Effecten natuurwaarde/biodiversiteit	30
5 Scenario's bosmaatregelen: Resultaten en discussie	35
5.1 Effecten van bosuitbreiding en -herstel: winningen hoge zandgronden	35

5.1.1	Waterkwantiteit	35
5.1.2	Grondwaterkwaliteit	39
5.1.3	Biodiversiteit	41
5.2	Effecten van bosrevitalisering: duinwaterwinningen	45
5.2.1	Grondwateraanvulling	45
5.2.2	Biodiversiteit	46
6	Conclusies en kennislacunes	49
7	Referenties	54
I	Details kenmerken winningen	59
II	Landgebruik/vegetatie per scenario	72
III	Grondwateraanvulling en verdamping van gewassen en vegetatietypen	78
IV	Verdampingsdata duinen	81
V	Achtergrondinformatie bostypen	82

1 Inleiding

1.1 Achtergrond: de Bossenstrategie en drinkwater

Het Nederlandse bos heeft recent veel in de aandacht gestaan. De doelen voor klimaatmitigatie hebben het belang van bestaande en nieuwe bossen als vastlegger van koolstof vergroot. Tegelijk is de afgelopen jaren duidelijk geworden dat de kwaliteit van het bestaande bos en de bijbehorende biodiversiteit, met name op de hoge zandgronden, sterk onder druk staat (de Vries et al., 2019). Als antwoord hierop werd in 2020 de landelijke Bossenstrategie gepresenteerd (LNV, 2020). De Bossenstrategie streeft naar een ambitieuze uitbreiding én kwaliteitsimpuls voor het Nederlandse bos, met als doel om tegelijk klimaatmitigatie te bereiken en de bosbiodiversiteit te versterken. Hierin is de ambitie geformuleerd om het Nederlandse bosareaal in 2030 met 10% uit te breiden (31.000 ha). Dit moet deels gebeuren binnen het bestaande Natuurnetwerk, maar ook voor een groot deel daarbuiten, op locaties die nu nog geen natuurbestemming hebben. Daarnaast moet een 'revitalisering' van het bestaande bos plaatsvinden. Dit gaat om maatregelen die de negatieve effecten van verzuring en verdroging van bossen tegengaan en het bos natuurlijker en veerkrachtiger moeten maken (LNV, 2020; Thomassen et al., 2020). De ambities vanuit de landelijke Bossenstrategie moeten door de provincies tot concrete plannen worden uitgewerkt (Flevoland, 2021; Provincie Gelderland, 2020; Provincie Noord-Brabant, 2020).

Bossen hebben een belangrijk effect op de lokale waterhuishouding, door hun relatief hoge verdamping, deels ook door de aanwezigheid van ontwatering, maar ook door hun invloed op de bodemontwikkeling en het bosmicroklimaat. Bosuitbreiding kan op landschapsschaal positieve én negatieve effecten hebben op de grondwateraanvulling en -kwaliteit, afhankelijk van de locatie en de manier waarop bosuitbreiding wordt toegepast (Brakkee & Dorland, 2021). Ook revitaliseringsmaatregelen zouden, hoewel in mindere mate, op waterstromen en -kwaliteit kunnen doorwerken. De effecten van bosmaatregelen op het watersysteem zijn in de bestaande strategieën echter nog beperkt meegenomen.

De ambities voor bosuitbreiding en -revitalisering zijn op dit moment nog niet aan bepaalde locaties of regio's toegewezen. Het is waarschijnlijk dat in allerlei verschillende typen gebieden een bijdrage aan de bosopgave nodig zal zijn, ook in gebieden met belangrijke waterfuncties, zoals de intrekgebieden van drinkwaterwinningen. Om het belang van (drink)waterbeschikbaarheid mee te kunnen nemen in de plannen voor bosuitbreiding en -revitalisering, is het dan ook noodzakelijk om inzicht te hebben in welke typen locaties vanuit oogpunt van (drink)waterbeschikbaarheid het meest geschikt zouden kunnen zijn, en waar juist grote negatieve effecten te verwachten kunnen zijn. Dit moet in verhouding worden gezien met welke locaties voor biodiversiteit de meeste potentie hebben.

1.2 Bestaande verkenningen ruimtelijke effecten bos

In navolging op de Bossenstrategie zijn recent al verschillende onderzoeken uitgevoerd naar de mogelijke ruimtelijke effecten van bosuitbreiding en -revitalisering. Eerste verkenningen vanuit de drinkwatersector zijn gemaakt in een verkenningssessie over de Bossenstrategie (DWSI, 2021) en een BTO-Trendalert (Brakkee & Dorland, 2021). Daarnaast zijn vanuit andere sectoren onderzoeken uitgevoerd.

Binnen het onderzoek "Nieuw bos voor klimaat en biodiversiteit" (Nijssen et al., 2021) is onderzocht op welke plekken binnen het bestaande NNN-netwerk het aanleggen van bos de meeste potentie heeft voor zowel koolstofopslag als biodiversiteit. Daarbij hebben de onderzoekers gekeken naar omvorming van voormalige, nog niet ingerichte landbouwgronden ("om te vormen naar natuur") en Flora- en faunarijke grasland naar bos óf naar

een ambitieuzer open vegetatietype. Voor deze omvormingen hebben ze overzichten gemaakt van de geschatte koolstofvastlegging en vereenvoudigde biodiversiteitseffecten, uitgesplitst naar verschillende landschapstypen.

De “Kansenkaart nieuw bos in beekdalen” (Possen et al., 2021) geeft een verkenning van de kansen van bosuitbreiding voor wateropgaven binnen beekdallandschappen. De onderzoekers brengen globaal (kwalitatief) in beeld waar in beekdallandschappen kansen kunnen liggen om door bosuitbreiding bij te dragen aan doelen vanuit het waterbeheer. Hierbij kijken ze naar KRW-doelen en waterkwaliteit, het vasthouden van water, en wateroverlast en -veiligheid. Er zijn per doel eenvoudige kennisregels opgesteld die een indeling geven in ‘kansrijke’ en ‘kansarme’ locaties, op basis van onder andere bodem- en grondwaterkaarten. Dit resulteert in een globale kansenkaart voor de hoge zandgronden en een specifieke uitwerking voor het beheergebied van waterschap de Dommel. De verschillende waterfuncties zijn hierin nog niet kwantitatief uitgewerkt.

Met betrekking tot revitalisering is door Steenvoorden et al. (2021) een literatuurverkenning uitgevoerd naar de mogelijke effecten van bosrevitalisering op waterfuncties in de provincie Brabant. Daarbij gaan ze uit van verschillende revitaliseringsscenario's, afhankelijk van de functie van het bos. Op basis van literatuuronderzoek geven ze voor deze scenario's een vereenvoudigde inschatting van de mogelijke effecten.

De effecten van bosuitbreiding en -omvorming op het watersysteem zijn ook eerder al in modelstudies onderzocht. Van Huijgevoort et al. (2020) modelleerden het effect van de bebossing van de Veluwe rond 1900 op de grondwaterstanden. De Niet et al. (2021) en van den Eertwegh et al. (2021) onderzochten het effect van het grootschalig omvormen van naaldbos naar loofbos. Deze studies lieten zien dat grootschalige bosvorming tot een substantiële reductie van de grondstandstand kan leiden, terwijl omvorming van naaldbos naar loofbos juist meer grondwateraanvulling kan opleveren. Deze modellen zijn echter afhankelijk van vereenvoudigde aannames over het verdampingsgedrag van bossen, en de uitkomsten zijn mogelijk niet direct toepasbaar op lokale schaal en langere termijn (Brakkee & Dorland, 2021). van den Eertwegh et al. (2021) lieten al zien dat het effect van bossen sterk afhangt van de locatie in het landschap en de kenmerken van het watersysteem.

Tot slot zijn recent verschillende experimentele onderzoeken gedaan naar de effecten van revitaliseringsmaatregelen, waaronder toepassing van rijkstrooiselsoorten en steenmeel (Bloem et al., 2022b; Desie et al., 2020) en hydrologisch herstel van bossen (van der Burg et al., 2014). Daarnaast is in OBN-verband onderzoek gedaan naar de biodiversiteit van nieuw aangelegde bossen (van den Berg et al., 2022). Hierin worden aanbevelingen gedaan hoe bosuitbreiding aan een verbetering van de biodiversiteit kan bijdragen en welke kennislacunes hierin nog liggen.

1.3 Doel

De genoemde studies hebben al vanuit verschillende oogpunten verkenningen gemaakt van de mogelijke effecten van bosuitbreiding en -revitalisering binnen landschappen. Het is echter nog moeilijk in te schatten hoe bosmaatregelen uit zouden kunnen werken in gebieden rond drinkwaterwinningen, en hoe hierin slimme keuzes gemaakt kunnen worden voor (drink)waterbeschikbaarheid én natuur.

Het doel van dit onderzoek is om te **verkennen hoe uitbreiding en kwaliteitsverbetering van bos ruimtelijk kan worden geoptimaliseerd voor de waterbeschikbaarheid voor drinkwater en biodiversiteit op landschappelijke schaal in en rond waterwingebieden**. De effecten op waterbeschikbaarheid en biodiversiteit worden bekeken aan de hand van vereenvoudigde indicatoren:

- 1) (Drink)waterbeschikbaarheid: grondwateraanvulling;
- 2) (Drink)waterkwaliteit: uitspoeling van vervuilende stoffen naar het grondwater, waarbij nitraat als indicator is gebruikt;
- 3) Natuurwaarde/biodiversiteit: lokale biodiversiteitsindex en landschapsstructuur.

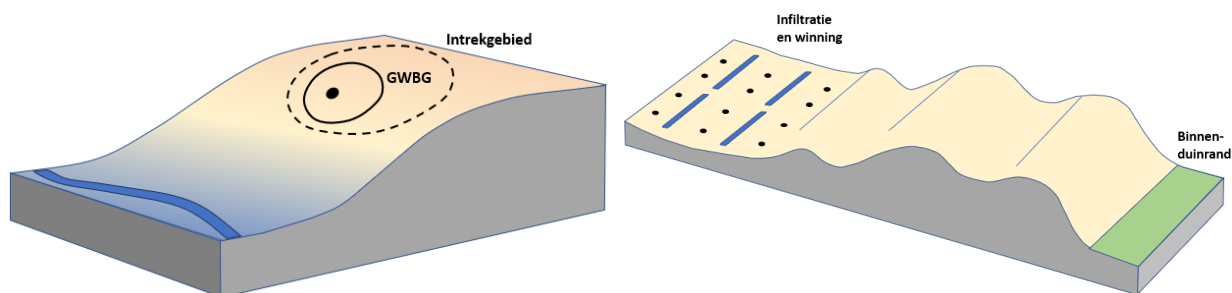
Behalve waterfuncties en natuurwaarde bieden bossen ook een reeks aan andere functies, zoals koolstofvastlegging, houtproductie en recreatie. Vanuit het perspectief van de drinkwaterbedrijven zijn echter de waterbeschikbaarheid en -kwaliteit en natuurwaarde van direct belang, en daarom richt dit onderzoek zich op deze aspecten.

Voor de drie onderdelen zijn de mogelijke effecten op semi-kwantitatieve manier verkend, op basis van vereenvoudigde berekeningen in combinatie met bestaande literatuur. Doel is om een eerste inzicht te krijgen in hoe de inpassing van bosmaatregelen in het landschap invloed heeft op de drinkwater- en natuurfuncties; welke inrichtingsopties mogelijk positiever of negatiever uitwerken voor drinkwaterwinning en natuur; en welke belangrijke kennislacunes hierin nog open liggen.

1.4 Afbakening en opzet

In het onderzoek kijken we naar twee typen winningen, waar een belangrijke invloed van het bosbeleid te verwachten is: freatische grondwaterwinningen op de hoge zandgronden en duinwaterwinningen. Rondom binnenlandse winningen kunnen opgaven liggen voor zowel bosuitbreiding als -revitalisering; daarbij zijn effecten op grondwateraanvulling en -kwaliteit met name voor freatische winningen te verwachten, die vooral op de hoge zandgronden liggen (van Loon et al., 2019). In de duingebieden beheren de duinwaterbedrijven grote oppervlakten aan natuur, waaronder duinbossen. Hier is bosuitbreiding minder waarschijnlijk vanwege de grote waarde van open duinhabitats en uitbreiding daarvan. Daarom is hier nauwelijks ruimte voor uitbreiding van bos, maar is kwaliteitsverbetering van de bestaande duinbossen wel relevant.

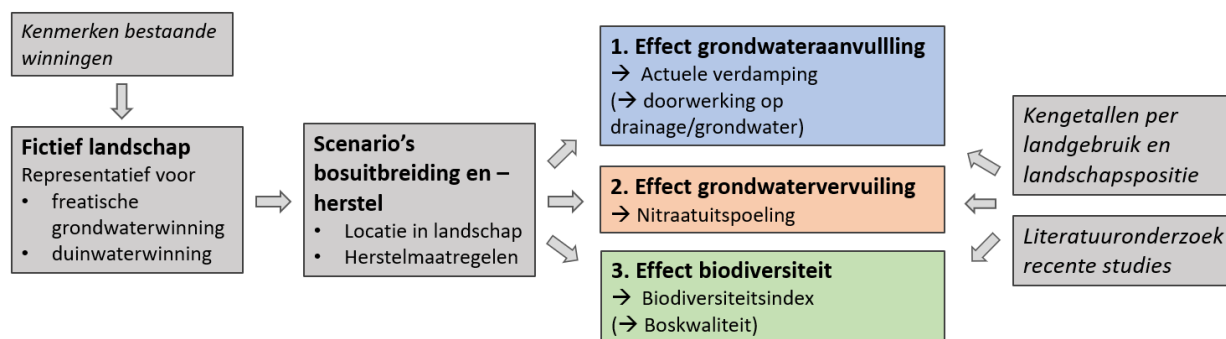
In het onderzoek zijn voor deze twee typen waterwingebieden verschillende ruimtelijke bosuitbreidings- en -revitaliseringsscenario's verkend. Daarbij is gekeken naar de schaal van een winning met het intrek- of infiltratiegebied in relatie tot het omgevende landschap. De effecten van bosmaatregelen op hydrologie en biodiversiteit kunnen immers alleen op landschapsschaal beoordeeld worden. Voor beide gebiedstypen maken we gebruik van een fictief studiegebied dat representatief is voor het type winning. Voor de *hoge zandgronden* kijken we naar een versimpeld landschapsgradiënt van een hoog gebied (stuwwal of dekzandrug) naar een beekdal of rivier (Figuur 1.1, links). Binnen dit gradiënt ligt een drinkwaterwinning met een intrekgebied en grondwaterbeschermingsgebied. Deze situatie lijkt op de situatie voor veel freatische winningen in Oost- en Zuid-Nederland (zie par. 2.2). Het intrekgebied kan door diepe grondwaterstanden droog zijn of wordt ontwaterd. Voor de duinen kijken we naar een vereenvoudigde binnenduinzone, gelegen vanaf het infiltratiegebied met terugwinning naar de binnenduinrand (Figuur 1.1, rechts). Deze zone wordt in veel duningebieden gedomineerd door bos. Door de hoge ligging zijn deze bossen vaak droog.



Figuur 1.1: Landschap met winning op de Hoge Zandgronden (links) en een duinwaterwingebied (rechts). GWBG = grondwaterbeschermingsgebied.

Het onderzoek bestaat uit de volgende stappen (Figuur 1.2):

- 1 Verkenning van de landschapskenmerken van de gebieden rond bestaande grondwaterwinningen, die relevant zijn voor de potentie en effecten van bosuitbreiding en -revitalisering (hoofdstuk 2).
- 2 Ontwerp van fictieve studiegebieden, één met representatieve landschapskenmerken en inrichting voor een binnenlandse grondwaterwinning en één voor een duinwinning (hoofdstuk 2.3).
- 3 Literatuurverkenning van recent onderzoek naar revitaliseringsmaatregelen (hoofdstuk 3).
- 4 Literatuuronderzoek naar effecten van verschillende landgebruikstypen en bosherstelmaatregelen op grondwateraanvulling, grondwatervervuiling en biodiversiteit (hoofdstuk 3).
- 5 Uitwerking van verschillende vereenvoudigde ruimtelijke scenario's voor bosuitbreiding en -herstel voor de fictieve gebieden: inschatting van effecten op grondwateraanvulling, grondwatervervuiling en biodiversiteit (hoofdstuk 4 en 5).
- 6 Conclusie en kennislacunes (hoofdstuk 6).



Figuur 1.2: Opzet van het onderzoek.

2 Kenmerken van waterwinningslandschappen en ontwerp fictieve gebieden

2.1 Methode

Als eerste stap zijn de belangrijkste kenmerken van de twee typen winningen, een binnenlandse freatische winning en een duinwaterwinning, met hun omgevende landschap in beeld gebracht. De belangrijkste landschapskenmerken die het effect van bosuitbreiding en -revitalisering bepalen, zijn de configuratie en grootte van de winning, het bestaande landgebruik en natuurtypen, de hydrologie en bodemkenmerken.

2.1.1 Winningstype hoge zandgronden

De landschapskenmerken van het hoge zandgronden-winningstype zijn bekeken op 1) het niveau van grondwaterbeschermingsgebieden, en 2) het niveau van landschapsgradiënten. Tabel 2.1 geeft de in beeld gebrachte kenmerken en de gebruikte bronnen.

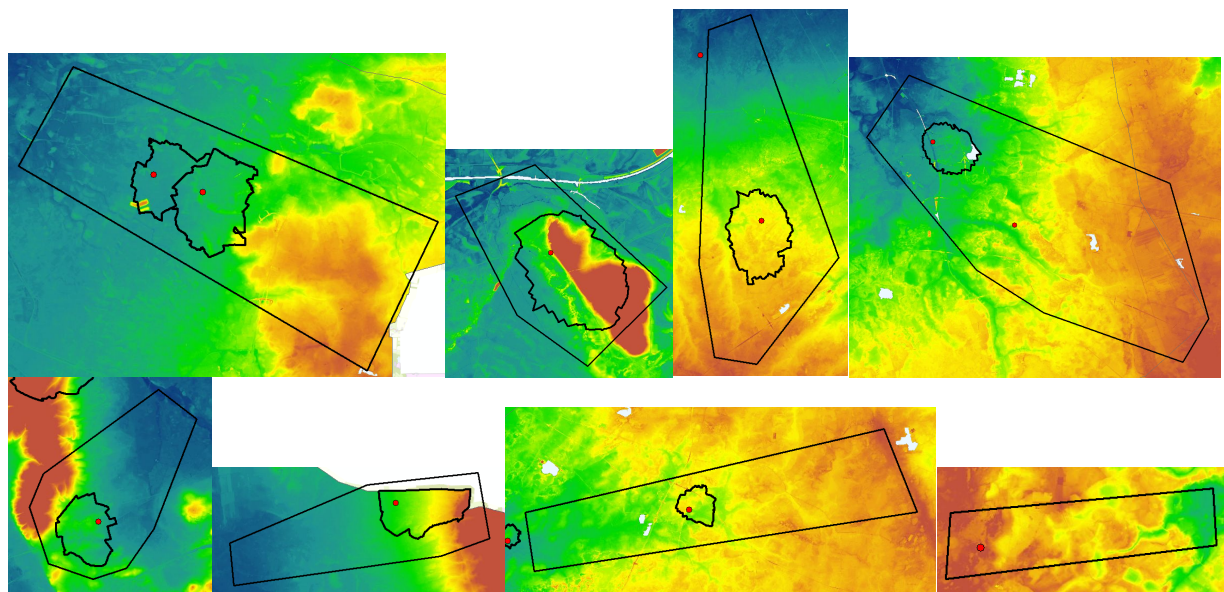
Tabel 2.1: Kenmerken van binnenlandse freatische wingebieden en omgevende landschappen, en gebruikte bronnen.

Kenmerk	Bron
Kenmerken winning	Gegevens drinkwaterbedrijven (van Loon et al., 2019)
Bestaand landgebruik	LGN6-kaart (Hazeu et al., 2012)
Bestaande natuurtypen	NNN-natuurtypenkartering 2021 (BIJ12)
Hydrologie: vochttoestand	LHM-grondwatertrappenkaart 2011-2018 (Deltares, 2020)
Hydrologie: drainage-intensiteit	Topografische kaarten waterlopen; gemodelleerde drainageflux LHM (Deltares, 2020)
Bodemtypen	BRO-bodemkaart (WEnR, 2021)

Voor de schaal van grondwaterbeschermingsgebieden zijn de landschapskenmerken in beeld gebracht voor een set van 56 grondwaterbeschermingsgebieden van freatische winningen (ABIKOU-indeling A zonder duinwaterwinningen). Er is voor gekozen om naar freatische winningen te kijken, omdat deze het meest gevoelig zijn voor veranderingen in grondwateraanvulling en uitspoeling van stoffen door landgebruiksveranderingen.

Voor het niveau van landschapsgradiënten zijn acht kenmerkende freatische winningen bekeken: Haarlo-Olden Eibergen, Lochem, Vessem, Helmond, Holten, Manderveen, Beilen en Schijf¹ (Figuur 2.1). Deze liggen elk op een gradiënt van een hoger gelegen rug of stuwwal naar een beekdal, met een gradiëntlengte van zo'n 5 tot 20 kilometer en een hoogteverschil van 0.5 tot 5 m/km (zie Tabel I. 3).

¹ Winning Schijf is een diepe winning, maar is bij de gradiënten meegenomen omdat het een representatief landschapsgradiënt kent.



Figuur 2.1: Landschappelijk hoogtetradiënt voor acht freatische grondwaterwinningen. De hoekige buitenste polygoon geven de landschapsuitsnede weer en de binnenste polygoon de grondwaterbeschermingsgebieden. Van linksboven naar rechtsonder: Haarlo-Olden, Eibergen, Lochem, Vessem, Helmond, Holten, Manderveen, Beilen en Schijf.

2.1.2 Duinwaterwingebieden

Omdat voor de duingebieden bosuitbreiding weinig speelt en we ons alleen op herstel van de ecologische kwaliteit richten, zijn de landschapkenmerken op een vereenvoudigde manier verkend. Het fictieve gebied is geïnspireerd op de binnenduinzone van de Amsterdamse waterleidingduinen, infiltratiegebied Castricum en Meijndel (Figuur 2.2). Voor deze drie gebieden zijn transecten gekozen van het midden van het infiltratiegebied tot de binnenduinrand. Deze gradiënten zijn 2 tot 3 km lang, waarbij het infiltratiegebied (infiltratieplassen + terugwinning) ongeveer 20% inneemt (Tabel I. 6). Voor deze transecten zijn de grootte van de winning en infiltratie, de vegetatietypen en het voorkomen van vochtige locaties globaal verkend. Hiervoor is gebruik gemaakt van Natura 2000-gebiedsanalyses (Breedveld et al., 2018; Provincie Noord-Holland, 2017, 2018), de LGN6-kaart (Hazeu et al., 2012) en verzamelde data vanuit het project “Evaluatie duinwaterwinningen” (Brakkee et al., 2023) gebruikt.

2.2 Kenmerken winningen en omgeving

Hier worden voor de binnenlandse freatische winningen en de duinwaterwinningen kort de landschapkenmerken omschreven, die de basis vormen voor het ontwerp van de fictieve gebieden. De volledige eigenschappen zijn te vinden in Bijlage I.

2.2.1 Hoge zandgronden: grondwaterbeschermingsgebieden

De bekeken freatische winningen in het binnenland onttrekken gemiddeld zo’n 3 Mm³/jaar, variërend tussen 0.5 en 10 Mm³/jaar (n=48, voor overige geen data). De gemiddelde vergunde capaciteit ligt op 4 Mm³/j (0.7-10). Het geschatte aandeel oppervlaktewater in de onttrekking (van Loon et al., 2019) is voor de meeste winningen zeer klein.

De grondwaterbeschermingsgebieden van de 56 bekeken freatische binnenlandse winningen zijn gemiddeld 500 ha groot (Figuur I. 1). Daarnaast is de grootte van het intrekgebied van de winningen geschat als de cirkel waarbinnen de totale jaarlijkse grondwateraanvulling (Deltares, 2020) gelijk is aan de totale winning. De geschatte intrekgebieden beslaan gemiddeld een gebied van zo’n 1300 ha, of een cirkel met een straal van 2 km (Figuur I. 1).

Tabel 2.2 geeft de verdeling van landgebruik over grondwatertrappen in de grondwaterbeschermingsgebieden van de freatische binnenlandse winningen. De winningen en hun grondwaterbeschermingsgebieden liggen vooral op hoge, droge landschapsposities. De grondwaterbeschermingsgebieden hebben een groter aandeel natuur (loofbos+naaldbos+korte natuurlijke vegetatie) dan gemiddeld in het landschapsuitsnede, waarbij vooral naaldbos veel meer voorkomt. De landgebruikstypen zijn niet gelijkmatig over de grondwatertrappen verdeeld: vooral de bossen liggen bijna volledig op de droogste standplaatsen. Ook korte natuurlijke vegetatie ligt iets bovengemiddeld op droge gronden, maar komt ook op vochtigere gronden voor. De grondwaterbeschermingsgebieden rond de freatische winningen worden gedomineerd door zandgronden, meestal leemarm, op sommige plekken leemrijker (Tabel I. 2). Andere bodemtypen maken meestal maar een klein aandeel uit.

Tabel 2.2: Landgebruik en verdeling over grondwatertrappen van de bodem in grondwaterbeschermingsgebieden van 56 freatische grondwaterwinningen (op basis van GIS-analyse; data (Deltares, 2020; Hazeu et al., 2012)).

Landgebruik	Gemiddelde verdeling over grondwatertrappen [%]								Geheel landschap
	GT1	GT2	GT3	GT4	GT5	GT6	GT7	GT8	
Agrarisch grasland	0.2	2.0	3.2	7.0	5.3	11.8	14.0	56.6	27.5
Akkerbouw	0.0	1.3	4.5	5.6	4.5	12.2	19.8	52.1	15.3
Loofbos	0.0	0.0	1.4	1.4	2.9	5.0	11.1	78.2	15.3
Naaldbos	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	7.4	89.3	23.5
Korte natuurlijke vegetatie	0.5	2.0	4.3	0.9	4.9	1.4	14.7	71.3	6
Bebouwing	0.0	0.0	0.3	0.0	0.7	1.3	16.6	81.1	8.9
Onverhard overig	0.0	0.0	0.4	0.0	1.6	6.7	17.0	74.4	2.8
Water	10.3	1.6	7.1	5.0	7.1	8.9	28.2	31.7	0.7
Geheel landschap	0.4	1.6	2.3	4.5	2.9	8.0	12.1	68.2	

Tabel 2.3 en Figuur I. 2 geven het aandeel van verschillende relevante natuurtypen in grondwaterbeschermingsgebieden van de 56 freatische winningen. De natuur rondom de winningen wordt in het algemeen gedomineerd door productiebos en droog natuurbos, met kleinere oppervlaktes droge lage vegetatietypen. Vochtige natuurtypen komen nauwelijks voor.

2.2.2 Hoge zandgronden: landschapsschaal

Behalve de grondwaterbeschermingsgebieden zelf is gekeken naar volledige landschapsgradiënten, die een groter gebied rondom de winningen omvatten, van laag (bijv. beekdal) tot hoog (top stuwwal/dekzandrug) in het landschap. Tabel 2.4 geeft de verdeling van het landgebruik over grondwatertrappen voor de bekeken landschapsgradiënten. Bodemtypen zijn gegeven in Tabel I. 4. De meeste gradiënten worden gedomineerd door droge condities (GT 7-8 gemiddeld in 56% van gradiënt). Iets vochtigere locaties nemen ook nog een substantieel aandeel in (GT 4-6 gemiddeld 34%), terwijl echt natte condities (GT 1-3) een stuk minder voorkomen (10%). De landschapsgradiënten worden gedomineerd door agrarisch gebruik, gevolgd door bossen en bebouwd gebied. De bossen, met name de naaldbossen, zijn sterk gebonden aan de hogere landschapsposities. Landbouwgrond komt juist relatief iets meer op de vochtigere posities voor.

De meeste gradiënten worden gedomineerd door zandgronden (podzol- en eerdgronden), maar op de vochtigere locaties komen ook meer lemige of organische gronden voor (Tabel I. 4).

Tabel 2.3: Oppervlaktes van NNN-natuurtypen in freatische grondwaterbeschermingsgebieden per provincie (zonder duinwaterwinningen) (op basis van GIS-analyse; data BIJ12).

Provincie		DR	GLD	LI	NB	OV	UT	Totaal
Oppervlak grondwaterbeschermingsgebied freatisch [ha]		5864	9587	930	4367	7995	1258	30000
NNN lage vegetatie	Lage vegetatie, vochtig [%]	1.0	0.9	0.1	0.3	0.1	0.0	0.6
	Lage vegetatie, droog [%]	1.2	4.8	5.6	3.5	7.3	4.3	4.7
	Rijke graslanden [%]	5.1	2.3	8.0	0.4	0.9	3.4	2.5
	N12.02 (kruiden- en faunarijck grasland) [%]	5.1	1.6	7.0	0.3	0.6	0.4	1.8
	Nog om te vormen naar natuur [%]	0.7	0.7	1.2	1.2	0.0	0.0	0.6
NNN bossen	N14 (vochtig bos) [%]	0.1	0.7	0.2	13.0	0.0	0.0	1.5
	N15 (droog bos) [%]	3.2	13.7	22.3	9.3	7.9	9.4	10.6
	N16 (productiebos) [%]	11.1	35.3	3.8	21.9	12.1	30.1	24.3
	N17 (cultuurhist. bos) [%]	0.0	0.2	0.0	0.0	0.3	0.0	0.1
	Totaal bos NNN [%]	14.4	49.9	26.3	44.2	20.4	39.5	36.4

Tabel 2.4: Landgebruik en verdeling over hydrologische posities in de bekeken landschapsgradiënten.

Landgebruik	Gemiddelde verdeling over grondwatertrappen [%]								Geheel gebied (ref)
	GT1	GT2	GT3	GT4	GT5	GT6	GT7	GT8	
Agrarisch grasland	1	5	8	11	8	25	19	23	40
Akkerbouw	0	2	6	8	7	24	23	31	26
Loofbos	0	1	6	3	6	13	16	54	8
Naaldbos	0	0	3	0	3	5	12	76	9
Korte natuurlijke vegetatie	1	4	11	6	9	15	26	28	5
Bebouwing	0	0	1	2	2	13	34	48	8
Onverhard overig	0	1	1	6	7	19	33	33	3
Water	4	4	9	8	13	14	23	25	1
Geheel gebied (ref)	1	3	6	7	7	21	20	35	

De drainagekenmerken van de landschapsgradiënten zijn verkend op basis van de dichtheid van waterlopen (dichter netwerk = sterker gedraineerd); de 'drainage conductance'-kaart van het LHM (lagere weerstand = sterker gedraineerd), en LHM-modeluitvoer van de fractie van de grondwateraanvulling die infiltreert naar het diepere grondwater (tweede modellaag), die ook een indicatie geeft van hoeveel water er als drainage wordt afgevoerd. De gegevens staan in Tabel I. 5.

Uit deze verkenning blijkt dat in de landschapsgradiënten rondom freatische winningen de drainage, zoals verwacht, over het gradiënt varieert. Hoog in het gradiënt zijn meestal wel sloten en waterlopen aanwezig, maar met een lage dichtheid. Hier infiltreert het merendeel van de grondwateraanvulling naar het diepere grondwater. De wegzijging is kleiner als hoog in het landschap lokale laagtes zijn of plekken waar water stagneert, zodat hier intensiever wordt gedraineerd. Midden in het gradiënt is vaak een mix aanwezig van meer en minder intensieve drainage; hier infiltreert gemiddeld ruwweg de helft van de grondwateraanvulling naar diepere lagen, maar met

een grote ruimtelijke variatie. Laag in het gradiënt is de drainage meestal intensief, met een dicht netwerk van sloten. Hier infiltreert minder dan de helft van de grondwateraanvulling naar dieper grondwater.

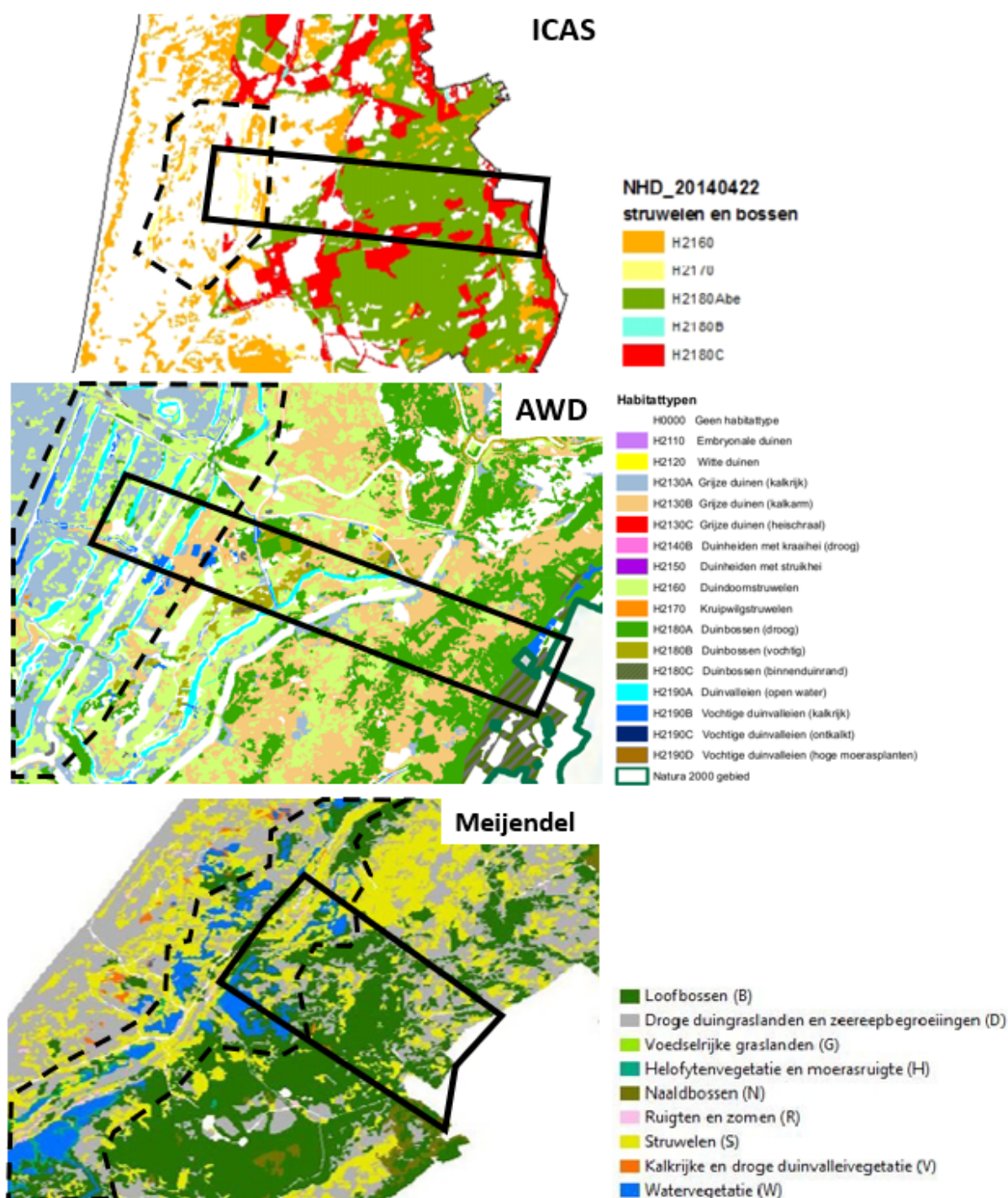
Ook de natuurgebieden die binnen de bekeken gradiënten liggen staan vaak onder invloed van drainage (Tabel I. 5). Hoog in de gradiënten zijn vaak in de natuurgebieden toch lokaal slootjes en waterloopjes aanwezig, waardoor een klein deel van het oppervlak gedraineerd wordt. Dit zal vooral gelden voor lokale laagtes en andere (voormalige) stagnerende locaties. In het midden en laag in de gradiënt staan de meeste natuurgebieden onder invloed van drainage, hoewel de dichtheid van waterlopen vaak wat lager is dan in omliggende landbouwgebieden. In sommige natuurgebieden zal de drainage zijn gereduceerd voor natuurdoelen, maar dit is waarschijnlijk niet overal gebeurd. Ook van der Burg et al. (2016b) geven aan dat in een groot deel van de (voormalig) vochtige bossen op de hoge zandgronden, zowel in de beekdalen als op stagnerende locaties hoger in het gradiënt, nog altijd rabatten of greppels aanwezig zijn die voor verdroging zorgen.

2.2.3 Duinwaterwingebieden

De bekeken duinwaterwingebieden hebben een infiltratiegebied (infiltratieplassen + omliggende winningen) van ongeveer een kilometer breed en een lengte variërend van ongeveer 2 tot ruim 5 kilometer; hierbinnen wordt jaarlijks tussen 20 en 70 miljoen kuub gewonnen (Tabel I. 6). Tabel 2.5 geeft de voorkomende vegetatie- en landgebruikstypen voor drie kenmerkende binnenduintransecten. Het bos in de bekeken zones bestaat gemiddeld in gelijke mate uit naald- en loofbos. De habitatypekaarten (Figuur 2.2) laten zien dat het bos meestal geconcentreerd is in de zone in het achterduin, terwijl met name richting het centrum van het duingebied en de infiltratiegebieden ook veel (duindoorn-)struweel voorkomt en lokaal kleine vochtige duinvalleien liggen. Vegetatieanalyses uitgevoerd door Brakkee et al. (2023) laten zien dat op het niveau van de gehele duingebieden vaak ongeveer 10% van het oppervlak uit vochtige vegetaties bestaat (Tabel I. 7). Vochtige delen liggen meestal vooral rond het infiltratiegebied en richting zee, soms lokaal in het middenduin. Binnen de bossen en struwelen maken vochtige typen slechts een klein deel uit.

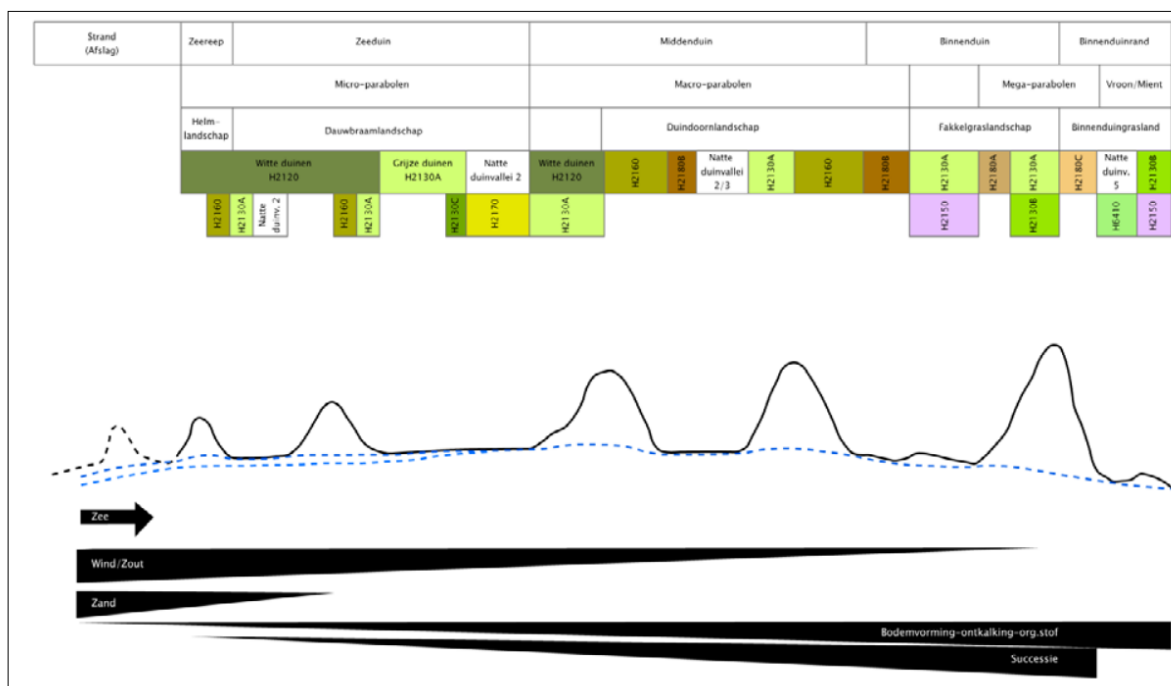
Tabel 2.5: landgebruik in drie voorbeeldtransecten in de binnenduinzone (op basis van data LGN6, Hazeu et al. (2012)).

LGN-type [%]	Bergen	IKIEF	AWD	Gemiddeld
Naaldbos	56	17	6	26
Loofbos + 'duinen met hoge vegetatie'	27	23	36	28
Duinen met lage vegetatie (<1 m)	5	41	33	26
Duinheide	4	0	0	1
Agrarisch grasland, overige landbouwgewassen, bebouwing (binnenduinrand)	3	15	13	10
Zoet water	1	1	5	2



Figuur 2.2: Habitat- of vegetatietypen voor gradiënt van achterduin naar waterwinning bij ICAS, de AWD en Meijndel. Met stippellijnen de infiltratiegebieden (Breedveld et al., 2018; Provincie Noord-Holland, 2017, 2018).

De duingebieden rond de drinkwaterwinningen in Noord- en Zuid-Holland kennen een kalkrijk moedermateriaal, maar er is een grote variatie in ontkalkingsdieptes, van ondiep tot enkele decimeters tot meerdere meters (Breedveld et al., 2018; Provincie Noord-Holland, 2017, 2018; van Delft, 2019) (Stuifzand et al. 2019). De ontkalkingsdiepte zal in grote lijnen toenemen met afstand tot de kust (Figuur 2.3). Het binnenduin en de hier voorkomende bossen zijn meestal al vrij diep ontkalkt, terwijl de omgeving van het infiltratiegebied meestal nog kalkrijker is (Brakkee et al., 2023)(Figuur 2.2).



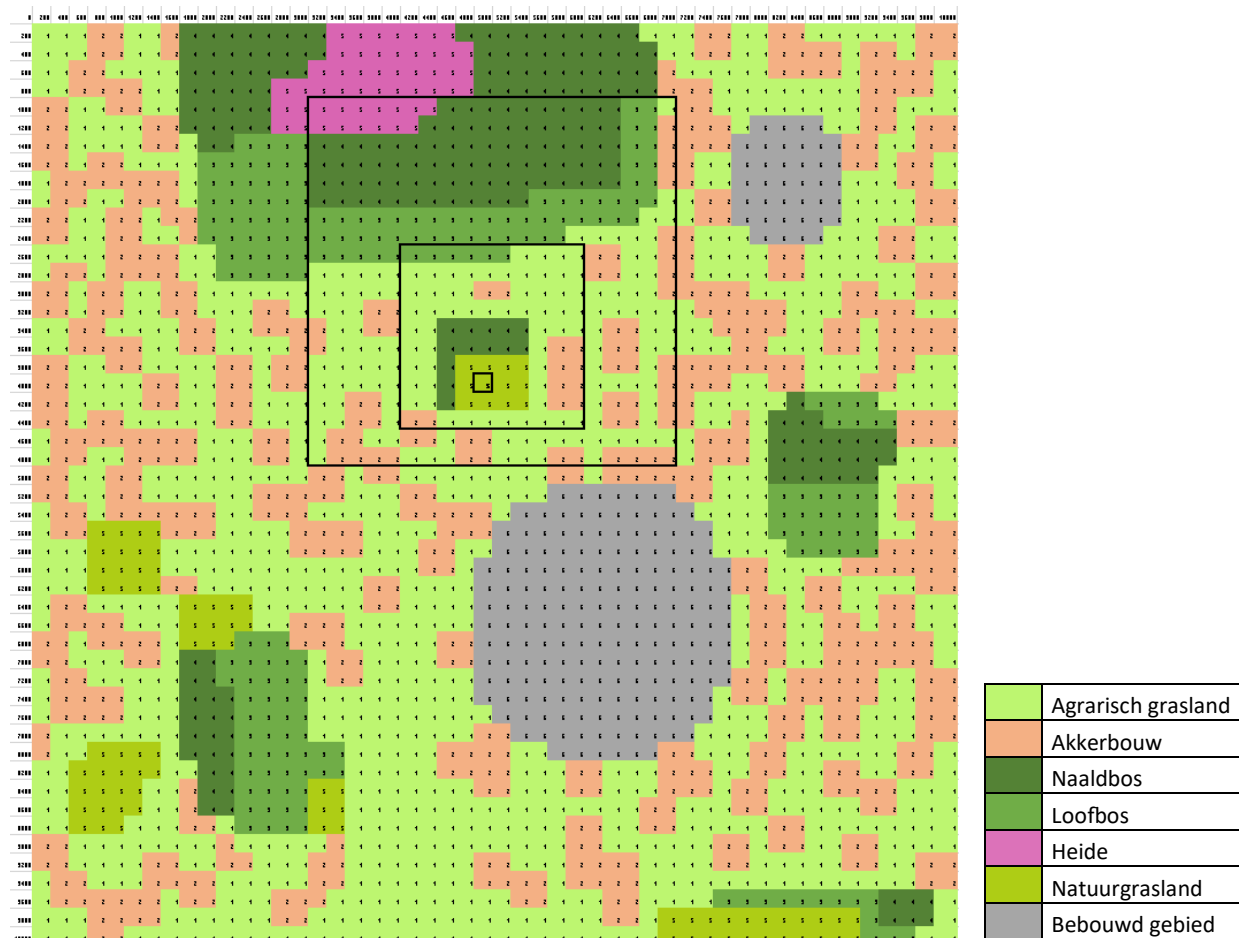
Figuur 2.3: Een schematische doorsnede van een duingebied, met typische vegetatietypen, grondwaterstanden en sturende processen (Slings et al., 2012).

2.3 Ontwerp fictieve gebieden

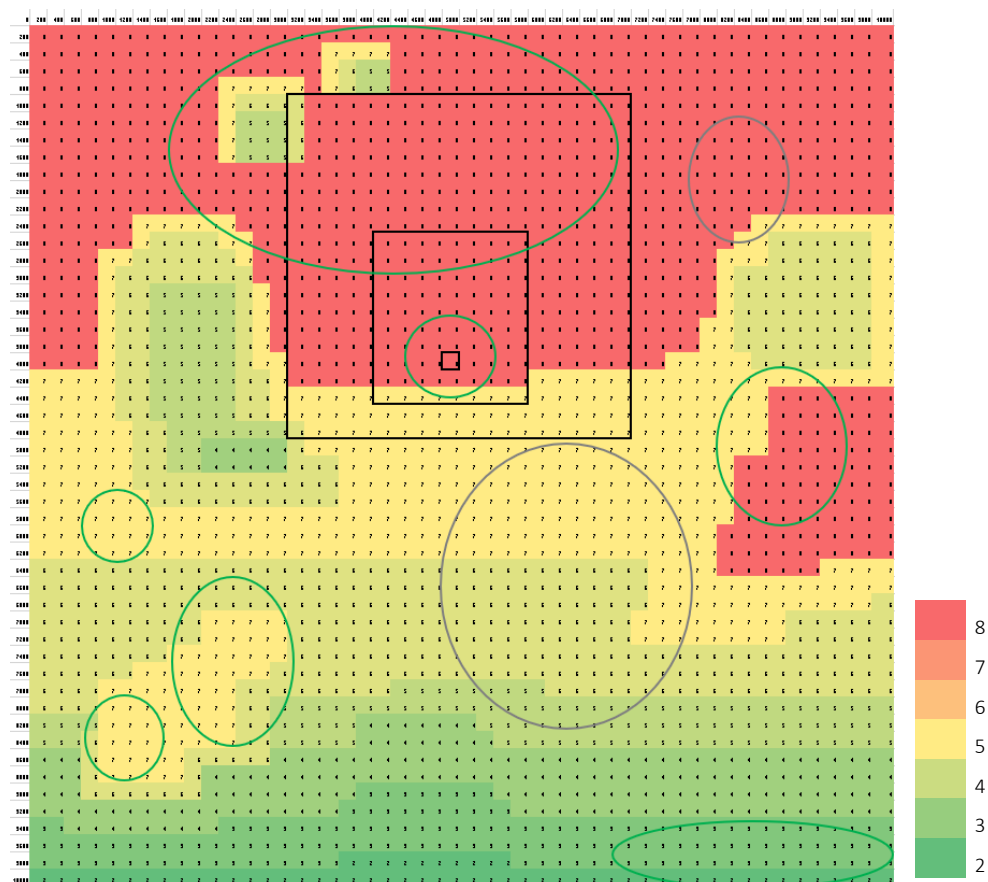
2.3.1 Winingstype hoge zandgronden

Op basis van de landschapkenmerken in par. 2.2.1 en 2.2.2 is het fictieve winningslandschap voor het hoge zandgronden-winingstype ontworpen. Daarbij is gezorgd dat de landschapkenmerken (hydrologie, landgebruik en verdeling daarvan over de grondwatertrappen) zo veel mogelijk overeenkomen met de gemiddelde kenmerken van de bekeken landschapsgadiënten en grondwaterbeschermingsgebieden van freatische binnenlandse grondwaterwinningen.

Figuur 2.4 geeft de resulterende landgebruikskaat voor het fictieve studiegebied van de hoge zandgronden; Figuur 2.5 geeft de grondwatertrappen. Het gaat om een gebied van 10 bij 10 kilometer, gelegen op de gradiënt vanaf de bovenkant van een stuwwal of dekzandrug (bovenin figuur) naar een beekdal (onderin figuur). Het gebied is in gebruik als zowel agrarisch grasland als akkerland, die gemengd over het gebied voorkomen. Bovenop de helling ligt een groter bosgebied met een heideveld; lager op de helling liggen twee kleinere stukken bos en enkele kleine natuurgraslanden. Ook langs de beek beneden aan de helling is een klein natuurgebied aanwezig. Er liggen twee dorpen in het gebied. De winning met het intrekgebied ligt aan de bovenkant van de helling, waarbij het onttrokken water vooral van het hoger gelegen infiltratiegebied afkomstig is.



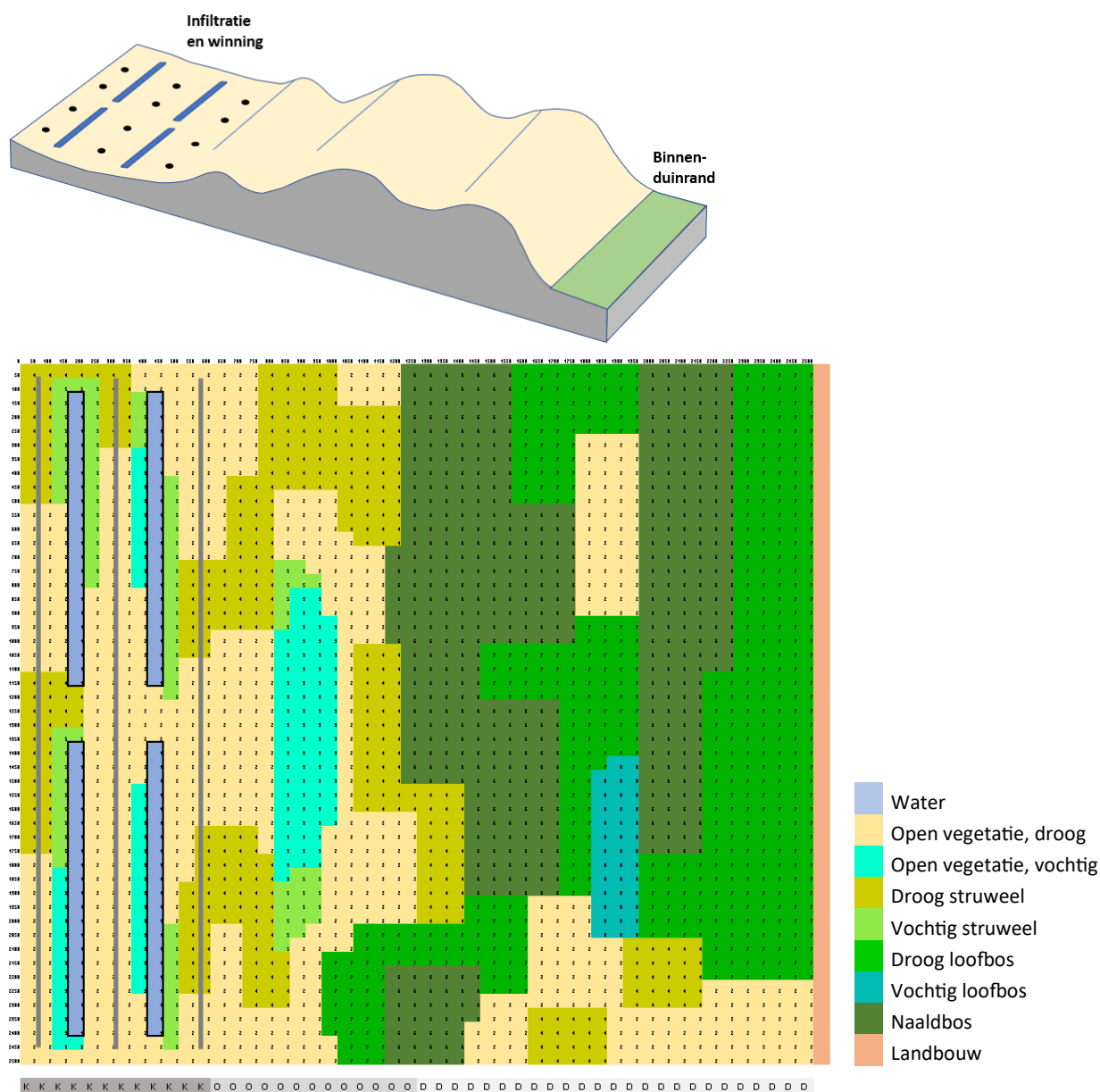
Figuur 2.4: Ontwerp fictief gebied voor het hoge zandgronden-winningstype (boven=hoog, onder=laag/beekdal). De zwarte vierkanten geven de locatie van de grondwaterwinning met daar omheen het grondwaterbeschermingsgebied en het intrekgebied.



Figuur 2.5: Grondwatertrappen voor het hoge zandgronden-winningstype (boven=hoog, onder=laag/beekdal)(GT II-VIII). De grijze en groene cirkels geven respectievelijk de locatie van bebouwde gebieden en natuurgebieden. De zwarte vierkanten geven de locatie van de grondwaterwinning met daar omheen het grondwaterbeschermingsgebied en het intrekgebied.

2.3.2 Duinwaterwingebieden

Figuur 2.6 geeft het ontwerp voor het fictieve gebied in de duinen. Het gebied is 2.5 bij 2.5 km groot, en omvat de zone vanaf het midden van een infiltratiegebied (links) tot aan de landbouwgebieden aan de binnenduinrand (rechts). De landwaartse zone wordt gedomineerd door (aangeplant) loof- en naaldbos. Richting het midden van het duingebied komt meer open duinvegetatie en struweel voor. Net achter het infiltratiegebied ligt een kleine vochtige duinvallei. Het midden van het duin rond het infiltratiegebied is kalkrijk; naar het oosten toe is de ondergrond dieper ontkalkt.



Figuur 2.6: Ontwerp fictief gebied voor het (binnen)duingebied. Links in het gebied ligt een infiltratiegebied met infiltratieplassen (blauw, omrand) en winstrangen of -drains (grijze lijnen). De rechterrand wordt gevormd door de duinrand met landbouwgebied. De kolom onder geeft de mate van ontkalking: kalkrijk (K), ondiep ontkalkt (O) en diep ontkalkt (D).

3 Revitaliseringsmaatregelen

De eerste ambitie uit de nationale Bossenstrategie is het vergroten van het bosoppervlak. De tweede poot is het ‘revitaliseren’ van het bestaande bos. In dit hoofdstuk wordt een kort overzicht gegeven van wat revitalisering inhoudt en van resultaten uit recent onderzoek.

In veel van de Nederlandse bossen zijn al decennia tekenen van een achteruitgang in de boskwaliteit (de Vries et al., 2017; de Vries et al., 2019; van der Burg et al., 2014). De problemen zijn met name zichtbaar op de hoge en droge zandgronden, waar het merendeel van de bossen ligt. Door verzurende en vermestende depositie en een dominantie van verzurende (naaldboom)soorten is hier een trend veroorzaakt van bodemverzuring en verlies aan bosvitaliteit, die zich ook recent nog voortzet (de Vries 2019). Daarnaast worden verdroging en een eenzijdige bosstructuur als belangrijke factoren genoemd die op dit moment de kwaliteit en soortenrijkdom van droge bossen op de hoge zandgronden beperken, naast andere beperkingen zoals een hoge wildstand en invasieve exoten (LNV, 2020; Steenvoorden et al., 2021; Thomassen et al., 2020). In de (voormalig) vochtige bossen op de zandgronden, zoals langs beken en locaties waar water stagneert, spelen dezelfde knelpunten van verdroging, verzuring en vermeting. Hier zijn belangrijke problemen vaak een afname in grond- en oppervlaktewaterinvloed en versnippering door het kleine oppervlak (van der Burg et al., 2016b). De status van duinbossen is recent minder onderzocht dan bossen in het binnenland. Ook in de duinen zijn een versnelde verzuring/ontkalking en vermeting door depositie, verdroging en het voorkomen van structuurarme niet-inheemse naaldbossen waarschijnlijk belangrijke knelpunten voor de boskwaliteit, maar de mate waarin deze een negatief effect hebben op verschillende duinbossen is niet goed bekend (Bobbink et al., 2022; Provincie Noord-Holland, 2017, 2018; Thomassen et al., 2020).

De ‘revitalisering’ van bossen, die in het beleid wordt nagestreefd, is erop gericht de invloed van deze knelpunten in de Nederlandse bossen te verminderen, en een ‘vitaler’ bos te creëren, dat bestand is tegen extremen en klimaatverandering en ook op lange termijn natuurwaarde en andere functies kan leveren (Thomassen et al., 2020). ‘Revitalisering’ is een verzamelterm voor een reeks aan maatregelen om deze kwaliteitsimpuls te bereiken. In dit rapport kijken we naar drie (groepen van) maatregelen, die de belangrijkste pijlers van revitalisering vormen: maatregelen voor bodemherstel, maatregelen in bosstructuur en -samenstelling, en maatregelen in hydrologie. Naast deze lokale maatregelen zal herstel voor een groot deel afhankelijk zijn van de randvoorwaarden op grote schaal – zoals de invloed van een hoge stikstofdepositie, klimaatverandering en structurele verdroging als gevolg van landgebruik en grondwateronttrekking (Thomassen et al., 2020). Deze grootschalige maatregelen nemen we hier niet mee, maar zijn wel van groot belang. Op basis van de huidige kennis over de effectiviteit van effectgerichte maatregelen is op dit moment geen herstelstrategie voorhanden die in zure bossen leidt tot vergaand ecologisch herstel en de negatieve ecologische effecten van een te hoge verzurende stikstofdepositie kan mitigeren. Hierdoor is voor een groot deel van de bestaande bossen zeer lastig te duiden wat toekomstige revitaliseringsmaatregelen gaan bijdragen aan ecologisch herstel. Voor herstel van natte en vochtige bossen is mogelijk met behulp van vernattingmaatregelen wel herstel mogelijk (Hommel et al. 2016a+b).

3.1 Maatregelen voor bodemherstel

Zoals beschreven is in veel van de Nederlandse bossen, met name de zure bossen op de hoge en droge zandgronden, sprake van een doorgaande trend van bodemverzuring en uitspoeling van basen (de Vries et al., 2019). De zure condities leiden tot een remming van het bodemleven en de afbraak van organische stof. Dit werkt door in een onbalans in de beschikbaarheid van nutriënten voor de bomen en voor andere bosflora en -fauna, met name een tekort aan mineralen en juist een (te) hoge stikstofbeschikbaarheid (de Vries et al., 2019; Desie et al., 2020). Deze nutriëntenonbalans wordt in verband gebracht met een verhoogde gevoeligheid van bomen voor

droogte-extremen, en wordt gezien als belangrijke factor in de recent opgetreden sterfte van eiken (de Vries et al., 2019; Desie et al., 2020; van den Berg et al., 2021). De degradatie van de bodem en bomen werkt ook door op andere bosflora en -fauna (Bloem et al., 2022a; Bloem et al., 2022b; de Vries et al., 2019; Desie et al., 2020). Door vergaande verwerking van de makkelijk verweerbare mineralen als gevolg van de verzurende depositie van afgelopen is de buffercapaciteit van de bodem sterk verlaagd en kan bij de huidige zuurdepositie nog geen herstel van minder zure condities optreden (Bergsma et al. 2016).

Twee belangrijke maatregelen die worden genoemd voor het herstel van bosbodems zijn het toepassen van kalk/dolomiet of steenmeel, en het inbrengen van 'rijkstrooiselsoorten'. Bij toepassing van kalk of steenmeel worden direct basen aan de bodem toegevoegd. Bij rijkstrooiselsoorten gaat het om het bijmengen van soorten met strooisel dat relatief veel basen bevat en makkelijker afbreekt dan strooisel van bijvoorbeeld naaldbomen of eiken; veel genoemde soorten zijn bijvoorbeeld vogelkers, linde, esdoorn en hazelaar (Desie et al., 2020). Het idee is dat toevoeging van soorten met rijker strooisel zorgt voor een actiever bodemleven, snellere strooiselafbraak en diepere menging van organische stof, waardoor de verzuring vertraagt, nutriënten sneller circuleren en basen beter in het systeem worden vastgehouden (Desie et al., 2020). Het bijmengen van rijkstrooiselsoorten wordt zowel genoemd als maatregel om bestaande verzuringstrends te *vertragen*, als om de basenstatus van de bodem daadwerkelijk te *verhogen*. In het laatste geval is het idee dat de rijkstrooiselsoorten basen uit de diepere ondergrond omhoog brengen naar de ondiepe bodem ('kalkpompen') (Bobbink et al., 2022; van Delft, 2019).

Het toepassen van kalk of steenmeel is tot nu toe nog vooral voorgesteld voor bossen op hoge, droge zandgronden. Het bijmengen van rijkstrooiselsoorten wordt echter ook voorgesteld in vochtige bossen op de zandgronden (van der Burg et al., 2016b) en in duinbossen (Huiskes et al., 2009; van Delft, 2019). In het laatste geval kan ook het inwaaien van kalkrijk zand aan de zeezijde en vanuit verstuiwingen in het duin lokaal bijdragen aan kalkrijkere bodems (Huiskes et al., 2009) (Aggenbach et al. 2018).

De toepassing van kalk en steenmeel zijn recent experimenteel onderzocht. Bobbink et al. (2018) bespreken de resultaten van een bekalkingsproef bij Harderwijk die in 1985-1986 is opgezet en sindsdien is gemonitord. Daarnaast is in 2016 op de Veluwe en in het Mastbos bij Breda een proef gestart met de toepassing van steenmeel (de Vries et al., 2019). Uit deze onderzoeken kwamen de volgende effecten naar voren:

- Bekalking leidde tot een duidelijke verhoging in de basenverzadiging van de bodem, die ook langdurig aan heeft gehouden (na 30 jaar nog steeds effect) (Bobbink et al., 2018). Ook in het experiment met steenmeel was na drie jaar een duidelijke verbetering van de basenstatus te zien, hoewel het effect op de pH maar zeer klein was.
- In de bekalkingsproef waren, ook na relatief lange tijd, nog duidelijke verschuivingen te zien in de afbraak van organische stof en het bodemleven (Bobbink et al., 2018). In de steenmeelexperimenten leidde de verhoging van de basenverzadiging tot een betere afbraak van organische stof en meer nitrificatie (de Vries et al., 2019). Er werd een toename in groei van fijne wortels en regenwormen geobserveerd, maar nog geen herstel van mycorrhiza's en ander bodemleven (Bloem et al., 2022a).
- De toepassing van steenmeel was na drie jaar terug te zien in de bladchemie van de eikenbomen, met een hoger basengehalte en lager N-gehalte. Op de vitaliteit van de bomen (diktegroei en bladbezetting) werden nog geen significante effecten geobserveerd (de Vries et al., 2019).
- De bekalkingsproef liet zien dat de verhoogde beschikbaarheid van nutriënten als gevolg van bekalking leidde tot meer ondergroei, waarbij onder hoge kalkgiften de vegetatie sterk verruigde (Bobbink et al., 2018). In de steenmeelproef zijn de effecten op overige bosflora en -fauna nog weinig onderzocht. Wel suggereerde het onderzoek een verbetering in de verteerbaarheid van de eikenbladeren die mogelijk al voordeel leverde voor bladetende rupsen (de Vries et al., 2019), wat wijst op doorwerking van de maatregelen hoger in de voedselketen. Hierover is echter nog weinig bekend.
- Mogelijke risico's van toepassing van kalk of steenmeel zijn een verruiging van de vegetatie bij een te hoge toepassing, mogelijke fosfortekorten op zeer arme bodems, en een risico op verlies van waardevolle soorten

van zure systemen of afbraak van organische lagen (Bloem et al., 2022a; Bobbink et al., 2018; de Vries et al., 2019).

Naast bekalking en steenmeeltoepassing is recent onderzoek gedaan naar de effecten van rijkstrooiselsoorten. Metingen in Nederlandse en Vlaamse bossen lieten zien dat bij eenzelfde uitgangssituatie (zandbodem) de aanplant van rijkstrooiselsoorten kan leiden tot een zeer geringe betere buffer- en bodemstatus dan soorten met verzurend strooisel (Desie et al., 2020). Onder bospercelen met rijker strooisel vonden de onderzoekers een hogere basenverzadiging en iets hogere pH, een dunnere strooisellaag en meer regenwormen. Deze positieve effecten treden vooral op lemige zandbodems en bij een flink aandeel rijkstrooisel soorten in de boomlaag (Desie et al., 2020; van den Berg et al., 2021). Dit is relevant voor locaties waar nieuw bos wordt ontwikkeld. Juist voormalige landbouwgronden zijn immers vaak nog goed gebufferd door bekalking, en hier kan een menging van rijkstrooiselsoorten resulteren in een langdurig rijker en mogelijk vitaler bos (van den Berg et al., 2022). In hoeverre bijmenging van rijkstrooiselsoorten voor herstel kan zorgen in bestaande bossen die al gedeeltelijk zijn verzuurd is nog minder duidelijk. Voorbeelden en eerste onderzoeken suggereren dat rijkstrooiselsoorten ook in menging met andere soorten kunnen leiden tot effecten op bodemeigenschappen en basenstatus, maar de onzekerheid is hier nog groot (Desie et al., 2020; van den Berg et al., 2021). Rijkstrooiselsoorten hebben waarschijnlijk vooral nut op plekken waar de ondergrond binnen enige diepte nog redelijk gebufferd is (Bloem et al., 2022b; Desie et al., 2020; Nyssen et al., 2016; van Delft, 2019).

Beide maatregelen, basentoediening en toepassing van rijkstrooiselsoorten, zijn nog experimenteel en de voordelen en risico's zijn nog niet goed bekend. Toch wordt aanbevolen om door te gaan met de experimentele toepassing vanwege de grote urgentie van de problematiek (Bloem et al., 2022b; Desie et al., 2020; Thomassen et al., 2020). De Bosgroepen ontwikkelden recent een 'beslisboom revitalisering' (Bloem et al., 2022b) waarin voor verschillende situaties maatregelen tegen verzuring en bosdegradatie worden afgewogen. Daarbij kan het in de praktijk nodig blijken om verschillende bodemverbeterende maatregelen met elkaar te combineren, dus een combinatie van steenmeel met rijkstrooiselsoorten, of bijvoorbeeld extra toepassing van kalk of introductie van bodembiota (Bloem et al., 2022a; Bloem et al., 2022b).

De resultaten van bestaande onderzoek naar steenmeel en rijkstrooiselsoorten zijn tot nu toe dus voorzichtig positief, en laten zien dat bodemverbeterende maatregelen, zo nodig in combinatie, lokaal kunnen leiden tot enige verbetering in de basenhuishouding en bodemkwaliteit van deels verzuurde bossen, hoewel de grootte van de effecten op langere termijn nog zeer onzeker zijn. Vooralsnog zijn er nog nauwelijks gunstige effecten waargenomen op het voorkomen van kenmerkende flora en fauna. Waar deze maatregelen succes hebben, zou dit niet alleen door kunnen werken op de biodiversiteit van de bossen, maar in potentie ook op grondwateraanvulling en grondwaterkwaliteit, door mogelijke veranderingen in de vochtbeschikbaarheid en bodemstructuur, verandering in de vegetatiestructuur en veranderingen in chemische omzettingen in de bodem. Deze effecten worden in hoofdstuk 5 besproken.

3.2 Maatregelen in bosstructuur en -samenstelling

Bij deze groep maatregelen gaat het om aanpassingen in bosbeheer, gericht op een grotere diversiteit in soorten, meer variatie in leeftijd met ook oude en dode bomen, en diversiteit in structuur met zowel gesloten als meer open bos (Nyssen & Wijdevén, 2019; Thomassen et al., 2020; Vandekerckhove, 2019).

Qua soortssamenstelling zijn veelgenoemde maatregelen het introduceren van rijkstrooiselsoorten binnen armere bostypen en het gedeeltelijk omvormen van naaldbossen naar loofbos. Aangezien Nederland grote oppervlaktes aan vrij uniforme, vaak exotische naaldhoutplantages kent, kan een gedeeltelijke omvorming mogelijk bijdragen aan de bosdiversiteit en -natuurwaarde, en mogelijk ook het tegengaan van verzuring en verdroging. Ook (oudere) naaldbossen kunnen echter van grote waarde zijn voor bepaalde typische bossoorten, met name paddenstoelen (NMV, 2010; Nyssen & Wijdevén, 2019; OBN, n.d.; van den Berg et al., 2022) en vogels. Een stap verder is het

introduceren van droogte- en warmtetolerante, ‘klimaatrobuuste’ soorten. Ondanks de grote onzekerheid wordt wel aangeraden hiermee verder te experimenteren (Thomassen et al., 2020). Een grotere variatie in boomsoorten leidt in theorie tot een grotere diversiteit in andere bossoorten, aangezien veel flora- en faunasoorten van bossen geassocieerd zijn met specifieke boomsoorten (NMV, 2010; Nyssen & Wijdeven, 2019). Daarnaast is de verwachting dat een breder soortenpalet het bos veerkrachtiger maakt voor verstoringen zoals extreem weer en ziektes (Thomassen et al., 2020).

Wat bosstructuur betreft wordt in het algemeen aangeraden om te streven naar een gevarieerde bosstructuur met meer oude en dode bomen. Veel West-Europese bossen zijn nog relatief jong, met een uniforme boomleeftijd. Vandekerckhove (2019) onderzocht de ontwikkeling van productiebossen na stoppen van beheer, waarbij het bos zich tot een dichter, natuurlijker bos ontwikkelt. Zij concluderen dat voor een goede ontwikkeling van bosbiodiversiteit zowel aaneengesloten, dichte boskernen zonder verstoring nodig zijn, als meer open bossen met kleinschalige verstoring of verjonging. Gesloten bossen met weinig verstoring en een bosmicroklimaat zijn van belang voor veel typische boskernsoorten, variërend van schimmels en insecten tot vaatplanten en vogels; hieronder zijn juist veel zeldzame soorten (Nyssen & Wijdeven, 2019; van den Berg et al., 2022; Vandekerckhove, 2019). Bossoorten die meer licht of dunnere strooisellagen nodig hebben zijn afhankelijk van opener bos waar enige verstoring plaatsvindt; zones met dit type bos zouden aan de randen van boskernen gecreëerd kunnen worden (Vandekerckhove, 2019).

Ook in duinbossen kan de kwaliteit waarschijnlijk verbeteren door meer structuurvariatie, en wordt vaak aanbevolen om te werken naar een (lokaal) opener bos en/of bos met meer open plekken en overgangen (OBN, n.d.; Provincie Noord-Holland, 2017). Daarnaast wordt ook in de duinen gestreefd naar een (gedeeltelijke) omvorming van naaldbos naar loofbos (Provincie Noord-Holland, 2017, 2018). Veel duinbossen zijn op dit moment in een ontwikkeling van natuurlijke veroudering, waarbij de bossen vaak vanzelf al waardevoller en structuurrijker worden. Ook ontwikkelt zich op sommige plekken waardevol nieuw bos door spontane successie (Min. LNV, 2008; Provincie Noord-Holland, 2017, 2018). Daarnaast gebeurt de omvorming van naald- naar loofbos in de duinen deels spontaan door het afsterven van uitheemse dennensoorten (Provincie Noord-Holland, 2017, 2018). Revitaliseringsmaatregelen in duinbossen kunnen gericht zijn op de ontwikkeling van structuurrijker bos en het stimuleren van de omvorming naar loofbos. Specifiek voor de duinbossen maakt het verwijderen van exoten, met name Amerikaanse vogelkers, ook vaak onderdeel uit van maatregelen in bosstructuur (Huiskes et al., 2009; Provincie Noord-Holland, 2018).

3.3 Maatregelen in hydrologie

Bij deze groep maatregelen gaat het om het herstellen van hydrologische condities op locaties die van nature (tijdelijk) vochtig of nat waren en/of grondwatertoevoer of overstroming kenden. In veel van de (voormalige) vochtige en natte bossen in Nederland liggen rabatten of greppels, zowel in beekdalen als op plekken met stagnerend water of toestroming van grondwater hoger in het landschap (van der Burg et al., 2016b). Daarnaast is er vaak sprake van verdroging door drainage in de bredere omgeving. Voor bossen in laagtes of langs beken speelt vaak een afname van de kwelinvloed of overstroming een rol. Ook op plekken waar kwel of overstroming nog wel optreedt kunnen problemen zijn doordat de kwaliteit van dit water onvoldoende is (Brouwer et al., 2022; Smolders et al., 2021; van der Burg et al., 2014).

Maatregelen voor hydrologisch herstel kunnen bestaan uit het dempen/ verondiepen of opstuwen van de grotere ontwateringsmiddelen, het verwijderen van detailontwatering binnen bossen, of, waar mogelijk, het aanpassen van drainage in omringend landbouwgebied. Rond beken kan worden geplagd of kunnen in de beken maatregelen worden genomen om overstroming te stimuleren (van der Burg et al., 2016a; van der Burg et al., 2014). De hydrologie op grotere schaal is vaak moeilijker te beïnvloeden, wat het herstel van vochtige bossen kan beperken.

De effecten van vernattingsmaatregelen in bossen zijn voor een reeks voorbeeldgebieden bijeengebracht door van der Burg et al. (2014). Het verminderen of verwijderen van drainage leidde meestal tot een duidelijke stijging in de grondwaterstanden van enkele decimeters (~10-50 cm); soms lukte het door de maatregelen de grondwaterinvloed of overstroming te herstellen. De effecten waren afhankelijk van de mate waarin de ontwatering werd aangepakt en de topografie (van der Burg et al., 2016a; van der Burg et al., 2014).

In de onderzochte bossen leidde de vernatting vaak tot veranderingen in de vegetatie richting een vochtiger bostype (van der Burg et al., 2016a; van der Burg et al., 2014). Op een enkele locatie waar grondwaterinvloed werd hersteld waren tekenen van een verbeterde basenrijkdom, een actiever bodemleven en meer basenminnende soorten in de ondergroei. Op sommige andere locaties trad eutrofiëring en verruiging op of stierven bestaande bomen door sterke en snelle vernatting (Brouwer et al., 2022; van der Burg et al., 2014). Alles bij elkaar is het succes van bosvernattingsprojecten nog variabel, afhankelijk van de invloed van basenrijk grondwater, de bodem en de schaal waarop maatregelen kunnen worden genomen (Brouwer et al., 2022; van der Burg et al., 2014).

Over de status van (voormalig) vochtige bossen in de duinen is weinig bekend (Brakkee et al., 2023; Min. LNV, 2008). In veel duingebieden was halverwege de 20^e eeuw sprake van een zeer sterke verdroging door drinkwaterwinning, peilverlaging in de binnenduintrand en polders en bosaanplant waar ook vochtige bossen waarschijnlijk sterk onder hebben geleden. Door actieve infiltratie en vernattingsmaatregelen is in en rond duinwaterwinningen een herstel van de waterhuishouding ingezet; de effecten hiervan op vochtige bossen zijn echter niet goed bekend (Min. LNV, 2008). Een analyse van vegetatiekarteringen in vijf duinwaterwingebieden (Brakkee et al., 2023) liet wisselende trends zien in het oppervlak van vochtige bossen in de afgelopen decennia, waarbij vochtige bossen meestal een zeer klein oppervlak uitmaken ten opzichte van droge duinbossen. Voor een deel van de vochtige duinbossen laat de kwaliteit bovendien nog te wensen over (Min. LNV, 2008; Provincie Noord-Holland, 2018). Wel hebben vochtige bossen zich lokaal uitgebreid door vernattingsmaatregelen. Daarnaast zijn door successie in natte duinvalleien lokaal nieuwe vochtige bossen ontstaan (Brakkee et al., 2023; Min. LNV, 2008; Provincie Noord-Holland, 2018). Daarmee zijn zulke bossen een van de weinige voorbeelden in Nederland die door natuurlijke successie zijn ontstaan.

Naast herstel van vochtige condities in bestaande bossen is er veel interesse in het creëren van nieuw vochtig bos, bijvoorbeeld langs beken of in laagtes in het landschap (LNV, 2020; Possen et al., 2021; Smolders et al., 2021). Juist vochtige bossen zijn in Nederland en op Europese schaal zeldzaam en kunnen een grote biodiversiteit herbergen (Thomassen et al., 2020; van den Berg et al., 2022). Bovendien kan omvorming van landbouw naar een natuurfunctie juist in lage delen van het landschap samengaan met het verminderen van drainage, en daarmee potentieel bijdragen aan het vasthouden van water in het landschap en bijvoorbeeld waterberging (Possen et al., 2021; Smolders et al., 2021).

4 Scenario's bosmaatregelen: methode

4.1 Ruimtelijke scenario's bosuitbreiding en -revitalisering

4.1.1 Scenario's

Voor de twee ontworpen fictieve gebieden, één voor een freatische winning op de hogere zandgronden en één voor een duinwaterwinning in de duinen, bekijken we de effecten van verschillende ruimtelijke scenario's van bosuitbreiding en -revitalisering. De scenario's hebben als doel om inzicht te geven in welke landschapsfactoren belangrijk zijn om bosmaatregelen optimaal in te passen in een concreet landschap, en zijn vooral verkennend bedoeld.

Voor het *hoge zandgronden*-winningstype kijken we naar scenario's van bosuitbreiding op verschillende posities in het landschapsgradiënt, al dan niet in combinatie met vermindering van resterende drainage. Zoals beschreven in 2.2.2 en in van der Burg et al. (2016b) is in veel (voormalig) vochtige delen van bossen nog steeds drainage aanwezig, zowel in beekdalen als hoger op het gradiënt. Ook bekijken we een scenario waarin een complete set aan revitaliseringsmaatregelen wordt uitgevoerd. Bij elkaar gaat het om de volgende scenario's:

- 1 Bosaanplant (5% van het studiegebied) op landbouwgrond hoog in het landschap
- 2 Bosaanplant op landbouwgrond hoog in het landschap met reductie van drainage
- 3 Bosaanplant op natuurgrasland hoog in het landschap (met reductie van drainage)
- 4 Bosaanplant op landbouwgrond laag in het landschap
- 5 Bosaanplant op landbouwgrond laag in het landschap met reductie van drainage
- 6 Bosaanplant op natuurgrasland laag in het landschap (met reductie van drainage)
- 7 Revitalisering: een combinatie van hydrologische maatregelen, aanpassingen in bosbeheer en soortensamenstelling (omvorming helpt van het naaldbos naar loofbos), en maatregelen gericht op tegengaan van verzuring.

De effecten van veranderingen in landgebruik en drainage op de grondwateraanvulling en -kwaliteit worden semi-kwantitatief ingeschat. Daarvoor zijn de aannames gebruikt zoals gegeven in Tabel 4.1. De effecten van revitaliseringsmaatregelen worden besproken op basis van literatuur.

Voor de *duingebieden*, waar de nadruk op natuurkwaliteit ligt, kijken we naar de volgende scenario's:

- 1 Revitalisering: aanpassingen in bosbeheer en soortensamenstelling (omvorming helpt van naaldbos aan de zeezijde van het bestaande bosareaal naar loofbos) en maatregelen gericht op tegengaan van verzuring.
- 2 Gedeeltelijke omvorming van bos naar open duinvegetatie (omvorming 20% van naaldbos aan zeezijde).

Tabel 4.1: Toegepaste aanpassingen in landgebruik en hydrologie voor de kwantitatieve verkenning van de scenario's (hoge zandgronden).

Scenario	Locatie nieuw bos (5% van studiegebied)	Drainage-aanpassing
1	Op landbouwgrond in hoge deel landschap; als bufferzones, corridors en in stedelijk gebied	
2		Verwijdering drainage in nieuw bos
3	Op bestaand natuurgrasland en in bufferzones rond natuur in hoge deel	Verwijdering drainage in nieuw bos
4	Op landbouwgrond in lage deel landschap; als bufferzones, corridors en in stedelijk gebied	
5		Verwijdering drainage in nieuw bos; bij intensieve drainage naar laagintensief
6	Op bestaand natuurgrasland en in bufferzones rond natuur in lage deel	Verwijdering drainage in nieuw bos; bij intensieve drainage naar laagintensief
7	Omvorming de helft van bestaand naaldbos naar loofbos	Verwijdering alle drainage in bestaand bos en aangrenzende natuur; verlaging drainage (1 intensiteit lager) in bufferzone rond bestaand bos

4.1.2 Oppervlak en locatie nieuw bos (hoge zandgronden)

De landelijke Bossenstrategie formuleert de ambitie om het oppervlak bos met 10% te laten groeien, met 37.000 hectare (LNV, 2020). Dit komt op landelijke schaal neer op ongeveer 1% van het landoppervlak. De verschillende provincies op de hoge zandgronden hebben de ambities in meer of minder detail in regionale plannen uitgewerkt. De provincie Noord-Brabant heeft zich bijvoorbeeld als doel gesteld om tot 2030 13.000 ha bos te realiseren (2.7% van het oppervlak) (Provincie Noord-Brabant, 2020). Voor de provincie Gelderland liggen plannen voor 1700 ha (0.3%) (Provincie Gelderland, 2020). Provincie Drenthe noemt 3700 ha (1.4%) en provincie Utrecht 1500 ha (1%) . In de landelijke en provinciale bossenstrategieën worden vooral kansen gezien voor nieuw bos rondom of grenzend aan bestaand bos of andere natuur, als bufferzone of als verbinding tussen natuurgebieden (m.n. binnen NNN) (Thomassen et al., 2020). Ook beekdalen en stedelijke gebieden worden als kansrijke locaties aangemerkt (LNV, 2020).

Om de effecten van bosuitbreiding duidelijk in beeld te krijgen, is in de scenario's uitgegaan van een ambitieuze bosuitbreiding van 5% van het oppervlak van het hoge zandgronden-studiegebied. In de praktijk zal dit voor de meeste wingebieden een stuk minder zijn. Omdat de effecten van de bosuitbreiding op een eenvoudige, lineaire manier zijn uitgewerkt, zullen de uitkomsten eenvoudig te schalen zijn naar andere oppervlaktes. In alle scenario's wordt het nieuwe bos vooral als strook rond bestaande natuur en als verbindingszone aangelegd, met ook kleinschalige bosontwikkeling bij stedelijk gebied.

4.1.3 Landschapscondities en bostypen

Voor de inschatting van de grondwateraanvulling en uitspoeling van vervuilende stoffen op de *hoge zandgronden* wordt onderscheid gemaakt tussen vegetatie- en landgebruikstypen op droge en vochtigere locaties op basis van de grondwatertrap. Daarbij zijn vegetaties en landbouw op grondwatertrap 7-8 als 'droog' aangemerkt, 5-6 als 'middel' en 2-4 als 'vochtig'. Hierbij houden we alleen een eenvoudig onderscheid aan tussen loof- en naaldbos, waarbij ervan uit wordt gegaan dat bij bosuitbreiding telkens naar loofbos wordt gestreefd en al het nieuwe bos dus uit loofbos zal bestaan. Voor de scenario's voor het *duingebied* is voor de verschillende vegetatietypen een droge en een vochtige variant aangehouden, uitgaand van een representatieve verhouding in het duinlandschap (zie 2.3.2).

Voor het onderdeel biodiversiteit worden in meer detail bostypen toegekend aan de locaties met bos in de fictieve landschappen. Dit wordt beschreven in par. 0.

4.2 Effecten van bosuitbreiding en -herstel op waterfuncties en natuur

4.2.1 Effecten waterkwantiteit: grondwateraanvulling

De grondwateraanvulling is de hoeveelheid water die infiltreert en de waterverzadigde zone bereikt. Het effect van bosuitbreiding op de waterkwantiteit is in beeld gebracht aan de hand van de geschatte grondwateraanvulling. De hoeveelheid water die op een bepaalde locatie het grondwater aanvult hangt af van de totale verdamping, de oppervlakkige afstroming en buffering in de onverzadigde zone. Hier kijken we enkel naar de grondwateraanvulling als de jaarlijkse neerslag min de totale werkelijke verdamping; dit is voor veel locaties op jaarbasis een goede indicatie.

Een belangrijk effect van het vervangen van lage vegetatie of gewassen naar bos is de in het algemeen verhoogde verdamping door bossen. Hierdoor komt netto minder water beschikbaar om het grondwater aan te vullen. Uit recente en oudere literatuur zijn meet- en modeldata verzameld van de jaarlijkse werkelijke verdamping van verschillende bostypen, korte natuurtypen, landbouwgrond en stedelijk gebied (zie Bijlage III.I). Op basis van dit literatuuroverzicht zijn voor ieder landgebruiks- en vegetatietypen versimpelde, gemiddelde waarden berekend voor de jaarlijkse werkelijke verdamping (Tabel 4.2). In stedelijk gebied wordt een groot deel van de neerslag vaak met riolering afgevoerd; voor stedelijk gebied is als indicatie een grondwateraanvulling van 200 mm/j aangehouden (Stuurman et al., 2008). Behalve van het vegetatietype is de verdamping sterk afhankelijk van onder andere de vochtbeschikbaarheid en de dichtheid van de vegetatie, die weer samenhangt met het beheer en de voedselrijkdom. In de vereenvoudigde verdampingswaarden is voor alle vegetatietypen onderscheid gemaakt in een droge en vochtige/natte vorm, waarbij de vochtige vorm meer zal verdampen. In de berekeningen is uitgegaan van een 'vochtig' type bij grondwatertrap 2-4, 'middel' bij 5-6, en 'droog' bij 7-8. Opgemerkt moet worden dat het hier gaat om zeer vereenvoudigde verdampingsgetallen, waarbij waarden uit studies uit verschillende perioden en met verschillende methodes zijn samengevoegd en geen rekening wordt gehouden met variatie van het bodemprofiel. Daarbij kennen ook de verdampingsmetingen zelf een onzekerheid die geschat wordt op 20-40%, afhankelijk van de methode (Caljé et al., 2014; Verhagen et al., 2014).

Voor duinvegetaties zijn verdampingswaarden gemeten met lysimeters bij Castricum (waaronder duinbos) van de jaren 1940 t/m 1990 (Stuyfzand, 1993) en in de Amsterdamse Waterleidingduinen in de jaren 80 (Stuyfzand, 1993). Daarnaast zijn door Voortman et al. (2015) lysimetermetingen gedaan van verdamping van droge stuifzandvegetaties bij Soestduinen. Een verzameling van deze gegevens is gegeven in bijlage IV. Tabel 4.2 geeft vereenvoudigde gemiddelde waarden die zijn gebruikt in de berekeningen.

Tabel 4.2: Vereenvoudigde waarden voor de jaarlijkse werkelijke verdamping van vegetatietypen. Waarden zijn gemiddelden, minimum en maximum van uit literatuur verzamelde meet- en modelgegevens (zie Bijlage III.I). Type 'Middel' (gemengd droog/vochtig) is berekend als het gemiddelde van het droge en vochtige/natte type. *Voor vochtig naaldbos waren geen gegevens beschikbaar. Als schatting is een berekening van de potentiële verdamping uit Verhagen et al. (2014) gebruikt; dit is mogelijk een overschatting. **Voor loofbos is de range ingeschat als het gemiddelde plus en min 100 mm/j; om in de scenario's een voldoende onzekerheidsmarge aan te houden. Merk op dat data zijn geaggregeerd die zijn verzameld met verschillende methodes en over verschillende periodes.

Vegetatie	Vochtcondities	n	ETa gem. afgerond	min	max
Agrarisch grasland	Droog	2	540	520	559
	Vochtig/nat	3	570	548	580
	Middel		550	534	570
Akkerbouw	Middel	12	470	253	580
Natuurgrasland	Droog	4	370	333	450
	Vochtig/nat	4	580	506	655
	Middel		480	419	552
Heide	Droog	2	420	410	430
	Vochtig/nat	2	480	460	502
	Middel		450	435	466
Naaldbos	Droog	4	660	580	730
	Vochtig/nat*	1	820	818	818
	Middel		740	699	774
Loofbos	Droog	2	560	460**	660
	Vochtig/nat	2	600	500	700
	Middel		580	480	680
Stedelijk	Middel		GWA 200	GWA 150	GWA 300

Tabel 4.3: Vereenvoudigde jaarlijkse verdamping voor duinvegetaties op basis van literatuurgegevens. Voor basisgegevens zie bijlage IV.

Vegetatie	Werkelijke verdamping, simpel [mm/j]	Min	Max
Open duinvegetatie, droog	360	197	499
Open duinvegetatie, vochtig	510	382	582
Struweel, droog	460	410	582
Struweel, vochtig	530	476	582
Loofbos, middel/droog	520		
Naaldbos, middel/droog	680	623	679

4.2.2 Effecten waterkwantiteit: 'voorraadeffect'

Een verandering in de verdamping (grondwateraanvulling) zal niet overal evenveel doorwerken op de grondwaterstanden en -voorraden. De doorwerking hangt af van de positie in het landschap en de mate waarin een locatie gedraineerd is. Op sterk gedraineerde locaties laag in het landschap wordt extra grondwateraanvulling snel afgevoerd naar het oppervlaktewater, terwijl een vermindering in aanvulling ook relatief weinig op de grondwaterstand doorwerkt door het hoge oppervlaktewaterpeil. Op locaties hoog in het landschap, verder weg van drainage en waterlopen, worden veranderingen in grondwateraanvulling niet gebufferd door het oppervlaktewatersysteem, en werken deze sterker door op de grondwaterstanden en de grondwateraanvulling op landschapsschaal (Kraijenhoff van de Leur, 1958; Meinardi et al., 1998; van den Eertwegh et al., 2021; van Drecht,

1997). De mate waarin een verandering in grondwateraanvulling doorwerkt op grondwaterstanden is gerelateerd aan de drainageweerstand. De drainageweerstand geeft het verband tussen de oppervlaktewaterafvoer/drainage en de opbolling van het grondwater ten opzichte van het oppervlaktewaterpeil in een situatie met stationaire stroming, waarbij dus de drainage gelijk is aan de grondwateraanvulling. van der Gaast et al. (2006) hebben ruimtelijke kaarten gemaakt van geschatte drainageweerstand, op basis van een GIS-analyse van slootdichtheden, met de aanname dat de invloed van een sloot afneemt met de afstand volgens de spreidingslengte (Mazure). Ook door Bot (2011) wordt een overzicht gegeven van representatieve drainageweerstand voor verschillende grondwatertrappen en drainage-intensiteiten. Deze liggen in dezelfde ordegrootte als de waarden van Van der Gaast (2006). Op basis van deze gegevens en de analyse van drainagekenmerken in de landschapsgradiënten (Bijlage I.II) zijn vereenvoudigde waarden gekozen voor de drainageweerstand bij verschillende landschapsposities en landgebruik (Tabel 4.4).

Tabel 4.4: Drainage-intensiteit en vereenvoudigde drainageweerstand [dagen] op verschillende landschapsposities.

Landgebruik	Grondwatertrap/ landschapspositie	Drainage-intensiteit	Vereenvoudigde drainageweerstand [d]
Landbouw en bebouwd	7-8	1- Laagintensief	300
	5-6	2- Matig intensief/ gemengd	150
	2-4	3- Hoogintensief	50
Natuur	7-8, hoog in landschap	0- Afwezig	1000
	<7, hoog in landschap	1- Laagintensief	300
	<7, middenzone/ flank	0- Afwezig op 3/4 oppervlak	1000
		2- Matig intensief op 1/4 oppervlak	150
	<5, laag in landschap/ beekdal	0- Afwezig op 1/2 oppervlak	1000
		2- Matig intensief op 1/2 oppervlak	150

De doorwerking van bosuitbreiding en -herstelscenario's op de grondwaterstanden en -voorraden is op een indicatieve manier in beeld gebracht als de verandering in grondwateraanvulling [mm/d] maal de drainageweerstand [d]. Deze waarde ('voorraadeffect' in mm) kan niet direct als een watervolume of stijging van de waterstand worden geïnterpreteerd, maar geeft wel een indicatie of een groot of klein effect te verwachten is. Merk op dat de vaste drainageweerstand in Tabel 4.4 een zeer grove versimpeling zijn. In werkelijkheid kan de drainageweerstand zeker op grotere schaal niet als constante worden beschouwd, en zal de weerstand meestal afnemen als de grondwaterstand stijgt (van den Akker, 2014). Om de werkelijke effecten op grondwaterstanden in te kunnen schatten is een ruimtelijk grondwatermodel nodig.

4.2.3 Effecten waterkwaliteit: nitraatuitspoeling

Het landgebruik is van belangrijke invloed op de kwaliteit van het water dat naar het grondwater infiltreert. Op de Nederlandse hoge zandgronden is nitraat één van de belangrijke probleemstoffen voor de grondwaterkwaliteit, en is problematisch voor het bereiken van de KRW-doelen en voor veel freatische drinkwaterwinningen. Nitraatuitspoeling is daarbij indicatief voor de bredere effecten van met name landbouwgebruik op de grondwaterkwaliteit (van Loon & Fraters, 2016). De geschatte uitspoeling van nitraat wordt hier daarom als indicatie gebruikt voor de effecten op de grondwaterkwaliteit.

Voor de inschatting van de uitspoeling van nitraat uit de verschillende landgebruikstypen op verschillende landschapsposities gebruiken we de methode van van Loon en Fraters (2016). Hierin zijn op basis van data uit het Landelijk Meetnet Mestbeleid 'referentieconcentraties' berekend voor nitraatuitspoeling onder gras- en akkerland: dit is de nitraatconcentratie in het uitspoelingswater bij een grondwatertrap VIII. Dit gaf voor de periode 2010-2014 (de meest recente bekeken periode) een gemiddelde referentieconcentratie van 117 mg/l voor akkerbouw en 83

mg/l voor agrarisch grasland. De nitraatconcentratie in uitspoelingswater hangt af van de grondwaterstand, omdat onder natte condities meer nitraatreductie optreedt. Met de reductiefactoren in Tabel 4.5 kan de referentieconcentratie worden omgerekend naar een schatting van de nitraatconcentratie in uitspoelingswater voor verschillende grondwatertrappen.

Tabel 4.5: Nitraatreductiefactoren per grondwatertrap, Boumans et al. 1989 in van Loon (2016).

GT	II	II*	III	III*	IV	V	V*	VI	VII	VIII
Gem. nitraat-reductiefactor	0.05	0.05	0.8	0.31	0.43	0.5	0.48	0.65	0.83	1.00
Standaarddeviatie	0.09	0.09	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.04	0.07	0.09

De meest recente grootschalige metingen van nitraatuitspoeling onder natuur zijn die vanuit het Trendmeetnet Verzuring (TVM). Masselink et al. (2012) rapporteren een gemiddelde nitraatconcentratie in uitspoelend grondwater onder heide- en boslocaties op zandgronden van zo'n 20 mg/l in de periode 2009-2011. De nitraatconcentratie kan echter ruimtelijk en in de tijd sterk variabel zijn onder heiden (1 tot 27 mg N/l; Aggenbach et al. 2022). Onder bossen kan de uitspoeling ook veel hoger zijn. van Loon et al. (2019) hebben op basis van het TMV en een GIS-analyse een referentieconcentratie (dus bij GT VIII) van 34 mg/l berekend voor nitraatuitspoeling onder bos en heide. Deze kunnen met Tabel 4.5 worden omgezet naar schattingen per grondwatertrap. De nitraatuitspoeling onder natuurgebieden varieert zeer sterk (Masselink et al., 2012). Waarschijnlijk is de stikstofuitspoeling onder bos, met name naaldbos, een stuk groter dan onder lage vegetaties, doordat bossen meer stikstofdepositie opvangen uit de lucht en bij verzaaiing met stikstof de stikstoftoevoer uit de lucht niet meer kunnen vastleggen. Zo werd in 1990 in 150 boslocaties een gemiddelde concentratie van 30 mg/l nitraat gemeten onder de wortelzone (de Vries et al., 2017). De Jonge en Tietema (2000a) schatten met een model op basis van metingen uit 1999 in het Edese bos concentraties rond 40 mg/l nitraat in uitspoelingswater onder naaldbos, zo'n 20 mg/l voor loofbos en rond 10 mg/l onder heide. Deze getallen zijn nu waarschijnlijk echter niet meer representatief, omdat de nitraatconcentraties in uitspoelingswater onder natuur sinds begin jaren 90 sterk zijn afgenomen (Boumans et al., 2012). Vanwege het gebrek aan recente gegevens voor verschillende typen is voor alle natuur uitgegaan van de referentieconcentratie van 34 mg/l en is deze doorgerekend voor het effect van grondwatertrap. Nitraatuitspoeling onder stedelijk gebied is niet meegenomen.

Op deze manier geven we een versimpelde schatting van potentiële effecten van bosuitbreiding op de grondwaterkwaliteit. In werkelijkheid zal bij aanleg van nieuw bos voor veel meer stoffen de input veranderen, zoals bijvoorbeeld sulfaat en DOC, en het effect op uitspoeling afhangen van biochemische interacties in het ecosysteem en de bodem en hoe de cycli van diverse stoffen in elkaar grijpen. Het kappen van bos kan leiden toe tijdelijk (enkele jaren) verhoogde uitspoeling van nitraat (Gundersen et al. 2006).

4.2.4 Effecten natuurwaarde/biodiversiteit

De effecten van bosmaatregelen op de waterkwantiteit en -kwaliteit moeten worden afgewogen tegen de potentiële voordelen van de maatregelen voor de natuurwaarde. De "natuurwaarde" van een gebied is niet in één indicator samen te vatten. Thomassen et al. (2020) maken onderscheid in drie aspecten: verscheidenheid/biodiversiteit; kenmerkendheid (passendheid in de lokale natuurlijke condities); en natuurlijkheid (ruimte voor natuurlijke processen). Vanuit het natuurbeleid ligt meestal de nadruk op de biodiversiteit. Daarbij is zowel de soortendiversiteit op lokale schaal van waarde, als de bijdrage van een locatie of natuurstype aan de diversiteit op grotere schaal (voorkomen van zeldzame of typische soorten; zeldzaamheid van het natuurstype op nationale of Europese schaal). Daarnaast kan worden gekeken naar de 'functionele biodiversiteit', of in hoeverre verschillende niches en functies in het ecosysteem vervuld zijn (Nijssen et al., 2021; Thomassen et al., 2020; Vandekerckhove, 2019). De veerkracht van (bos)ecosystemen hangt ook af van de mate waarin natuur/bosgebieden voldoende groot en verbonden zijn (Nijssen et al., 2021; Thomassen et al., 2020; Vandekerckhove, 2019). In dit

onderzoek richten we ons op een indicatie van de biodiversiteit van soorten en op de voorkomende bostypen; daarnaast nemen we de landschappelijke samenhang kort mee.

Biodiversiteitsscores

Om voor de *hoge zandgronden*-situatie de biodiversiteitswaarde op verschillende landschapsposities in te schatten, maken we gebruik van de methode van Nijssen et al. (2021); in dat onderzoek is een inschatting gemaakt van de mogelijke biodiversiteitseffecten bij omvorming van korte natuurtypen naar bos. Op basis van literatuuronderzoek hebben zij voor verschillende vegetatietypen een biodiversiteitsscore opgesteld. Daarbij hebben ze voor verschillende aspecten van de biodiversiteit een score ingeschat (kwalitatieve score laag-hoog): voor de lokale soortenrijkdom voor verschillende soortgroepen; voor de unieke biodiversiteit, dus in hoeverre een vegetatietype zeldzame soorten herbergt; en voor het belang van het type op Europese schaal (Natura 2000) (zie Tabel 4.6). Daarbij hebben ze onderscheid gemaakt in matig en goed ontwikkelde vormen van de natuurtypen.

Voor dit onderzoek zijn de vegetatietypen van Nijssen et al. deels nog verder vereenvoudigd (schuingedrukte rijen in Tabel 4.6): goede en matig ontwikkelde vormen zijn tot één type gemiddeld (uitgaand dat in een landschap een mix aan goede en minder goed ontwikkelde vegetaties voorkomt); ook is voor korte natuurlijke vegetatie één gemiddelde waarde genomen, waarmee er vanuit wordt gegaan dat schrale en nutriëntenrijkere graslandtypen in het landschap in ongeveer gelijke mate voorkomen. Aan de vegetatietypen van de zandgronden en beekdalen zijn twee typen toegevoegd: het haagbeuken- en essenbos (lokaal relevant op de basenrijkere hoge zandgronden) en het Hoog- en Laagveenbos (lokaal relevant voor laagtes op de arme hoge zandgronden).

In de bosscenario's voor de hoge zandgronden zijn de vegetatietypen uit Tabel 4.6 toegewezen op basis van landschapspositie en grondwatertrap (Tabel 4.7) om de biodiversiteitsscores te berekenen.

Potentiële bostypen

Om een beeld te krijgen van welke typen bossen en bijbehorende soorten ontwikkeld zouden kunnen worden bij bosuitbreiding, zijn voor de hoge zandgronden-scenario's ook meer gedetailleerd 'potentieel natuurlijke bostypen' toegekend (van der Werf, 1991). Welke bostypen onder verschillende condities werkelijk 'natuurlijk' zijn of potentie hebben is niet eenvoudig aan te geven. Er zijn in Nederland immers nauwelijks natuurlijke referenties, en bovendien zouden in de huidige situatie bostypen kunnen ontstaan die in het verleden nooit zijn voorgekomen (Thomassen et al., 2020). Omdat hier het doel is om een eerste beeld te geven van de potentiële bostypen en -biodiversiteit zijn we uitgegaan van de 'potentieel natuurlijke bostypen' beschreven door van der Werf (1991). In van der Werf (1991) worden zo'n 20 bostypen ingedeeld en wordt aangegeven onder welke condities deze van nature te verwachten zijn. Ook worden typische sequenties van bostypen gegeven voor verschillende landschapsgradiënten in Nederland (zie Bijlage I). Op basis van deze gradiënten, in combinatie met informatie uit Runhaar (2010) en Possen et al. (2021) zijn voor de verschillende landschapsposities en grondwatertrappen representatieve potentiële bostypen toegewezen.

De typische bosgemeenschappen zullen op de hoge zandgronden waarschijnlijk verschillen tussen de armere en iets rijkere, meer lemige zandgronden (Nijssen et al., 2021; van der Werf, 1991). Volgens de Bosgroeiplaatstypenkaart van Bijlsma (Thomassen et al., 2020) (Figuur IV. VI) komen deze groeiplaatstypen op de hoge zandgronden gemengd in ruwweg gelijke delen voor. Daarom zijn twee varianten aangehouden: een voor de rijkere en een voor de armere zandgronden. Tabel 4.7 geeft de gebruikte toewijzing van bostypen voor het hoge zandgronden-gebiedstype.

Tabel 4.6: Biodiversiteitsscores voor vegetatietypen in relevante landschapstypen, ingeschat door Nijssen et al (2021). Voor de verschillende onderdelen zijn kwalitatieve scores ingeschat (1=net zo laag als conventionele landbouw, 5=zeer hoog) op basis van literatuuronderzoek.

Landschapstype	NNN-type		Vaaplanten	Mossen	Paddenstoelen & schimmels	Dagvlinders	Sprinkhanen & krekels	Broedvogels	Ongewervelden overig	Biodiversiteit algemeen	Biodiversiteit uniek	Europees belang
Regengevoede zandgronden, arm/ rijk, droog/ vochtig	N00.01	Agrarisch	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	N12.02m	Kruiden- en faunarijk grasland (matig)	2	1	1	1	2	1	2	1.4	1	1
	N12.02g	Kruiden- en faunarijk grasland (goed)	2	2	1	2	3	2	3	2.1	2	1
	N12.02	Kruiden- en faunarijk grasland (gemengd)	2	1.5	1	1.5	2.5	1.5	2.5	1.8	1.5	1
	N11.01	Droog schraalgrasland	3	3	4	4	4	3	5	3.7	4	5
	Laag - droog	Korte natuurlijke vegetatie, droog	2.5	2.3	2.5	2.8	3.3	2.3	3.8	2.8	2.8	3
	N15.02m	Dennen-, eiken- en beukenbos (matig)	3	3	3	1	1	3	3	2.4	2	3
	N15.02g	Dennen-, eiken- en beukenbos (goed)	4	5	5	3	2	4	5	4	4	3
	N15.02	Dennen-, eiken- en beukenbos (gemengd)	3.5	4	4	2	1.5	3.5	4	3.2	3	3
Beekdal-gronden	N00.01	Agrarisch	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	N12.02m	Kruiden- en faunarijk grasland (matig)	2	1	1	1	2	2	2	1.6	1	1
	N12.02g	Kruiden- en faunarijk grasland (goed)	2	2	2	2	2	3	3	2.3	2	1
	N12.02	Kruiden- en faunarijk grasland (gemengd)	2	1.5	1.5	1.5	2	2.5	2.5	1.9	1.5	1
	N10.02	Vochtig hooiland	4	4	3	4	3	4	4	3.7	4	5
	Laag - vochtig	Korte natuurlijke vegetatie, vochtig	3	2.8	2.3	2.8	2.5	3.3	3.3	2.8	2.8	3
	N14.01m	Rivier- en beekbegeleidend bos (matig)	3	4	3	2	1	3	3	2.7	3	5
	N14.01g	Rivier- en beekbegeleidend bos (goed)	4	5	4	2	1	5	4	3.6	4	5
	N14.01	Rivier- en beekbegeleidend bos (gemengd)	3.5	4.5	3.5	2	1	4	3.5	3.1	3.5	5
Vochtige-natte rijke zandgronden	N14.03m	Haagbeuken- en essenbos (matig)	3	3	3	2	1	3	3	2.6	3	3
	N14.03g	Haagbeuken- en essenbos (goed)	4	4	5	2	1	4	4	3.4	3	3
	N14.03	Haagbeuken- en essenbos (gemengd)	3.5	3.5	4	2	1	3.5	3.5	3	3	3

Landschapstype	NNN-type		Vaatplanten	Mossen	Paddenstoelen & schimmels	Dagvlinders	Sprinkhanen & krekels	Broedvogels	Ongewervelden overig	Biodiversiteit algemeen	Biodiversiteit uniek	Europees belang
Vochtige-natte arme zandgronden	N14.02m	Hoog- en laagveen-bos (matig)	3	4	3	2	1	3	3	2.7	3	4
	N14.02g	Hoog- en laagveen-bos (goed)	4	5	5	2	1	4	4	3.6	4	5
	N14.02	Hoog- en laagveen-bos (gemengd)	3.5	4.5	4	2	1	3.5	3.5	3.1	3.5	4.5

Tabel 4.7: Potentiële bostypen op verschillende locatietypen op de hoge zandgronden, op basis van (Possen et al., 2021; Runhaar, 2010; van der Werf, 1991).

Landschapstype	Landschapspositie	Grondwatertrap	Vegetatietype (Nijssen et al., 2021)	Potentieel bostype (van der Werf, 1991)
Rijke zandgronden	Hoog (bovenste 60%)	6-8	N15.02 Dennen-, eiken- en beukenbos	8 Droog wintereiken-beukenbos
		<6	N15.02 Dennen-, eiken- en beukenbos	7 Vochtig wintereiken-beukenbos
	Laag (onderste 40%)	6-8	N15.02 Dennen-, eiken- en beukenbos	8 Droog wintereiken-beukenbos
		5	N15.02 Dennen-, eiken- en beukenbos	7 Vochtig wintereiken-beukenbos
		3-4 (vochtig)	N14.03 Haagbeuken- en essenbos	18 Eiken-Haagbeukenbos
		1-2 (permanent nat)	N14.01 Rivier- en beekbegeleidend bos	23 Vogelkers-Essenbos 29 Elzenbroekbos
Arme zandgronden	Hoog (bovenste 60%)	6-8	N15.02 Dennen-, eiken- en beukenbos	6 Droog berken-zomereikenbos
		<6	N15.02 Dennen-, eiken- en beukenbos	7 Vochtig berken-zomereikenbos
	Laag (onderste 40%)	6-8	N15.02 Dennen-, eiken- en beukenbos	6 Droog berken-zomereikenbos
		4-5	N15.02 Dennen-, eiken- en beukenbos	7 Vochtig berken-zomereikenbos
		3	N15.02 Dennen-, eiken- en beukenbos	10 Elzen-eikenbos
		1-2	N14.01 Rivier- en beekbegeleidend bos	29 Elzenbroekbos

Voor de scenario's voor de *duingebieden* zijn potentiële habitat- en bostypen toegewezen op basis van de positie in het landschap, de vochtcondities en de ont kalkingsdiepte, op basis van van der Werf (1991) en Slings et al. (2012). Tabel 4.8 geeft de gebruikte indeling.

Tabel 4.8: Indeling van vegetatietypen voor de duingebieden onder verschillende condities. Op basis van van der Werf (1991) en Slings et al. (2012).

Vegetatie	Positie en ontkalkingsdiepte	Habitatype en bostype (van der Werf, 1991)
Bos	Middenduin, droog	H2180A Duinbossen, droog 11 Duin-eikenbos of 6 Berken-zomereikenbos of 19 Droog duin-berkenbos (bij veel dynamiek)
	Middenduin/binnenduin, vochtig	H2180B Duinbossen, vochtig 27 Moerasspirea-elzenbos of 20 Abelen-iepenbos
	Binnenduin (binnen 1 km van binnenduinrand)	H2180A Duinbossen, droog of H2180C Duinbossen, binnenduinrand 8 Droog wintereiken-beukenbos of 13 Gierstgras-beukenbos
Struweel	Droog	H2160 of H2170 Duindoorn- of kruipwilgstruwelen, droog
	Vochtig	H2160 of H2170 Duindoorn- of kruipwilgstruwelen, vochtig
Open	Droog, kalkrijk	H2130A Grijze duinen kalkrijk
	Droog, ondiep/ diep ont kalkt	H2130B Grijze duinen kalkarm
	Vochtig	H2190 Vochtige duinvalleien

Landschapscompositie

Om behalve de lokale biodiversiteit ook de landschappelijke robuustheid van de aanwezige natuur mee te wegen, is voor de scenario's tot slot gekeken naar de landschapscompositie (zie ook Nijssen et al. 2021). Voor drie aspecten zijn de effecten kwalitatief gescoord (toe- of afname);

- Grootte van aaneengesloten natuurgebieden. Grote natuurgebieden zijn beter bestand tegen randeffecten en verstoring.
- Verbondenheid van natuurtypen in het landschap, door directe corridors of 'stapstenen'. Waar natuurgebieden verbonden zijn kunnen soorten die aan deze typen verbonden zijn (open vegetatie of juist bos) beter door het landschap migreren.
- Aanwezigheid van gradiënten en overgangen tussen natuurtypen en locatiecondities. Veel soorten zijn afhankelijk van de aanwezigheid van verschillende natuurtypen (bijv. open en gesloten, nat en droog) op voldoende korte afstand van elkaar.

Het effect van revitaliseringsmaatregelen op de biodiversiteit is nog moeilijk in harde indicatoren te vatten. Naar veel revitaliseringsmaatregelen is nog maar op een beperkt aantal locaties onderzoek gedaan; met name de doorwerking van maatregelen op bosflora en -fauna is grotendeels nog onbekend een waarschijnlijk zeer locatie-afhankelijk. Op basis van de verzamelde recente informatie in hoofdstuk 3 worden inschattingen gegeven van de mogelijke effecten van revitaliseringsmaatregelen op de waterbeschikbaarheid, -kwaliteit en biodiversiteit.

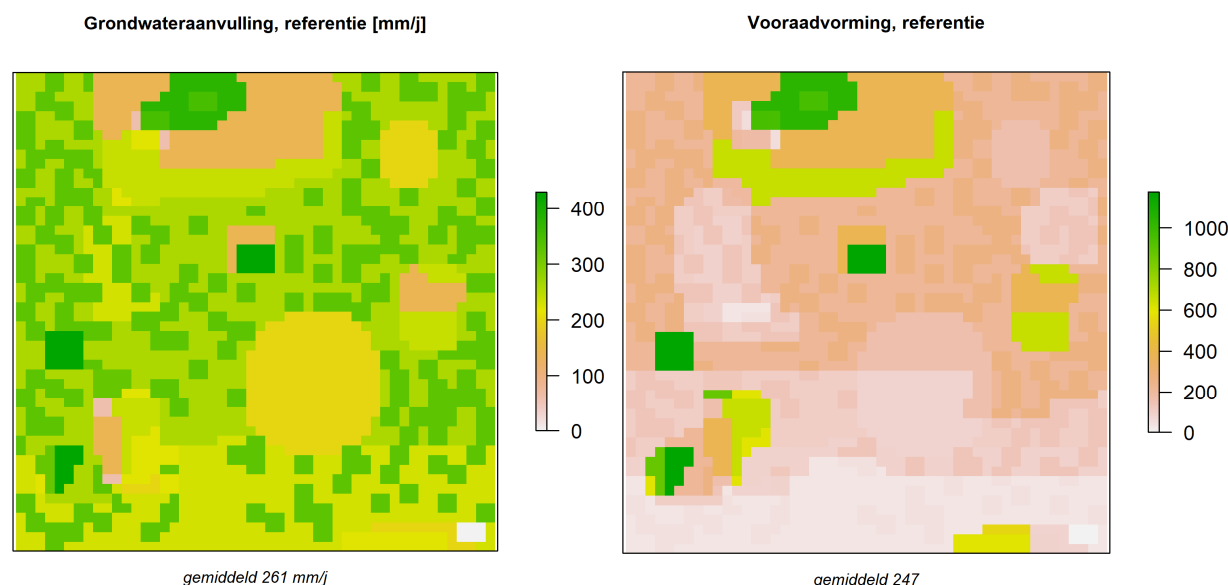
5 Scenario's bosmaatregelen: Resultaten en discussie

5.1 Effecten van bosuitbreiding en -herstel: winningen hoge zandgronden

5.1.1 Waterkwantiteit

Grondwateraanvulling

De geschatte ruimtelijke verdeling van de jaarlijkse grondwateraanvulling voor het hoge zandgronden-studiegebied in de referentiesituatie is gegeven in Figuur 5.1 (links). De geschatte grondwateraanvulling is het hoogst in korte natuur op droge locaties, en het laagst in naaldbos. Rechts is de ruimtelijke verdeling van het indicatieve 'voorraadeffect' gegeven. Het 'voorraadeffect' is de verandering van grondwateraanvulling vermenigvuldigd met de drainageweerstand. Het 'voorraadeffect' is relatief hoog in de hoge delen van het landschap (bovenin figuur) en is ook sterk verhoogd in natuurgebieden, door de lagere drainage-intensiteit.



Figuur 5.1: Geschatte grondwateraanvulling (links, mm/j) en grondwater'voorraadeffect' (rechts) in het hoge zandgronden-studiegebied, referentiesituatie.

Tabel 5.1 (bovenste rij) geeft de geschatte effecten van de verschillende bosuitbreidingsscenario's op de grondwateraanvulling, met daarbij ook een ruwe indicatie van de onzekerheidsmarge. De resultaten laten zien dat een ambitieuze bosuitbreiding (nieuw bos op 5% van het totale landschapsoppervlak) kan leiden tot een vermindering van de grondwateraanvulling op landschapsschaal, met een potentiële ordegrootte van enkele millimeters per jaar gemiddeld over het hele landschap. Deze vermindering is zeer gering en bedraagt slechts ca. 1% van de aanvulling in de referentiesituatie. In de berekeningen wordt een iets groter effect ingeschat voor bosvorming op natuurgrasland dan voor bosvorming op landbouwgrond; dit komt doordat de gemiddelde verdamping uit de verzamelde gegevens voor natuurgrasland iets lager uitkomt dan voor agrarisch grasland en akkerland, maar dit zal tussen landschappen sterk verschillen, afhankelijk van de mix in gewassen en de typen korte natuur die in het landschap voorkomen. Een omvorming van de helft van het naaldbos naar loofbos in het revitaliseringsscenario (S7) heeft voor de grondwateraanvulling potentieel een effect van een soortgelijke

ordegrootte als de bosaanplantscenario's. De onzekerheidsmarge bestrijkt voor grondwateraanvulling de range van enkele mm/j afname tot toename. Daardoor is er onzekerheid of de aanvulling op landschapsschaal af- of toeneemt.

Andere studies bevestigen dat van bosvorming in het algemeen een negatief effect verwacht moet worden op de grondwateraanvulling. Verlagen in grondwateraanvulling door bosontwikkeling worden in meetstudies uit verschillende voorbeeldgebieden bevestigd (Filoso et al., 2017; Teuling et al., 2019). De precieze grootte van het effect heeft echter een grote onzekerheidsmarge. Tussen verschillende bossen kan de jaarlijkse verdamping waarschijnlijk met tientallen tot honderden millimeters per jaar uiteenlopen, door verschillen in het bostype en de dichtheid, de leeftijd en groei- en vochtcondities (Delzon & Loustau, 2005; Jansen & Olsthoorn, 2003; Kirchen et al., 2017; Schipka et al., 2005; Verhagen et al., 2014). Dit betekent dat het effect van bosvorming op de grondwateraanvulling tussen locaties sterk uiteen zou kunnen lopen, en dat omvorming van naald- naar loofbos soms mogelijk juist een verlaagde aanvulling kan opleveren. Bijkomende onzekerheid is dat de bestaande kennis over de verdamping van bossen en andere vegetatietypen is gebaseerd op een beperkte set meetstudies over verschillende periodes, waarbij de verdampingsmetingen uit deze studies ook zelf een relatief grote onzekerheid kennen. Daar komt bij dat de bestaande metingen van de (bos)verdamping mogelijk minder betrouwbaar zijn voor een toekomstige situatie met klimaatverandering en toenemende droogteperiodes (Brakkee & Dorland, 2021).

Bij de inschatting van de verandering in grondwateraanvulling is alleen gekeken naar de verandering in landgebruik. In die scenario's waar ook de hydrologie is hersteld zal de verdamping in werkelijkheid mogelijk verder verhogen, doordat op sommige plekken vochtiger condities ontstaan. Dit geldt vooral voor locaties met een middelmatige grondwatertrap, waar door hydrologisch herstel het grondwater weer in het bereik van de wortelzone zou kunnen komen. De vermindering van de aanvulling van het grondwatersysteem door meer verdamping wordt dan wel (deels) gecompenseerd door een verminderde drainage. Met dit laatste effect wordt echter in de analyse geen rekening gehouden.

Tabel 5.1: Berekende effecten van de scenario's op de gemiddelde grondwateraanvulling (GWA, mm/j) en op de 'voorraadvorming'. De tweede kolom geeft de grondwateraanvulling en het voorraadeffect in de referentiesituatie. Voor elk scenario wordt het gemiddelde effect (bovenste getal) en de onzekerheidsmarge (tussenhaakjes) weergegeven.

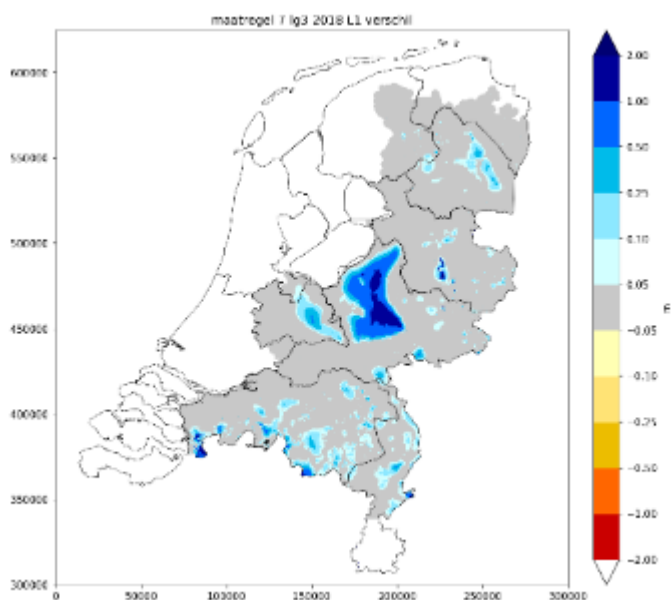
Scenario	Ref	S1 Uitbr. op landbouw, hoog	S2 Uitbr. op landbouw, hoog, + verminderen van de drainage	S3 Uitbr. op natuur- grasland., hoog, + verminderen van de drainage	S4 Uitbr. op landbouw, laag	S5 Uitbr. op landbouw, laag, + verminderen van de drainage	S6 Uitbr. op natuurgras- land, laag, + verminderen van de drainage	S7 Omvorming ½ naaldbos, + verminderen van de drainage
Gem. grondwater- aanvulling [mm/j]	260 (210...340)	-2.6 (-13...+5)	-2.6 (-13...+5)	-3.9 (-13...5)	-2.6 (-11...+5)	-2.6 (-11...+5)	-3.0 (-11...+5)	+3.1 (-1...+7)
Gem. voorraad- effect ['mm']	247 (200...320)	-2.0 (-10...+4)	+21 (+4...+37)	+10 (-6...+28)	-0.9 (-4...+2)	+17 (+6...+28)	+8.1 (-7...+23)	+24 (+15...+33)

Voorraadeffect

In Tabel 5.1 (onderste rij) is ook de geschatte doorwerking van de bosscenario's op het voorraadeffect weergegeven. Bij enkel bosvorming zonder aanpassing van de drainage (S1, S4) neemt de grondwatervoorraad en dus grondwaterstand waarschijnlijk af door de verminderde grondwateraanvulling. Dit effect is bovenin het landschap groter dan laag in het landschap waar meer invloed is van drainage en oppervlaktewater. Wanneer echter tegelijk met bosvorming de drainage wordt teruggebracht (S2, S3, S5, S6), lijkt ondanks de reductie in

grondwateraanvulling netto een duidelijk positieve bijdrage op de grondwater voorraad mogelijk. De precieze grootte van dit effect zal afhangen van de lokale waterhuishouding en de mate waarin het mogelijk is de drainage substantieel te reduceren. Omvorming van de helft van het naaldbos in het revitaliseringsscenario (S7), in combinatie met een reductie van drainage in én rond bestaande bossen, geeft volgens de schattingen het grootste positieve effect. In dit scenario worden op relatief grote oppervlakten hydrologische maatregelen genomen.

Eerdere studies op basis van ruimtelijke grondwatermodellen geven effecten van bos en bosomvorming op de grondwaterstand van enkele cm tot meerdere decimeters, afhankelijk van de schaal van de maatregelen. Bij bosaanplant of omvorming in kleinere natuurgebieden worden veranderingen van enkele centimeters voorspeld. Bij bosaanplant of -verwijdering, of omvorming van naaldbos naar loofbos, op zeer grote schaal in traag reagerende gebieden (Utrechtse Heuvelrug of Veluwe) zouden de effecten meerdere decimeters of zelfs meters kunnen zijn (de Niet et al., 2021; Steenvoorden et al., 2021; van den Eertwegh et al., 2021; Van Huijgevoort et al., 2020). Figuur 5.2 uit van den Eertwegh et al. (2021) toont de gemodelleerde effecten van een omvorming van (alle) naaldbos naar korte natuurlijke vegetatie op de seizoensmatige uitzakking van de grondwaterstanden (enkele jaren na de ingreep). In de grotere, hooggelegen delen geeft dat aanzienlijke stijgingen van de zomergrondwaterstand. Van bosaanplant zou een in orde grootte omgekeerd effect verwacht mogen worden. Het is duidelijk te zien dat in kleinere bosgebieden, waar het grondwater sneller reageert en sterker onder invloed van drainage staat, de effecten veel kleiner zijn dan in grote gebieden. De getoonde effecten kunnen als extreme uitersten worden beschouwd: in de praktijk zal de schaal van bosuitbreiding vele malen kleiner zijn dan in deze berekeningen. Daarnaast kan uitbreiding van loofbos op landbouwgrond geen of een gering effect hebben in geval de verdamping tussen agrarische gebruik en loofbos weinig verschilt. Het begrip van de werkelijke effecten van bosaanplant en omvorming naar loofbos op het grondwater in de Nederlandse situatie is nog vooral gebaseerd op modelstudies van vaak hypothetische situaties met veel onzekerheden over de verdamping. (Toegankelijke) meetgegevens van bouseffecten op de grondwaterstanden in praktijksituaties zijn nauwelijks beschikbaar, waardoor we beperkt kunnen voorspellen wat in de praktijk de effecten zullen zijn.



Figuur 5.2: Effect van omvorming van naaldbos naar lage vegetatie op de LG3 in 2018, 5 jaar na omvorming, berekend met het LHM. Uit van den Eertwegh et al. (2021). Getallen in de legenda zijn in meter.

Indirecte effecten

Behalve door de directe verandering in de totale verdamping door bossen heeft bosvorming indirecte effecten op de grondwateraanvulling. Ten eerste zal door bosontwikkeling een strooisellaag ontstaan, en zal de hoeveelheid organische stof in de bodem toenemen (Archer et al., 2016; Nijssen et al., 2021; van den Berg et al., 2022). Tegelijk

is te verwachten dat de bodem op termijn een betere structuur krijgt met meer grote poriën, afhankelijk van de ontwikkeling van bodembiota na bosvorming. Hierdoor zouden de infiltratiecapaciteit en bergingsvermogen van de bodem toe kunnen nemen (Schipper et al., 2015; Wösten & Groenendijk, 2021). Deze ontwikkelingen gaan waarschijnlijk echter langzaam: onderzoek in bossen op voormalige landbouwgronden van enkele decennia oud laat zien dat het gehalte organische stof meestal nog laag is en de bodemfauna zich nog beperkt heeft ontwikkeld ten opzichte van oudere bossen (van den Berg et al., 2022).

De effecten van een toename in organische stof en verandering in bodemstructuur op de waterbalans zijn vooral onderzocht in een landbouwcontext (Schipper et al., 2015; Steenvoorden et al., 2021; Wösten & Groenendijk, 2021). Een verhoogde infiltratiecapaciteit kan in potentie leiden tot een vermindering van oppervlakkige afstroming, wat positief zou zijn voor de (grond)waterbeschikbaarheid. Op landbouwpercelen, ook op de Nederlandse hoge zandgronden, kan oppervlakkige afstroming van regenwater door beperkte infiltratie lokaal regelmatig voorkomen (Jansen et al., 2013; Massop et al., 2012). Toch is oppervlakkige afstroming op landschapsschaal bij de huidige sterke ontwatering waarschijnlijk maar een kleine post op de waterbalans (volumes gemeten in Massop et al. uitgespreid op landschapsschaal zeer klein). Op zandbodems met een zeer laag organisch stofgehalte kan een verhoging van de bodemorganische stof tot niveaus kenmerkend voor bossen tot verhogingen in het vochtvasthoudend vermogen leiden van enkele millimeters (Minasny & McBratney, 2018; Wösten & Groenendijk, 2021) (Voortman et al. 2017). In periodes waarin natte en droge periodes elkaar afwisselen kan dit in theorie leiden tot tientallen millimeters extra water vastgehouden in de bodem op jaarbasis. Dit is water dat extra zal verdampen en dus minder zal infiltreren naar het grondwater. Dit zijn echter theoretische ordegrottes. en de vorming van een luchtige strooisellaag en mosbedekking kan de bodemverdamping juist verminderen (Voortman et al. 2013). In hoeverre bodemveranderingen door bosaanplant effect kunnen hebben op de waterbalans op grotere schaal is nog zeer onduidelijk. Het is waarschijnlijk echter te verwachten dat de bodem-gerelateerde effecten op de waterbalans veel kleiner zullen zijn dan de effecten van vegetatieverandering op de verdamping zelf (Steenvoorden et al., 2021).

Een mogelijk positief effect van bosaanplant op de voorraadeffect is te verwachten als bos wordt gevormd op percelen waar voorheen werd beregend uit grondwater. Op intensief beregende percelen kan de beregening tot honderden millimeters per jaar uitvallen (van der Meer, 2020) en ook op landschapsschaal kan beregening in droge periodes voor substantiële grondwaterstandsverlagingen zorgen (van den Eertwegh et al., 2021). Een ander belangrijk effect, waar in de scenario berekening geen rekening is gehouden, het stoppen van de afwatering van voorheen geïsoleerde laagten. Door ontwatering zijn zulke laagten water gaan afvoeren via afwatering door zandruggen, terwijl dat daarvoor niet het geval was. Verwijdering van de afwatering leidt dan tot meer grondwateraanvulling.

Effecten van revitalisering op de waterbalans

Effecten van bosrevitaliseringsmaatregelen op de waterhuishouding zijn op dit moment nog heel beperkt onderzocht. Van het omvormen van naald- naar loofbos is de algemene consensus, zoals boven besproken, dat dit tot substantieel hogere grondwateraanvulling en grondwaterstanden kan leiden, afhankelijk van de schaal en lokale drainagesituatie (de Niet et al., 2021; Dolman et al., 2000; Possen et al., 2021; Van Huijgevoort et al., 2020). Binnen loof- en naaldhoutbossen bestaat waarschijnlijk echter een grote variatie in de jaarlijkse verdamping, afhankelijk van het specifieke bostype, de dichtheid en leeftijd en de groeicondities (Delzon & Loustau, 2005; Jansen & Olsthoorn, 2003; Kirchen et al., 2017; Schipka et al., 2005; Verhagen et al., 2014), waarbij sommige loofbostypen mogelijk meer verdampen dan open naaldbossen. Bovendien laten metingen dat de variatie in verdamping tussen jaren vele malen groter is dan de variatie tussen bostypen (Moors, 2012).

De effecten van maatregelen in de bosstructuur op de waterbalans zullen afhangen van het type maatregel. Maatregelen gericht op meer natuurlijk, onverstoorde bos leiden in principe tot een meer gesloten groei en daarmee meer verdamping (Vandekerckhove, 2019); hetzelfde zou gelden voor een toename in ondergroei (Moors,

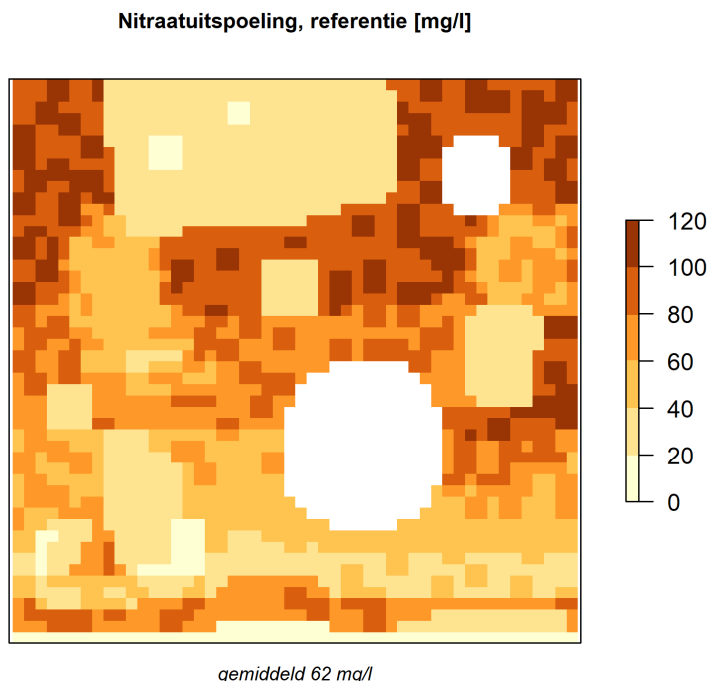
2012; Verhagen et al., 2014). Op locaties waar juist meer open plekken en verjonging worden nagestreefd is het omgekeerde te verwachten (Steenvoorden et al., 2021).

Van bodemmaatregelen, zoals toepassing van steenmeel en rijkstrooiselsoorten, wordt verwacht dat dit kan leiden tot een dunnere strooisellaag, een hoger gehalte organisch stof in de minerale toplaag en een actiever bodemleven. In theorie zou dit kunnen leiden tot een hoger vochtvasthoudend vermogen (Desie et al., 2020), en daarmee een potentieel grotere verdamping. De effecten van bodemherstelmaatregelen in bossen op de waterstromen in de bodem zijn echter nog niet onderzocht. Steenvoorden et al. (2021) concluderen op basis van infiltratieberekeningen dat een verhoging van de infiltratiecapaciteit in bosgebieden weliswaar leidt tot iets minder oppervlakkige afvoer; dit is voor de waterbalans echter niet relevant doordat in de meeste droge en verdroogde bosgebieden oppervlakkige afstroming toch al nauwelijks optreedt (Steenvoorden et al., 2021).

Hydrologisch herstel van (vochtige) bossen door verwijdering van drainage zal lokaal leiden tot een verhoogde grondwaterstand; in de praktijk zijn effecten van enkele centimeters tot meerdere decimeters gerapporteerd (van der Burg et al., 2014). De indicatieve berekeningen gedaan in deze studie geven aan dat het reduceren van drainage in bossen ook op landschapsschaal een positief effect op de grondwatervoorraden kan hebben (Tabel 5.1). Om de effecten van vernatting van bos op de landschappelijke waterbalans goed te begrijpen, zijn echter ruimtelijke modelberekeningen nodig. Deze moeten dan ook de gedetailleerde waterhuishouding in en rond natuurgebieden meenemen waaronder ook berging van oppervlaktewater

5.1.2 Grondwaterkwaliteit

De geschatte nitraatconcentraties in het uitspoelingswater voor het hoge zandgronden-studiegebied zijn gegeven in Figuur 5.3. De nitraatuitspoeling loopt binnen het landschap sterk uiteen. De concentraties zijn het hoogst in de droge landbouwgebieden en het laagst in de vochtige natuurgebieden.



Figuur 5.3: Geschatte nitraatconcentratie (mg NO₃/l) in uitspoelingswater voor het hoge zandgronden-studiegebied in de referentiesituatie. Nitraatuitspoeling in stedelijk gebied is niet meegenomen (witte cirkels).

Tabel 5.2 toont de geschatte effecten van de verschillende bosscenario's op de nitraatuitspoeling. Omdat alleen naar de effecten van veranderd landgebruik is gekeken en niet naar effecten van vernatting, zijn de varianten met hydrologische aanpassingen niet apart meegenomen. De resultaten laten zien dat bosaanplant op 5% van het

studiegebied tot een reductie in nitraatuitspoeling zou kunnen leiden van eenzelfde ordegrootte als bij de effecten op grondwateraanvulling, enkele procenten. Het effect is groter op de droge gronden hoog in het landschap, doordat hier de uitspoeling in de referentiesituatie het hoogst ligt. Lager in het landschap is het effect kleiner. Ook voor de scenario's waarin korte natuurtypen naar bos wordt omgevormd (S3 en S6) is een vermindering in de nitraatuitspoeling te zien. Dit komt doordat in deze scenario's óók bos is geplant op landbouwgrond om het totale nieuwe bosoppervlak naar 5% te brengen (zie Tabel 4.1, Bijlage II.I). Bovendien is in de berekeningen dezelfde nitraatconcentratie aangehouden onder alle natuurtypen. In werkelijkheid is de uitspoeling onder bossen waarschijnlijk hoger, door een verhoogde invang van stikstofdepositie (de Jonge & Tietema, 2000b; de Vries et al., 2019). Dit effect zou in de praktijk dus iets minder positief uitwerken. Het effect van de reductie van drainage is in de schattingen niet meegenomen. In werkelijkheid zou de lokale vernatting die in scenario S2, S3, S5 en S6 optreedt tot een extra verlaging van de nitraatuitspoeling kunnen leiden door een hogere denitrificatie in de bodem (van Loon, 2016).

Tabel 5.2: Geschat effect van bosscenario's op de nitraatconcentraties in uitspoelingswater op basis van vereenvoudigde berekeningen. Voor elk scenario wordt het gemiddelde effect op de concentratie (bovenste getal) en de procentuele afname van de concentratie (tussenhaakjes) weergegeven.

Scenario	Ref	S1 Uitbr. op landbouw, hoog	S3 Uitbr. op natuur- grasland., hoog, + verminderen drainage	S4 Uitbr. op landbouw, laag	S6 Uitbr. op natuurgras- land, laag, + verminderen drainage
Gem. nitraatconcentratie uitspoelingswater [mg/l]	62	-3.1 (-5%)	-2.0 (-3%)	-1.9 (-3%)	-1.1 (-2%)

Effecten van bosuitbreiding op de grondwaterkwaliteit

Naar het effect van bosaanplant op de grondwaterkwaliteit is weinig direct onderzoek gedaan. Omdat in het algemeen geen bemesting of bestrijdingsmiddelen worden gebruikt, zal bij bosvorming op landbouwgrond op wat langere termijn een sterke afname in de uitspoeling van vervuilende stoffen plaatsvinden (Jansen & Olsthoorn, 2003). Wel zou op korte termijn een sterke uitspoeling kunnen optreden van bepaalde stoffen. van den Berg et al. (2022) concluderen dat in recent aangeplante bossen op landbouwgrond een sterke piek in nitraatuitspoeling kan optreden door de hoge nitraatbeschikbaarheid en de lage gehalten organische stof. Tegelijk vindt meestal een snelle verzuring van de bodem plaats, zeker bij aanplant van soorten met verzurend strooisel. Dit zou ook effect kunnen hebben op de uitspoeling van sommige stoffen (de Vries et al., 2017; Klok et al., 2004). De uitspoeling zal afhankelijk zijn van het voorgaande landgebruik, of er wordt geplagd, en of er vernatting plaatsvindt. Vernatting van bestaande of nieuw aangelegde bossen kan complexe effecten hebben voor de chemische processen in bodem en grondwater (van der Burg et al., 2014). Op langere termijn geldt dat de uitspoeling van stoffen zoals nitraat wel zal verlagen, maar ook niet naar nul zal gaan, omdat bossen, met name naaldbossen, relatief veel atmosferische depositie invangen en een verhoogde uitspoeling kennen ten opzichte van korte natuurtypen (de Jonge & Tietema, 2000b; de Vries et al., 2017). In geval dat bosuitbreiding gecombineerd wordt met houtoogst kan dit houtkap periodiek leiden tot verhoogde uitspoeling van nitraat als gevolg van verhoogde mineralisatie en minder op name door de vegetatie (Gundersen et al. 2006). Daarbij geldt ook dat sommige stoffen vanuit het landbouwverleden, waaronder fosfaat en pesticiden, lang in de bodem aanwezig kunnen blijven (Eekeren et al., 2021; van den Berg et al., 2022).

Effecten van revitalisering op de grondwaterkwaliteit

Ook de effecten van revitaliseringsmaatregelen op de kwaliteit van uitspoelend water zijn nog weinig onderzocht. Wel is recent onderzoek gedaan naar de effecten op de bodemeigenschappen en -chemie. Omvorming van naaldbos naar loofbos zou een verlaging op kunnen leveren in de uitspoeling van onder andere nitraat, door de verminderde invang. Ook een overgang van bosbouw naar een natuurlijker bosbeheer met minder verstoring zou de uitspoeling van bijvoorbeeld nitraat iets kunnen verminderen (de Jonge & Tietema, 2000b).

Bodemherstelmaatregelen zoals de toepassing van steenmeel leiden, wanneer ze succesvol zijn, tot een verminderde verzuring, een actiever bodemleven en meer organisch stof in de bodem (in plaats van erop) (Desie et al., 2020). Dit zou door kunnen werken op de mate waarin stoffen in de bodem worden vastgehouden; hier is echter nog weinig over bekend. Maatregelen in de waterhuishouding, ten slotte, kunnen ook invloed hebben op de bodemchemie en uitspoeling in bossen door veranderingen in de afbraak en mobiliteit van stoffen. De precieze effecten zijn waarschijnlijk echter zeer verschillend tussen locaties (Brouwer et al., 2022; van der Burg et al., 2014).

In het kort geldt dat er nog weinig bekend is over de effecten van revitaliseringsmaatregelen op de grondwaterkwaliteit. Omdat de bijdrage van bossen aan vervuiling van het grondwater in het algemeen veel kleiner is ten opzichte van agrarisch en stedelijk landgebruik zijn van revitalisering weinig risico's voor de grondwaterkwaliteit te verwachten.

5.1.3 Biodiversiteit

Biodiversiteitsscores

Het effect van de verschillende bosscenario's op de landschappelijke biodiversiteitsscores is gegeven in Tabel 5.3. De mogelijke effecten van de hydrologische maatregelen in scenario S2, S3, S5 en S6 zijn hierin niet meegenomen. De biodiversiteitsscore van het landschap neemt in alle bosuitbreidingsscenario's toe, doordat landbouwgrond naar natuur wordt omgevormd. Dit gebeurt ook in het scenario 'bosuitbreiding in korte natuur' doordat hierin ook deels op landbouwgrond wordt uitgebreid. De toename in biodiversiteit is groter bij uitbreiding op alleen landbouwgronden, doordat geen korte natuurtypen opgegeven worden.

Bij bosuitbreiding op landbouwgrond (S1, S4) zou volgens de toegepaste scores het voordeel voor unieke en Europees belangrijke biodiversiteit groter zijn wanneer dit laag in het landschap gebeurt. In dit geval kunnen immers vochtige en natte bostypen worden gevormd, die op grote schaal relatief zeldzaam zijn en dan ook in het algemeen als waardevol worden beschouwd (Nijssen et al., 2021; Thomassen et al., 2020; van der Burg et al., 2014). Wel is het verschil in biodiversiteitstoename klein, doordat nog steeds relatief weinig werkelijk nat bos wordt ontwikkeld; omdat het landschap op de hoge zandgronden zonder vernattingsmaatregelen maar een klein aandeel heeft met grondwatertrappen lager dan 4. Volgens de scores wordt de lokale biodiversiteitsscore iets kleiner ingeschat in vochtige bostypen. Wanneer wel met vernatting rekening wordt gehouden zou dat aandeel kunnen toenemen.

Bij bosuitbreiding gedeeltelijk in bestaande natuur (S3, S6) laten de scores zien dat de biodiversiteit laag in het landschap minder profiteert. Dit komt omdat de bestaande kleine oppervlakten met (potentieel) waardevolle vochtige graslandtypen opgegeven moeten worden. Nijssen et al. (2021) geven aan dat waar het gaat om unieke soorten en Europese biodiversiteit niet alleen vochtige en beekbegeleidende bossen, maar ook juist goed ontwikkelde vochtige én droge schraalgraslanden waardevol zijn. Bosvorming op dit soort goed ontwikkelde natuurgraslanden, of graslanden die potentie hebben zich hiertoe te ontwikkelen, is dus in principe minder wenselijk en kan negatief uitwerken voor de algehele natuurwaarde van het landschap.

De verandering van biodiversiteitswaarde door nieuwvorming bostypen op basis van de scores van Nijssen et al. is gering in verhouding met de biodiversiteit waarden van betreffende bostypen. In het revitaliseringsscenario S7 is gekeken naar het potentiële effect van een gedeeltelijke omvorming van naaldbos naar loofbos en een kwaliteitsverbetering van al het loofbos naar 'goed ontwikkeld' bos. Een dergelijke revitalisering levert voor de

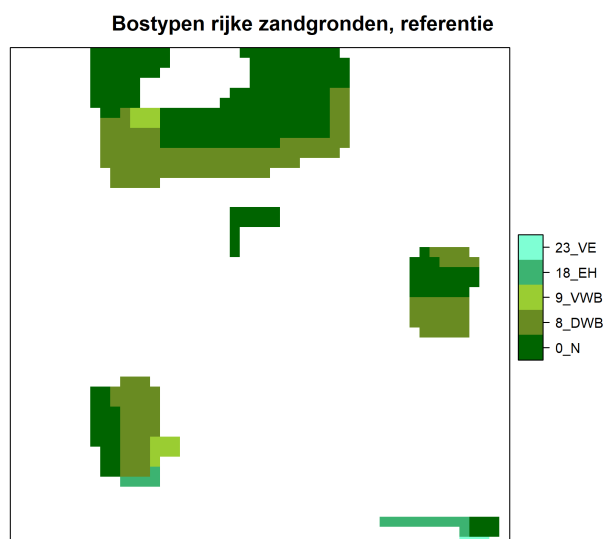
biodiversiteitsscores net zoveel op als de ontwikkeling van nieuw bos op zich. In de praktijk zal het biodiversiteitsvoordeel van bosuitbreiding versus revitalisering afhangen van de compositie van het landschap en de potentie van locaties om goed ontwikkeld bos te creëren (Nijssen et al., 2021).

Tabel 5.3: Effect van bosvormingsscenario's op de gemiddelde biodiversiteitsscore in het landschap op 3 aspecten. S7: scenario waarbij alle loofbos-natuurtypen van een gemiddelde naar een goede kwaliteitsscore gaan.

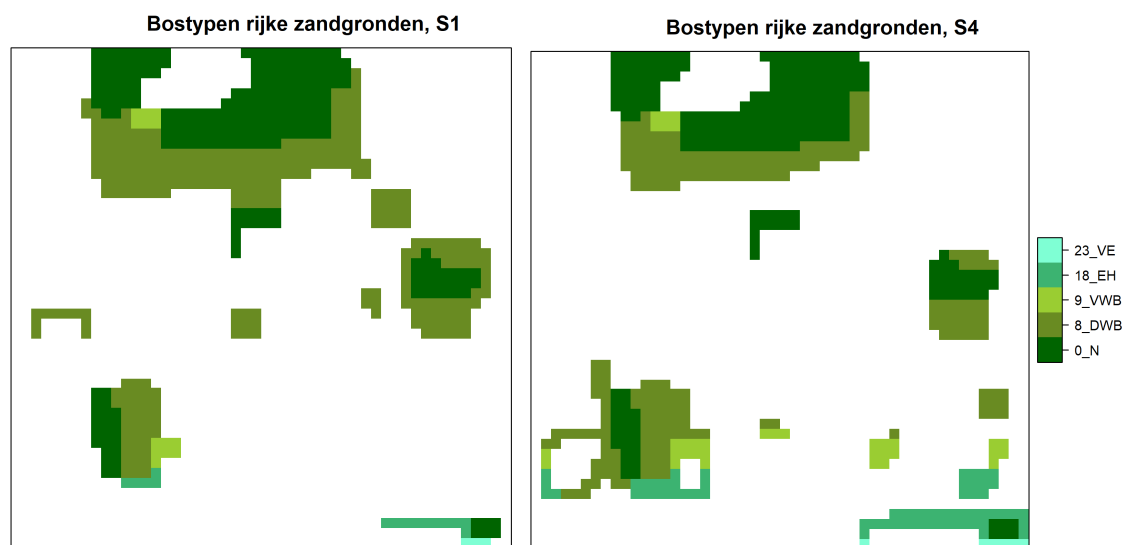
Scenario	Ref	S1 Uitbr. op landbouw, hoog	S3 Uitbr. op natuur grasland, hoog	S4 Uitbr. op landbouw, laag	S6 Uitbr. op natuur grasland, laag	S7 Revitali- sering
Lokale biodiversiteit	1.474	+0.11	+0.082	+0.106	+0.063	+0.080
Unieke biodiversiteit	1.440	+0.10	+0.073	+0.101	+0.062	+0.096
Europees belang	1.454	+0.10	+0.069	+0.102	+0.064	+0.000

Potentiële bostypen

Figuur 5.4 laat het voorkomen van de verschillende gedetailleerde bostypen zien in de referentiesituatie voor het hoge zandgronden-studiegebied. Figuur 5.5 geeft de nieuwe verdeling bij bosuitbreiding hoog in het landschap (S1) en laag in het landschap (S4) (bij S3 en S6 soortgelijk beeld). Bij bosontwikkeling op hoge gronden ligt de toename logischerwijs bij droge bostypen, eiken-beukenbossen en op arme zandgronden eiken-berkenbossen. Bij bosontwikkeling in de lagere helft van het landschapsgradiënt wordt het oppervlak van zowel droge als natte bostypen versterkt. Er kan potentieel vochtig eiken-berken/beukenbos ontstaan en op rijkere gronden eiken-haagbeukenbos; langs de beek kan beekbegeleidend bos van essen en/of elzen worden gevormd. Er is in deze analyse niet gekeken naar de effecten van het verminderen van drainage op de potentieel gevormde bostypen in scenario 2, 3, 5 en 6. Als drainage wordt verminderd zouden meer locaties natter kunnen worden en zouden op grotere oppervlaktes vochtige en natte bostypen kunnen ontstaan.



Figuur 5.4: Potentiële bostypen in het hoge zandgronden-studiegebied in de referentiesituatie. Bostypen: 0 Naaldbos, 8 Droog Wintereiken-Beukenbos, 9 Vochtig Wintereiken-Beukenbos 18 Eiken-Haagbeukenbos, 23 Vogelkers-Essenbos.



Figuur 5.5: Potentiële bostypen in scenario S1 (bosaanplant op landbouwgrond hoog in het landschap) en S4 (bosaanplant op landbouwgrond laag in het landschap) voor een situatie op iets rijkere/lemige zandgronden. Bostypen: 0 Naaldbos, 8 Droog Wintereiken-Beukenbos, 9 Vochtig Wintereiken-Beukenbos 18 Eiken-Haagbeukenbos, 23 Vogelkers-Essenbos.

Tabel 5.4: Oppervlak van potentiële bostypen [ha] voor de verschillende scenario's. Bostypen voor rijkere en armere zandgronden gegeven.

Bostype		Ref	S1 Uitbr. op landbouw, hoog	S3 Uitbr. op natuur grasland, hoog	S4 Uitbr. op landbouw, laag	S6 Uitbr. op natuur grasland, laag	S7 Revitali- sering
0	Naaldbos	916	916	916	916	916	656
8/6	Droog eiken-beukenbos/ droog eiken-berkenbos	664	1164	1164	880	896	896
9/7	Vochtig eiken- beukenbos/ Vochtig eiken-berkenbos	52	52	52	136	84	56
18/7	Eiken-haagbeukenbos/ vochtig eikenbos	60	60	60	248	240	84
23/29	Vogelkers-essenbos/ elzenbroekbos	12	12	12	24	68	12

Landschapscompositie

Naast de biodiversiteitswaarde van de natuurtypen zelf is de landschappelijke 'robuustheid' van de natuur kwalitatief gescoord voor de verschillende scenario's (Tabel 5.5). De bosuitbreidingsscenario's leiden logischerwijs tot een groter bosoppervlak, en daarmee potentieel tot sterkere bossen. Dit effect zou laag in het landschap nog iets groter kunnen zijn, omdat hier in het algemeen nog minder bos voorkomt (par. 2.2.2). Ook de verbondenheid van de bossen verbetert, doordat het nieuwe bos als stapstenen tussen bestaande boslocaties wordt aangelegd (zie bijlage II.I). Het oppervlak aan korte natuurtypen neemt af in die scenario's waar bos op natuurgrasland wordt gevormd. Dit zal minder problematisch zijn in matig tot slecht ontwikkelde natuurgraslanden die zonder plaggen of afgraven weinig perspectief hebben voor verbetering van de kwaliteit wegens een hoge fosfaatvoorraad in de bodem (Aggenbach et al. 2017); maar ook deze kunnen op landschapsschaal mogelijk belangrijk zijn voor soorten van open landschappen. Door het verdwijnen van een deel van de korte natuurtypen raken de overgebleven plekken met korte vegetatie in de scenario's S3 en S6 bovendien meer geïsoleerd.

Bosvorming op landbouwgrond (S1, S4) kan positief uitwerken voor het voorkomen van overgangen tussen lage en hoge vegetatietypen, doordat het nieuwe bos wordt aangeplant in aansluiting op bestaande natuur. Dit geldt niet

wanneer bos wordt aangeplant in korte natuurtypen (S3, S6) omdat hier korte natuurtypen verdwijnen en het landschap meer bos gedomineerd wordt. Overgangen tussen droge en vochtige natuur, die voor veel diersoorten belangrijk zijn (Nijssen et al., 2021) nemen toe bij bosontwikkeling in landbouwgebied laag in het landschap waar veel nat-droogovergangen voorkomen.

Revitalisering van bossen kan in potentie leiden tot een verbetering in het voorkomen van gradiënten in het landschap tussen lage en hoge vegetatie en tussen droge en vochtige natuur. Dit is mogelijk wanneer met revitalisering een betere afwisseling in bosstructuur wordt bereikt en/of bossen lokaal worden vernat.

Tabel 5.5: Ingeschatte effecten van bosscenario's op de landschappelijke compositie van de natuur. Effecten kwalitatief beoordeeld als 'sterk positief' (++), 'licht positief' (+), 'neutraal' (0), 'licht negatief' (-) en 'sterk negatief' (--), 'neutraal' (0). Bij 'gradiënten' gaat het erom in hoeverre lage en hoge vegetaties, en natte en droge natuur naast elkaar voorkomen.

Scenario	Oppervlak bossen	Verbondenheid bossen	Oppervlak korte natuurtypen	Verbondenheid korte natuurtypen	Gradiënten korte vegetatie & bos	Gradiënten nat-droog
S1 Uitbr. op landbouw, hoog	++	++	0	0	+	0
S3 Uitbr. op natuur grasland, hoog	++	+	--	-	-	0
S4 Uitbr. op landbouw, laag	++	++	0	0/-	+	+
S6 Uitbr. op natuur grasland, laag	++	0	--	-	-	0
S7 Revitalisering	0	0	0	0	Potentieel +	Potentieel +

Effecten van revitalisering op de biodiversiteit

Revitaliseringsmaatregelen op het gebied van *bosstructuur* zullen in het algemeen gericht zijn op het vergroten van de diversiteit aan boomsoorten en bosdichtheid, en/of een natuurlijker bosbeheer met minder verstoring en meer oude elementen en meer natuurlijke dynamiek van de boomlaag (par. 3.2). Een grotere diversiteit aan boomsoorten kan in principe leiden tot een verhoogde diversiteit aan andere flora- en faunasoorten die op deze boomsoorten gespecialiseerd zijn (Nyssen & Wijdevén, 2019). Het stimuleren van kleinschalige verjonging of open plekken in delen van bossen is positief voor bossoorten die meer licht en open bodems nodig hebben (Vandekerckhove, 2019). Maatregelen die juist zijn gericht op een natuurlijker bosbeheer in boskernen, door het verminderen van verstoring en het toelaten van natuurlijke ontwikkeling en veroudering, kunnen leiden tot een toename in typische soorten van oudere, dichte boskernen ('oudbossoorten'), zoals onderzoek door Vandekerckhove (2019) en van den Berg et al. (2022) laat zien. Knelpunt daarbij is dat dit type soorten zich vaak zeer langzaam verspreidt en relict populaties zeldzaam zijn, en herstelde locaties dus moeilijk gekoloniseerd worden. Hoewel in een deel van de onderzochte bossen al na enkele decennia een toename van soorten van ouder, dichter bos te zien was, zal de vestiging afhangen van de aanwezigheid van oude bosrelicten en de verspreidingscapaciteit van individuele soorten (van den Berg et al., 2022; Vandekerckhove, 2019). In het algemeen geldt dat waar

revitaliseringsmaatregelen in de bosstructuur erin slagen om zowel oude, ongestoorde kernen als opener delen te creëren een toename van de algehele biodiversiteit te verwachten is.

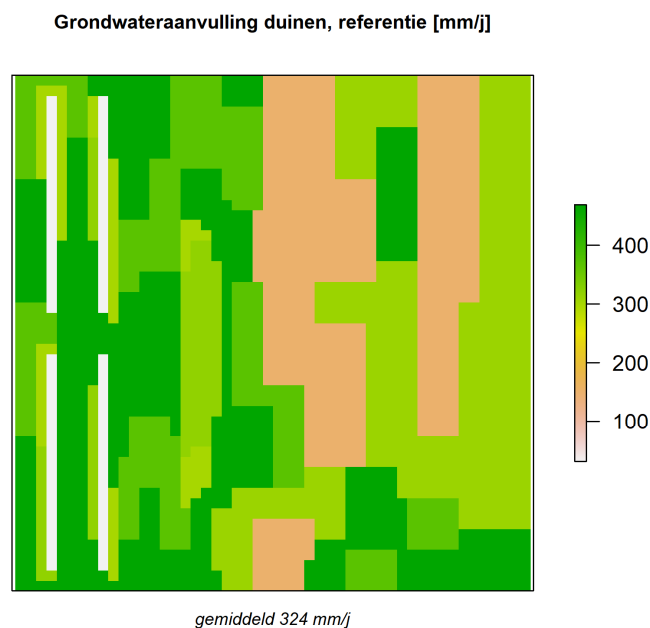
Van maatregelen voor *bodemherstel* (steenmeel, rijkstrooiselsoorten) wordt verwacht dat deze via de verbetering van de gezondheid van de bodem en bomen ook de bosbiodiversiteit kan stimuleren (de Vries et al., 2019; Nyssen et al., 2016). Op dit moment werken de voortschrijdende verzuring en beperkte vitaliteit van bomen op de hoge zandgronden ook door op beperkingen voor andere bosflora en -fauna (de Vries et al., 2017; de Vries et al., 2019). Zo komen veel 'oudbossoorten' voor op iets en goed gebufferde bodem, en is een effect van basentekort op vlinders en vogels gerapporteerd (de Vries et al., 2019; van den Berg et al., 2022). De recente onderzoeken naar toepassing van steenmeel en rijkstrooiselsoorten hebben nog weinig gekeken naar de doorwerking van de veranderingen in de bodem op de bosflora en -fauna. Bij het steenmeelexperiment op de Veluwe waren wel al veranderingen te zien in de bodemfauna (Bloem et al., 2022a), en waren eerste signalen dat de verbeterde nutriëntencondities door zouden kunnen werken op bladetende rupsen (de Vries et al., 2019). Het bekalkingsexperiment bij Harderwijk (Bobbink et al., 2018) liet zien dat bekalking een sterk effect kan hebben op de ondergroei, ook na langere tijd. Matige bekalking leidde tot een betere groei van struiken en kruiden op de bosgrond, maar bij sterke bekalking trad verzuuring op (Bobbink et al., 2018). Verder zijn uit de recente onderzoeken naar steenmeel en rijkstrooiselsoorten nog geen of nauwelijks effecten op bosflora en -fauna gerapporteerd. Ook hier zou de trage verspreiding van plant en diersoorten van bos en bodembiota, een beperking kunnen vormen (Bloem et al., 2022a; van den Berg et al., 2022).

5.2 Effecten van bosrevitalisering: duinwaterwinningen

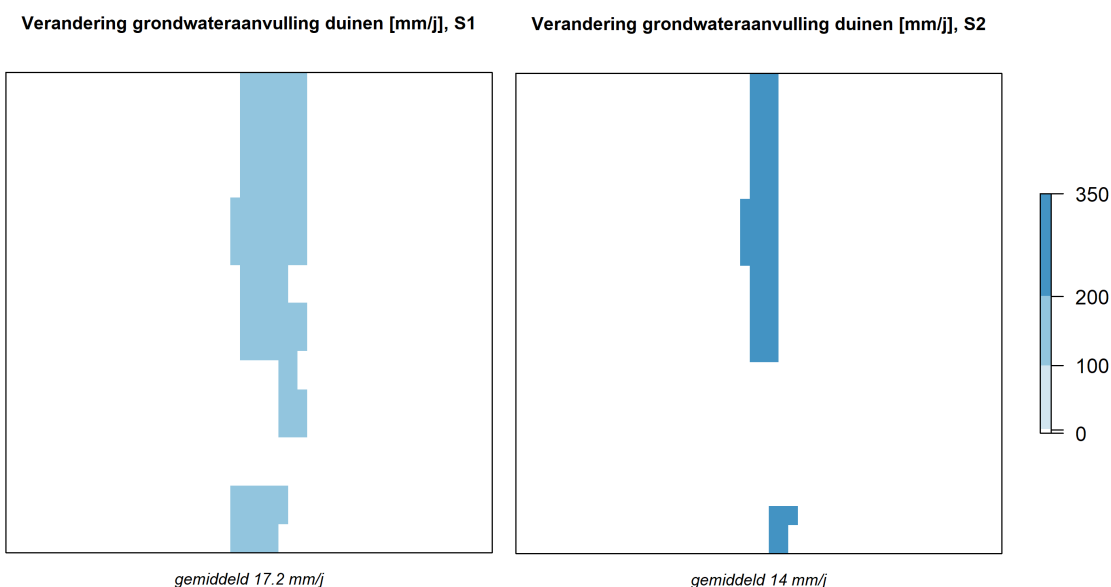
5.2.1 Grondwateraanvulling

Figuur 5.6 geeft de geschatte jaarlijkse grondwateraanvulling in het duin-studiegebied in de referentiesituatie. De grondwateraanvulling is het hoogst in de open, droge duinvegetatie, gevolgd door droog duinstruweel. In de naaldbossen is de aanvulling het laagst. Figuur 5.7 geeft de geschatte verandering in grondwateraanvulling in duinscenario 1 (omvorming 50% naaldbos naar loofbos) en scenario 2 (omvorming 20% naaldbos naar open duinvegetatie). Beide scenario's leiden tot een toename van enkele procenten in de totale grondwateraanvulling van het gebied, met 10-20 mm/j over het gehele gebied. Er is dus een duidelijke verhoging van de grondwateraanvulling mogelijk, maar het effect is klein in verhouding tot de grootte van de rivierinfiltratie en winning in het infiltratiegebied (links in figuur). Uitgaand van een infiltratie en winning van 1-2 Mm³ per 100 meter noord-zuidlengte van het infiltratiegebied (par. 2.2.3), waarvan de helft in de landwaartse helft van het infiltratiegebied (12.5-25 Mm³), geeft 2-4 m/j aan actieve infiltratie/winning gemiddeld over het gehele studiegebied van 6.25 km².

Het effect van vegetatietypen op de grondwateraanvulling en grondwaterstanden in de duinen is in het verleden redelijk uitgebreid onderzocht. Deze studies concludeerden ook al dat een omvorming van naaldbos naar loofbos of open duinvegetatie een vergroting van de grondwateraanvulling en grondwaterstanden zou kunnen opleveren (Runhaar et al., 2000; Stuyfzand, 1993; Witte et al., 2017). Op dit moment is in veel duininfiltratiegebieden het beleid om de winning van natuurlijk (niet actief geïnfiltreerd) grondwater zo veel mogelijk te beperken (Brakkee et al., 2023). Dat betekent dat bij bosmaatregelen gericht op de grondwateraanvulling vooral de effecten op vochtige natuur in het midden- en achterduin van betekenis zijn. Zo is recent door Staatsbosbeheer onderzoek gedaan naar de mogelijke hydrologische effecten van het kappen van naaldbos in de duinen bij Schoorl (Staatsbosbeheer, 2017). De effecten van de toegenomen grondwateraanvulling op de vegetatie zijn in beide scenario's niet meegenomen.



Figuur 5.6: Geschatte jaarlijkse grondwateraanvulling uit neerslag in het duin-studiegebied in de referentiesituatie. Er is geen rekening gehouden met grondwateraanvulling door kunstmatige infiltratie en daarom is aan de infiltratiepanden (witte vlakken links) is geen waarde voor grondwateraanvulling toegekend.

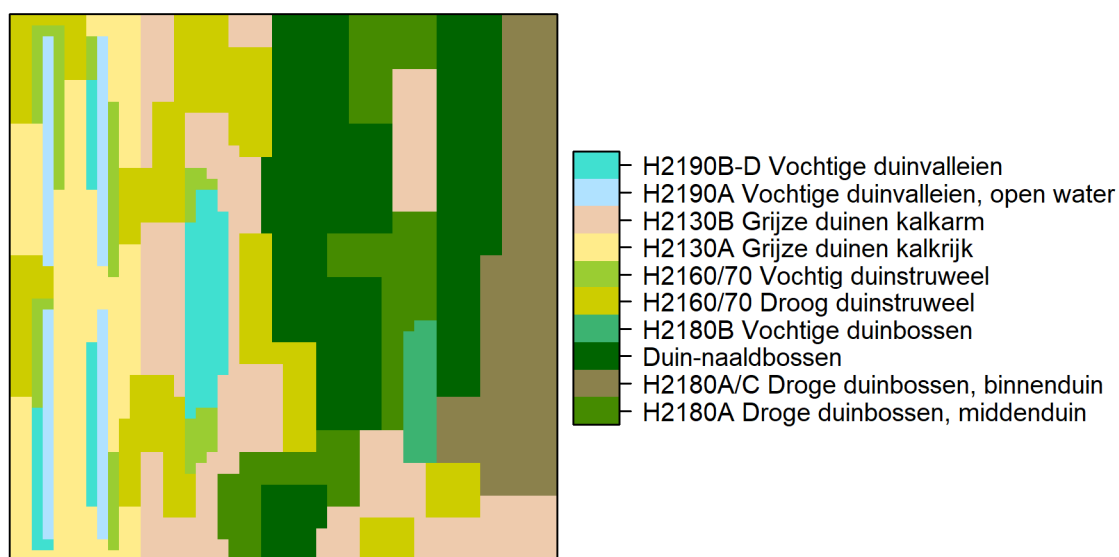


Figuur 5.7: Geschatte veranderingen in de grondwateraanvulling [mm/j] als gevolg van de bosscenario's voor het duin-studiegebied. Scenario 1: Gedeeltelijke omvorming van naaldbos naar loofbos. Scenario 2: Gedeeltelijke omvorming van naaldbos naar open duinvegetatie.

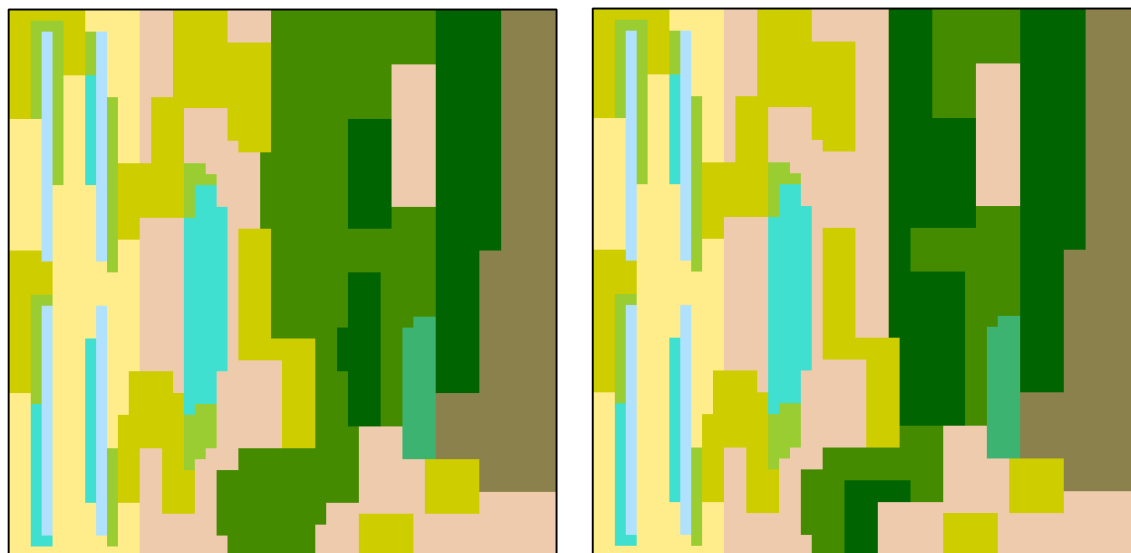
5.2.2 Biodiversiteit

Habitattypen

De verdeling van potentiële habitat- en bostypen in het duingebied in de referentiesituatie is gegeven in Figuur 5.8. Figuur 5.9 toont de situatie na omvorming van een deel van het naaldbos in het middenduin naar loofbos (S1, links) en naar open duinvegetatie (S2, rechts). In het eerste scenario zullen droge duin-loofbossen ontstaan; in het tweede scenario neemt het oppervlak aan droge, kalkarme grijze duinvegetatie toe (Tabel 5.6). In het geval dat bijvoorbeeld wordt geplagd of verstuing plaatsvindt zouden mogelijk jongere of kalkrijkere bostypen en open duintypen kunnen ontstaan (Huiskes et al., 2009).



Figuur 5.8: Potentiële habitat/vegetatietypen in het duingebied in de referentiesituatie.



Figuur 5.9: Potentiële habitat/vegetatietypen in het duingebied in scenario 1 (gedeeltelijke omvorming van naaldbos naar loofbos) en scenario 2 (gedeeltelijke omvorming van naaldbos naar open duinnatuur). Voor legenda zie Figuur 5.9.

Tabel 5.6: Oppervlak van potentiële habitat/vegetatietypen [% van gebied] in het duingebied in scenario 1 (gedeeltelijke omvorming van naaldbos naar loofbos) en scenario 2 (gedeeltelijke omvorming van naaldbos naar open duinnatuur).

Habitat/vegetatietype [%]	Referentie	Scenario 1	Scenario 2
H2180A Droge duinbossen, middenduin	9.0	19.7	9.0
H2180A/C Droge duinbossen, binnenduin	11.5	11.5	11.5
Duin-naaldbossen	21.5	10.8	17.2
H2180B Vochtige duinbossen	1.5	1.5	1.5
H2160/70 Droog duinstruweel	15.1	15.1	15.1
H2160/70 Vochtig duinstruweel	3.5	3.5	3.5
H2130A Grijs duinen kalkrijk	12.4	12.4	12.4
H2130B Grijs duinen kalkarm	17.6	17.6	22.0
H2190A Vochtige duinvalleien, open water	3.4	3.4	3.4
H2190B-D Vochtige duinvalleien	4.5	4.5	4.5

Landschapscompositie

De ingeschatte effecten van de bosscenario's op de landschapscompositie zijn gegeven in Tabel 5.7. In scenario 1 vindt een gedeeltelijke omvorming van naald- naar loofbos plaats, in combinatie met een algehele revitalisering van de bossen, bijvoorbeeld door toegevoegde maatregelen in bosstructuur. Op het totaaloppervlak van bos heeft dit geen effect, maar het oppervlak en de verbondenheid van goed ontwikkeld duin(loof)bos zou potentieel toe kunnen nemen. Door het lokaal creëren van meer open plekken en bosranden zouden bovendien meer mozaïeken in lage en hoge vegetatie ontstaan, wat waardevol kan zijn voor duinfauna (OBN, n.d.). Eventuele vernattingsmaatregelen en verhoogde grondwateraanvulling door bosomvorming zouden er ook toe kunnen leiden dat meer vochtige plekken ontstaan in het midden- en binnenduin, en daarmee meer nat-droog-gradiënten worden gevormd.

Bij omvorming van naaldbos naar open duinvegetatie (S2) neemt het bosoppervlak in het landschap af ten koste van open duinvegetatie. In de natura 2000-systematiek wordt prioriteit toegekend aan het habitattypen grijs duinen, terwijl duin-naaldbos niet als beschermd habitattypen geldt. Oudere duin-naaldbossen kunnen soms echter wel waardevol zijn voor bijvoorbeeld plantensoorten, paddenstoelen en korstmossen (NMV, 2010; OBN, n.d.). De nieuw gecreëerde open duinvegetatie kan, afhankelijk van de locatie van maatregelen, zorgen voor een verbetering in de connectiviteit van open duinvegetaties in het landschap en het voorkomen van gradiënten tussen lage en hoge vegetatie.

Tabel 5.7: Ingeschatte effecten van bosscenario's in het duingebied op de landschappelijke compositie van de natuur. Scenario 1: revitalisering van het duinbos en gedeeltelijke omvorming naald- naar loofbos; Scenario 2: Gedeeltelijke omvorming van naaldbos naar open duinvegetatie. Effecten zijn kwalitatief beoordeeld als 'sterk positief' (++), 'licht positief' (+), 'neutraal' (N), 'licht negatief' (-) en 'sterk negatief' (--), 'neutraal' (0), 'Potentieel'(Pot.). Bij 'gradiënten' gaat het erom in hoeverre lage en hoge vegetaties, en natte en droge natuur naast elkaar voorkomen.

Scenario	Oppervlak bossen	Verbondenheid bossen	Oppervlak korte natuurtypen	Verbondenheid korte natuurtypen	Gradiënten korte vegetatie & bos	Gradiënten nat-droog
S1	0/Pot. +	0/Pot. +	0	0	Pot. +	Pot. +
S2	--	N	++	+	+	0

6 Conclusies en kennislacunes

Het creëren van nieuw bos in het landschap, en in mindere mate het revitaliseren van bestaand bos, kan veel verschillende directe en indirecte effecten hebben op de functies die het landschap levert – van biodiversiteit tot waterlevering, koolstofvastlegging, houtproductie, recreatie en andere. Deze effecten zullen afhangen van de locatie en de manier waarop bosmaatregelen worden ingericht. Bij het zoeken naar locaties voor bosmaatregelen moet worden gezocht naar plekken waar de gewenste functies zo goed mogelijk kunnen worden bereikt en de negatieve effecten zoveel mogelijk beperkt. Ook in landschappen rond drinkwaterwinningen liggen mogelijke opgaven of kansen voor bosuitbreiding en -herstel. Hier zal het belang van de waterbeschikbaarheid extra goed moeten worden afgewogen tegen de voordelen van bosmaatregelen.

In dit onderzoek is een verkenning gemaakt van hoe bosuitbreiding en bosrevitalisering zouden kunnen worden ingepast in landschappen rond drinkwaterwinningen, kijkend naar de mogelijke effecten op de (drink)waterbeschikbaarheid, (drink)waterkwaliteit en biodiversiteit. De effecten van bosmaatregelen zijn verkend op basis van vereenvoudigde scenarioberekeningen in combinatie met bestaande literatuur.

Wat zijn de effecten van bosvorming en -revitalisering in landschappen op de hoge zandgronden op (drink/grond)water en natuur, en hoe hangt dit af van de locatie in het landschap?

Tabel 6.1 geeft een synthese van de verwachte effecten van bosmaatregelen uit de scenario-analyse. De verwachting is dat bosuitbreiding in veel gevallen voor een lokale verlaging zal zorgen in de grondwateraanvulling (neerslag minus verdamping), waarbij de grootte van het effect afhankelijk is van het type bos, het voorgaande landgebruik en de schaal van bosvorming – die in veel gevallen beperkt zal zijn. Waarschijnlijk zullen effecten van bos op de grondwateraanvulling vooral door veranderingen van de verdamping worden bepaald, en zullen eventuele effecten door bodemverandering veel kleiner zijn. Of het effect van bosvorming groter is op natuurgasland of op landbouwgrond is voor een specifiek landschap moeilijk te voorspellen, omdat dit zeer afhankelijk is van het type landbouw en de korte natuurtypen die worden vervangen. Omdat in agrarisch grasland de verdamping relatief hoog is, kan hier omvorming naar loofbos een verwaarloosbaar of relatief gering effect hebben op de grondwateraanvulling. Kijken we niet naar de grondwateraanvulling zelf, maar naar de doorwerking op de het voorraadeffect en -standen, dan is het verlagende effect van bosvorming op het voorraadeffect waarschijnlijk sterker op hogere posities in het landschap, verder van waterlopen, dan laag in het landschap. Vooral bij grootschalige bosvorming kunnen de effecten op waterstand groot zijn. Wanneer echter in de hoge delen van het landschap tegelijk met bosvorming de bestaande drainage wordt verwijderd of beperkt en wordt gestopt met afwatering van voor heen geïsoleerde laagten kan het netto effect voor het voorraadeffect in potentie positief zijn. Dit zal afhangen van de mate waarin drainage en afwatering wordt gereduceerd. Of bosuitbreiding in combinatie met hydrologisch herstel hoog of laag in landschap substantiële oppervlakten natte condities en dus natte natuur opleveren kon uit de berekeningen in deze studie nog niet worden opgemaakt. Gezien de grote schaal waarop hoge en lage delen van het zandlandschap zijn ontwaterd biedt hydrologisch herstel zeker perspectief voor vernatting. Voor de kwantificering zijn meer gedetailleerde modelberekeningen nodig. Revitaliseringsmaatregelen in bestaande bossen kunnen in potentie een (kleine) verbetering in grondwateraanvulling en stand opleveren, als hierbij dicht naaldbos wordt omgevormd, er meer open bos komt en/of hydrologisch herstel plaatsvindt. Dit zal echter van de precieze maatregelen afhangen en de grootte van de effecten is onzeker.

Voor de grondwaterkwaliteit zal bosvorming in de meeste gevallen positief zijn als dit gebeurt op voormalige landbouwgrond, doordat toepassing van mest- en pesticiden wordt gestopt. Op korte termijn kan na bosvorming mogelijk wel een sterke uitspoeling van nog aanwezige stoffen plaatsvinden. Voor de nitraatuitspoeling zou omvorming van landbouwgrond naar bos hoog in het landschap mogelijk een groter positief effect kunnen hebben

dan lager in het landschap, doordat in de droge delen de huidige uitspoeling groter is. Als de nadruk ligt op andere stoffen dan nitraat of op de oppervlaktewaterkwaliteit kan deze verhouding anders zijn. Wanneer bosuitbreiding op landbouw gepaard gaat met vernatting kan bijvoorbeeld de fosfaatuitspoeling naar het oppervlaktewater toenemen. Bosvorming op natuurgrasland kan een klein negatief effect hebben op de uitspoeling van stoffen, doordat meer depositie uit de atmosfeer zal worden ingevangen. Over de effecten van revitalisering van bos op de grondwaterkwaliteit is weinig bekend; waarschijnlijk zullen eventuele effecten klein zijn omdat het vervuilende effect van bos al gering is. De nitraatuitspoeling van bos wordt verder in belangrijke mate bepaald door de stikstofdepositie omdat veel bossen stikstofverzadigd zijn.

Bosuitbreiding op landbouwgrond zal in de meeste gevallen positief uitwerken voor de algemene biodiversiteit en voor de landschappelijke robuustheid van bossen (door verbinden en bufferen van bestaand bos). De kansen voor biodiversiteit lijken het hoogst in lagere, vochtigere of rijkere gebieden, omdat hier een potentie ligt om waardevolle vochtige en rijkere bostypen te ontwikkelen. Daarbij is een goede inrichting wel van belang om ook daadwerkelijk soortenrijke nieuwe bossen te bereiken (van den Berg et al., 2022). Bosvorming op natuurgrasland kan positief of negatief uitwerken voor biodiversiteit en natuurwaarde, afhankelijk van de kwaliteit van de korte natuurtypen die wordt vervangen en de potentie van de locatie om bos van goede kwaliteit te ontwikkelen (Nijssen et al., 2021). Ook revitaliseringsmaatregelen kunnen, zelfs zonder bosuitbreiding, veel opleveren voor de natuurwaarde van het landschap, als deze erin slagen de kwaliteit van bossen te herstellen. De vooruitzichten daarvoor zijn sterk afhankelijk het bostypen. Voor zure, droge bossen is bij de huidige nog steeds hoge stikstofdepositie het herstelperspectief zeer slecht zonder dat er beproefde technieken voor herstel van habitatkwaliteit voorhanden zijn. Herstelkansen voor vochtige en natte bossen zijn groter omdat die meer stuurbaar zijn met maatregelen in de waterhuishouding en positieve resultaten zijn gerealiseerd in herstelprojecten. Wel geldt dat van veel revitaliseringsmaatregelen de werkelijke lange termijn doorwerking op de biodiversiteit nog slecht bekend is. Voor een werkelijk succesvolle revitalisering van bossen is bovendien is ook verbetering nodig van condities op landschapsschaal, waarbij het ongedaan maken van de structurele verdroging en sterke verlaging van de stikstofdepositie cruciaal zijn..

Tabel 6.1: Synthese effecten bosscenario's op water- en natuurfuncties in een landschap rond een typische drinkwaterwinning op de hoge zandgronden. Scenario 1-6: bosuitbreiding (5% van landschap) op verschillende locaties, met en zonder ingrepen in hydrologie (verwijderen drainage). Scenario 7: revitaliseringsmaatregelen. Effecten weergegeven als positief (+), negatief (-), neutraal (0) en onzeker (?).

Scenario	Land-schaps-positie	Voorgaand landgebruik	Hydrol. maatregelen	Grondwater-beschikbaarheid		Grondwater-kwaliteit	Bio-diversiteit en vitaliteit natuur
				Aanvulling	Voorraad-effect/ Waterstand		
S1 Uitbr. op landbouw, hoog	Hoog	Landbouw	Nee	0/-	0/-/--	++	+
S2 Uitbr. op landbouw, hoog, + verminderen drainage			Ja	0/-	+?	++	+
S3 Uitbr. op natuur-grasland., hoog, + verminderen drainage		Natuur	Ja	0/-	+?	+/-?	+/-?
S4 Uitbr. op landbouw, laag	Laag	Landbouw	Nee	0/-	-	+	++
S5 Uitbr. op landbouw, laag, + verminderen drainage			Ja	0/-	+?	+	++
S6 Uitbr. op natuurgrasland, laag, + verminderen drainage		Natuur	Ja	0/-	+?	+/-?	+/-?
S7 Omvorming ½ naaldbos, + verminderen drainage	Revitalisering: verloving, verbetering bosstructuur, bodem, hydrologie			+/-	+	N/+?	droge zure bossen 0/? vochtige/natte bossen +/++

Waar liggen kansen en risico's vanuit waterfuncties en natuur voor bosuitbreiding en -revitalisering in gebieden rond binnenlandse drinkwaterwinningen?

De eenvoudige verkenning die in deze studie is gedaan laat zien dat voor de grondwaterkwantiteit vooral kansen liggen bij bosvorming in combinatie met hydrologisch herstel (meer grondwateraanvulling en vernatting) en revitaliseringsmaatregelen. Daarbij zouden de kansen in de lage delen van het landschap mogelijk groter kunnen zijn, maar dit is uit dit onderzoek nog niet duidelijk gebleken. Gezien de relatief hoge verdamping van agrarische graslanden is omvorming naar bos hier overwegend gunstig en lijken mogelijk negatieve effecten op de grondwateraanvulling beperkt te zijn. Voor de grondwaterkwaliteit liggen kansen in die gebieden waar landbouw op dit moment negatieve effecten heeft op de uitspoeling van stoffen; voor nitraat geldt dit juist vooral in de hoge delen van het landschap. Voor het intrekgebied van waterwingebieden geldt dan hoe meer landbouwgrond wordt omgevormd naar bos hoe groter de vermindering van de nitraatuitspoeling zal worden. Voor de biodiversiteit liggen de grootste kansen bij bosvorming op landbouwgrond en kan overal in het landschap voordeel behaald worden, afhankelijk van de inrichting van het nieuwe bos. Daarbij zijn de kansen op lagere, vochtigere of rijkere locaties waarschijnlijk het grootst omdat hier meer herstelperspectief is op waardevolle bostypen.

In de praktijk zal de afweging voor bosmaatregelen en de locatie daarvan per gebied moeten worden gemaakt, afhankelijk van wat de prioriteiten zijn, grondposities en ambities van stakeholders en waar praktisch gezien opties liggen. Gezien de grote schaal van de huidige ontwatering in en rond vele waterwingebieden is het belangrijk om bosmaatregelen uit te voeren in samenhang met maatregelen voor herstel van de waterhuishouding.

Wat zijn de effecten van bosrevitalisering in landschappen rond duinwaterwinningen op grondwater en natuur?

Revitalisering in duinbossen heeft in vergelijking met binnenlandse bossen nog relatief weinig aandacht gehad. Revitalisering zou hier de vorm kunnen krijgen van een gedeeltelijke omvorming van naaldbos naar loofbos en mogelijk deels opener maken van het bos, en kan daarmee in potentie een verhoging van de grondwateraanvulling en -voorraden opleveren. Dit geldt ook wanneer duin(naald)bos gedeeltelijk wordt omgevormd naar open duinvegetatie. Door revitalisering en omvorming van naaldbos in duingebieden kan ook een vergroting van de natuurwaarde en vitaliteit van bos en/of open natuurtypen worden verwacht. Het positieve effect zal afhangen van de locatiekeuze ten opzichte van bestaande waardevolle vegetaties, de natuurwaarde van de bestaande naaldbossen, en of in combinatie met omvorming ook extra inrichtingsmaatregelen worden genomen. Over de effecten van revitaliseringsmaatregelen in duinbossen op de boskwaliteit en -biodiversiteit is echter weinig bekend.

Welke kennislacunes liggen nog open om de effecten van bosmaatregelen in het landschap te voorspellen?

Uit de verkenning zijn verschillende kennislacunes naar voren gekomen, die het op dit moment nog moeilijk maken om de effecten van bos(maatregelen) in het landschap goed te begrijpen en voorspellen. Deze lacunes betreffen:

- Het verdampingsgedrag en de grondwateraanvulling van verschillende bostypen, ook onder droogte en klimaatverandering, is onzeker. De bestaande kennis is gebaseerd op een relatief klein aantal meetstudies, en op dit moment worden de variatie binnen bostypen en de effecten van weersextremen en klimaatverandering nog weinig in studies meegenomen. Ook veel andere vegetatietypen kennen een brede range in verdampingswaarden, wat het inschatten van de effecten van bosvorming verder bemoeilijkt.
- De mogelijke effecten van klimaatverandering op bossen: hoe zou hun verdampings- en groeigedrag kunnen veranderen, hoe kan de soortensamenstelling verschuiven, en wat is de impact van klimaatverandering (o.a. droogte- en hittestress) voor de gezondheid en biodiversiteit van bossen? De bossen die nu worden aangeplant zullen immers pas over decennia volledig ontwikkeld zijn.
- Meetdata van de effecten van bosaanplant en -omvorming op de hydrologie. De bestaande kennis is vooral op modelberekeningen gebaseerd. Bij bestaande bosaanplant- of omvormingsprojecten zijn effecten op de waterhuishouding weinig gemonitord en gerapporteerd.

- Effecten van hydrologische herstelmaatregelen, zoals het verminderen van lokale drainage of het inrichten van (beboste) nattere bufferzones op de waterbalans van het landschap. Dit kan met modelberekeningen worden onderzocht, maar ook juist metingen in uitgevoerde projecten zouden waardevol zijn, die nu schaars zijn.
- De nitraatuitspoeling van bossen is sterk variabel en kan ook erg hoog zijn. Er is nog weinig inzicht in variatie in de ruimte en tijd en welke factoren een rol bij spelen.
- Effecten van (lokale) herstelmaatregelen op bosvitaliteit en -biodiversiteit. Er is recent onderzoek gedaan naar steenmeeltoepassing en rijkstrooiselsoorten en hydrologische maatregelen, maar de doorwerking van maatregelen op langere termijn is nog onzeker. Om dit moment ontbreekt tevens grotendeels voor de droge zure bossen een perspectief voor ecologisch herstel bij de huidige en toekomstige stikstofdepositie. Ook is van maatregelen in de bosstructuur nog minder bekend.
- Er is weinig (recente) kennis van de status en herstelmogelijkheden van duinbossen. Vooral van vochtige typen die momenteel weinig voorkomen, is weinig bekend, terwijl deze wel waardevol kunnen zijn.

7 Referenties

- Aggenbach, C.J.S., M. Berg, J. Frouz, T. Hiemstra, L. Norda, J. Roymans, R. van Diggelen (2017). Evaluatie strategieën omgang met overmatige voedingsstoffen. OBN2017/ 214-NZ, Vereniging van Bos- en Natuureigenaren. Driebergen.
- Aggenbach C.J.S, M. Lemmens & E. Sanz Mali (2022). Effecten van de COVID-19 lockdowns en droogte op de stikstofhuishouding van droge heide. KWR 2022.015, KWR Water Research Institute, Nieuwegein.
- Archer, N. A. L., Otten, W., Schmidt, S., Bengough, A. G., Shah, N., & Bonell, M. (2016). Rainfall infiltration and soil hydrological characteristics below ancient forest, planted forest and grassland in a temperate northern climate [https://doi.org/10.1002/eco.1658]. *Ecohydrology*, 9(4), 585-600.
https://doi.org/https://doi.org/10.1002/eco.1658
- Bartholomeus, R., van Huijgevoort, M., van den Eertwegh, G., & van Deijl, D. (2019). *Efficiëntie van berekening en subirrigatie uit grondwater: Modelmatige analyses met SWAP en Hydrus-2D* (KWR 2019.059).
- Bergsma, H., J.J. Vogels, M. Weijters, R. Bobbink, A.J.M. Jansen & L. Krul (2016). Tandrot in de bodem – hoeveel biodiversiteit kan de huidige minerale bodem nog ondersteunen? *Bodem* 1: 27-29.
- Bloem, J., Dimmers, W., Polling, M., de Groot, A., Laros, I., de Jong, A., Verbaarschot, E., Weijters, M., van Duinen, G. A., & van den Berg, L. (2022a). Effecten van steenmeel op bodemleven in droge eikenbossen. *Vakblad Natuur Bos Landschap*(189), 30-33. **https://www.natuurkennis.nl/Uploaded_files/Publicaties/vnbl-nov2022-steenmeel.pdf**
- Bloem, J., Weijters, M., & van den Berg, L. (2022b). *Veldwerkplaats stikstof, verzuring, strooiselafbraak, kwijnende bossen / steenmeel*.
- Bobbink, R., van den Burg, A., Brouwer, E., van de Riet, B., & Siepel, H. (2018). *Langetermijneffecten van bosbekalking en – bemesting: de Harderwijkerproef* (Monitoring OBN-17-DZ). (OBN, Issue.
- Bobbink, R., van Dijk, G., Remke, E., & Tomassen, H. (2022). *Herstelbaarheid van door stikstofdepositie aangetaste Natura 2000-habitattypen: een overzicht*. **https://www.greenpeace.org/static/planet4-netherlands-stateless/2022/02/6c62b831-0bobbinketal2022rapportherstelbaarheidvoorgp_finalfinal.pdf**
- Bot, A. P. (2011). *Grondwaterzakboekje*. Bot Raadgevend Ingenieurs. **www.grondwaterzakboekje.nl**
- Boumans, L. J. M., Wattel-Koekkoek, E. J. W., & van der Swaluw, E. (2012). *Veranderingen in regen- en grondwaterkwaliteit als gevolg van atmosferische emissiereducties*
https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/680720005.pdf
- Brakkee, E. A., Aggenbach, C. J. S., & Geurts, J. (2023). Evaluatie waterwinning en natuur in de duinen. KWR 2023.037, Nieuwegein.
- Brakkee, E. A., & Dorland, E. (2021). *Trendalert De Bossenstrategie in waterperspectief*.
- Breedveld, M. J., Stempher, W., & de Boer, M. E. (2018). *Beheerplan bijzondere natuurwaarden Meijndel & Berkheide*. **https://www.bij12.nl/wp-content/uploads/2020/09/Natura-2000-Beheerplan-97-Meijndel-Berkheide.pdf**
- Brouwer, E., van der Burg, R. F., Franssen, M. L., van Duinen, G. A., Jansen, A. J. M., J., v. D., & Emsens, W. J. (2022). *De nutriëntenkringloop tijdens herstel van basenrijke, vochtige bossen* (OBN, Issue.
https://www.natuurkennis.nl/Uploaded_files/Publicaties/obn-2018-100-nz-nutriëntenkringloop-vochtig-bos.pdf
- Caljé, R., Schaars, F., & Heijkers, J. (2014). *Vergelijking van enkele schattingsmethoden voor de actuele verdamping*. **https://www.stowa.nl/publicaties/vergelijking-van-enkele-schattingsmethoden-voor-de-actuele-verdamping**
- De Jonge, M., & Tietema, A. (2000a). Nitraatuitspoeling onder bos overschrijdt drinkwaternorm vaker dan gedacht. *H2O*, 2000(24), 26-27. **https://edepot.wur.nl/370562**
- de Jonge, M., & Tietema, A. (2000b). Nitraatuitspoeling onder bos overschrijdt drinkwaternorm vaker dan gedacht. *H2O*, 24, 26-27. **https://edepot.wur.nl/370562**
- de Niet, J., van der Toorn, L., Beijer, E., Heijkers, J., & Hoekstra, J. (2021). Hydrologische effecten studie van het vervangen van naaldbos op de Utrechtse Heuvelrug door loofbos. *H2O*, 2021.
https://www.h2owaternetwerk.nl/vakartikelen/hydrologische-effecten-van-het-vervangen-van-naaldbos-op-de-utrechtse-heuvelrug-door-loofbos
- de Vries, W., Bolhuis, P., van de Burg, A., & Bobbink, R. (2017). Doorgaande verzuring van bosbodems: Oorzaken en gevolgen voor het bosecosysteem. *Vakblad Natuur Bos Landschap*(137), 32-35.

- de Vries, W., Weijters, M., Jong, A. d., Delft, B. v., Bloem, J., Burg, A. v. d., Duinen, G.-J. v., Verbaarschot, E., & Bobbink, R. (2019). *Verzuring van loofbossen op droge zandgronden en herstel mogelijkheden door steenmeeltoediening* (OBN, Issue).
- Deltares. (2020). *LHM4.1 geaggregeerde modelresultaten*.
<https://data.nhi.nu/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/3c17b80b-e24e-4529-b778-98dd2b95f09c>
- Delzon, S., & Loustau, D. (2005). Age-related decline in stand water use: sap flow and transpiration in a pine forest chronosequence. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129(3), 105-119.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.01.002>
- Desie, E., van den Berg, L., Nyssen, B., Weijters, M., van Duinen, G. A., den Ouden, J., Vancampenhout, K., & Muys, B. (2020). Rijkstrooisel: kansen voor herstel van de nutriëntenkringloop in bossen. *De Levende Natuur*, 121(4), 134-139. <https://bosgroepen.nl/bosgroep-zuid-nederland/wp-content/uploads/sites/4/2020/08/Artikel-levende-natuur-Rijkstrooisel.pdf>
- Dolman, H., Moors, E., Elbers, J., Snijders, W., & Hamaker, P. (2000). *Het Waterverbruik Van Bossen in Nederland*.
http://www.climatexchange.nl/projects/boshydrologie/Waterverbruik_Bossen.pdf
- DWSI. (2021, 2021-05-27). De Bossenstrategie: Ziet men door de bomen het water nog wel? De Bossenstrategie: Ziet men door de bomen het water nog wel?, Teams.
- Eekeren, N. v., Jongejans, E., Agtmaal, M. v., Guo, Y., Velden, M. v. d., Versteeg, C., & Siepel, H. (2021). *Bodemleven in de toplaag - Springstaarten & mijten in landbouw- en natuurgrasland*.
<https://louisbolk.nl/sites/default/files/publication/pdf/bodemleven-de-toplaag.pdf>
- Elbers, J. A., Moors, E. J., & Jacobs, C. M. J. (2010). *Gemeten actuele verdamping voor twaalf locaties in Nederland*.
<https://edepot.wur.nl/163481>
- Filoso, S., Bezerra, M. O., Weiss, K. C., & Palmer, M. A. (2017). Impacts of forest restoration on water yield: A systematic review. *PloS one*, 12(8), e0183210.
- Flevoland, P. (2021). *Bossenstrategie provincie Flevoland*. Lelystad Retrieved from <https://www.flevoland.nl/wat-doen-we/natuur/bossenstrategie>
- Gundersen, P., I. K. Schmidt, and K. Raulund-Rasmussen. (2006). Leaching of nitrate from temperate forests: effects of air pollution and forest management. *Environmental Reviews* 14:1-57.
- Hazeu, G. W., Schuiling, C., Dorland, G. J., Oldengarm, J., & Gijsbertse, H. A. (2012). *Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland versie 6 (LGN6)*. <https://www.wur.nl/nl/Onderzoek-Resultaten/Onderzoeksinstituten/Environmental-Research/Faciliteiten-tools/Kaarten-en-GIS-bestanden/Landelijk-Grondgebruik-Nederland/Versies-bestanden/LGN6.htm>
- Hommel, P.W.F.M., H.M. Beije, R.W. de Waal & N.A.C. Smits (2016a). Herstelstrategie H91E0B Herstelstrategie H91E0B: Vochtige alluviale bossen Vochtige alluviale bossen Vochtige alluviale bossen (essen- (essen-iepenbossen) iepenbossen) iepenbossen).
- Hommel, P.W.F.M., R.W. de Waal, & N.A.C. Smits (2016b). Herstelstrategie H91E0C Herstelstrategie H91E0C: Vochtige alluviale bossen Vochtige alluviale bossen Vochtige alluviale bossen (beekbegeleidende bossen) (beekbegeleidende bossen).
- Huiskes, H. P. J., Beije, H. M., Hommel, P. W. F. M., Schotsman, N., Slings, Q. L., & Smits, N. A. C. (2009). *Herstelstrategie H2180A: Duinbossen (droog)*. <https://www.natura2000.nl/meer-informatie/herstelstrategieen>
- Jansen, A. J. M., & Olsthoorn, A. F. M. (2003). Relatie bos en waterwinning. 1. Verkenning van samenwerkingsmogelijkheden. *Nederlands Bosbouwtijdschrift*, 75(2), 7-10.
<https://edepot.wur.nl/114339>
- Jansen, P., Massop, H., Groenendijk, P., Renaud, L., & Hendriks, R. (2013). *Oppervlakkige afstroming en diepte van modelprofielen*. <https://edepot.wur.nl/294091>
- Kirchen, G., Calvaruso, C., Granier, A., Redon, P.-O., Van der Heijden, G., Bréda, N., & Turpault, M.-P. (2017). Local soil type variability controls the water budget and stand productivity in a beech forest. *Forest Ecology and Management*, 390, 89-103. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.12.024>
- Klok, C., Römkens, P., & Faber, J. H. (2004). *Risicobeheer van verontreinigde gronden - Kwetsbaarheid en kansrijkdom van natuurdoelen op verontreinigde bodems*.
<https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/28770>
- Kraijenhoff van de Leur, D. A. (1958). A study of non-steady groundwater flow with special reference to a reservoir-coefficient. *De Ingenieur*, 70(19), 87-94.

- LNV. (2020). *Bos voor de toekomst: Uitwerking ambities en doelen landelijke Bossenstrategie en beleidsagenda 2030* (1120-001). <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2020/11/18/uitwerking-ambities-en-doelen-landelijke-bossenstrategie-en-beleidsagenda-2030>
- Masselink, N. J., Jeths, R., & Wattel-Koekoek, E. J. W. (2012). *Trendmeetnet Verzuring: Monsternemingen in 2009/2010/2011*.
- Massop, H., Noij, I. G., Appels, W. M., & van den Toorn, A. (2012). *Oppervlakkige afspoeling op landbouwgronden. Metingen op zandgrond in Limburg*. <https://edepot.wur.nl/240818>
- Meinardi, C. R., Schotten, C. G. J., & De Vries, J. J. (1998). Grondwateraanvulling en oppervlakkige afstroming in Nederland: Langjaarlijkse gemiddelden voor de zand- en leemgebieden. *Stromingen*, 1998(3), 27-41. <https://edepot.wur.nl/10097>
- Min. LNV. (2008). *Profiel document H2180 Duinbossen*. Retrieved from <https://natura2000.nl/profielen/h2180-duinbossen>
- Minasny, B., & McBratney, A. B. (2018). Limited effect of organic matter on soil available water capacity [<https://doi.org/10.1111/ejss.12475>]. *European Journal of Soil Science*, 69(1), 39-47. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ejss.12475>
- Moors, E. (2012). *Water use of forests in the Netherlands* [Vrije Universiteit Amsterdam, Alterra]. Amsterdam. https://www.hydrology.nl/images/docs/dutch/2012.05.22_Eddy_Moors.pdf
- Nijssen, M., Delforterie, W., & Termaat, T. (2021). *Nieuw bos voor klimaat en biodiversiteit*. <https://www.vbne.nl/klimaatlimbosennatuurbeheer/uploads/1-5-eindrapportage-klimaatpilots-2020-nieuw-bos-voor-klimaat-en-biodiversiteit.d6402e.pdf>
- NMV. (2010). Naaldbossen in Nederland: Bedreigde levensgemeenschappen. In Nederlandse Mycologische Vereniging (Ed.).
- Nyssen, B., van der Burg, R. F., & Desie, E. (2016). Regime shift in bossen op zandgronden: LESA toont de kansen. *De Levende Natuur*, 117(6), 230-233. <https://delevendenatuur.nl/sites/default/files/2021-06/web117230-234.pdf>
- Nyssen, B., & Wijdeven, S. (2019). Biodiversiteit versterken in multifunctioneel bos. *Vakblad Natuur Bos Landschap*. <https://edepot.wur.nl/473755>
- OBN. (n.d.). *N15.01 Duinbos*. Vereniging Bos- en Natuureigenaren. Retrieved 2022-10-10 from <https://www.natuurkennis.nl/natuurtypen/n15-droge-bossen/n15-01-duinbos/algemeen-n1501/>
- Possen, B. J. H. M., van Velthoven, B., & Inckel, M. (2021). *Kansenkaart Nieuw bos in Beekdalen - Achtergrondrapport*. https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties%202021/STOWA%202021-XX%20Kansenkaart_Nieuw_bos_in_Beekdalen.pdf
- Provincie Gelderland. (2020). *Vitaal en divers bos: Uitvoeringsprogramma Bomen en Bos* (2020-003070). https://www.gelderland.nl/bestanden/Documenten/Gelderland/03Natuur/DOC_Uitvoeringsprogramma_Bomen_en_Bos_vastgesteld_15_dec_2020.PDF
- Provincie Noord-Brabant. (2020). *Brabantse bossenstrategie: Meer en beter bos, goed voor mens, dier en plant*. <https://www.brabant.nl/bestuur/provinciale-staten/statenstukken/cpv/20200309/download?qvi=1279704>
- Provincie Noord-Holland. (2017). *Natura 2000 beheerplan Noordhollands Duinreservaat 2018-2024*. https://www.bij12.nl/assets/Noordhollands-Duinreservaat-N2000_9-1-2018_ia.pdf
- Provincie Noord-Holland. (2018). *Natura 2000 beheerplan Kennemerland-Zuid 2018-2024*. <https://www.bij12.nl/wp-content/uploads/2019/01/N2000-Beheerplan-Kennemerland-Zuid-2018-2024.pdf>
- Runhaar, J. (2010). *Invloed grondwaterstanden op standplaatscondities en vegetatie*.
- Runhaar, J., Maas, C., Meuleman, A. F. M., & Zonneveld, L. M. L. (2000). Maatregelen gericht op verhoging van de grondwaterstand en stijghoogte. In *Herstel van natte en vochtige ecosystemen; handboek*. https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_95473_31/
- Schipka, F., Heimann, J., & Leuschner, C. (2005). Regional variation in canopy transpiration of Central European beech forests. *Oecologia*, 143(2), 260-270. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1798-6>
- Schipper, P., Groenendijk, P., van Eekeren, N., van Zanen, M., Rozemeijer, J., Jansen, G., & Swart, B. (2015). *Goede grond voor een duurzaam watersysteem. Verdere verkenningen in de relatie tussen agrarisch bodembeheer, bodemkwaliteit en waterhuishouding*. <https://edepot.wur.nl/348633>
- Slings, R., Arens, B., Sevink, J., Remke, E., & Nijssen, M. (2012). *Deel III Landschapsecologische inbedding van de herstelstrategieën, onderdeel Droog Duinlandschap* (Herstelstrategieën stikstofgevoelige habitats, Issue. <https://www.natura2000.nl/meer-informatie/herstelstrategieen>

- Smolders, A. J. P., Runhaar, J., Loeb, R., & Lucassen, E. C. (2021). De terugkeer van het verdwenen hout: Randvoorwaarden voor de ontwikkeling van elzenbroekbos in beekdalen. *Landschap*, 38(3), 146-155. https://www.landschap.nl/wp-content/uploads/2021_3_3_Smolders.pdf
- Spieksma, J. F. M., Dolman, A. J., & Schouwenaars, J. M. (1995). *De parameterisatie van de verdamping van natuurterreinen in hydrologische modellen* (Nationaal Onderzoeksprogramma Verdroging (NOV), Issue. https://www.hanscees.com/hatertse-vennen/parametriNOV_4_2.pdf
- Staatsbosbeheer. (2017). *Staatsbosbeheer laat locaties natuurherstel en waterhuishouding onderzoeken*. Retrieved 2022-12-21 from <https://www.boswachtersblog.nl/schoorlseduinen/2017/12/21/staatsbosbeheer-laait-locaties-natuurherstel-en-waterhuishouding-onderzoeken/>
- Steenvoorden, M., Huisman, L., & Vermeijden, L. (2021). *Quickscan effecten revitalisering bossen Provincie Noord Brabant*.
- Stroet, R. (2016). *De overgangszone tussen de Stuwwal van Ootmarsum en de Slenk van Reutum*.
- Stuurman, R., Baggelaar, P., Berendrecht, W., Buma, J., de Louw, P., & Oude Essink, G. (2008). *Toekomst van de Nederlandse grondwatervoorraad in relatie tot klimaatverandering*.
- Stuyfzand, P. J. (1993). *Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the western Netherlands* [PhD Dissertation, Vrije Universiteit Amsterdam, KIWA]. Nieuwegein. <https://research.vu.nl/en/publications/hydrochemistry-and-hydrology-of-the-coastal-dune-area-of-the-west>
- Teuling, A. J., De Badts, E. A., Jansen, F. A., Fuchs, R., Buitink, J., Hoek van Dijke, A. J., & Sterling, S. M. (2019). Climate change, reforestation/afforestation, and urbanization impacts on evapotranspiration and streamflow in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(9), 3631-3652.
- Thomassen, E., Wijdeven, S., Boosten, M., Delforterie, W., & Nyssen, B. (2020). *Revitalisering Nederlandse Bossen*. <https://bosgroepen.nl/bosgroep-zuid-nederland/wp-content/uploads/sites/4/2020/09/Revitalisering-Nederlandse-Bossen-DEFINITIEVE-VERSIE.pdf>
- van Delft, B. (2019). *Bodemonderzoek Solleveld en Staelduinse bos. Onderzoek naar mogelijkheden voor verbetering zuurbuffer in de bodem door boomsoortkeuze*.
- van den Akker, C. (2014). Een fysische onderbouwing van de overdrachtsfactor. *Stromingen*, 20(1), 5-14. https://www.nhv.nu/wp-content/uploads/2020/06/2014-1_een_fysische_onderbouwing_van_de_overdrachtsfactor.pdf
- van den Berg, L., Desie, E., & van Duinen, G. A. (2021). *Veldwerkplaats Rijkstrooiselsoorten* (OBN, Issue.
- van den Berg, L. J. L., Baeten, L., Bloem, J., Brouwer, E., van der Burg, R. F., de Graaf, M. C. C., Verbaarschot, E., Verheijen, K., van der Vlist, S., & Weijters, M. (2022). *Naar een strategie voor ontwikkeling van soortenrijke bossen op voormalige landbouwgronden*.
- van den Eertwegh, G., De Louw, P., Witte, F., Bartholomeus, R., Van Huijgevoort, M., Deijl, D. v., Dam, J. v., Hunink, J., America, I., Pouwels, J., Hoefslot, P., & Wit, J. d. (2021). *Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden- en Oost-Nederland: het verhaal - analyse van droogte 2018 en 2019 en bevindingen*.
- van der Burg, R. F., Bartels, M., & Nyssen, B. (2016a). Ecosysteembenadering voor het bosbeheer op de Groote Heide. *De Levende Natuur*, 117(6), 235-237.
- van der Burg, R. F., Bijlsma, R. J., Brouwer, E., & De Waal, R. W. (2016b). *Vochtige bossen, tussen verdrogen en nat gaan* (OBN, Issue. <https://edepot.wur.nl/371572>
- van der Burg, R. F., VBrouwer, E., Bijlsma, R. J., van den Burg, A. B., van Duinen, G. A., Hommel, P. W., Jansen, A. J., Lucassen, E. C., & de Waal, R. W. (2014). *Preadvies voor herstel en ontwikkeling van vochtige bossen op de pleistocene zandgronden* (2014/OBN192-NZ). (OBN, Issue.
- van der Gaast, J., Massop, H., Vroon, H., & Staritsky, I. (2006). *Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken* (Alterra-rapport 1339).
- van der Meer, R. W. (2020). *Watergebruik in de land- en tuinbouw 2017 en 2018*. <https://research.wur.nl/en/publications/watergebruik-in-de-land-en-tuinbouw-2017-en-2018>
- van der Werf, S. (1991). *Bosgemeenschappen*. Pudoc.
- van Drecht, G. (1997). Modellen voor diffuse ontwatering in de toplaag. *Stromingen*, 3(2), 5-16.
- Van Huijgevoort, M. H., Voortman, B. R., Rijpkema, S., Nijhuis, K. H., & Witte, J.-P. M. (2020). Influence of climate and land use change on the groundwater system of the Veluwe, The Netherlands: A historical and future perspective. *Water*, 12(10), 2866.
- van Loon, A. F. (2016). *De gevolgen van mestgebruik voor drinkwaterwinning*. <https://edepot.wur.nl/384531>
- van Loon, A. F., Clevers, S., & Jalink, M. (2019). *De waarde van natuur voor de watervoorziening*.
- van Loon, A. F., & Fraters, D. (2016). *De gevolgen van mestgebruik voor drinkwaterwinning: een tussenbalans* (KWR 2016.023).

- Vandekerckhove, K. (2019). *Status and development of old-growth elements and biodiversity during secondary succession of unmanaged temperate forests* [PhD thesis, Universiteit Gent].
https://purews.inbo.be/ws/portalfiles/portal/16968740/Vandekerckhove_2019_StatusAndDevelopmentOfOldGrowthElementsAndBiodiversityDuringSecondarySuccessionOfUnmanagedTemperateForests.pdf
- Verhagen, F., Spek, T., Witte, F., Voortman, B., Moors, E. J., Querner, E. P., & Eertwegh, G. A. P. H. v. d. (2014). Expertdialog de Veluwe. Begrijpen we het watersysteem? *Stromingen*, 2014(3), 5-19.
<https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/480111>
- Voortman, B. R., R. P. Bartholomeus, P. M. van Bodegom, H. Gooren, S. van der Zee, and J. P. M. Witte. 2014. Unsaturated hydraulic properties of xerophilous mosses: towards implementation of moss covered soils in hydrological models. *Hydrological Processes* 28:6251-6264.
- Voortman, B. R., Y. Fujita, R. P. Bartholomeus, C. J. S. Aggenbach, and J. P. M. Witte. 2017. How the evaporation of dry dune grasslands evolves during the concerted succession of soil and vegetation. *Ecohydrology* 10.
- Voortman, B., van Huijgevoort, M., & Witte, J. P. (2019). *Verdamping Van Natuurterreinen Berekend Met AZURE. De Parametrisatie Van Heide op Basis Van Lysimetermetingen en een Vergelijking Met Literatuurcijfers*.
- Voortman, B. R., Bartholomeus, R. P., van der Zee, S. E. A. T. M., Bierkens, M. F. P., & Witte, J. P. M. (2015). Quantifying energy and water fluxes in dry dune ecosystems of the Netherlands. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(9), 3787-3805. <https://doi.org/10.5194/hess-19-3787-2015>
- WEnR. (2021). *Bodemkaart*. <https://basisregistratieondergrond.nl/inhoud-bro/registratieobjecten/modellen/bodemkaart-smg/>
- Witte, F., Fujita, Y., Bartholomeus, R., Raterman, B., & Rood, C. E. M. (2017). Vegetatiedynamiek in droge duinen. Modellerings ecosystemendiensten onder invloed van klimaat en stikstof. *Landschap*, 34(3), 108-117.
- Witte, F., Zaadnoordijk, W., Cirkel, G., Leunk, I., & Aarts, H. (2015). *Grondwateraanvulling en achtergrondverlaging in de provincie Noord-Brabant*.
- Wösten, H., & Groenendijk, P. (2021). *Deltafact Belang van bodemorganische stof voor het waterbeheer*.
<https://www.stowa.nl/deltafacts/zoetwatervoorziening/droogte/belang-van-bodemorganische-stof-voor-het-waterbeheer#2599>

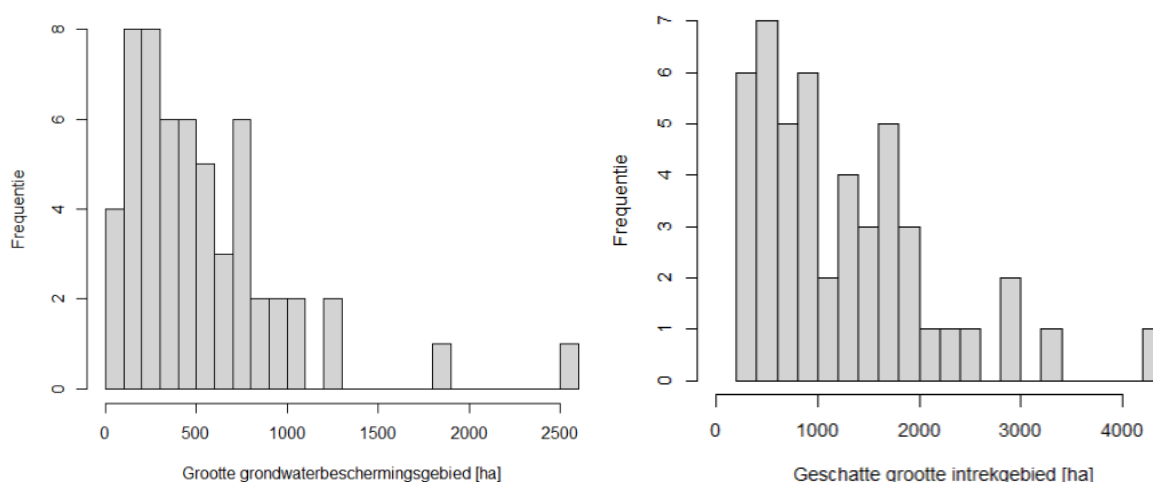
I Details kenmerken winningen

I.1 Hoge zandgronden: grondwaterbeschermingsgebieden

Algemene kenmerken winningen

De bekeken freatische winningen in het binnenland onttrekken gemiddeld zo'n 3 Mm³/jaar, variërend tussen 0.5 en 10 Mm³/jaar (n=48, voor overige geen data). De gemiddelde vergunde capaciteit ligt op 4 Mm³/j (0.7-10). Het geschatte aandeel oppervlaktewater ligt voor de meeste van deze winningen op nul, maar een deel van de winningen heeft wel een substantiële oppervlaktewaterinvloed van enkele procenten tot zo'n 20%. De bekeken winningen onttrekken op enkele tientallen meters diep, gemiddeld op tussen 26 en 62 meter (n=45). De grondwaterbeschermingsgebieden van de 56 bekeken freatische binnenlandse winningen zijn gemiddeld 500 ha groot (Figuur I. 1), hoewel dit voor sommige winningen een stuk groter is.

De grootte van het intrekgebied van de winningen is ruw geschat als die cirkel waarbinnen de totale jaarlijkse grondwateraanvulling (LHM-data, (Deltares, 2020)) gelijk is aan de totale winning. Dit geeft een overschatting voor winningen waar een deel van het water uit oppervlaktewater afkomstig is; deze correctie is hier niet meegenomen omdat het om een indicatie van de maximale grootte gaat. De geschatte intrekgebieden beslaan gemiddeld een gebied van zo'n 1300 ha, of een cirkel met een straal van 2 km (Figuur I. 1). De intrekgebieden zijn meestal ongeveer 2 keer zo groot als de grondwaterbeschermingsgebieden.



Figuur I. 1: Grootte van grondwaterbeschermingsgebieden (links, N=56), en geschatte grootte intrekgebied (rechts, N=48).

Kenmerken en inrichting van grondwaterbeschermingsgebieden

Tabel I. 1 en Tabel I. 2 geven de verdeling van hydrologie, landgebruik en grondsoorten in de grondwaterbeschermingsgebieden van de freatische binnenlandse winningen. De winningen en hun grondwaterbeschermingsgebieden liggen vooral op hoge, droge landschapsposities (grondwatertrap 7 of 8 dominant in 45 van de 56, 5 of 6 in 6 gebieden, 3 of 4 in 5 gebieden). In 33 van de gebieden komen grondwatertrappen lager dan 5 niet of heel weinig voor.

In de grondwaterbeschermingsgebieden ligt meer natuur dan gemiddeld in het landschap als geheel, waarbij vooral naaldbos veel meer voorkomt. De landgebruikstypen zijn niet gelijkmatig over de hydrologische posities verdeeld: vooral de bossen liggen bijna volledig op de droogste standplaatsen. Ook korte natuurlijke vegetatie ligt iets

bovengemiddeld op droge gronden, maar komt ook op vochtigere gronden voor. Landbouwgrond ligt gemiddeld iets meer op de wat minder droge gronden.

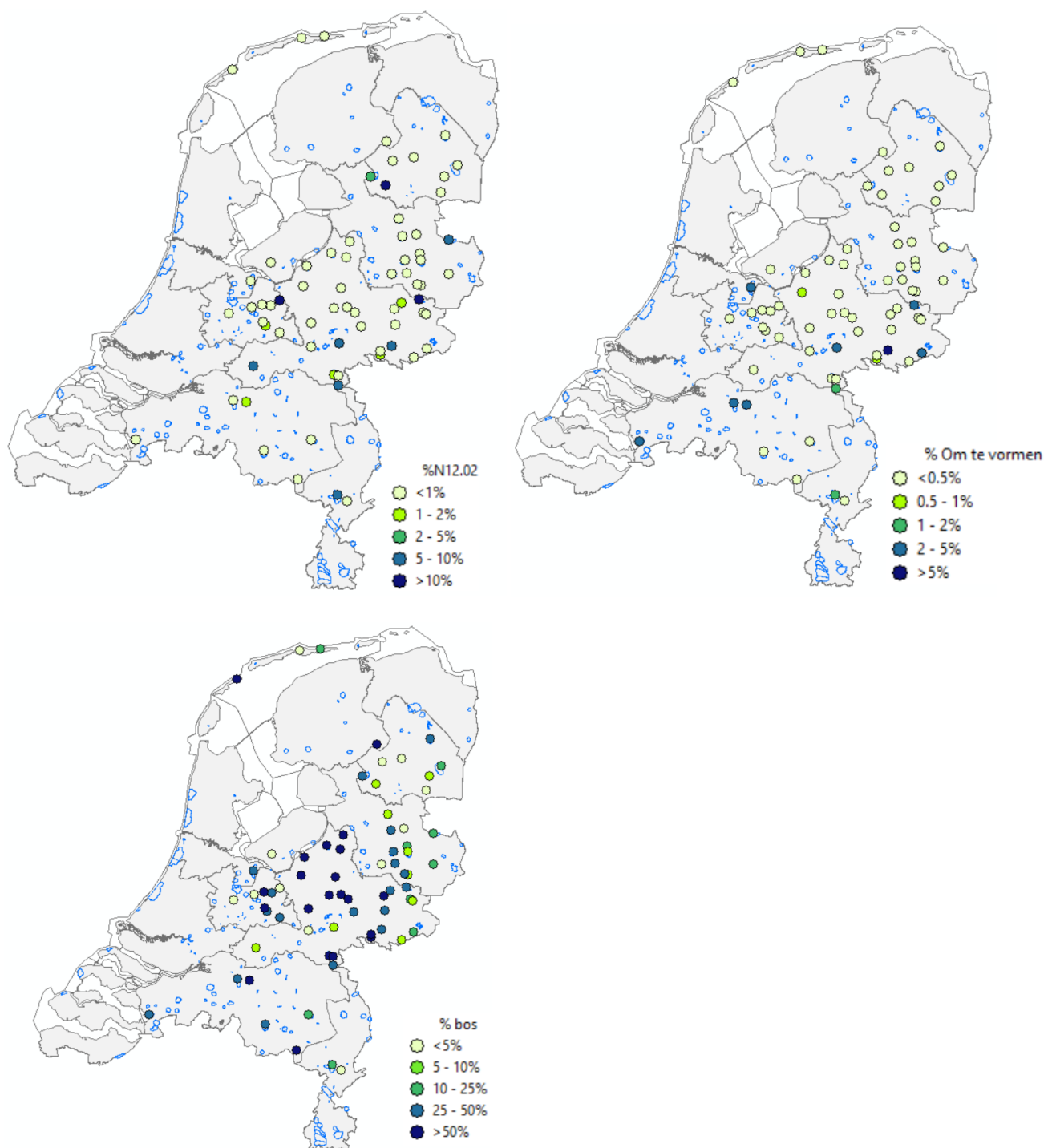
Tabel I. 1: Landgebruik en verdeling over hydrologische posities in 56 freatische grondwaterbeschermingsgebieden (op basis van GIS-analyse; data (Deltares, 2020; Hazeu et al., 2012)).

	Gemiddelde verdeling over grondwatertrappen [%]								
Landgebruik	GT1	GT2	GT3	GT4	GT5	GT6	GT7	GT8	Geheel landschap
Agrarisch grasland	0.2	2.0	3.2	7.0	5.3	11.8	14.0	56.6	27.5
Akkerbouw	0.0	1.3	4.5	5.6	4.5	12.2	19.8	52.1	15.3
Loofbos	0.0	0.0	1.4	1.4	2.9	5.0	11.1	78.2	15.3
Naaldbos	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	7.4	89.3	23.5
Korte natuurlijke vegetatie	0.5	2.0	4.3	0.9	4.9	1.4	14.7	71.3	6
Bebouwing	0.0	0.0	0.3	0.0	0.7	1.3	16.6	81.1	8.9
Onverhard overig	0.0	0.0	0.4	0.0	1.6	6.7	17.0	74.4	2.8
Water	10.3	1.6	7.1	5.0	7.1	8.9	28.2	31.7	0.7
Geheel landschap	0.4	1.6	2.3	4.5	2.9	8.0	12.1	68.2	

Tabel I. 2: Grondsoorten in 56 freatische grondwaterbeschermingsgebieden (op basis van GIS-analyse; data (WEnR, 2021)).

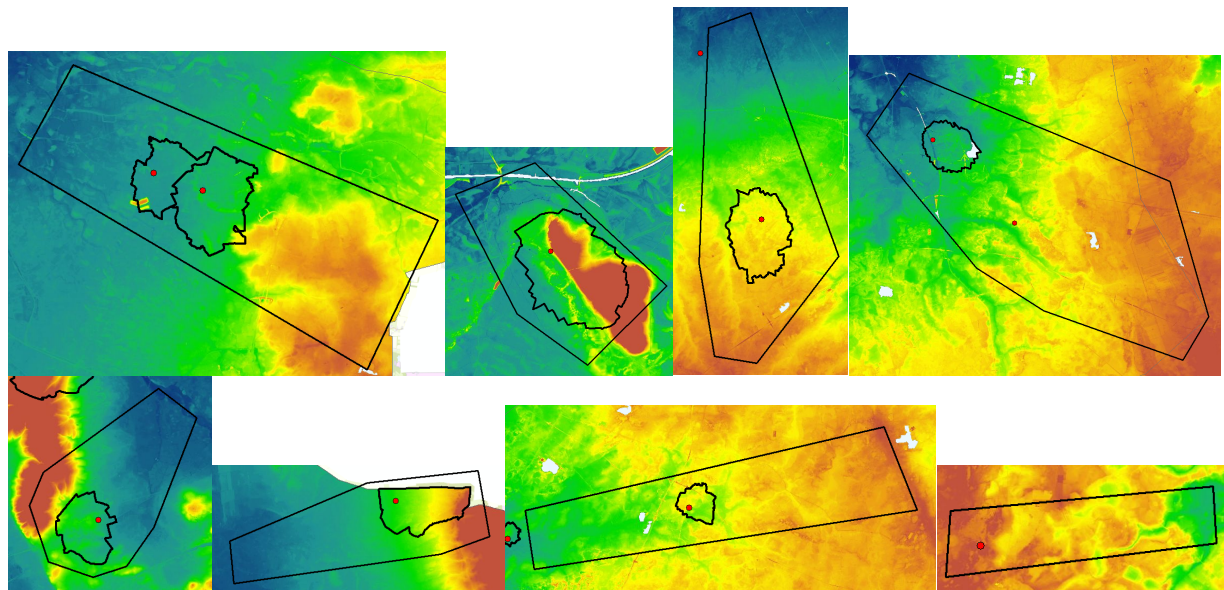
Bodemgroep	Gemiddeld oppervlak in GWBG [%] (N=56)
Zand, niet/zwak lemig	61.4
Zand, sterk lemig	16.3
Veen + moerig	5.3
Klei	4.5
Leem	1.5
Overig	11.0

Tabel 2.3 en Figuur I. 2 geven het aandeel van verschillende relevante natuurtypen in grondwaterbeschermingsgebieden van freatische winningen. De natuur rondom de winningen wordt gedomineerd door productiebos, droog natuurbos en droge lage vegetatietypen.



Figuur I. 2: Voorkomen van Flora- en faunarijk grasland (N12.02), nog naar natuur om te vormen gronden (N00.01) en bossen (N14-17) in freatische grondwaterbeschermingsgebieden.

I.II Hoge zandgronden: landschapsschaal



Figuur 7.1: Landschapelijk gradiënt (hoogteligging) voor acht freatische grondwaterwinningen. De polygonen geven de grondwaterbeschermingsgebieden en de gebruikte uitsnedes. Van linksboven naar rechtsonder: Haarlo-Olden Eibergen, Lochem, Vessem, Helmond, Holten, Manderveen, Beilen en Schijf.

Tabel I. 3: Basiskenmerken van onderzochte landschapsgradiënten. GT=grondwatertrap; GWBG=grondwaterebeschermingsgebied.

Winning	Lengte transect [km]	Hoogte transect [m NAP]	Gradiënt [m/km]	GTs in transect	GT locatie winning	GTs in GWBG	Winning relatieve horizontale positie vanaf onderkant van de doorsnede	Winning relatieve hoogte vanaf onderkant
Haarlo-Olden Eibergen	12	15-35	1.7	3-8	7-8	3-8	33%	90%
Lochem	5	10-50	8.0	4-8	8	7-8	80%	40%
Vessem	20	10-30	1.0	2-8	8	8	55%	100%
Helmond	17	15-30	0.9	4-8	8	7-8	35%	100%
Manderveen	18	10-60	2.8	4-8	8	4-8	67%	50%
Beilen	30	5-20	0.5	2-8	7	2-8	57%	90%
Schijf	10	8-42	3.4	2-8	8	8	70%	60%

Tabel I. 4 en Tabel 2.4 geven de hydrologie- en bodemcondities en het landgebruik voor de acht bekeken landschapsgradiënten. Deze liggen alle op zandgrond. Podzol- en Eerdgronden zijn over de hele gradiënt meestal dominant, maar op de vochtigere locaties komen Beekeerdgronden en meer organische gronden ook veel voor. Enkele bodemtypen die ontstaan in de relatief natte condities hebben nu relatief droge grondwatertrappen (bijvoorbeeld hoog aandeel Veldpodzol bij Gt 7-8). Dit duidt op sterke en grootschalige verdroging.

De landschapsgradiënten worden gedomineerd door agrarisch gebruik, gevolgd door bossen en bebouwd gebied. De bossen, met name de naaldbossen, zijn sterk gebonden aan de hogere landschapsposities. Landbouwgrond komt juist relatief iets meer op de vochtigere posities voor.

Tabel I. 4: Hydrologie en bodemtypen in de bekeken landschapsgradiënten.

Landschapstype		Voorkomen [%]
Hydrologie	Bodemtype	
Droog (GT 7-8) (56%)	Veldpodzolgrond	18.6
	Enkeerdgrond	12.6
	Haarpodzolgrond	6.4
	Gooreerdgrond	3.7
	Holtpodzolgrond	3.1
	Beekeerdgrond	2.8
	Laarpodzolgrond	2.7
	Duinvaaggrond	2.5
Middel (GT 4-6) (34%)	Veldpodzolgrond	14.7
	Beekeerdgrond	4.5
	Gooreerdgrond	4.4
	Enkeerdgrond	3.4
	Moerige eerdgrond	2.2
	Laarpodzolgrond	1.2
	Moerige podzolgrond	1.1
Vochtig (GT 1-3) (10%)	Veldpodzolgrond	2.7
	Beekeerdgrond	1.8
	Moerige eerdgrond	1.6
	Madeveengrond	1.4
	Gooreerdgrond	1.2

Tabel 7.1: Landgebruik en verdeling over hydrologische posities in de zeven bekeken landschapsgradiënten.

	Gemiddelde verdeling over grondwatertrappen [%]								Geheel gebied (ref)
Landgebruik	GT1	GT2	GT3	GT4	GT5	GT6	GT7	GT8	
Agrarisch grasland	1	5	8	11	8	25	19	23	40
Akkerbouw	0	2	6	8	7	24	23	31	26
Loofbos	0	1	6	3	6	13	16	54	8
Naaldbos	0	0	3	0	3	5	12	76	9
Korte natuurlijke vegetatie	1	4	11	6	9	15	26	28	5
Bebouwing	0	0	1	2	2	13	34	48	8
Onverhard overig	0	1	1	6	7	19	33	33	3
Water	4	4	9	8	13	14	23	25	1
Geheel gebied (ref)	1	3	6	7	7	21	20	35	

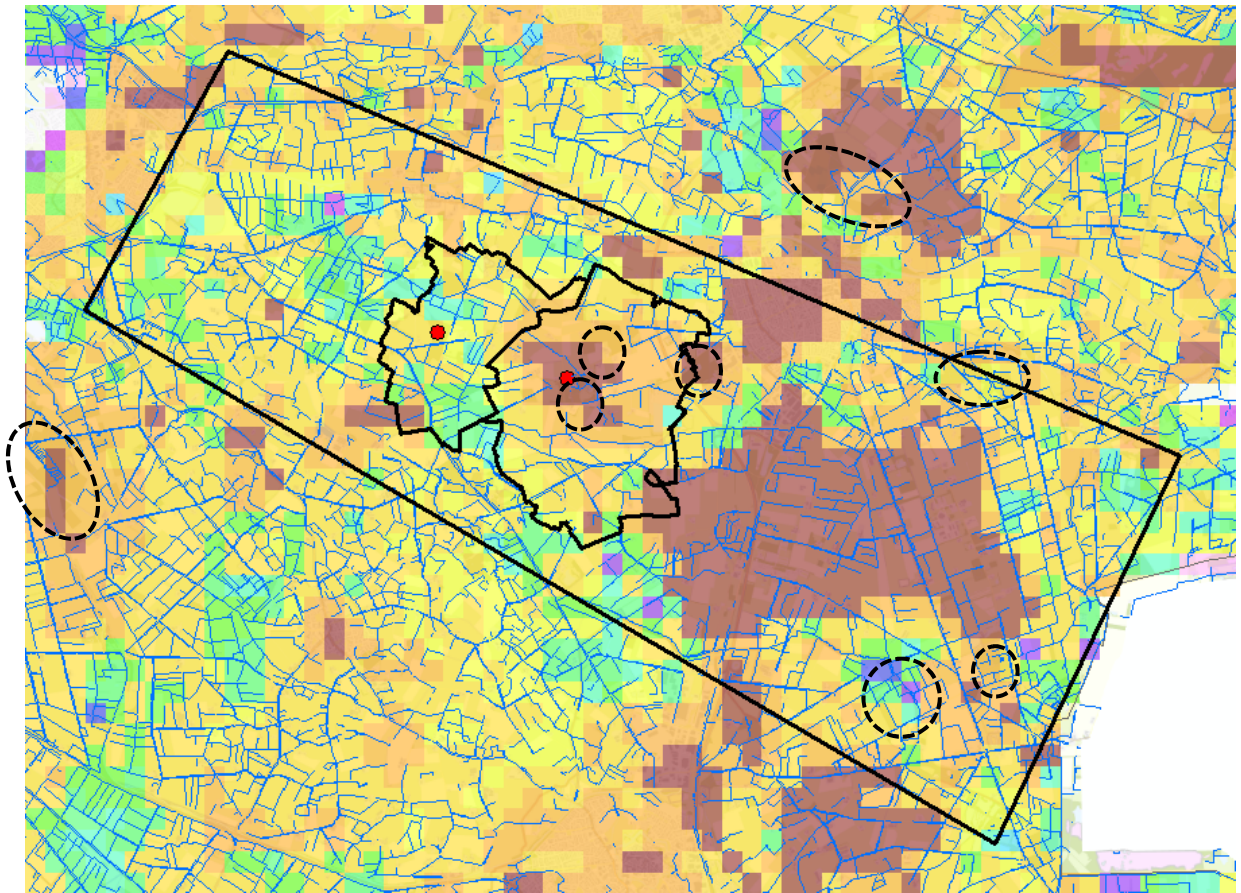
De drainagekenmerken van de landschapsgradiënten zijn verkend op basis van de dichtheid van waterlopen; de 'drainage conductance'-kaart van het LHM (lagere weerstand = sterk gedraineerd), en LHM-modeluitvoer van de fractie van de grondwateraanvulling die infiltreert naar het diepere grondwater (tweede modellaag), die ook een indicatie geeft van hoeveel water er als drainage wordt afgevoerd (Tabel I. 5). De figuren daar onder geven voor de vier voorbeeldgradiënten rondom winningen de grondwatertrap (bruin=GT8, blauw=GT1-2); de ligging van de winning met grondwaterbeschermingsgebied; en de ligging van natuurgebieden (stippellijn cirkels).

Hieruit blijkt dat in de landschapsgradiënten rondom freatische winningen de drainage, zoals verwacht, over het gradiënt varieert. Hoog in het gradiënt zijn meestal wel sloten en waterlopen aanwezig, maar met een lage dichtheid. Hier infiltreert het merendeel van het neerslagoverschot, vaak zelfs vrijwel 100%. Dit is minder als hoog in het gradiënt lokale laagtes zijn of plekken waar water stagneert, zodat hier intensiever wordt gedraineerd. Midden in het gradiënt, op de overgang tussen de hoge rug en het beekdal of andere laagte, is vaak een mix aanwezig van meer en minder intensieve drainage; hier infiltreert gemiddeld in de orde grootte van de helft van de grondwateraanvulling, maar met een grote ruimtelijke variatie. Laag in het gradiënt is de drainage meestal intensief, met een dicht netwerk van sloten. Hier infiltreert minder dan de helft van de grondwateraanvulling naar dieper grondwater. Wanneer naar de figuren wordt gekeken valt ook op dat droge gebieden veel drainage kunnen hebben.

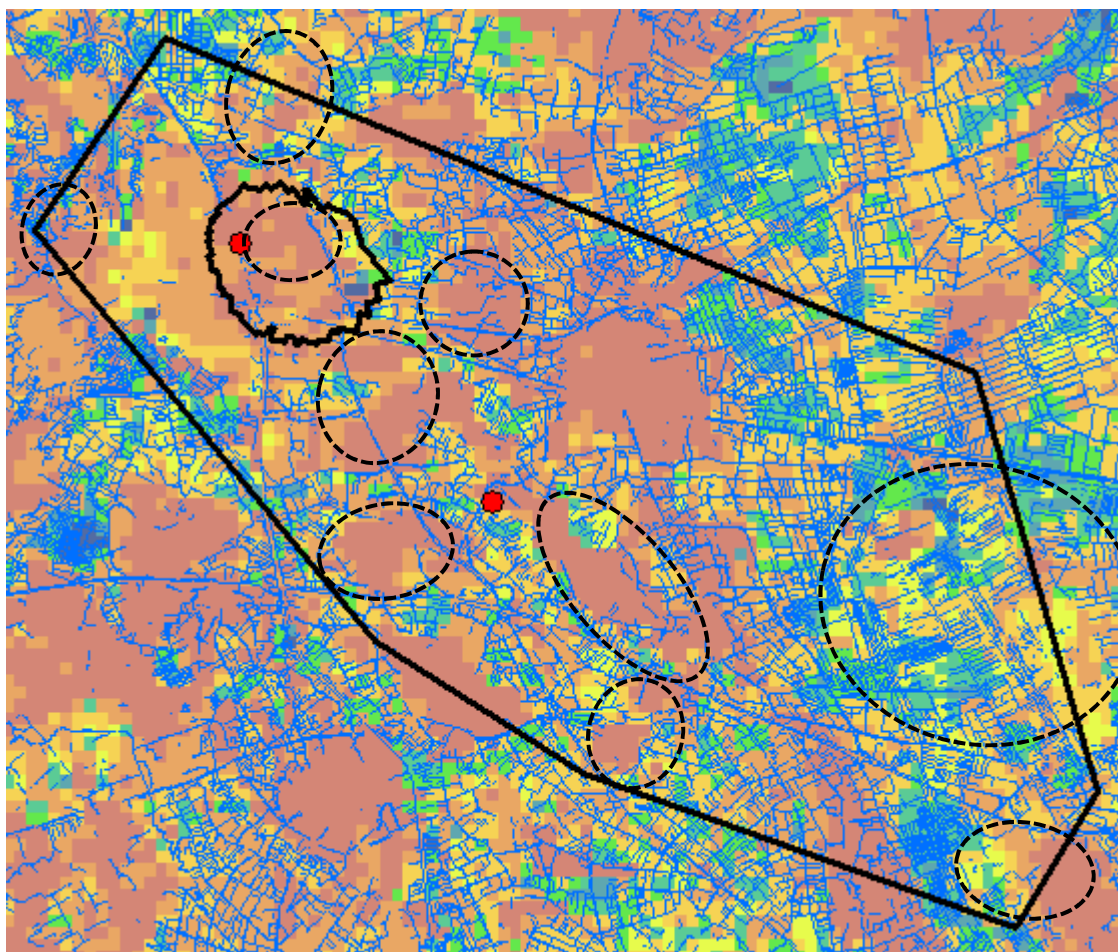
Specifiek kijkend naar de natuurgebieden die binnen de gradiënt aanwezig zijn, dan blijkt dat ook de natuurgebieden vaak onder invloed staan van drainage (zie Bijlage I.I). Hoog in de gradiënten zijn vaak in de natuurgebieden toch sloten aanwezig, waardoor ook hier gedraineerd wordt. Dit zal vooral gelden voor lokale laagtes en andere (voormalige) stagnerende locaties. In het midden en laag in de gradiënt staan de meeste natuurgebieden onder invloed van drainage, hoewel de dichtheid van waterlopen vaak wat lager is dan in omringende landbouwgebieden. In sommige natuurgebieden zal de drainage zijn gereduceerd voor natuurdoelen, maar dit is waarschijnlijk niet overal gebeurd. Ook (brochure herstel vochtige bossen) noemen dat een groot deel van de vochtige bossen op de hoge zandgronden, zowel in de beekdalen als op vochtige/stagnerende locaties hoger in het gradiënt, is voorzien van rabatten of greppels, waarbij die op de meeste plekken nog altijd aanwezig zijn. Zoals boven aangegeven duiden de huidige droge condities van bodemtypen die ontstaan zijn onder natte condities op sterke verdroging. Ook waar bijv. natuurgraslanden zijn gecreëerd op voormalige landbouwgrond is mogelijk vaak nog de oorspronkelijke drainagedichtheid aanwezig.

Tabel I. 5: Drainagekenmerken van vier voorbeeld-landschapsgradiënten.

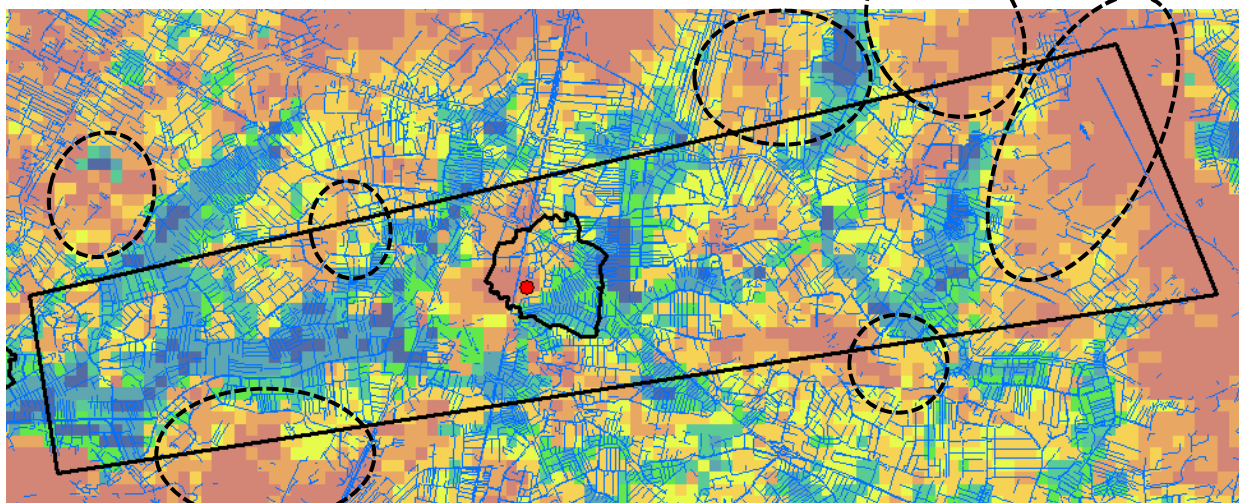
Gradiënt	Deel	Aandeel GT <7	Drainage natuurgebied	Fractie van neerslagoverschot dat bijdraagt aan grondwateraanvulling in delen met natuur	Drainage landbouwgebied	Fractie van neerslagoverschot dat bijdraagt aan grondwateraanvulling in delen met landbouw
Haarlo- Olden Eibergen	Hoog	0.3	Ws. aanwezig	Merendeel	Gemengd	Merendeel
	Midden	0.8	Aanwezig	Ruwweg helft	Gemengd	Ruwweg helft
	Laag	0.95	Aanwezig	Ruwweg helft	Intensief	Ruwweg helft
Helmond	Hoog	0.4	Lokaal	Merendeel	Gemengd	Merendeel
	Midden	0.4	Laagintensief	Ruwweg helft	Gemengd	Minder dan helft
	Laag	0.7	Intensief	Zeer weinig	Sterk	Zeer weinig
Beilen	Hoog	0.6	Lokaal	Vrijwel alles	Laagintensief	Merendeel
	Midden	0.8	Laagintensief	Vrijwel alles	Gemengd	Minder dan helft
	Laag	0.95	Intensief	Zeer weinig	Intensief	Zeer weinig
Schijf	Hoog	0	Lokaal	Vrijwel alles	Laagintensief	Ruwweg helft
	Midden	0.5	Laagintensief	Ruwweg helft	Gemengd	Ruwweg helft
	Laag	1	Intensief	Minder dan helft	Intensief	



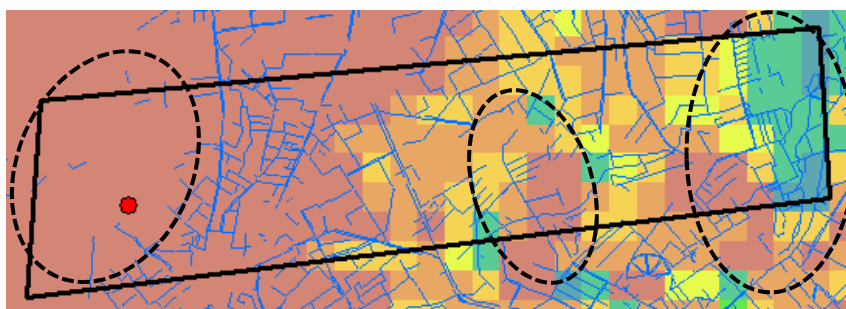
Figuur I. 3: Drainagecondities voor het landschapsgradiënt (grote zwarte omlijning) Haarlo-Olden Eibergen (winningen in rood, grondwaterbeschermingsgebied zwart omlijnd). Gegeven zijn de grondwatertrappen (kleuren, bruin=droog, blauw=nat; (Deltares, 2020)); waterlopen (blauwe lijnen) en natuurgebieden (stippellijnen).



Figuur I. 4: Drainagecondities voor het landschapsgradiënt (grote zwarte omlijning) Helmond (winning in rood, grondwaterbeschermingsgebied zwart omlijnd). Gegeven zijn de grondwatertrappen (kleuren, bruin=droog, blauw=nat; (Deltares, 2020)); waterlopen (blauwe lijnen) en natuurgebieden (stippellijnen).



Figuur I. 5: Drainagecondities voor het landschapsgradiënt (grote zwarte omlijning) Beilen (winning in rood, grondwaterbeschermingsgebied zwart omlijnd). Gegeven zijn de grondwatertrappen (kleuren, bruin=droog, blauw=nat; (Deltares, 2020)); waterlopen (blauwe lijnen) en natuurgebieden (stippellijnen).



Figuur I. 6: Drainagecondities voor het landschapsgradiënt (grote zwarte omlijning) Helmond (winningen in rood, grondwaterbeschermingsgebied zwart omlijnd). Gegeven zijn de grondwatertrappen (kleuren, bruin=droog, blauw=nat; (Deltares, 2020)); waterlopen (blauwe lijnen) en natuurgebieden (stippellijnen).

I.III Duinwaterwingebieden

Tabel I. 6: Eigenschappen van binnenduintransecten voor drie voorbeeld-duinwaterwingebieden.

	Oppervlak infiltratiepanden	Breedte inf.gebied (west-oost)	Lengte inf.gebied (noord-zuid)	Lengte gradiënt (midden inf.gebied - binnenduintrand)	Groote infiltratie - winning	Winning per lengte inf.gebied	Helft breedte inf.gebied/ gradiëntlengte
ICAS	28 ha	900 m	1500 m	2500 m	25 Mm ³ /j	1.7 Mm ³ /100 m	0.18
AWD	93 ha	1100 m (excl voorraadkanaal)	5000 m	3100 m	67 Mm ³ /j	1.3 Mm ³ / 100 m	0.18
Meijen -del	102 ha	~800 m (variabel)	5300 m	2000 m	52 Mm ³ /j	1.0 Mm ³ /100 m	0.20

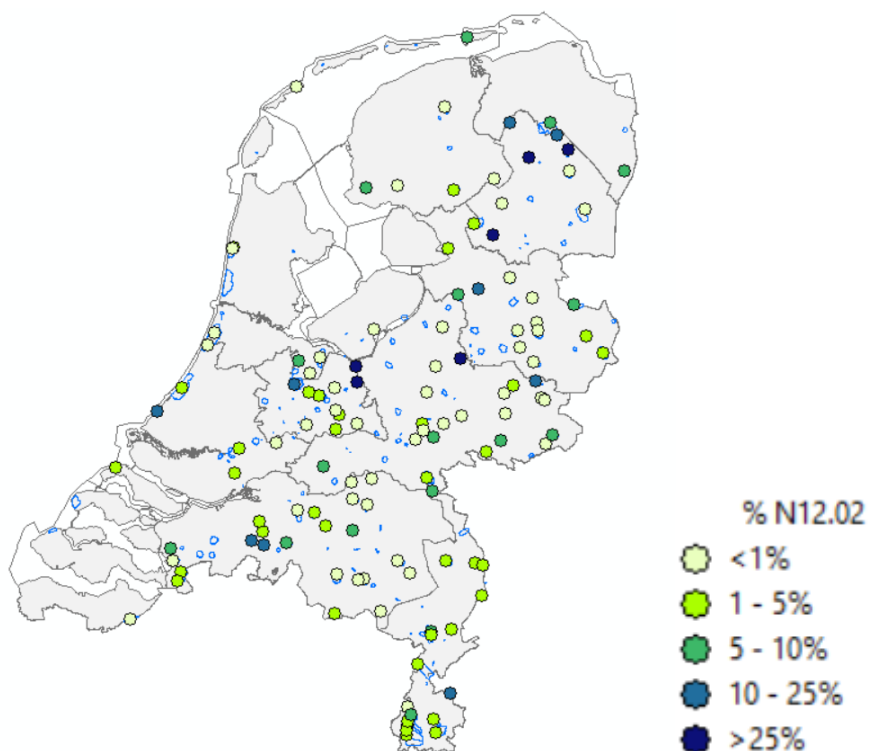
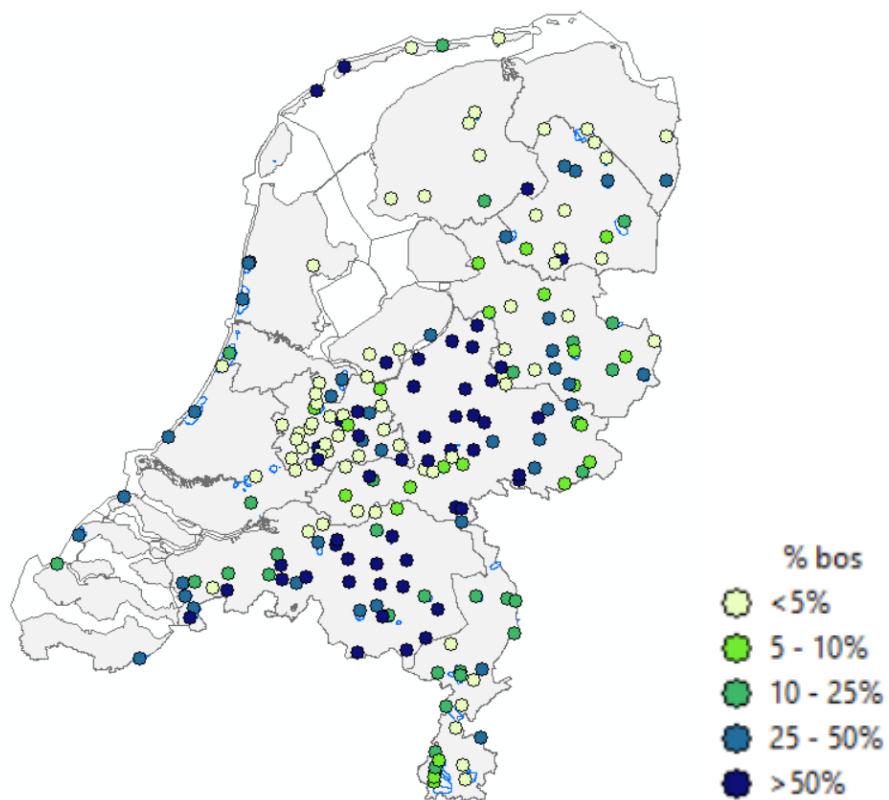
Tabel I. 7: Het oppervlakteaandeel van bos- en struweeltypen in het duingebied rond ICAS, de AWD en Meijendel. Op basis van analyse vegetatiekarteringen in project "Evaluatie duinwaterwinningen" (Brakkee et al., 2023).

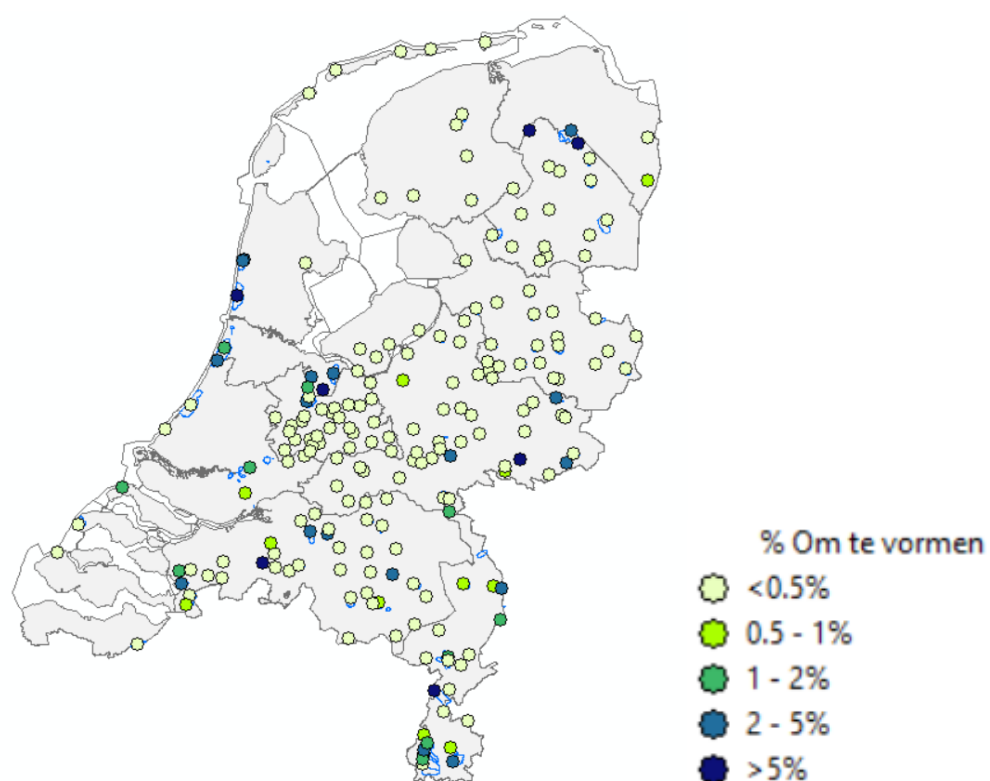
	ICAS 2008	AWD 2018	Meijendel 2021
Totaal opp. ha	1338	3382	1709
Droog struweel %	17.9	17.4	22.5
Vochtig struweel %	1.1	1.5	0.2
Totaal struweel %	19.0	18.9	22.8
Droog bos %	46.4	15.1	22.9
Vochtig bos%	0.1	0.5	1.2
Totaal bos %	46.5	15.6	24.1
Totaal vochtig/nat %	6.0	10.1	10.2

I.IV NNN-typen in alle grondwaterbeschermingsgebieden

Tabel 7.2: Oppervlakte aandeel van NNN-natuurtypen in grondwaterbeschermingsgebieden per provincie.

	Provincie	DR	FL	FR	GLD	GR	LI	NB	NH	OV	UT	ZL	ZH	Totaal
Oppervlak GWBG [ha]		7412	996	3669	12300	3606	18233	15345	10658	12014	6206	2165	7331	99935
NNN lage vegetatie	Lage vegetatie, vochtig [%]	2.5	0	2	0.5	5.3	0.4	1	3.1	1	2.8	2.3	3.4	1.7
	Lage vegetatie, droog [%]	1.6	0	9.7	4	0.3	1.9	3.2	43.7	6.6	2.5	39.5	42.5	11.4
	Rijke graslanden [%]	7.8	0.1	2	2.2	18.1	4.7	1.9	1.4	2.5	5.9	0.8	2.1	3.7
	N12.02 (kruiden- en faunarijk grasland) [%]	7.7	0.1	1.7	1.7	8.1	3.8	1.5	0.7	1.9	5.4	0	2.1	2.8
	Nog om te vormen naar natuur [%]	1.2	0	0	0.3	2.9	2.5	0.7	3.8	0	0.5	0	0.8	1.3
NNN Bossen	N14 (vochtig bos) [%]	0.2	15.9	0	0.6	1	3.8	0.3	0.1	0.4	1.4	0.1	1.3	1.3
	N15 (droog bos) [%]	3.6	0	10.1	12.3	1.5	5.9	9.6	29.1	6.5	11.1	17	16.8	10.9
	N16 (productie-bos) [%]	15.6	3.7	4.3	26.8	4.9	2.9	24.6	0	10.4	11.4	10.2	0.2	11.3
	N17 (cultuurhist. bos) [%]	0	0	0	0.4	0.1	0.1	0.3	0.6	0.3	0.3	0.4	2.4	0.4
	Totaal bos NNN [%]	19.4	19.7	14.4	40.2	7.6	12.7	34.8	29.8	17.6	24.3	27.7	20.7	24

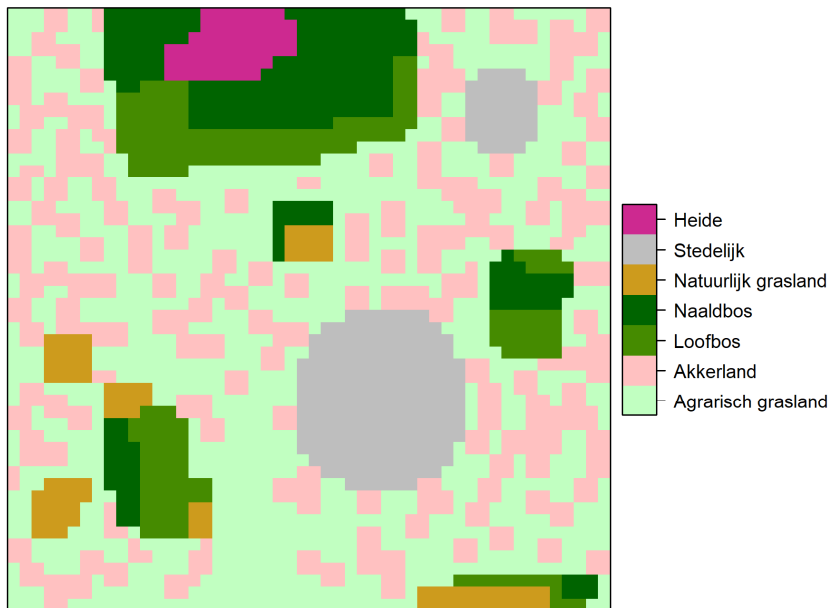




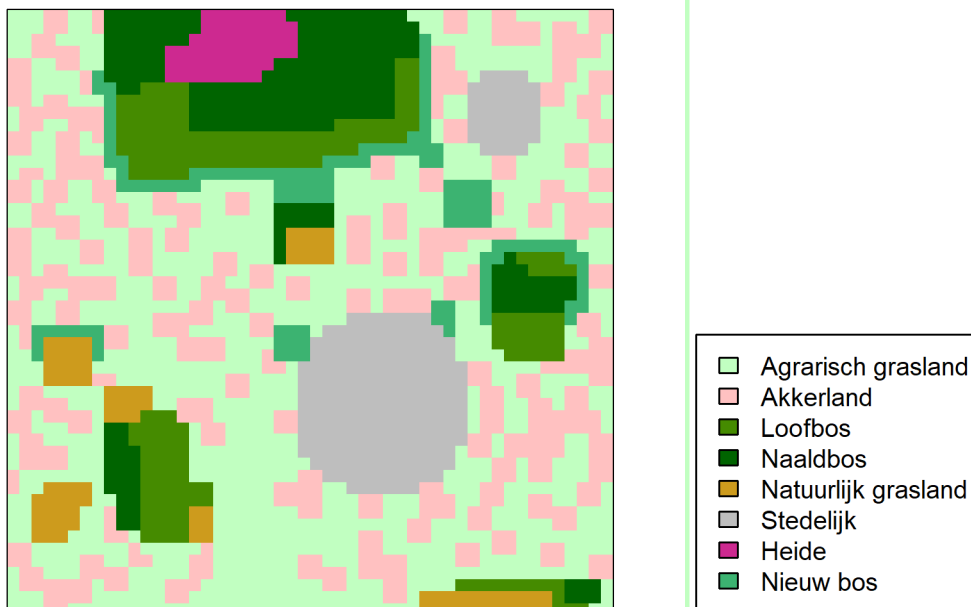
II Landgebruik/vegetatie per scenario

II.I Scenario's Hoge Zandgronden

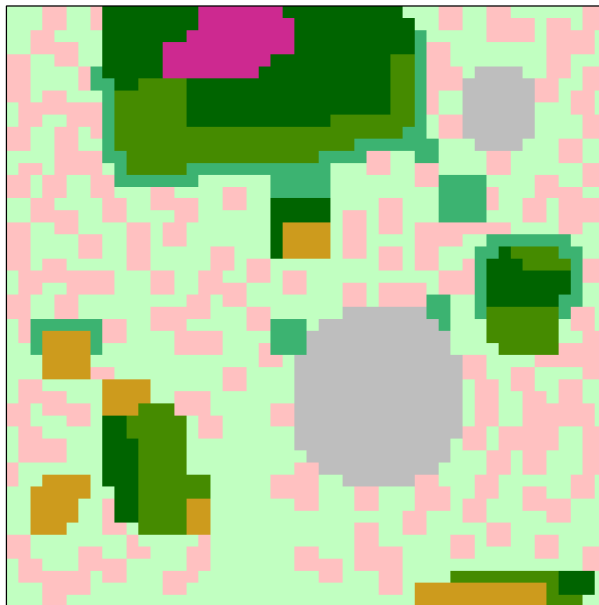
Landgebruik, referentie



Landgebruik, S1

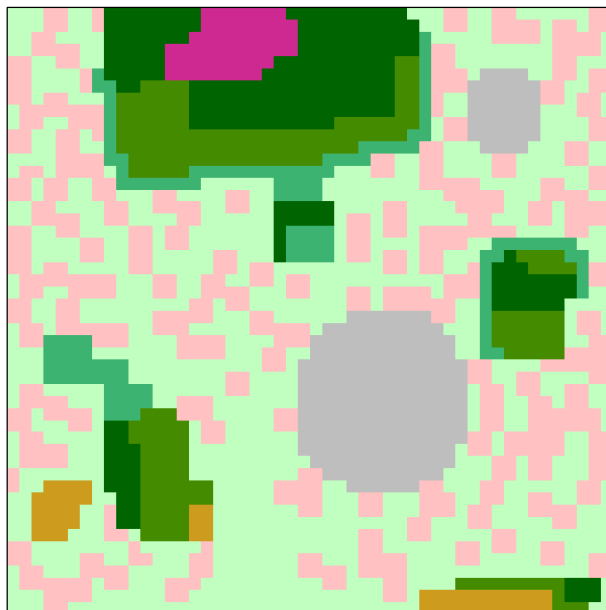


Landgebruik, S2

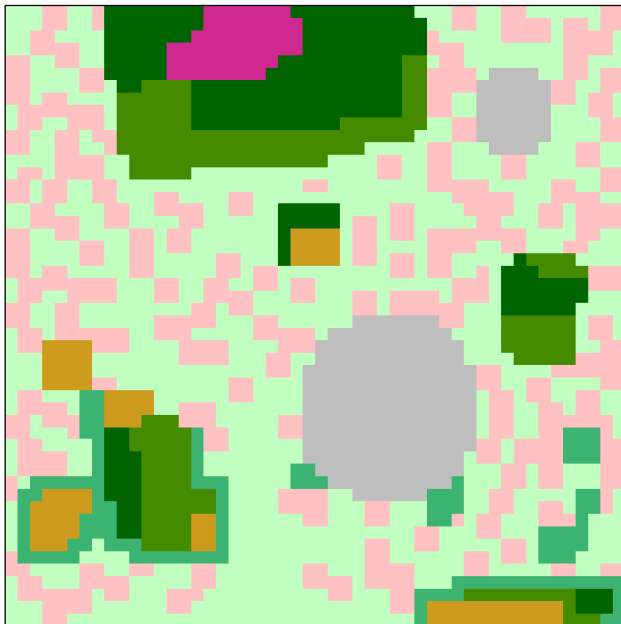


- Agrarisch grasland
- Akkerland
- Loofbos
- Naaldbos
- Natuurlijk grasland
- Stedelijk
- Heide
- Nieuw bos

Landgebruik, S3



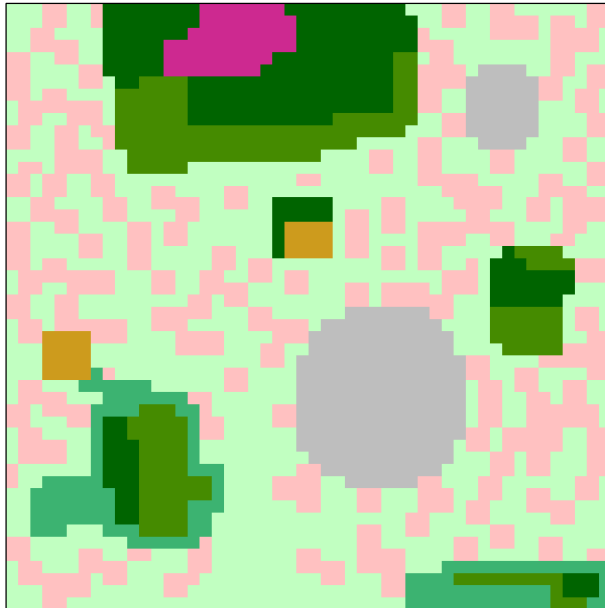
Landgebruik, S4



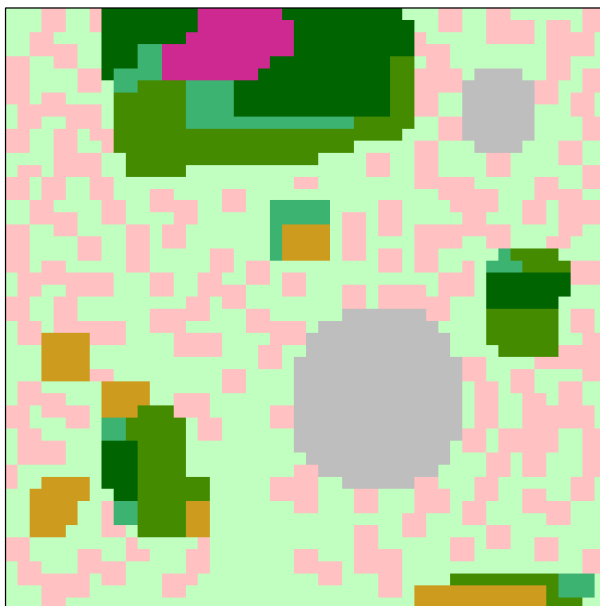
Landgebruik, S5



Landgebruik, S6

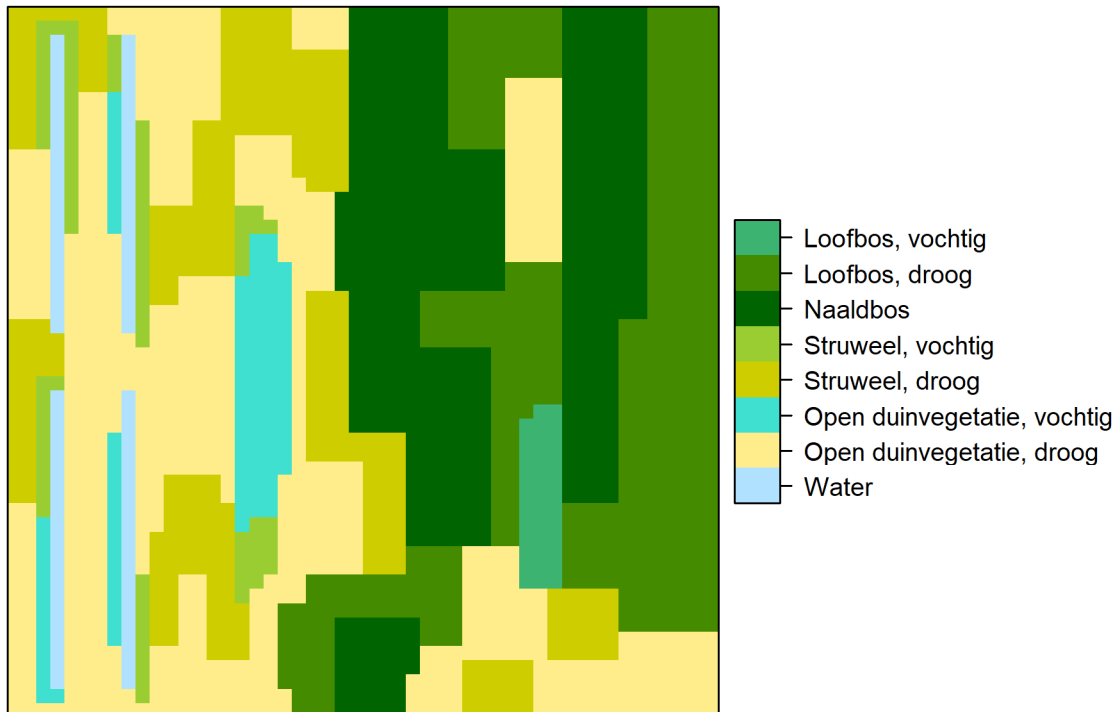


Landgebruik, S7



II.II Scenario's duinen

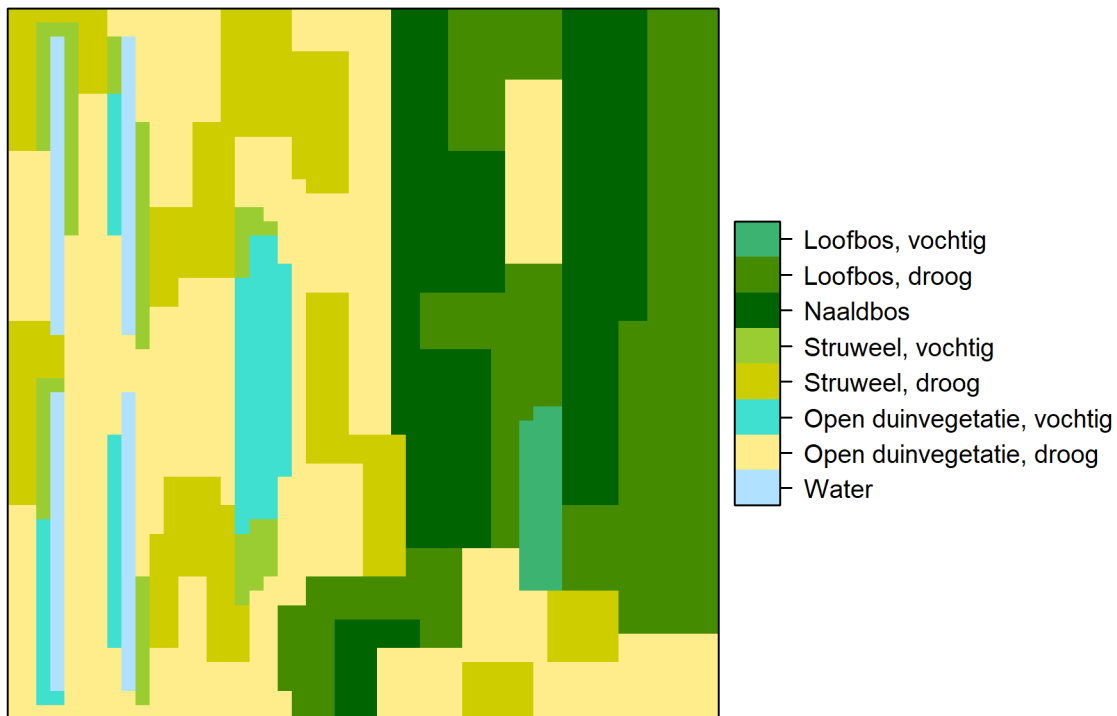
Duingebied, referentie



Vegetatie, S1



Vegetatie, S2



III Grondwateraanvulling en verdamping van gewassen en vegetatietypen

III.I Literatuurgegevens verdamping en grondwateraanvulling

Tabel III. 1: Meet- en modelgegevens van jaarlijkse werkelijke verdamping en grondwateraanvulling van verschillende agrarische gewassen. DO00: (Dolman et al., 2000); ST16: (Stroet, 2016); WI15: (Witte et al., 2015); EL10: (Elbers et al., 2010) BA19: (Bartholomeus et al., 2019); ME98: (Meinardi et al., 1998). P= neerslag, ETa=werkelijke verdamping, ETp=potentiële verdamping, T=transpiratie, gwa=grondwateraanvulling, GWS=grondwaterstand; F= ETact/Emak

Gewas	Bron	Jaren	Gem. neerslag	Methode	Locatie, vochtcondities/bodem	Opmerking	Werkelijke verdamping [mm/j]
Agrarisch grasland, droog	WI15	2007-2013	831	Schatting uit gewasopbrengsten	Gemiddeld Brabant		559
	ST16	1961-2015		SWAP; ET=p-GWA	Zwak lemig fijn zand, diepe GWS / niet berekend	GWA afgelezen uit grafiek; Eta=p-GWA	520
Agrarisch grasland, vochtig/nat	EL10	2006	775	EC	Cabauw, kleigrond		567
	EL10	2003	676	EC	Haastrecht; veen		548
	ST16	1961-2015		SWAP	Zwak lemig fijn zand, ondiepe GWS/ berekend	GWA afgelezen uit grafiek; Eta=p-GWA	580
Maïs	EL10	2005	865	EC	Langerak; kleigrond		531
	EL10	2007	843	EC	Dijkgraaf; kleigrond		580
	ME98	1983	740	Tritiumprofiel	Venhorst; matig fijn zand, Gt7		450
	WI15	2007-2013	831	Schatting uit gewasopbrengsten	Gemiddeld Brabant		470
Aardappelen	EL10	2005	716	EC	Molenweg; kleigrond		474
	WI15	2007-2013	831	Schatting uit gewasopbrengsten	Gemiddeld Brabant		480
	BA19	2003-2017	745	SWAP	Zwak lemig fijn zand, diepe GWS, niet berekend		317
Granen	WI15	2007-2013	831	Schatting uit gewasopbrengsten	Gemiddeld Brabant		509
	EL10	2006	810	EC	Lutjewad, kleigrond		523
Groente	BA19	2003-2017	745	SWAP	Zwak lemig fijn zand, diepe GWS, niet berekend	Alleen T bekend; gemiddeld min-max; Eta=Ta+115	253
Suikerbiet	WI15	2007-2013	831	Schatting uit gewasopbrengsten	Gemiddeld Brabant		522
Biet	EL10	2006	830	EC	Vredepeel; zandgrond		558

Tabel III. 2: Meet- en modelgegevens van de werkelijke verdamping van korte natuurtypen. DO00: (Dolman et al., 2000); VO15: (Voortman et al., 2015); VO19: (Voortman et al., 2019); WI15: (Witte et al., 2015); SP95: (Spijksma et al., 1995). $F = ET_{act}/E_{mak}$

Vegetatie	Bron	Jaren	Gem. neerslag	Methode	Locatie, vochtcondities/bodem	Opm	Werkelijke verdamping g [mm/j]
Natuurlijk/ extensief grasland, droog	DO00	Jaren 80-90		Metingen uit literatuur		Gem. min-max	363
	WI15	Jaren 80-90		Literatuur	Korte natuurlijke vegetatie, droog		450
	VO15	2013		Model (Hydrus) obv lysimeter	Soestduinen, zand, diepe grondwaterstand		350
	VO15	2013		Model	Diepe grondwaterstand		333
Natuurlijk/ extensief grasland, vochtig/nat	SP95	1991-1992		Uit Janssen 1994, Lysimeter	Schraalgrasland, GWS -30 cm tot aan MV	Gem. gewasfactor 1.0*, $ET_a = F * ET_p$	595
	SP95	1991-1992		Uit Janssen 1994, Lysimeter	Pijpenstrootje, GWS -30 cm tot aan MV	Gem. gewasfactor 1.1*, $ET_a = F * ET_p$	655
	VO19			Uit Moors 1998	Pijpenstrootje, GWS -30 – -70 cm	Gem. gewasfactor 0.9*, $ET_a = F * ET_p$	506
	WI15	Jaren 80-90		Literatuur	Korte natuurlijke vegetatie, nat		550
Heide, droog	VO19	1988-2017		Model (Hydrus) obv lysimeter	NP hoge Veluwe	variatie 358-492	430
	DO00	Jaren 80-90		Metingen uit literatuur		Gem. min-max	410
Heide, vochtig/nat Heide, vochtig/nat	SP95	1991-1992		Lysimeters (Uit Janssen 1994)	Vochtige dopheide	Gem. groeiseizoen + winter	502
	VO15	2013		Model (Hydrus) obv lysimeter	Soestduinen		460

Tabel II. 1: Meet- en modelgegevens van werkelijke verdamping van bossen. DO00: (Dolman et al., 2000) VO15: (Voortman et al., 2015) 3: (Stroet, 2016) VO19: (Voortman et al., 2019) WI15: (Witte et al., 2015) EL10: (Elbers et al., 2010). $F = ET_{act}/E_{mak}$

Vegetatie	Bron	Jaren	Gem. neerslag	Methode	Locatie, vochtcondities/bodem	Opm	Werkelijke verdamping g [mm/j]
Naaldbos, droog	VO19	1997-2003		EC + correctie VO19	Loobos/Kootwijk; GWS 2-10 m; grove den; LAI 1.9	verdampingscijfers gecorrigeerd door VO19	602
	DO00	1995-1998		EC	Bankenbos/Veenhuizen; GWS 1-2 m; lariks; LAI 1.8		580
	DO00			EC + water-energiebalans (uit Bosveld 1999)	Donker naaldbout (douglas), Garderen		730
	VO19	1957-1981	820	Model obv metingen 3 jaar	Donker naaldbout		712

				(uit Tiktak & Bouten 1994)			
Naaldbos, vochtig/nat	VE14	1951-2013	833	Model (SWAP)	Grove den, 100% bedekking, geen ondergroei, potentiële verdamping	Potentiële verdamping als schatting voor verdamping onder nattere condities	818
Loofbos, droog	DO00				Beukenbos		558
	DO00	1996-1998		EC	Kampina/Boxtel; GWS 0-2 m; gemengd naald/loofbos; LAI 3.8; vernattingsmaatregelen geweest		555
Loofbos, vochtig/nat	DO00	1995-1998		EC	Fleditebos/Zeewolde; GWS 1-2 m; populier; klei; bomen gebruiken ws grondwater	Variatie in Eta tussen jaren rond 30 mm	625
Loofbos, vochtig/nat	EL10	2008	895	EC	Oostwaard, wilg op klei		579

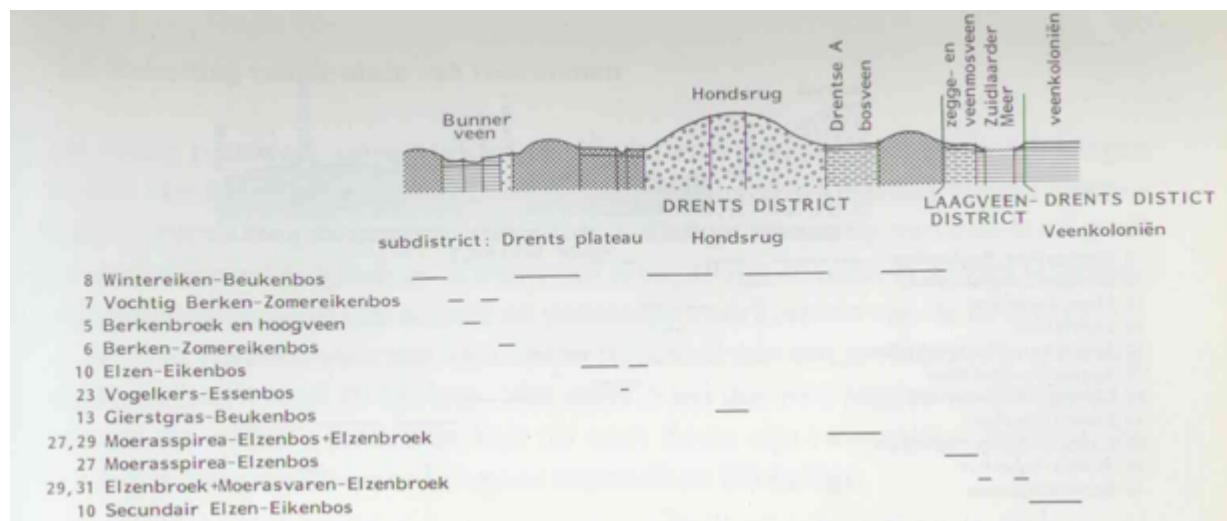
Tabel II. 2: Gegevens van verdamping en grondwateraanvulling in stedelijk gebied. ST08: (Stuurman et al., 2008).

Landgebruik	Bron	Methode	Vochtcondities/bodem	Verdamping [mm/j]
Stedelijk	ST08	Waterbalans		Open stedelijk: ETa 290 (37% P), GWA 300 (40% P). Dicht schatting GWA 150-200. Afh. drainage

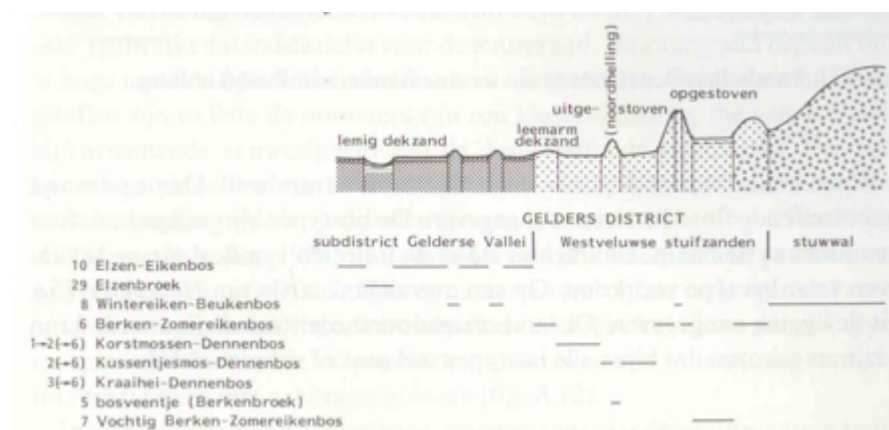
IV Verdampingsdata duinen

Bron	Categorie	Vegetatie	Neerslag [mm/j]	Methode	Werkelijke verdamping [mm/j]
Stuyfzand, 1993	Lage duinvegetatie, droog	Kaal	820	Lysimeters Castricum	197
		Mossen	820	Lysimeters AWD	328
		Arme droge duinvegetatie	820	Lysimeters AWD + extrap.	361
		Rijke droge duinvegetatie	820	Lysimeters AWD + extrap.	443
		Heide	820	Literatuur	451
	Struweel	Open struweel	820		410
		Dicht struweel	820	Lysimeters Castricum	476
	Vochtige duinvegetatie	Nat, hoge grassen en kruiden	820		492
		Natte duinvalleivegetatie	820	Lysimeters AWD	582
	Loofbos	Eiken, middel	820	Lysimeters Castricum	517
		Vochtig loofbos	820	Lysimeters AWD + extrap.	582
	Naaldbos	Droog naaldbos	820	Lysimeters AWD + extrap.	623
		Naaldbos middel	820	Lysimeters Castricum	679
		Nat naaldbos	820	Lysimeters AWD + extrap.	746
Voortman et al., 2015	Lage duinvegetatie, droog	Kaal middel	827	Model obv lysimeters Soestduinen	295
		Kaal droog	827		258
		Mossen middel	827		312
		Mossen droog	827		272
		Gras	827		382
		Gras, droog	827		362
		Heide	827		499
		Heide, droog	827		420

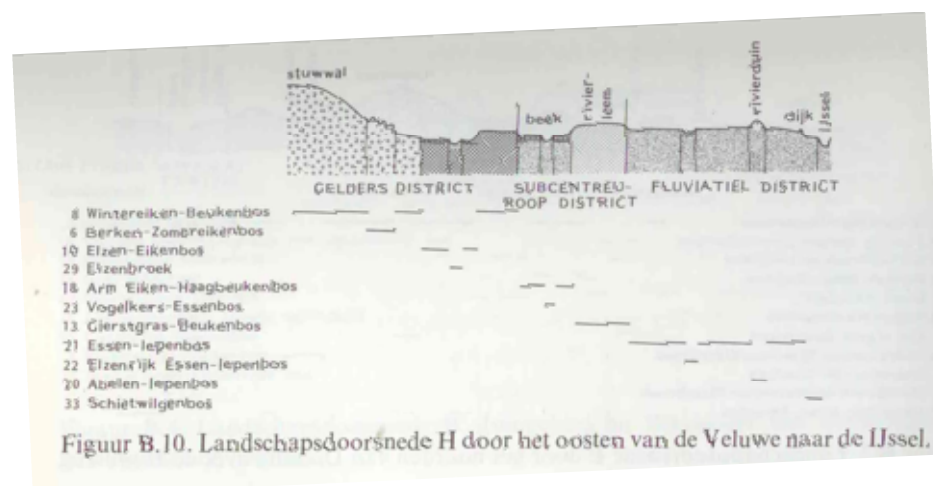
V Achtergrondinformatie bostypen



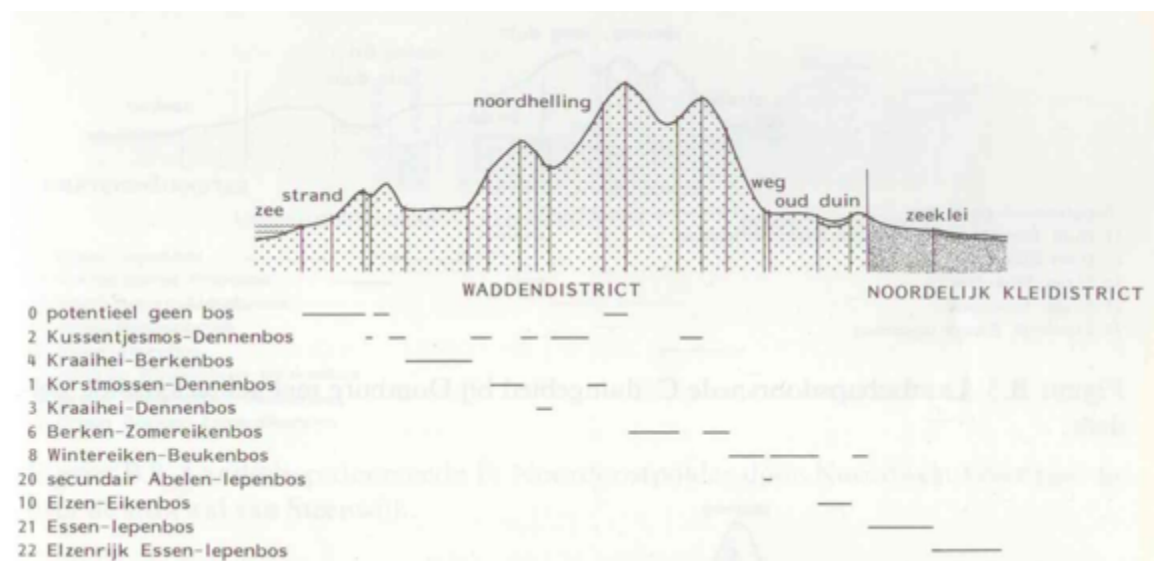
Figuur IV. 1: Landschapsdoorsnede met potentiële bostypen, Noord-Drenthe. Uit van der Werf (1991)



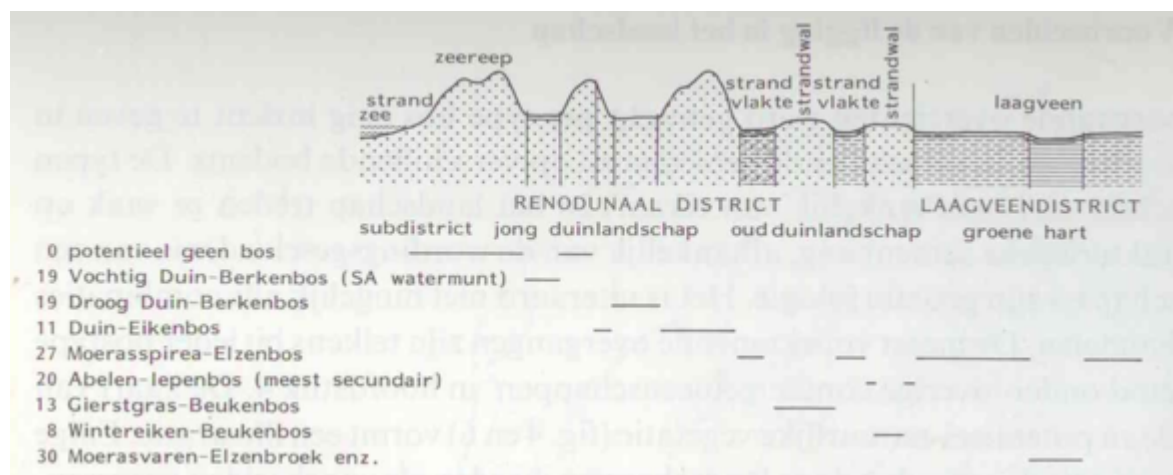
Figuur IV. 2: Landschapsdoorsnede met potentiële bostypen, westkant Veluwe. Uit van der Werf (1991)



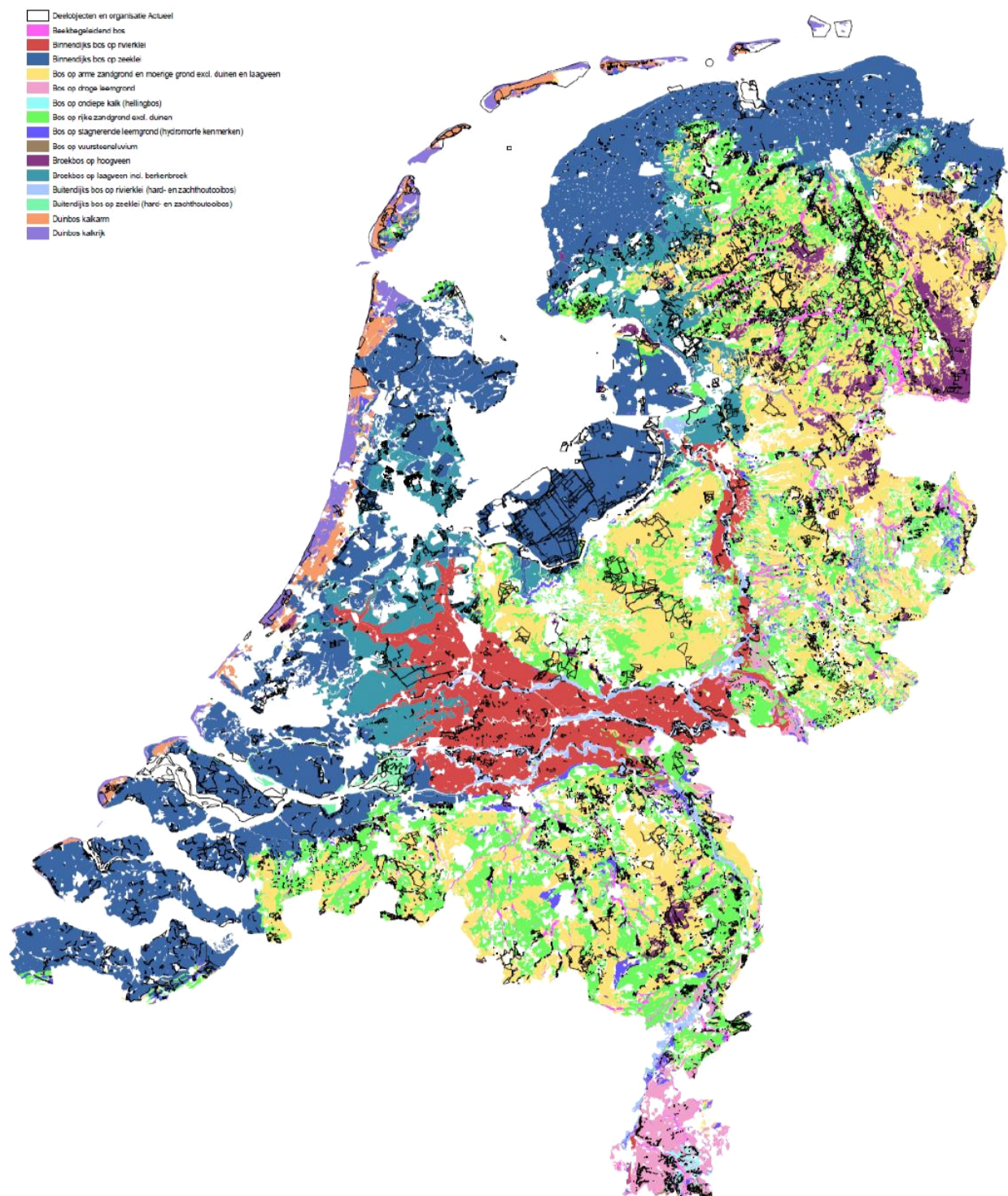
Figuur IV. 3: Landschapsdoorsnede met potentiële bostypen, oostkant Veluwe. Uit (van der Werf, 1991)



Figuur IV. 4: Landschapsdoorsnede met potentiële bostypen, duingebied bij Schoorl. Uit van der Werf (1991)



Figuur IV. 5: Landschapsdoorsnede met potentiële bostypen, duingebied bij Wassenaar. Uit van der Werf (1991)



Figuur IV. VI: Bosgroeiplatestypenkaart op basis van gegevens van bodem en hydrologie, door Bijlsma (2014) in Thomassen et al. (2020).