



De verdamping van bossen op de Veluwe

Modellering van
ruimtelijke verschillen en
effecten van
klimaatverandering

MOISTURE MATTERS
10/01/2025



MOISTURE
MATTERS

De verdamping van bossen op de Veluwe

Modellering van ruimtelijke verschillen en effecten van klimaatverandering

MOISTURE MATTERS
10/01/2025

Auteurs

Bernard Voortman
Gijsbert Cirkel
Marjolein van Huijgevoort
Rogier van der Velde

Publicatiedatum

10/01/2025

Projectgroep

Almer Bolman
Teun Spek
Igor Jellema
Jelle van Sijl
Willem-Jan Dirkx
Boy Possen
Ute Sass-Klaassen
Stefan Dekker
Flip Witte
Eddy Moors

KWR



**MOISTURE
MATTERS**

info@moisture-matters.nl
www.moisture-matters.nl
+31 (0)6 28244782
Von Weberstraat 6
3533ED Utrecht

© Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden
verveelvoudigd zonder voorafgaande
schriftelijke toestemming van de uitgever.

Voorwoord

Naar aanleiding van meerdere brainstormsessies begin 2024 met de Provincie Gelderland, Vitens en Waterschap Vallei en Veluwe zijn doelen opgesteld om het waterverbruik van bossen beter in beeld te krijgen. Een eerste stap was om een gevoeligheidsanalyse uit te voeren om hypothesen minder op onderbuikgevoelens te baseren. Dit onderzoek is het resultaat van die insteek. In dit rapport worden diverse thema's in relatie tot het waterverbruik van bossen verkend: ruimtelijke variaties, effecten van worteldieptes, klimaatverandering en verschillen tussen modellen. Elk van deze onderwerpen leent zich voor verder onderzoek. Het voorliggende rapport biedt een beknopt overzicht van de verschillende processen en geeft een indicatie van de variatie in verdampingscijfers. Om die reden worden de hoofdstukken kort en kernachtig behandeld. Het voorliggende rapport kan gebruikt worden om met cijfers onderbouwd vervolgonderzoek vorm te geven.

Inhoudsopgave

1	Introductie	5
	Achtergrond	5
	Doelstellingen	6
	Leeswijzer	6
2	Methoden	7
	Modelsimulaties	7
	Hydrologisch model FluxPark	7
	<i>Interceptieverdamping</i>	8
	<i>Bodemverdamping en transpiratie</i>	9
	Modelinvoer	10
	<i>Meteorologie</i>	10
	<i>Landgebruik</i>	10
	<i>Bodemeigenschappen</i>	10
	<i>Van drie naar achttien bostypen</i>	12
3	Resultaten en Discussie	14
	Ruimtelijke verschillen in bosverdamping	14
	Effect van worteldiepte op verdamping	18
	Klimaatscenario's	20
	Vergelijkingen met AZURE	25
	<i>Verdampingsconcepten</i>	29
4	Conclusies	31
	<i>Ruimtelijke variaties in bosverdamping</i>	31
	<i>Effecten van worteldieptes op verdamping</i>	31
	<i>Effecten van klimaatverandering</i>	32
	<i>Vergelijking met het AZURE-model</i>	32
5	Aanbevelingen vervolgonderzoek	33
6	Referenties	35
7	Bijlagen	37
	Bijlage 1. Jaarcijfers van de verdamping in Nederland	37

1 Introductie

Achtergrond

Menselijke ingrepen in de afgelopen 150 jaar hebben ertoe geleid dat de druk op het beschikbare water van het Veluwe systeem is toegenomen. Dit is het gevolg van o.a. toename van verdamping door toename van de oppervlakte (donker, altijd groen) naaldbos, onttrekkingen, ontwatering van de flanken, verstedelijking en inpoldering van de Flevopolders. De metingen van de afgelopen 20 jaar laten zien dat de trend in de grondwaterstand van de Veluwe dalend is bij een stijgende trend in de winterneerslag. Natuur, landbouw, drinkwater en industrie zijn afhankelijk van het grondwater van de Veluwe. Voor een duurzaam waterbeheer en begrip van het hydrologisch functioneren van hoge zandgronden zoals de Veluwe is een van de belangrijkste punten de grondwateraanvulling, het verschil tussen de neerslag en de verdamping.

Ondanks de huidige dalende trend in grondwaterstanden worden onder klimaatprojecties vaak toenemende grondwaterstanden voorspeld voor de Veluwe. Dit komt doordat de neerslag in de meeste klimaatscenario's toeneemt (behalve voor het nieuwe KNMI'23 Hd scenario) en de toenemende warmte in de zomer (zonuren en temperatuur) in de modellen niet leidt tot een substantiële toename van de verdamping door een gebrek aan bodemwater. We zijn voor bosgebieden aan deze simulaties gaan twijfelen omdat in de afgelopen droge jaren (2018, 2019, 2020, 2022) verschillende bossen weinig reactie (blad- of naaldverkleuring), laten zien op droge omstandigheden. Uiteraard hebben verschillende bossen schade laten zien, maar er is ook een groot deel dat weinig tot geen respons heeft getoond. Dit geeft ons een indicatie dat bossen mogelijk minder last hebben van droogte dan tot nu toe wordt aangenomen. Als bossen voldoende water tot hun beschikking hebben, en blijven doorverdampen in de zomer, dan kunnen de uitkomsten van modelsimulaties op basis van klimaatscenario's kantelen van een toenemende grondwaterstand naar een dalende grondwaterstand (zoals we nu lijken te meten in de meeste gebieden).

Naast de effecten van droogte merken we dat bossen in zijn algemeenheid relatief simpel zijn geschematiseerd in regionale grondwatermodellen, zoals AZURE. Meestal worden enkele bostypen gebruikt (loofbos, naaldbos en donker naaldbos). Tussen verschillende bossen zijn in het verleden grote verschillen gemeten in verdamping van ca. 530 mm/jaar tot ca. 710 mm/jaar (bijlage 1). We verwachten dus een variatie van minstens 180 mm/jaar. Als je alleen uitgaat van een gemiddeld bos, kan je dus fouten maken van ca. 90 mm/jaar (de helft van 180 mm/jaar). Voor grondwateraanvullingscijfers van ca. 360 mm/jaar is die fout dus bijzonder groot (ca. 25%). Bovenstaande observaties hebben ertoe geleid dat de projectgroep (zie voorblad) fundamenteel en toegepast onderzoek wil uitvoeren om de nauwkeurigheid van grondwatersimulaties te verbeteren. Samen met meer partners (waaronder Brabant Water, HDSR en HVH Larenstein) wordt voorgesorteerd om veldmetingen en onderzoek te starten in 2025. In voorbereiding daarop is voorliggend onderzoek uitgevoerd om beslagen ten ijs te komen.

Doelstellingen

- Bandbreedtes in belangrijke verdampingsprocessen (interceptie, transpiratie, bodemverdamping) van bossen te kwantificeren, waarbij we ingaan op ruimtelijke variaties en verdampingstekorten tijdens droogte. Daarmee kunnen we grenzen stellen aan de discussie rond de verdamping van bossen.
- Hypothesen scherper krijgen en de belangrijkste processen in beeld krijgen om daarmee later ook een meetstrategie te kunnen onderbouwen (welke processen, welke locaties en welk type metingen).
- Vastleggen wat de huidige stand van zaken is rond de simulatie van bosverdamping in hydrologische modellen FluxPark en AZURE, zodat in vervolgonderzoek kan worden teruggegrepen en kan worden aangetoond waar en hoe verbeteringen zijn aangebracht en wat dat heeft opgeleverd.

Hoewel we nog lang niet alles weten over de verdamping van bossen, hebben we ons in dit project gedwongen om van begin tot eind berekeningen uit te voeren voor verschillende bostypen, met diverse worteldieptes en onder veranderende klimaatomstandigheden. Deze berekeningen bevatten soms ingenieursoplossingen of ongepubliceerde methoden om bijvoorbeeld interceptieverdamping te bepalen.

In 2023 en begin 2024 zijn verschillende studies uitgevoerd waarop dit onderzoek voortbouwt. In opdracht van OBN Natuurkennis is een literatuuronderzoek verricht met een overzicht van jaarlijkse verdampingscijfers van bossen, en is een kaart ontwikkeld die de bosdichtheid en relatieve ruimtelijke verdamping in kaart brengt

(<https://www.natuurkennis.nl/activiteit/kennisuur-verdamping-van-bossen/>). Daarnaast is in opdracht van het AZURE-consortium een vergelijking gemaakt tussen de verdampingsberekeningen in FluxPark en MetaSWAP voor de Veluwe. Hiermee is voldoende materiaal verzameld om de huidige stand van zaken vast te leggen en, met de beschikbare kennis, eerste verbeteringen door te voeren om een zo nauwkeurig mogelijke schatting van de verdamping van bossen te maken.

Leeswijzer

In het eerste hoofdstuk wordt uitgelegd hoe FluxPark is gebruikt om verdampingsposten uit te rekenen en worden de verschillende modelscenario's en aanpassingen toegelicht. Daarna worden de resultaten behandeld en worden vergelijkingen gedaan met het huidige AZURE-model. Telkens worden de resultaten direct bediscussieerd. In het laatste hoofdstuk worden de belangrijkste conclusies opgesomd en aanbevelingen gedaan.

2 Methoden

Modelsimulaties

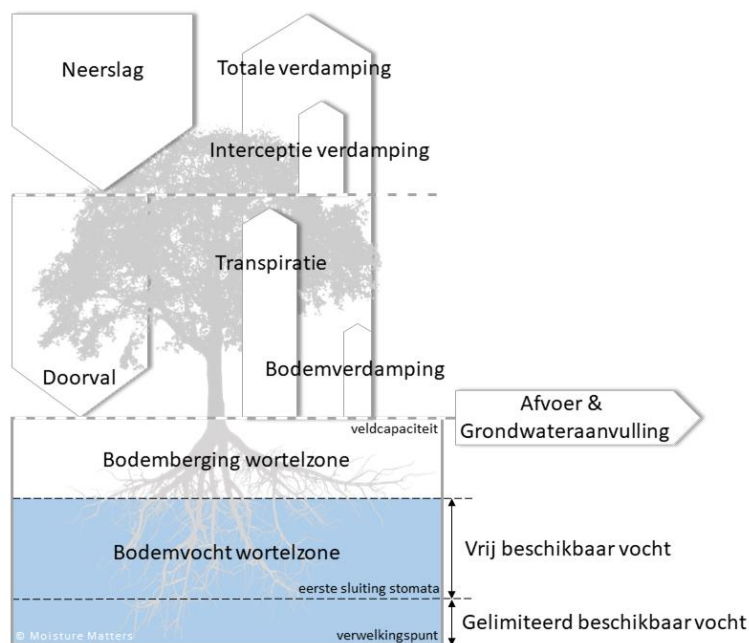
Voor de schatting van de verdamping maken we gebruik van het ruimtelijke hydrologische model FluxPark, dat snelle aanpassingen in modelconcepten en parameters mogelijk maakt. We willen bijvoorbeeld enkele modelinstellingen, zoals de worteldiepte, het bostype en de lengte van het groeiseizoen voor loofbossen, aanpassen om beter te begrijpen hoeveel invloed deze eigenschappen hebben op de verdamping en grondwateraanvulling. In deze studie zijn de volgende berekeningen uitgevoerd:

1. Een berekening met het bosgebied verdeeld in alleen naaldbos, donker naaldbos en loofbos (zoals nu standaard wordt gebruikt) en een standaard worteldiepte van 100 cm. Dit is ons vertrekpunt.
2. Eenzelfde berekening met naaldbos en loofbos, elk verdeeld in negen verschillende klassen op basis van het literatuuronderzoek uitgevoerd in opdracht van OBN Natuurkennis (Voortman et al. 2024). Deze berekening moet inzicht geven in het belang van verschillende bosdichtheden en vormt hiermee de referentie voor navolgende berekeningen.
3. Een berekening waarbij de worteldiepte in stappen van 50 cm wordt vergroot (startend vanaf 100 cm). De toename van de worteldiepte stopt zodra de transpiratiereductie verwaarloosbaar is. Deze berekening zegt impliciet ook iets over de relevantie van bodemfysische eigenschappen, omdat een beter vochtvasthoudend vermogen van de bodem ook leidt tot een toename van de waterbeschikbaarheid net als de worteldiepte.
4. Een doorrekening van twee KNMI'23 klimaatscenario's voor het zichtjaar 2100 (Hn en Hd). In deze analyse worden berekeningen gemaakt met een worteldiepte van 100 cm en een nog steeds plausibele worteldiepte van 250 cm. Door ook een grotere worteldiepte te gebruiken geeft deze simulatie een beeld of verdampingsreductie bij bossen in de zomer aannemelijk is, en wat het effect daarvan is op de grondwateraanvulling.
5. Een simulatie waarin het groeiseizoen voor loofbossen toeneemt met drie weken in het voorjaar en drie weken in het najaar. Deze berekening is alleen uitgevoerd voor het Hd klimaatscenario voor zichtjaar 2100 en een worteldiepte van 250 cm.

Hydrologisch model FluxPark

FluxPark is een hydrologisch model dat wordt gebruikt in beslissingsondersteunende systemen, voor adviesprojecten en voor onderzoek (Voortman, 2022). In operationele toepassingen rekent het model in de cloud en levert dagelijks voorspellingen van bijvoorbeeld bodemvocht, verdamping, grondwateraanvulling en droogte stress. In dit project is het model gebruikt om lokaal berekeningen te ontwikkelen en aanpassingen te doen in de verdampingseigenschappen van bossen.

De kern van Fluxpark is een zogenaamd reservoirmodel. Dit is in de hydrologie wellicht het meest gebruikte concept om hydrologische fluxen uit te rekenen. In de basis wordt een waterbalans bijgehouden door een reservoir te vullen en legen aan de hand van verschillende in- en uitgaande posten. Het is populair onder hydrologen door zijn eenvoud, snelle rekentijd en brede toepasbaarheid. In ons geval bestaat het reservoir uit de wortelzone van planten waar de in- en uitgaande fluxen bestaan uit neerslag, interceptieverdamping, doorval, bodemverdamping, transpiratie en grondwateraanvulling (Figuur 1). FluxPark beperkt zich tot het uitrekenen van waterbalansposten en doet geen expliciete berekeningen van stromingsprocessen. In deze studie wordt dan ook geen rekening gehouden met capillaire nalevering of oppervlakkige afvoer.



Figuur 1. Schematische weergave van het FluxPark model.

Interceptieverdamping

Interceptieverdamping is een post die onafhankelijk van de onverzadigde zone wordt berekend. Elk gewas heeft een interceptiecapaciteit die per dag van het jaar is gespecificeerd. Deze capaciteit wordt tijdens een neerslagbui gevuld, alvorens regenwater het bodemoppervlak raakt. Per landgebruiksklasse wordt het interceptiereservoir geleegd met de snelheid van de potentiële interceptieverdamping. Het interceptiemodel rekent in tijdstappen van één dag, net als transpiratie en bodemverdamping. De potentiële interceptieverdamping zou in theorie ongeveer gelijk moeten zijn aan de openwaterverdamping maar dan met de aerodynamische eigenschappen van het gewas. Voor bossen ligt daarom de potentiële interceptieverdamping hoger dan de openwaterverdamping door de hoge windsnelheid boven het bladerdek en de ruwheid van het oppervlak. In FluxPark wordt dit benaderd door de openwater verdamping ($1.25 \times \text{Makkink}$, in mm/d) te berekenen en vervolgens de interceptiecapaciteit daarbij op te tellen. Het optellen van de interceptiecapaciteit bij de openwater verdamping is onconventioneel, en is een oplossing om i) een betere schatting te maken van de potentiële

interceptieverdamping (hoger dan open water), maar vooral om ii) meer energie in de winter toe te voegen aan het model. Stel op een regenachtige winterse dag is de referentiegewasverdamping volgens Makkink 0.1 mm/d en een bos heeft een interceptiecapaciteit van 2 mm, dan berekent FluxPark dus een interceptieverdamping van $0.1 \text{ mm/d} * 1.25 + 2 \text{ mm} = 2.125 \text{ mm/d}$ (uitgaande van voldoende neerslag). Volgens metingen in het Speulderbos verdampt in een winterse regenachtige maand soms ca. 100 mm/maand aan interceptiewater (Voortman 2023). Deze hoeveelheid kan je nooit modelleren met alleen de referentieverdamping volgens Makkink die eenvoudig een factor 10 lager ligt in de winter.

Deze aanpak is onconventioneel, maar zorgt voor goede resultaten (Voortman et al., 2023) en voorkomt de noodzaak om additionele meteorologische variabelen te interpoleren zoals windsnelheid, relatieve luchtvochtigheid of het dampspanningstekort en aannames te moeten doen voor aerodynamische eigenschappen van het gewas. In het model FluxPark wordt aangenomen dat eerst interceptiewater verdampt en er dus geen druppels meer op het bladerdek liggen voordat transpiratie plaatsvindt.

Bodemverdamping en transpiratie

Nadat de interceptieverdamping is berekend, wordt de doorval toegevoegd aan het reservoirmodel (Figuur 1) waarmee bodemverdamping en transpiratie worden berekend. De diepte van het bodemreservoir staat gelijk aan de hoeveelheid beschikbaar bodemvocht in de wortelzone tussen veldcapaciteit en het verwelkingpunt. Veldcapaciteit is het vochtgehalte dat een bodem heeft nadat het drainageproces verwaarloosbaar klein is geworden. Deze term is afhankelijk van de zuigspanning in de onverzadigde zone, het gebied boven de grondwaterstand. Veldcapaciteit valt vaak tussen pF1.8 en pF2.2. Omdat we geen capillaire nalevering simuleren en in veldmetingen regelmatig zien dat de zuigspanning na drainage vaak minder dan pF2.0 bedraagt, ook op hoge zandgronden, is ervoor gekozen om in FluxPark de onderrand van de definitie te hanteren (pF1.8). Door doorval (neerslag die het vegetatiedek passeert en de bodem bereikt) wordt het reservoir gevuld en door de som van werkelijke bodemverdamping en werkelijke transpiratie wordt het reservoir geleegd. Als de bodem boven veldcapaciteit verzadigd, vindt percolatie richting het grondwater plaats of oppervlakkige afvoer. In FluxPark wordt daarin geen onderscheid gemaakt. Het neerslagoverschot wordt beschouwd als de grondwateraanvulling in deze studie, aannemende dat de oppervlakkige afvoer voor het overgrote deel ook weer lokaal infiltreert in lagere delen van het landschap.

Bodemverdamping reduceert vaak sneller door een vochttekort dan transpiratie. Doordat het reservoirmodel geen detailinformatie van de bovenlaag van de bodem bevat, wordt in een tussenstap een eerste schatting gemaakt van de werkelijke bodemverdamping met het model van Boesten en Stroosnijder (1986), alvorens wordt gecontroleerd of er voldoende water in het reservoir zit om te verdampen. In het model van Boesten en Stroosnijder (1986) wordt aangenomen dat bodems een fase hebben waarin ze potentieel verdampen, waarna de verdamping exponentieel afneemt doordat de bovenlaag van de bodem uitdroogt.

Als de doorwortelde bodem uitdroogt, sluiten planten hun huidmondjes om uitdroging te voorkomen. Het moment van sluiten wordt bepaald door de hoeveelheid vrij beschikbaar vocht (figuur 1). Als dit opdraakt dan sluiten de huidmondjes en wordt in het model de transpiratie lineair gereduceerd afhankelijk van het vochtgehalte totdat het reservoir leeg is en dus het verwelkingspunt is bereikt. In FluxPark beginnen de huidmondjes van bossen te sluiten bij een zuigspanning van -600 cm en het verwelkingspunt van bossen ligt op -6000 cm. Zolang vrij beschikbaar vocht (bodemvocht tussen veldcapaciteit en de eerste sluiting van huidmondjes) aanwezig is in het reservoirmodel, dan verloopt de transpiratie potentieel.

In het model wordt het sluiten van huidmondjes volledig gedreven door bodemvocht. In veldsituaties zijn er tal van andere factoren die de opening van stomata beïnvloeden, zoals het dampspanningstekort, de CO₂-concentratie, lucht- en bladtemperatuur en standplaatscondities zoals de zuurgraad (een gebrek aan calcium kan bijvoorbeeld leiden tot een toename in verdamping). Deze factoren worden niet meegenomen in het model omdat het bijzonder complex is om deze elementen in een ruimtelijk model te verwerken en omdat meestal bodemvocht de primaire factor is voor de bepaling van transpiratie.

Modelinvoer

Meteorologie

Waterbalansberekeningen beginnen altijd met een accurate schatting van de neerslag. In deze studie zijn de dagelijkse neerslagcijfers afkomstig van KNMI-neerslagstations en automatische weerstations. Deze zijn geïnterpoleerd met het interpolatiealgoritme dat binnen FluxPark is ontwikkeld (een “inverse distance weighing” met enkel drie punten met vervolgens smoothing). De referentie gewasverdamping volgens Makkink (Makkink 1957) is ook afkomstig van automatische weerstations en is ook geïnterpoleerd met de methoden binnen FluxPark (“radial basis splines”).

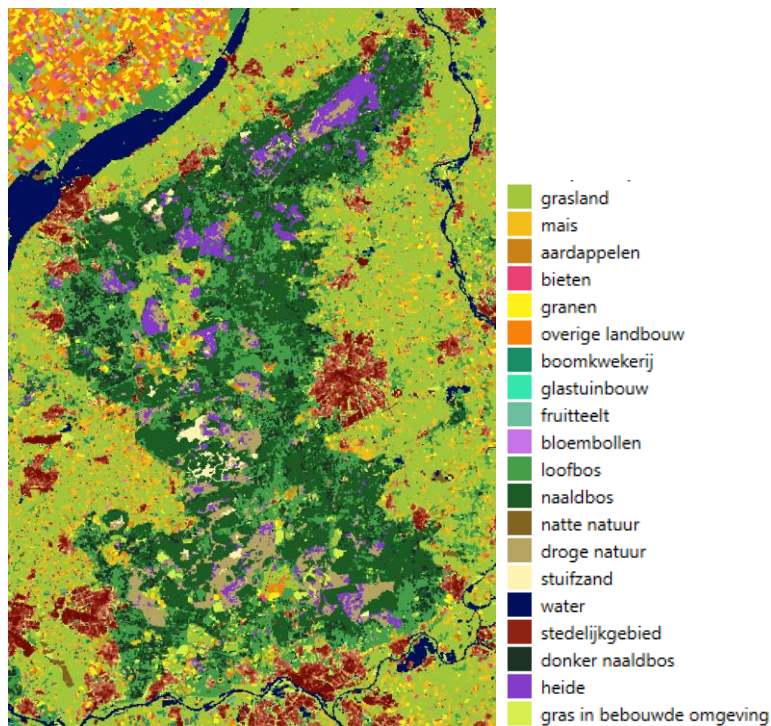
Landgebruik

In totaal worden in FluxPark voor negentien verschillende landgebruiksklassen berekeningen uitgevoerd. Deze landgebruiksklassen zijn gebaseerd op de basisregistratie percelen, Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland (LGN) en satellietbeelden. Deze kaarten worden in een continu proces vernieuwd in FluxPark. In de berekeningen is gebruikgemaakt van het landgebruik van het jaar 2022 (Figuur 2). Het landgebruik is constant gehouden over de volledige modelperiode van 1991 tot 2020.

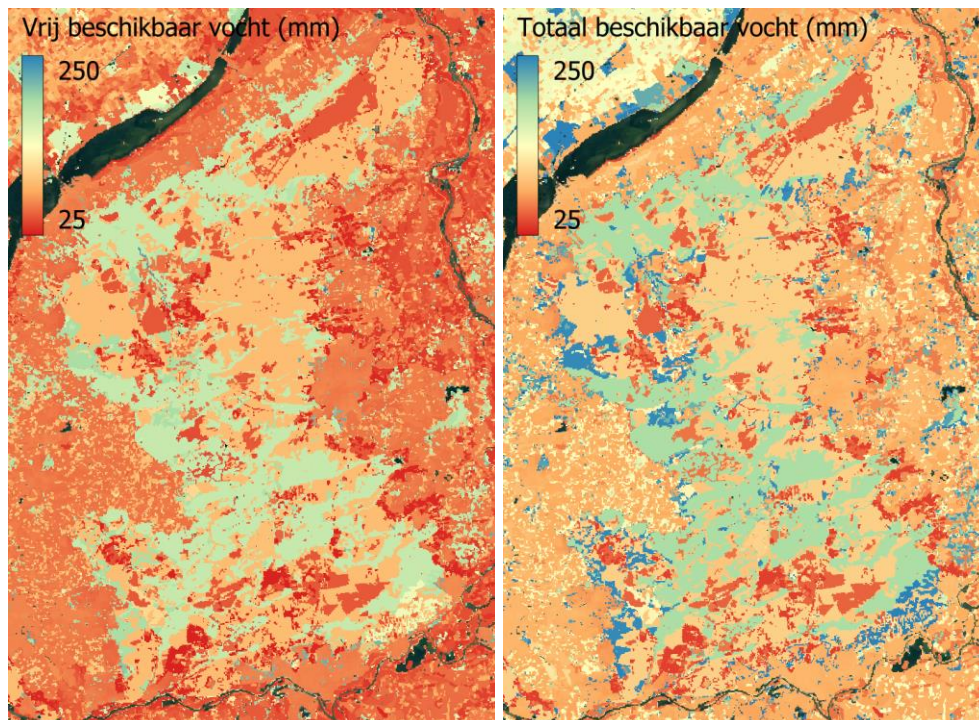
Bodemeigenschappen

Het beschikbare vocht in het reservoirmodel en de sluiting van huidmondjes (Figuur 3) worden bepaald door: de bodemfysische eigenschappen (genomen uit de BodemFysische Eenheden Kaart 2020, BOFEK2020; Heinen et al., 2021), de diepte van de wortelzone, en zogenaamde Feddes parameters van de vegetatie, kort gezegd de drukhoogte in de bodem waarop planten hun huidmondjes sluiten (Feddes, 1971) en worden toegewezen op basis van het landgebruik. In

stedelijk gebied zijn bodemeigenschappen bepaald op basis van het ISRIC SoilGrids250m (Hengl, 2017) die zijn geharmoniseerd met Nederlandse cijfers.



Figuur 2. Het landgebruik van 2022 van FluxPark.

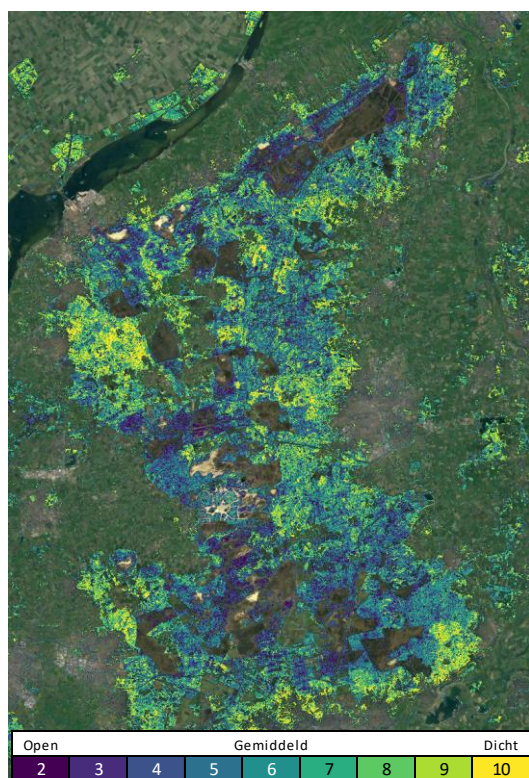


Figuur 3. Kaarten van de reservoir parameters. Links vrij beschikbaar vocht (het vochtgehalte in mm tussen veldcapaciteit en het eerste moment waarop huidmondjes sluiten), rechts totaal plantbeschikbaar vocht (het vochtgehalte in mm tussen veldcapaciteit en verwelkingspunt).

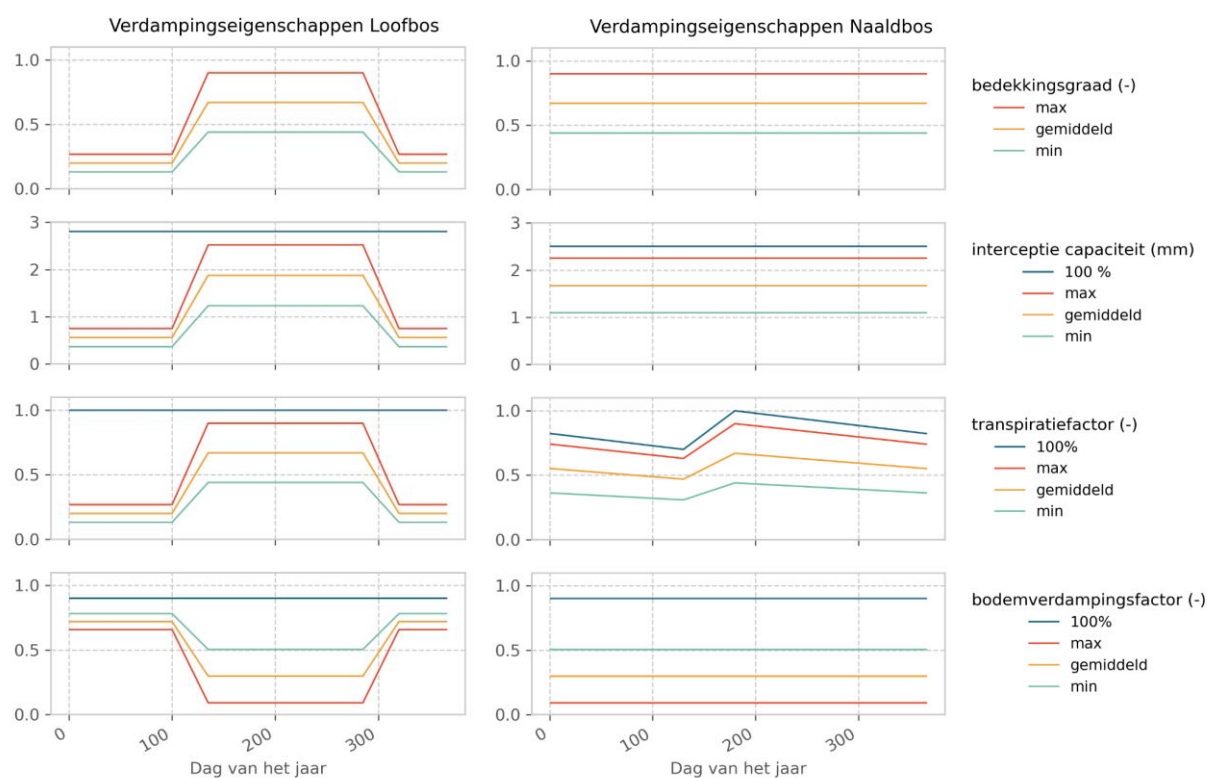
Van drie naar achttien bostypen

Een belangrijke stap in deze studie is om meer ruimtelijke nuances te verdisconteren in de berekeningen van de verdamping van bossen. Kaartmateriaal van de dichtheid van naald- en loofbos is al beschikbaar (Voortman, 2022). Binnen het kaartmateriaal van de dichtheid van het bos bestaan negen klassen per bostype (loof- en naaldbos), dus in totaal achttien bostypen (Figuur 4). In deze paragraaf wordt beschreven hoe we dit kaartmateriaal hebben vertaald naar verdampingseigenschappen. Van elk landgebruikstype is een tabel nodig met een gespecificeerde bedekkingsgraad, interceptiecapaciteit, transpiratiefactor en bodemverdampingsfactor per dag van het jaar. Om tot verdampingseigenschappen te komen worden deze eigenschappen allemaal afhankelijk gemaakt van de bedekkingsgraad. In essentie nemen we aan dat de kroonsluiting van het bos de meest bepalende factor is voor de verdamping: hoe dichter het bos, hoe hoger de verdamping. Dit is mede ontleend aan de ontwikkeling van de verdamping op de lysimeters te Castricum die hebben laten zien dat de verdamping niet meer substantieel toeneemt als de geplante bomen een hoge bedekking hebben.

Door de interceptiecapaciteit, transpiratiefactor en bodemverdampingsfactor bij 100% bedekking te vermenigvuldigen met de werkelijke bedekkingsgraad, en voor de bodemverdampingsfactor door één min de bedekkingsgraad, worden de verdampingseigenschappen geschaald naar bedekking. Hiermee hoeft alleen nog een omzetting plaats te vinden van de dichtheidsklassen (van 2 tot 10) naar een bedekkingsgraad om alle verdampingseigenschappen te bepalen. Van het Speulderbos en het Loobos (beide naaldbossen) kennen we de bedekkingsgraad (90% en 67%) en de dichtheidsklasse (10 en 6). We hebben besloten om deze relatie lineair door te trekken, dus de laagste dichtheidsklasse 2 krijgt daarmee een bedekking van 44%. Voor het loofbos is dezelfde vertaling gedaan met dezelfde cijfers. Wel is de bedekking van het loofbos uiteraard variabel in de tijd door bladverlies. Dit vindt voor alle loofbostypen op hetzelfde moment plaats. Alle eigenschappen en vertalingen worden weergegeven in Figuur 5.



Figuur 4. Kaartmateriaal van de dichtheid van het bos voor naald- en loofbos.



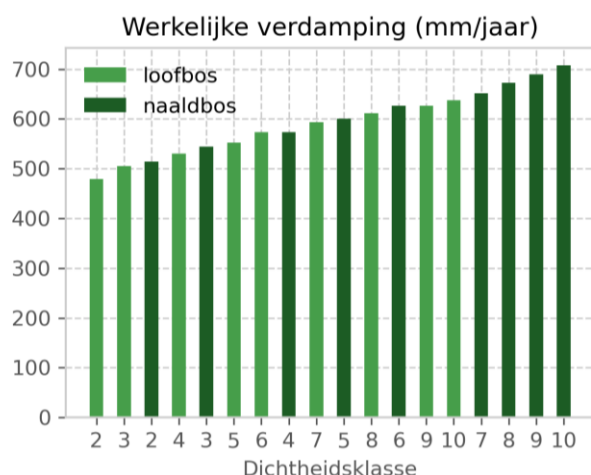
Figuur 5. Verdampingseigenschappen van bossen, met maximale dichtheidsklasse (10), gemiddelde dichtheidsklasse (6), en minimale dichtheidsklasse (2).

3 Resultaten en Discussie

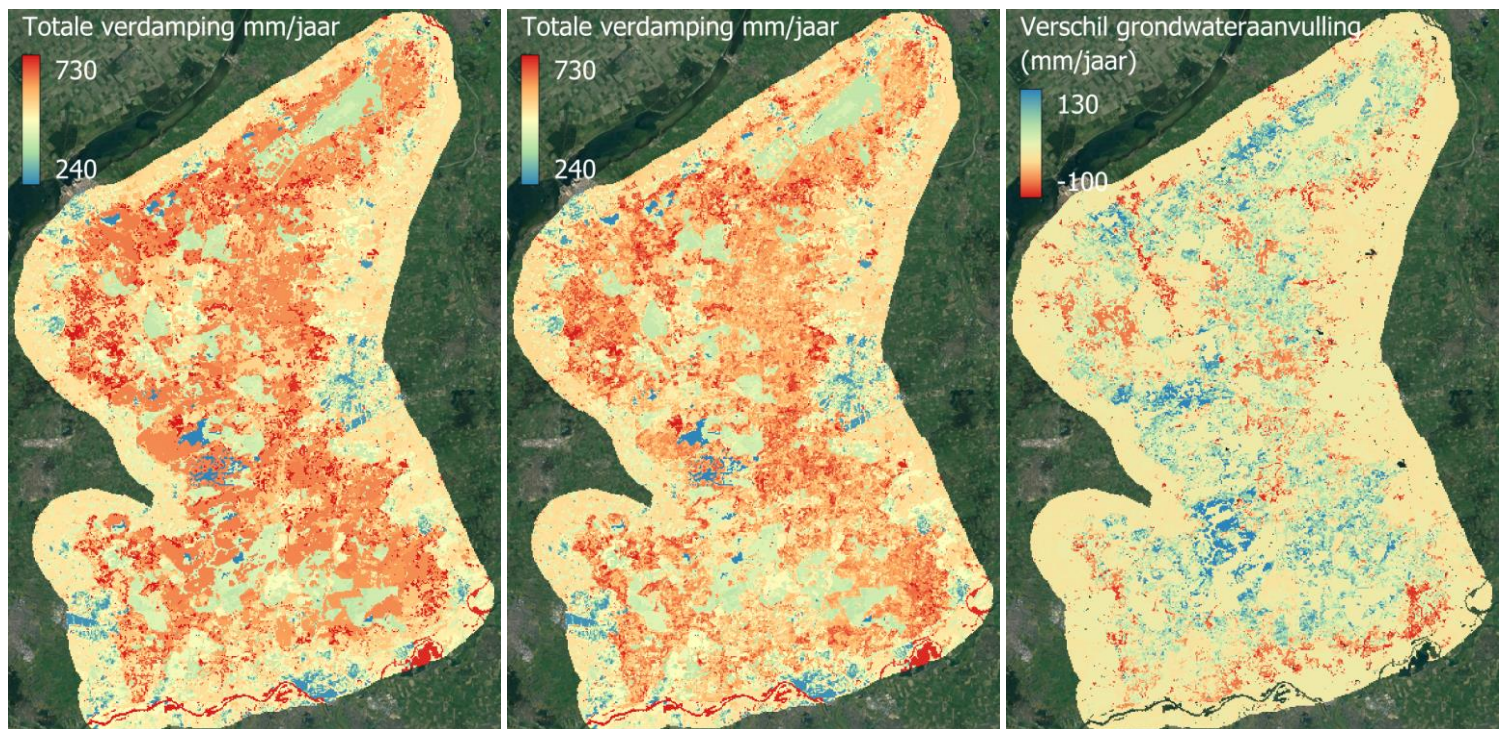
In onderstaande paragrafen analyseren we eerst de modelresultaten van de originele FluxPark berekeningen met de drie standaard bostypen en vergelijken we die met de berekeningen met meer bostypen. Vervolgens worden modelberekeningen met verschillende worteldieptes en een veranderend klimaat behandeld. Ten slotte volgt een vergelijking met het AZURE-model.

Ruimtelijke verschillen in bosverdamping

De totale verdamping van verschillende bossen varieert volgens veldmetingen tussen ca. 530 mm/jaar (eikenbos, Castricum lysimeters) en 710 mm/jaar (Douglas, Speulderbos; bijlage 1). Voor donker naaldbos (dichtheidsklasse 10) is met FluxPark een verdamping van ca. 710 mm/jaar berekend. Open loofbos (dichtheidsklasse 2) komt uit op 490 mm/jaar (Figuur 6). Door gebruik te maken van het kaartmateriaal en de ruimtelijke verschillen te verdisconteren komen de langjarig gemiddelde verdampingscijfers dus goed overeen met de waargenomen spreiding. Ook voor een gemiddeld naaldbos zoals het Loobos (dichtheidsklasse 6) komen verdampingscijfers goed overeen (gemeten: 630 mm/jaar periode 1995-1998 vs gemodelleerd 1991-2020, 630 mm/jaar). Alle donkere naaldbosklassen (van 7 t/m 10) hebben de hoogste verdampingscijfers, wat overeenkomt met het algemeen geaccepteerde beeld dat donkere naaldbossen meer water verdampen dan loofbossen door een hoge interceptieverdamping in de winter (Figuur 6). Toch hebben loofbossen met hoge dichtheidsklassen (9 en 10) in vergelijking met een gemiddeld naaldbos (ca. 630 mm/jaar) een hogere of vergelijkbare werkelijke verdamping. Er is duidelijk een overlap in de verdamping tussen de twee bostypen (naald- en loofbos). Dit komt ook overeen met het patroon in veldmetingen (bijlage 1). Dit laat zien dat niet alle naaldbossen meer water verbruiken dan loofbossen. Dit betekent dat voor het inschatten van de hydrologische baten van het omvormen van naald- naar loofbos, de locatie-specifieke eigenschappen van het bos moeten worden beschouwd.



Figuur 6. De langjarig gemiddelde (1991 – 2020) totale werkelijke verdamping van bossen (mm/jaar) per dichtheidsklasse. De x-as is gesorteerd op de hoeveelheid werkelijke verdamping. De verdampingscijfers zijn het gemiddelde van alle pixels in de betreffende dichtheidsklasse in het modelgebied.



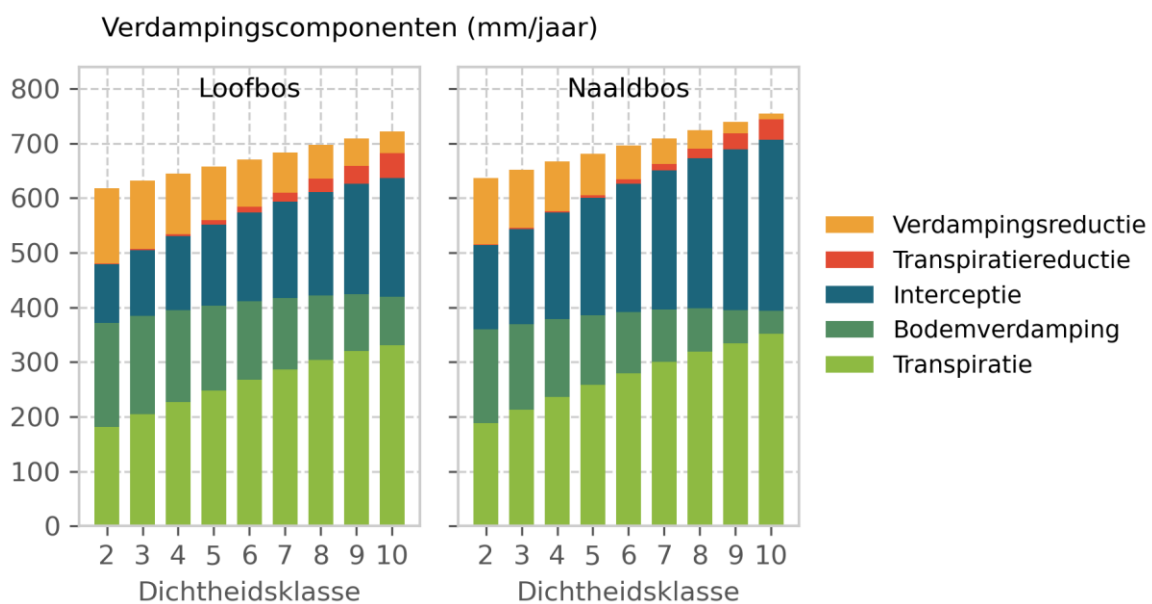
Figuur 7. De totale langjarige (1991 – 2020) werkelijke verdamping (mm/jaar), links met drie bostypen, midden met achttien bostypen, rechts het verschil in grondwateraanvulling (mm/jaar) tussen beide simulaties.

Door meer ruimtelijke verschillen te verdisconteren in de berekening van bosverdamping verandert de (lokale) langjarig gemiddelde grondwateraanvulling met maximaal +130 mm/jaar tot -100 mm/jaar in vergelijking met een simulatie met maar drie bostypen (loof-, naald- en donker naaldbos, Figuur 7). Op grondwateraanvullingscijfers van bossen zijn dit enorm grote verschillen, een toename van ca. 50% en een afname van ca. 35%. Vooral voor lichte naaldbossen neemt de verdamping flink af en dus de grondwateraanvulling toe (ten zuiden en ten noorden van Kootwijk en aan de noordflank). Voor donkere loofbossen neemt de verdamping vooral toe (langs de zuidflank, het Speulderbos, de Leuvenumse beek, en regio's aan de oostflank nabij Apeldoorn en Epe). Gezien de grote verschillen zijn de ruimtelijke nuances relevant voor het begrip en de modellering van grondwaterstanden en afvoeren van beken en sprengen. Tegelijkertijd, als je alle cijfers zou middelen over de hele Veluwe, dan neemt de grondwateraanvulling maar 10 mm/jaar toe, van 360 mm/jaar naar 370 mm/jaar. Op de schaal van de Veluwe middelen de ruimtelijke verschillen dus uit. Dit neemt niet weg dat de impact voor de water beschikbaarheid regionaal groot kan zijn.

Om beter te begrijpen waardoor verschillen in verdamping ontstaan, hebben we alle individuele verdampingscomponenten ook weggeschreven per bostype (Figuur 8). Hierin is duidelijk te zien dat in essentie de grootste verschillen in verdamping worden gemaakt door interceptieverdamping (donkerblauwe balken). De interceptieverdamping van naaldbos is substantieel groter dan die voor loofbos. Donker naaldbos (dichtheidsklasse 10) en een gemiddeld naaldbos (dichtheidsklasse 6) hebben een berekende interceptieverdamping van maar liefst 35% en 27% van de neerslag. Voor het donker loofbos is de interceptie lager, ca.

25%. Dit soort berekende percentages komen goed overeen met veldmetingen (bijlage 1, 38% Speulderbos, 27% Loobos, 25% Beuk). Een lagere interceptieverdamping voor loofbos komt doordat het loofbos zijn blad laat vallen en daardoor een kortere periode interceptieverdamping kan genereren. Wel is de in ons model aangehouden maximale interceptiecapaciteit van een loofbos in de zomer (2.8 mm, 100% bedekking) groter dan de interceptiecapaciteit van een naaldbos (2.5 mm, 100% bedekking). Ook de transpiratie neemt flink toe met de bosdichtheid, maar dit gaat bijna één op één ten koste van de bodemverdamping. De som van beide termen blijft daarom per bostype ongeveer gelijk (Figuur 8, de som van de twee groene balken).

In zijn algemeenheid geldt dat in de berekening een dicht bos meer transpiratiereductie heeft en een open bos meer bodemverdampingsreductie. Hoe hoger de potentiële transpiratie hoe hoger de transpiratiereductie kan worden. In deze berekening is gerekend met een dikte van de wortelzone van 100 cm voor alle bostypen. Voor dichte bossen blijkt deze worteldiepte ontoereikend om voldoende bodemvocht te kunnen onttrekken en leidt deze beperkte diepte tot transpiratiereductie. Voor lichte bossen is de potentiële transpiratie lager en is een worteldiepte van 100 cm voldoende. Het is belangrijk om te beseffen dat we ondergronds dus mogelijk nog te weinig ruimtelijke nuance meewegen, omdat aan alle bossen dezelfde worteldiepte is toegekend.



Figuur 8. De verdampingscomponenten van loof- en naaldbos per dichtheidsklasse berekend over de periode 1991 – 2020.

Tot op heden rekende hydrologen vaak met enkel drie bostypen: loofbos, naaldbos en donker naaldbos. Hierdoor is een vertekend beeld ontstaan met altijd hoge verdampingscijfers voor naaldbos in vergelijking tot loofbos. Een mogelijke verklaring is te vinden in de locatie van de verschillende meetinstallaties en herkomst van de verdampingscijfers. Omdat het Speulderbos (Douglas, donker naaldbos) al sinds de jaren tachtig wordt bemeten, hebben we cijfers van

donker naaldbos. Dus dit is in het verleden als begroeiingstype toegevoegd. Omdat er geen goede gegevens zijn van een open lichte opstand van naaldbos is deze klasse niet eerder toegevoegd. Voor loofbossen is überhaupt geen poging gedaan de ruimtelijk verschillen te verdisconteren in ruimtelijke hydrologische modellen. In deze studie hebben we, met zo goed mogelijke inschattingen op basis expert judgement en nieuwe data, een eerste beeld geschetst van de ruimtelijke verschillen in bosverdamping door het naald- en loofbos in negen verschillende dichtheidsklassen te verdelen. Deze ruimtelijke nuances zijn relevant voor het begrip, de modellering van grondwaterstanden en de hydrologische advisering ten aanzien van de ruimtelijk ontwikkeling. Voor de meest open naaldbosklasse is een verdamping van iets meer dan 500 mm/jaar berekend, wat we in de verslaglegging van Nederlandse meetlocaties nog niet eerder zijn tegengekomen. Van alle cijfers die we presenteren is dit cijfer wellicht het meest onzeker. Verdere validatie met veldmetingen is daarom zeer gewenst. Ondanks dat we zien dat gepresenteerde cijfers goed overeenkomen met literatuercijfers, moeten we ons ervan bewust zijn dat de literatuercijfers soms afkomstig zijn uit andere meetperioden en jaren. Omdat onze langjarige cijfers van 1991 tot 2020 ook de extreme jaren 2018, 2019 en 2020 bevatten mag je eigenlijk verwachten dat onze cijfers wellicht wat hoger zouden moeten uitkomen dan literatuurwaarden. De laatste decennia is de referentieverdamping namelijk toegenomen. We hebben daarom eerder de indruk dat we verdamping nog iets onderschatten dan overschatten, maar dit is tevens afhankelijk van de keuze van de worteldiepte (volgende paragraaf).

Effect van worteldiepte op verdamping

Om een beeld te krijgen van de effecten van worteldieptes op de grondwateraanvulling zijn in Fluxpark de worteldieptes van bossen vergroot tot het punt waarop geen transpiratiereductie meer optreedt. Deze diepte geeft namelijk de grens aan vanaf waar de worteldiepte niet meer beperkend is voor wateropname en de verdamping/grondwateraanvulling bepaald wordt door het klimaat/weer. Dit geeft grenzen aan de discussie. In Figuur 3 is de transpiratiereductie van het extreem droge jaar 2018 weergegeven voor verschillende worteldieptes. De referentieberekening met een worteldiepte van 100 cm laat al een vrij groot gebied zien (de westflank rond Kootwijk) met nauwelijks een transpiratietekort. Dit komt grotendeels door de gunstige bodemfysische eigenschappen in deze regio. Het vrij beschikbare vocht is hier bijna twee keer zo groot (ca. 190 mm) als elders (ca. 100 mm, Figuur 3). Ook zijn dit soms de regio's met een lagere bosdichtheid en dus een lagere potentiële transpiratie.

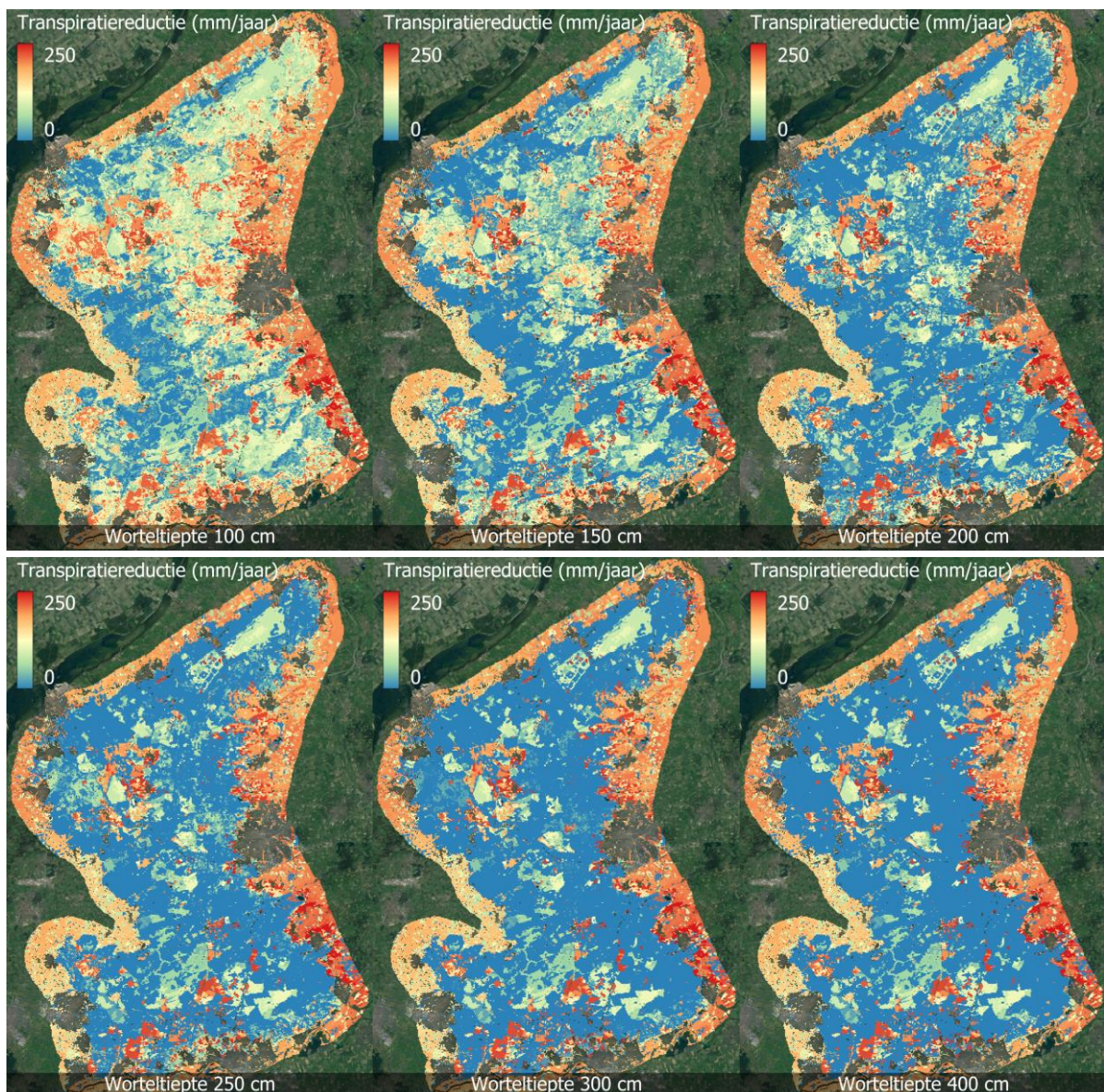
Binnen het donker loofbos treed de grootste transpiratiereductie op in 2018 (ca. 220 mm/jaar). In de regio van het Speulderbos (noord-west hoek) is dit goed zichtbaar. Het donker naaldbos heeft daar ook een hoge transpiratiereductie van ca. 180 mm/jaar. Dit is een gebied dat volgens het kaartmateriaal een hoge bosdichtheid heeft en ongunstige bodemfysische eigenschappen. Als de worteldiepte in stappen wordt vergroot, dan blijkt dat de transpiratiereductie verwaarloosbaar wordt bij een worteldiepte van ongeveer 300 cm. Dit is de worteldiepte waarvan je kan zeggen dat de beschikbaarheid van vocht in de bodem niet meer beperkend was voor de verdamping in 2018.

Volgens de literatuur kunnen bomen, onder invloed van allerlei factoren zoals bodemtype, water- en nutriëntenbeschikbaarheid, eenvoudig dieper dan 100 cm wortelen. Van den Burg (1996), bijvoorbeeld, geeft de volgende worteldieptes: lariks 1 m, populier 1.62 m, eik 1.4 m, grove den 4.25 m. Moors (2012) geeft de volgende worteldieptes: lariks 0.7 m, eik 1.6 m, populier 1.8 m, gemengd 1.2 m, grove den >2.5 m. De bomen in de lysimeters te Castricum wortelden tot in het drainagestelsel op 2.5 m diep. Met een worteldiepte van 100 cm zitten we in de meeste van onze hydrologische modellen dus aan de ondiepe kant. Ook weten we vrij zeker dat de transpiratiereductie zoals gesimuleerd voor het donker naaldbos van het Speulderbos te hoog is (ca. 180 mm/jaar in 2018). Sinds 2022 zijn polymeren tensiometers geïnstalleerd in het Speulderbos en kunnen we analyseren of bodemvocht vrij opneembaar is (Figuur 10). In 2022 neemt het vrij opneembaar vocht tot een diepte van 165 cm sterk af in augustus. Op dat moment ontstaat ook een verschil in potentiële transpiratie en werkelijke verdamping, maar het verschil is niet bijzonder groot. De verdamping blijft redelijk op niveau. Dit zien we ook later in de zomer van 2023. Al met al hebben we dus voldoende aanleiding om te veronderstellen dat we de transpiratiereductie hier in FluxPark overschatten als we de worteldiepte beperken tot 100 cm.

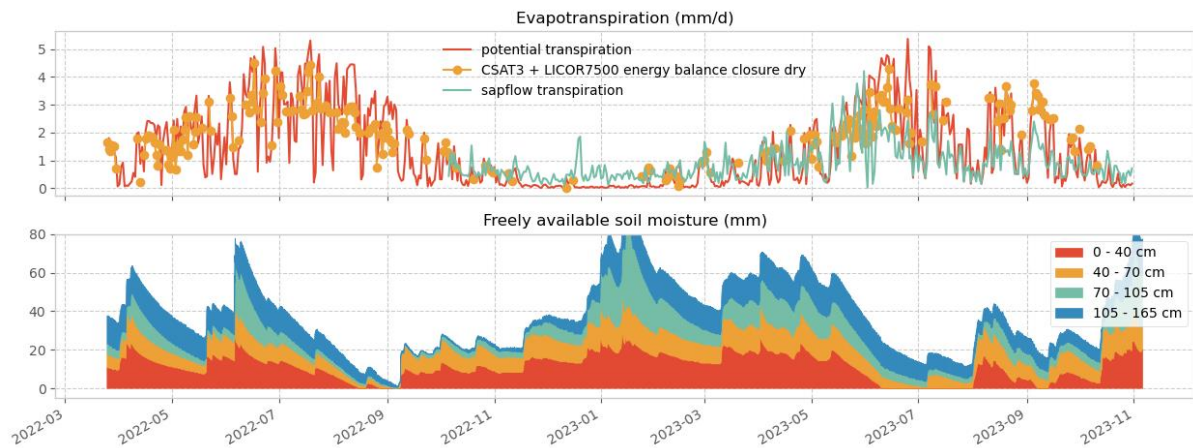
In hydrologische modellen wordt in Nederland vrijwel altijd gerekend met een vrij beperkte worteldiepte van rond de 100 cm (80 cm tot ca. 120 cm) voor bossen. We hebben daarom een sterke indicatie dat we hiermee de transpiratie teveel beperken en verdamping onderschatten,

vooral voor dichte opstanden. We hebben daarom in de volgende hoofdstukken ook berekeningen gebruikt met een worteldiepte van 250 cm om verdampingscijfers te beoordelen. Deze worteldiepte is namelijk nog plausibel en geeft nog enige transpiratiereductie, wat we mogen verwachten.

In onze aanpak hebben we voor alle bostypen dezelfde worteldiepte gebruikt. In werkelijkheid mag verwacht worden dat er een relatie bestaat tussen bijvoorbeeld de bovengrondse biomassa en de ondergrondse biomassa en dus de worteldiepte in de ruimte varieert afhankelijk van aanwezige soorten en bodemgesteldheid. Dit was voor deze studie een brug te ver om nader te onderzoeken, maar deze ruimtelijk nuances verdienen de aandacht.



Figuur 9. De transpiratiereductie (mm/jaar) voor het jaar 2018 voor verschillende worteldieptes.



Figuur 10. Boven: de potentiële transpiratie, gemeten verdamping en sapflow. Onder: het vrij beschikbaar vocht voor verschillende grondlagen.

Het is belangrijk om te beseffen dat in deze berekeningen van FluxPark capillaire nalevering of beregening niet is meegenomen. Deze componenten missen in de laaggelegen gebieden rondom de Veluwe (Figuur 9). Daarom is hier de transpiratiereductie hoog.

Klimaatscenario's

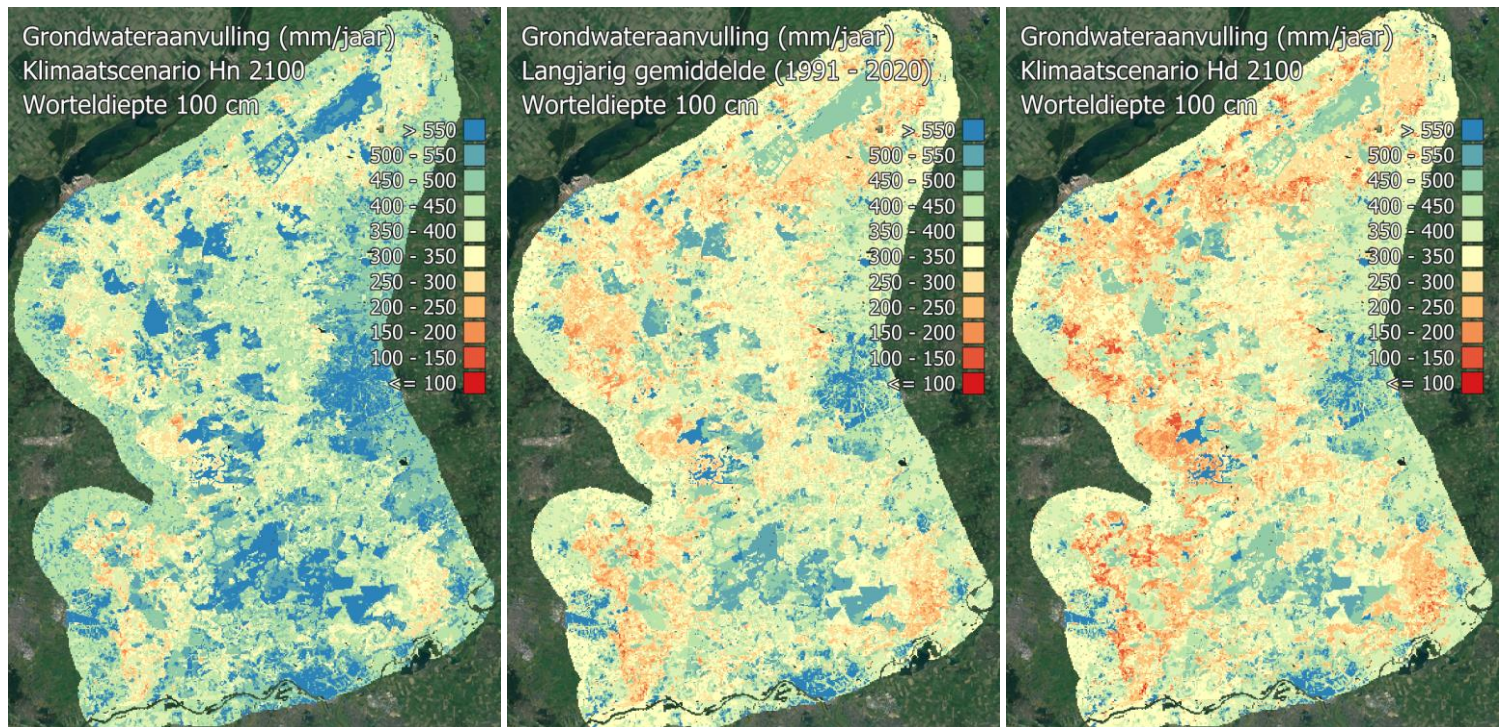
De gevolgen van klimaatverandering voor de grondwateraanvulling zijn doorgerekend voor het jaar 2100 met behulp van de KNMI '23 klimaatscenario's (KNMI, 2023). In deze studie zijn twee scenario's met een hoge uitstoot van broeikasgassen doorgerekend: Hn, waarin de winters aanzienlijk natter (24% meer neerslag) en de zomers iets droger worden (12% minder neerslag), en Hd, waarin de winters iets natter (14% meer neerslag) en de zomers sterk droger worden (29% minder neerslag). In beide scenario's neemt de referentiegewasverdamping volgens Makkink toe: 11% voor scenario Hn en 17% voor scenario Hd. Er is gerekend met worteldieptes van 100 cm (Figuur 11) en 250 cm (Figuur 12) voor bosgebieden. In het natte scenario (Hn) stijgt de grondwateraanvulling met 19% bij een worteldiepte van 100 cm en met 16% bij een worteldiepte van 250 cm voor de hele Veluwe. In het droge scenario (Hd) neemt de grondwateraanvulling af met 6% bij een worteldiepte van 100 cm en met 13% bij een worteldiepte van 250 cm. De relatieve verschillen zijn dus het grootst voor het natte scenario. In het droge scenario met worteldieptes van 250 cm neemt de grondwateraanvulling substantieel af, omdat de bossen langer kunnen verdampen in de zomer. In sommige regio's daalt de grondwateraanvulling dan tot minder dan 100 mm/jaar (Figuur 12). De keuze van de worteldiepte heeft dus grote gevolgen voor de uitkomsten. Voor andere begroeiingstypen, zoals heideterreinen, neemt de grondwateraanvulling niet tot nauwelijks af in het droge scenario.

Per bostype zijn ook de effecten van klimaatverandering gerapporteerd voor de berekening met een worteldiepte van 250 cm (Tabel 1, Figuur 13). De veranderingen voor verschillende bostypen zijn groter dan voor de gehele Veluwe (zoals hierboven geschetst). De grondwateraanvulling neemt toe met 12% tot 23% per bostype in het Hn scenario en af met 14% tot 40% in het Hd scenario (Tabel 1). Het is opvallend dat voor elk bostype de verdamping

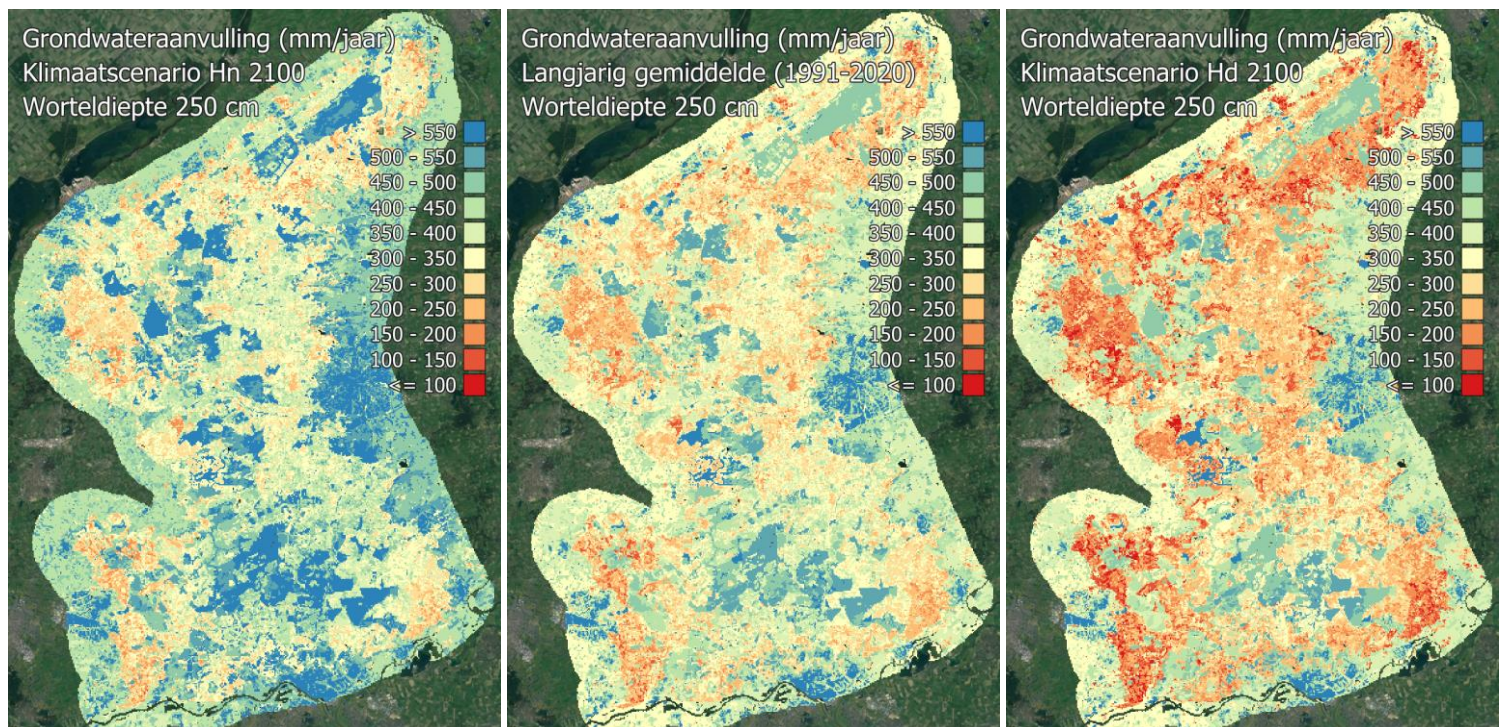
toeneemt met ca. 5% tot 7% in beide klimaatscenario's. In absolute zin betekent dit dat de verdamping voor donkere bossen meer toeneemt dan voor lichte bossen.

In de toekomst mag je verwachten dat de begroeiing zich aanpast aan het klimaat. Voor loofbossen kan dit betekenen dat het groeiseizoen eerder begint en later stopt, wat kan leiden tot een hogere verdamping dan tot nu toe wordt uitgerekend. Om te onderzoeken wat dit zou kunnen betekenen voor de grondwateraanvulling, is het groeiseizoen met zes weken verlengd voor het Hd klimaatscenario. Kort gezegd betekent dit dat de trapezoïde in de verdampingseigenschappen (Figuur 5) voor loofbossen is verbreed. Het effect hiervan is dat de verdamping in het Hd scenario voor loofbossen verder toeneemt met 21 mm/jaar voor een open loofbos tot 30 mm/jaar voor een dicht loofbos. Deze cijfers zijn niet gelijk heel groot. Dit komt omdat het groeiseizoen primair wordt opgelegd door het verloop van de referentiegewas verdamping die is gebaseerd op inkomende zonnestraling en luchttemperatuur. Alleen als het model een lage gewasfactor gebruikt terwijl de referentieverdamping al oploopt, dan onderschat het model de verdamping en wordt deze kunstmatig laag gehouden terwijl het seizoen al is begonnen. Andersom is het minder problematisch. Als de gewasfactor hoog is maar de referentie verdamping nog laag, dan is de modelfout klein. Dit komt omdat een lage referentieverdamping van bijvoorbeeld 0.1 mm/d vermenigvuldigd met 1, nog steeds verwaarloosbaar is. In FluxPark hanteren we daarom al een relatief lang groeiseizoen voor loofbossen in de standaardversie. We laten het seizoen beginnen op dag 100 (10 april) en eindigen op dag 320 (16 november). Verder verlengen van het seizoen leidt wel tot meer verdamping, maar het is niet schrikbarend veel. Wel is het opvallend dat door een langer groeiseizoen de verdamping van loofbossen in het Hd scenario meer toeneemt (9 tot 12 %) dan de verdamping van naaldbossen (ca. 5 tot 7%) en de verschillen tussen loof- en naaldbos dus kleiner worden (Tabel 1).

Het is belangrijk om te markeren dat de cijfers in tabel 1 zijn bepaald met een worteldiepte van 250 cm voor bossen. De cijfers zijn daarom iets hoger dan de cijfers gepresenteerd in de eerste paragraaf van het huidige hoofdstuk. Met een kritische blik op deze cijfers, moeten we bekennen dat een verdamping van 682 mm/jaar voor een dicht loofbos in het huidige klimaat mogelijk aan de hoge kant is. Daarom is het belangrijk om meer onderzoek te doen naar de verdampingscijfers van donkere loofbossen.



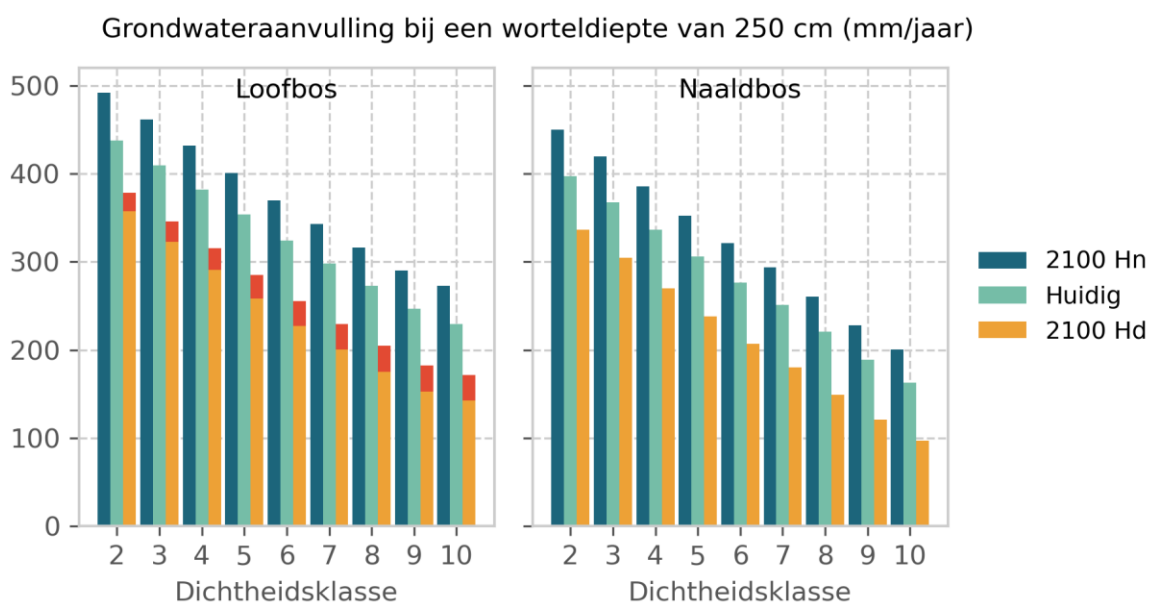
Figuur 11. De grondwateraanvulling voor het huidige klimaat (midden), het natte scenario Hn (links) en het droge scenario Hd (rechts) met een worteldiepte van 100 cm.



Figuur 12. De grondwateraanvulling voor het huidige klimaat (midden), het natte scenario Hn (links) en het droge scenario Hd (rechts) met een worteldiepte van 250 cm voor bossen.

Tabel 1. Effecten van klimaatverandering op de verdamping en grondwateraanvulling voor verschillende bostypen op de Veluwe als we uitgaan van een worteldiepte van 250 cm. Hd Gr staat voor het Hd scenario met een langer groeiseizoen voor loofbos.

		Verdamping (mm/jaar)				Aanvulling (mm/jaar)				Verandering verdamping (%)			Verandering aanvulling (%)		
		Huidig	Hn	Hd	Hd Gr	Huidig	Hn	Hd	Hd Gr	Hn	Hd	Hd Gr	Hn	Hd	Hd Gr
Loofbos (dichtheids klasse)	2	480	507	511	532	437	492	378	357	6%	6%	11%	12%	-14%	-18%
	3	508	537	543	566	409	462	346	323	6%	7%	12%	13%	-16%	-21%
	4	534	566	574	599	382	432	315	290	6%	7%	12%	13%	-18%	-24%
	5	560	595	602	629	353	401	285	258	6%	7%	12%	13%	-19%	-27%
	6	586	623	630	658	324	370	255	227	6%	7%	12%	14%	-21%	-30%
	7	612	650	656	686	298	343	229	200	6%	7%	12%	15%	-23%	-33%
	8	637	676	680	710	272	316	205	175	6%	7%	11%	16%	-25%	-36%
	9	660	699	699	730	247	290	182	153	6%	6%	11%	17%	-26%	-38%
	10	682	720	714	744	229	273	171	142	6%	5%	9%	19%	-25%	-38%
Naaldbos (dichtheids klasse)	2	515	543	546		397	450	337		6%	6%		13%	-15%	
	3	546	577	581		368	420	305		6%	6%		14%	-17%	
	4	577	611	616		336	385	270		6%	7%		15%	-20%	
	5	606	643	649		306	353	238		6%	7%		15%	-22%	
	6	636	675	680		276	321	207		6%	7%		16%	-25%	
	7	664	705	710		251	294	180		6%	7%		17%	-28%	
	8	692	734	739		220	261	149		6%	7%		18%	-32%	
	9	719	761	762		189	228	121		6%	6%		21%	-36%	
	10	744	787	783		163	200	97		6%	5%		23%	-40%	



Figuur 13. De grondwateraanvulling voor loofbos en naaldbos bij een worteldiepte van 250 cm voor het huidige klimaat en twee klimaatscenario's (Hn en Hd). De rode balken voor loofbos geven de afname van de grondwateraanvulling als het groeiseizoen voor loofbossen 6 weken langer duurt.

Tot voor kort simuleerden we met AZURE altijd een toenemende grondwateraanvulling onder een veranderend klimaat voor de Veluwe (van Huijgevoort et al., 2020, van Engelenburg et al. 2018). Veelal omdat in de zomer een gebrek aan bodemwater leidde tot een beperkte of geen toename van de verdamping. Als de winters natter worden dan neemt de grondwateraanvulling toe, ondanks hetere zomers. Aan deze positieve toekomstbeelden zijn we gaan twijfelen omdat we toenemende grondwaterstanden nog niet in het veld hebben kunnen waarnemen (tot 2023). Hoe de waterbalans uitpakt tussen verdamping in de zomer en neerslag in de winter is uiteindelijk doorslaggevend. Omdat is gerekend met een beperkte worteldiepte en veel transpiratiereductie zijn eerdere studies conservatief geweest in het schatten van de zomerse verdamping. Daarnaast zijn bijvoorbeeld donkere naaldbossen en loofbossen niet altijd meegenomen in de analyses. De klimaatprojecties van deze studie laten voor het eerst een afname zien in de grondwateraanvulling voor het droge Hd scenario voor het zichtjaar 2100, wat een duidelijk ander beeld geeft op de toekomst. Dit komt mede omdat in deze studie is gerekend met KNMI'23 scenario's die een droger toekomstbeeld schetsen dan de klimaatscenario's uit 2014.

Vergelijkingen met AZURE

Veel nationale en regionale modellen gebruiken MODFLOW voor grondwaterstroming in combinatie met MetaSWAP om verdamping en grondwateraanvulling uit te rekenen. Ook in AZURE wordt MetaSWAP gebruikt. Omdat elk modelconsortium zijn eigen instellingen en invoergegevens kan specificeren in MetaSWAP spreken we hier over een vergelijking met AZURE. Om de voorgaande analyses te duiden en te vergelijken met de huidige modellen is voor de periode 2010 t/m 2018 een vergelijking gedaan tussen AZURE en FluxPark. Voor FluxPark hanteren we de berekening met achttien verschillende bostypen en een worteldiepte van 250 cm. We gebruiken deze versie van FluxPark omdat we denken dat deze berekening de meest accurate weergave is van de werkelijkheid. Het is belangrijk om te beseffen dat we hier twee modellen met verschillende detailniveaus, invoergegevens en modelconcepten vergelijken. In een eerdere studie is ook een vergelijking gedaan voor beide modellen, met de oude versie van FluxPark met drie bostypen en een worteldiepte van 100 cm voor de periode 2013 t/m 2015 (van der Velde et al. 2024).

In zijn algemeenheid is de verdamping op jaarbasis van het hele modelgebied Veluwe in FluxPark 10 tot 80 mm/jaar hoger dan in AZURE. De grondwateraanvulling in FluxPark is daarom lager (Figuur 14). Dit zijn verschillen die vooral veroorzaakt worden door een hogere transpiratie in FluxPark (Figuur 14). Dit is niet verwonderlijk omdat in FluxPark met een grotere worteldiepte is gerekend en dichte loofbossen zijn toegevoegd. Tegelijkertijd is gebleken dat in AZURE een landgebruikskaart is gebruikt van het NHI waarin een groot areaal naaldbos foutief is verdwenen. Vrijwel overal is op de Veluwe een groot deel van het naaldbos verdwenen (Figuur 15). Dit klopt niet, en verklaart het homogene ruimtelijke patroon in verdamping in Figuur 16 en Figuur 17 voor AZURE. De vergelijking tussen de twee modellen is daarom wat ongelukkig.

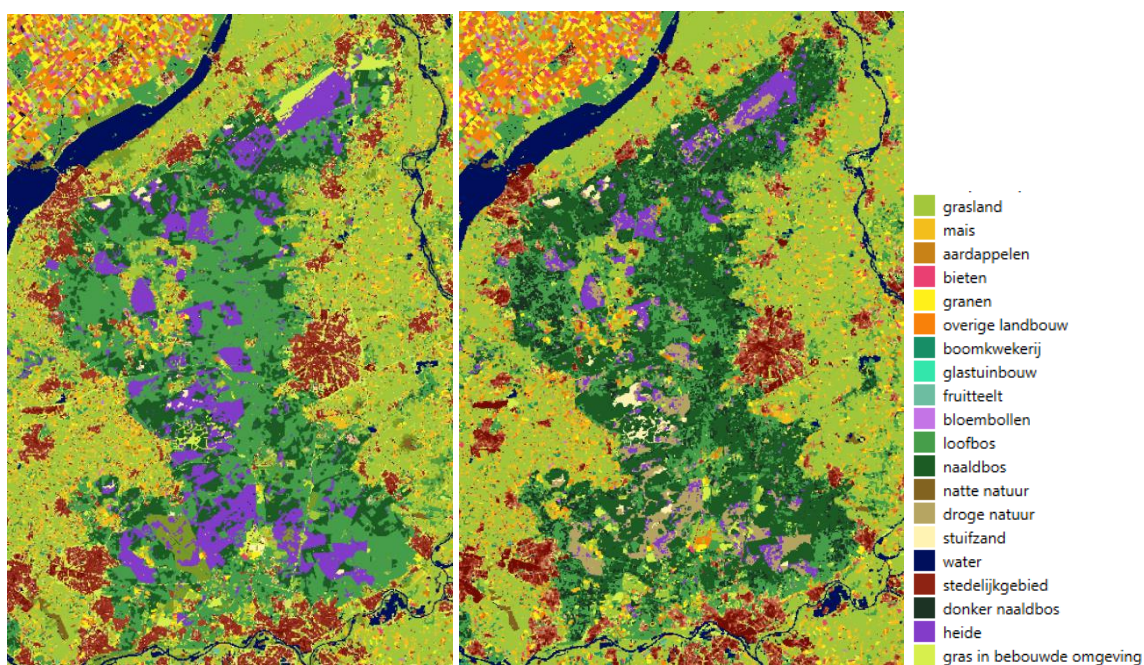
Mede daarom zijn regionale verschillen bijzonder groot (+300 mm/jaar tot -300 mm/jaar, Figuur 18), bijvoorbeeld in het extreem droge jaar 2018. Het is zelfs zo dat AZURE in 2018 een verdamping simuleert van ca. 400 mm/jaar voor een groot areaal van het bos, terwijl FluxPark een verdamping simuleert van ca. 600 mm/jaar tot 700 mm/jaar (Figuur 17). De zeer lage verdampingscijfers in 2018 in AZURE achten we niet waarschijnlijk. In het beeld van 2018 onderscheidt het bos zich niet meer van heideterreinen, wat ons niet realistisch lijkt. Het jaar 2014 was een stuk natter met ook zomerse neerslag waardoor de worteldiepte niet relevant is voor de verdampingsberekeningen. Voor het jaar 2014 zijn de verschillen tussen AZURE en FluxPark daarom minder extreem, maar nog steeds groot (Figuur 18). De verdamping voor het bosgebied is in AZURE 100 mm/jaar tot 200 mm/jaar lager dan in FluxPark. Wat opvalt is dat het naaldbos in AZURE in 2014 niet afsteekt tegenover het omringende land, waar de verdamping soms zelfs hoger ligt. Dit achten we niet realistisch. Een dicht naaldbos verdampt meer dan Engels raaigras door een hoge interceptieverdamping in de winter. Vooral dit soort bossen met hoge cijfers ontbreken in de berekening van AZURE.

Het is belangrijk om te beseffen dat in de berekeningen van FluxPark geen capillaire nalevering of beregening is meegenomen. Deze componenten missen in de laaggelegen gebieden rondom

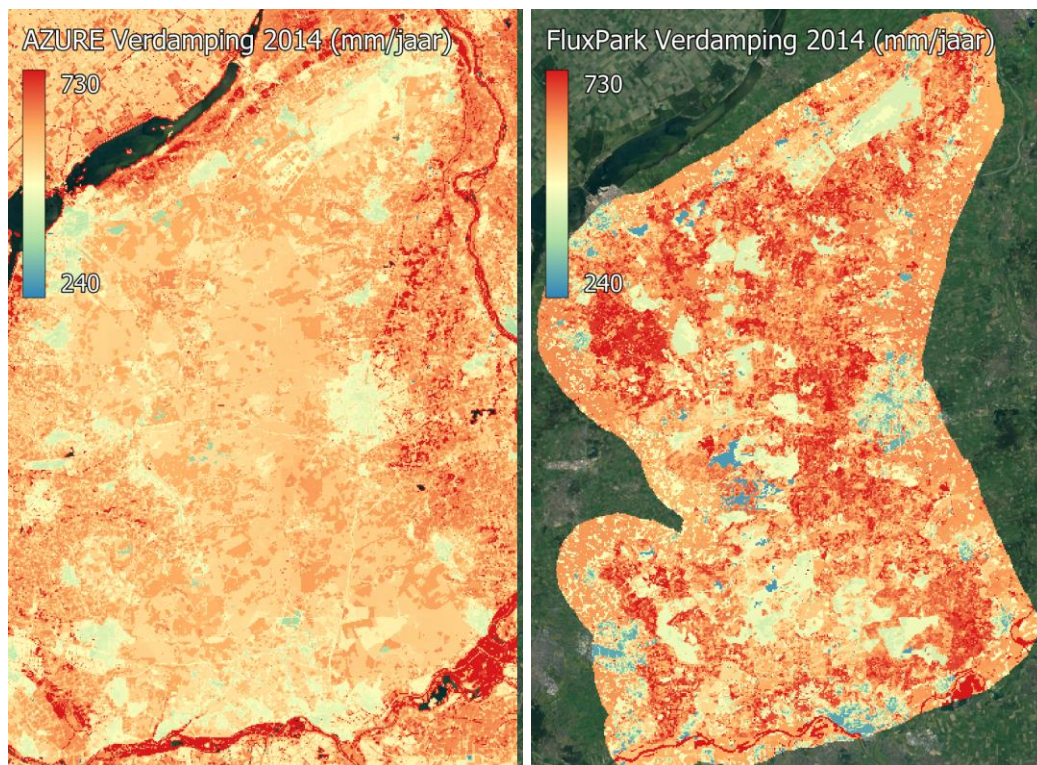
de Veluwe. Daarom zijn de verdampingscijfers voor 2018 in deze gebieden een stuk lager voor FluxPark dan voor AZURE (Figuur 17).



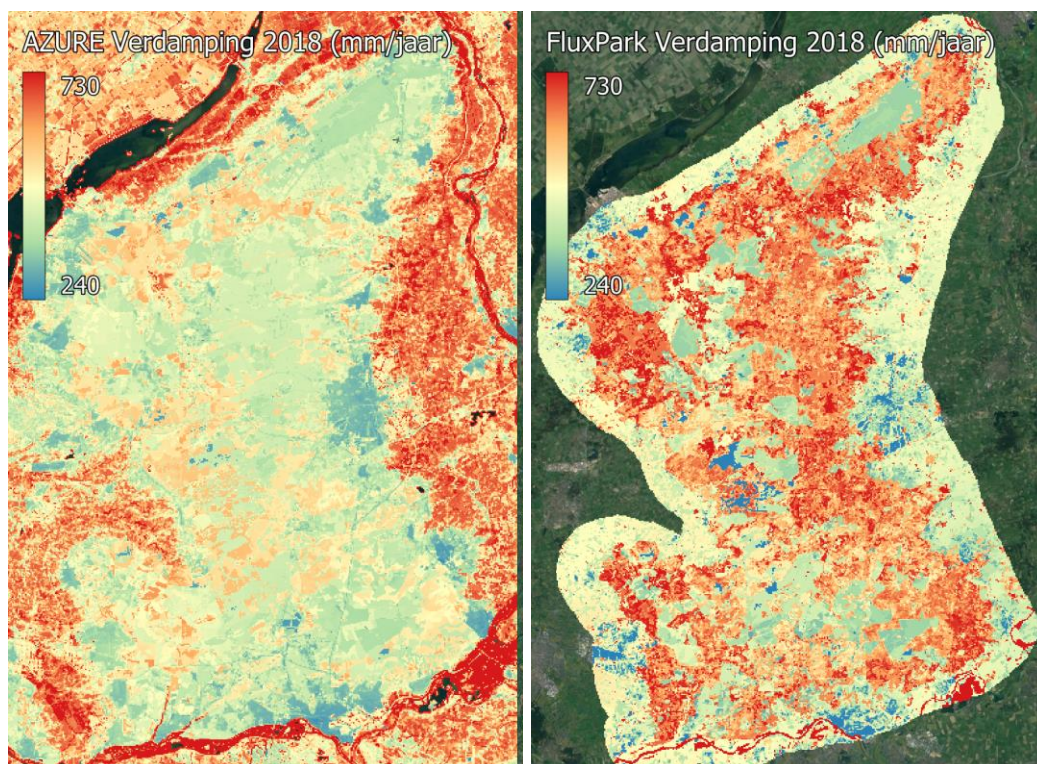
Figuur 14. De jaarlijkse verdampingscomponenten en grondwateraanvulling voor het hele modelgebied (Veluwe) voor AZURE en FluxPark van 2010 t/m 2018.



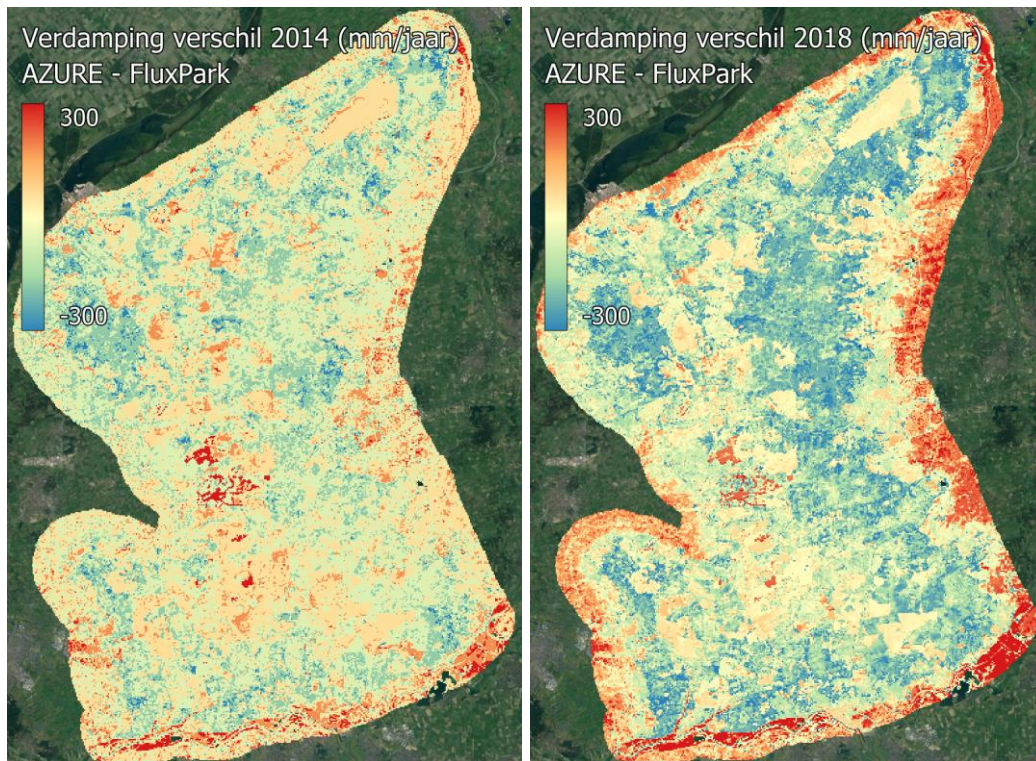
Figuur 15. Het landgebruik van AZURE (links) en FluxPark (rechts).



Figuur 16. De totale werkelijke verdamping (mm/jaar) van 2014 voor AZURE en FluxPark.



Figuur 17. De totale werkelijke verdamping (mm/jaar) van 2018 voor AZURE en FluxPark.



Figuur 18. De verdampingsverschillen tussen beide modellen AZURE minus FluxPark voor het jaar 2014 en 2018.

Verdampingsconcepten

Onderstaand is geschreven voor experts en kan daarom lastig te doorgronden zijn zonder verdere uitleg.

FluxPark en AZURE maken deels gebruik van vergelijkbare verdampingsconcepten. Zo gebruiken beide modellen bijvoorbeeld het model van Boesten en Stroosnijder (1986) om bodemverdamping uit te rekenen en gewasfactoren in combinatie met de referentiegewasverdamping om potentiële verdamping uit te rekenen. Een belangrijk verschil is de methode voor de berekening van interceptie. Dit is voor bossen een grote flux. Voor donkere naaldbossen bestaat bijna de helft van de totale verdamping uit interceptie. In AZURE wordt het Rutter (1971) interceptiemodel gebruikt waarin wordt aangenomen dat tijdens de neerslagbui ook interceptieverdamping optreedt, ongeacht de grootte van het interceptiereservoir (hoeveel water in de bladeren blijft hangen). Dit is aannemelijk, behalve als je rekent met tijdstappen van een dag. Dan duurt de neerslagbui dus 24 uur en kan continu neerslag blijven verdampen. De potentiële interceptieverdamping is dan altijd leidend. Dit leidt op sommige dagen tot overschatting van interceptieverdamping en tot een model dat lastig te kalibreren is, omdat de grootte van het interceptiereservoir er nauwelijks toe doet. Daarnaast is het gebruik van de referentiegewasverdamping volgens Makkink zoals in AZURE problematisch voor interceptieberekeningen voor winterse omstandigheden. In de winter is de referentieverdamping maar een paar tiende millimeter per dag, terwijl uit veldmetingen blijkt dat interceptieverdamping eenvoudig in de orde grootte van millimeters kan komen (Voortman, 2023). De energie voor verdamping komt dan niet uit zonnestraling, maar uit de atmosfeer zelf door wind en een lagere luchtvochtigheid. De winterse interceptieverdamping wordt daarom onderschat bij gebruik van de referentieverdamping volgens Makkink. In een wintermaand kan 100 mm interceptiewater verdampen in een donker naaldbos, wat het essentieel maakt om interceptie te kunnen berekenen (Voortman, 2023). In FluxPark is dit opgelost door aan te nemen dat het interceptiereservoir altijd binnen 24 uur wordt geleegd, ongeacht de hoeveelheid zonlicht. In feite wordt de potentiële interceptieverdamping verhoogd met de interceptiecapaciteit. Dit zorgt ervoor dat in de winter meer energie beschikbaar is in het model en het interceptiewater kan verdampen. In FluxPark is dus de grootte van het interceptiereservoir leidend voor de hoeveelheid interceptieverdamping en niet de potentiële interceptieverdamping zoals in AZURE.

De berekening van interceptie is ook belangrijk omdat interceptieverdamping de transpiratie “onderdrukt”. Als interceptie niet goed wordt uitgerekend, heeft dit dus ook gevolgen voor transpiratie. In FluxPark wordt uitgerekend hoe lang het interceptiewater op de bladeren lag door de werkelijke interceptieverdamping (mm/d) te delen door de potentiële interceptieverdamping (mm/d). Met deze fractie wordt de transpiratie verlaagd, omdat wordt aangenomen dat alle energie eerst wordt gebruikt voor interceptieverdamping. In AZURE en SWAP wordt hetzelfde principe gehanteerd. Het is ons opgevallen dat deze reductie in veldmetingen soms maar beperkt wordt waargenomen en de reductie in modelsimulaties verlaagd wordt met een zogenaamde “interception efficiency”, de fractie van

interceptieverdamping die de transpiratie reduceert. Tiktak en Bouten (1994) gebruikten een waarde van 0.14 voor donker naaldbos. Dit soort nuances en onderdelen in verdampingsconcepten verdienen de aandacht. De grootste uitdaging in verdampingsonderzoek is dat de verdampingscomponenten, interceptieverdamping, transpiratie en bodemverdamping, elkaar beïnvloeden en als communicerende vaten werken. Als een van de termen niet goed wordt uitgerekend, wordt het moeilijk om andere termen aan te passen.

4 Conclusies

In dit rapport zijn veel onderwerpen behandeld om een goed beeld te krijgen van de bandbreedtes en hypothesen die we hebben rond het waterverbruik van bossen. Hieronder volgende de belangrijkste conclusies. In het volgende hoofdstuk worden aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek.

Ruimtelijke variaties in bosverdamping

- Niet elk naaldbos verdampt meer dan een loofbos. De verdamping varieert sterk per bostype en dichtheid. Donkere naaldbossen hebben de hoogste verdamping door een hoge interceptie in de winter, maar een gemiddeld naaldbos verdampt ongeveer evenveel als een dicht loofbos.
- Ruimtelijke nuances in verdamping hebben een aanzienlijke impact op de grondwateraanvulling. Verschillen lopen uiteen van +130 mm/jaar tot -100 mm/jaar in vergelijking met een model met enkel drie bostypen (loof-, naald- en donker naaldbos). Over de gehele Veluwe wordt het effect van deze verschillen uitgemiddeld, met een toename van 10 mm/jaar in de grondwateraanvulling.

Effecten van worteldieptes op verdamping

- Door een worteldiepte van 100 cm te gebruiken in de meeste hydrologische modellen in Nederland wordt de verdamping onderschat. Vooral voor donkere bossen met een hoge potentiële transpiratie.
- In de hier uitgevoerde berekeningen is de transpiratiereductie van open lichte bossen laag. Juist voor deze bossen zou wellicht de worteldiepte wat ondieper kunnen zijn, waarmee de transpiratiereductie toeneemt. Ook wordt in deze bossen volgens het model relatief veel energie gestopt in bodemverdamping. Of dit klopt is onduidelijk door een gebrek aan veldwaarnemingen.
- Bij een worteldiepte van ca. 3 meter is de transpiratiereductie in het huidige klimaat en bij de huidige verdeling van interceptie, bodemverdamping en transpiratie in FluxPark verwaarloosbaar. Deze diepte is niet onrealistisch en voor sommige bostypen haalbaar. Het is daarom goed mogelijk dat sommige bossen uitkunnen met het bodemwater in extreem droge jaren.
- Het is ons opgevallen dat het patroon in transpiratiereductie sterk wordt beïnvloed door de bodemfysische eigenschappen op de Veluwe. Twee dominante bodems komen voor op de Veluwe. Validatie van de eigenschappen en ruimtelijk voorkomen is nodig om effecten van droogte te begrijpen.

Effecten van klimaatverandering

- In dit rapport presenteren we voor het eerst een klimaatprojectie (Hd 2100) waarin de grondwateraanvulling daalt in plaats van toeneemt zoals in voorgaande studies. De daling is vooral groot als gerekend wordt met diepe worteldieptes voor bossen van 250 cm. Voor heel de Veluwe neemt dan de grondwateraanvulling af met 13%. Voor individuele bosklassen neemt de grondwateraanvulling af met 14% tot 40% (van open naar dichte bostypen). Als gerekend wordt met een worteldiepte van 100 cm zijn veranderingen beperkt (gemiddeld 6% voor de hele Veluwe). In het natte KNMI-klimaatsscenario Hn 2100 neemt de grondwateraanvulling toe voor de hele Veluwe met 16% tot 19% afhankelijk van de gebruikte worteldiepte (respectievelijk 250 cm of 100 cm).
- Verandering van het groeiseizoen in de modelparameters van loofbos leidt tot een gemiddelde toename van de verdamping van ca. 20 mm/jaar tot 30 mm/jaar voor loofbossen. Verschillen tussen loof- en naaldbos worden daarmee kleiner.
- Veranderingen in het bos zelf, van licht naar gemiddeld, van gemiddeld naar donker, of andersom, hebben mogelijk een groter effect op de verdamping en grondwateraanvulling (ca. 100 mm/jaar) dan het klimaat. Het bosbeheer doet ertoe.

Vergelijking met het AZURE-model

- De verschillen tussen FluxPark en AZURE zijn groot (+300 tot -300 mm/jaar). Vooral donkere bossen met hoge verdampingscijfers ontbreken in het AZURE-model. Hierdoor wordt de verdamping in AZURE in sommige regio's onderschat.
- Conceptueel gebruikt AZURE een interceptiemodel dat onhandig is in gebruik en genereert op dag-basis onrealistische cijfers. Tevens kan de winterse interceptie met dit concept niet worden uitgerekend als het gebruikt wordt in combinatie met de referentiegrasverdamming volgens Makkink zonder verdere correcties.
- De invoergegevens van het AZURE-model zijn naast de concepten bepalend voor de uitkomsten. Op de landgebruikskaart van AZURE ontbraken grote arealen naaldbos ten tijde van het genereren van de modeluitkomsten¹.

¹ Hierover is contact met RWS en het AZURE consortium, mogelijke aanpassingen volgen.

5 Aanbevelingen vervolgonderzoek

Dit rapport betreft een voorstudie. In een groter vervolgonderzoek worden veldmetingen opgezet en modellen ontwikkeld en getoetst (meer informatie: projectvoorstel RECHARGE). Hieronder worden enkel aanbevelingen opgesomd die worden ondersteund met het materiaal uit deze rapportage.

- Door de ordegrootte van verschillende verdampingstermen te vergelijken en in te zetten op relatief grote posten die goed meetbaar zijn, kan worden bepaald welke veldmetingen de meeste meerwaarde bieden voor het verbeteren van hydrologische berekeningen. Deze studie bevestigt nogmaals dat verdamping van bossen voor een groot deel bestaat uit interceptieverdamping en bodemverdamping. De transpiratie is volgens onze berekeningen weliswaar de grootste verdampingspost voor alle bostypen (Tabel 2), maar de som van interceptieverdamping en bodemverdamping is in de meeste gevallen groter, behalve voor dichte loofbossen. Daarnaast is de interceptieverdamping voor naaldbossen bijna even hoog als de transpiratie en is de bodemverdamping gelijkwaardig aan de transpiratie voor lage dichtheidsklassen. Als daarbij wordt meegewogen dat doorvalmetingen om interceptie te bepalen (doorvalgoten) en bodemverdampingsmetingen (lysimeters) eenvoudiger zijn uit te voeren dan transpiratiemetingen (vrijwel altijd indirect via sapflow of inverse modellering), dan is het evident om interceptieverdamping en bodemverdamping goed te gaan meten in het vervolgproject. Als die termen accuraat kunnen worden geschat, is een groot deel van de verdamping en de ruimtelijke verschillen in verdamping goed in beeld gebracht. Tevens kan daarmee ook de transpiratie beter worden ingeschat omdat deze als restterm overblijft.

Tabel 2. Verdampingsposten als percentage van de neerslag, het gemiddelde voor de periode 1991-2020.

dichtheidsklasse	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Loofbos									
interceptieverdamping	12%	13%	15%	16%	18%	19%	21%	22%	24%
bodemverdamping	21%	20%	18%	17%	16%	14%	13%	11%	10%
transpiratie	20%	22%	25%	27%	29%	32%	33%	35%	36%
Naaldbos									
interceptieverdamping	17%	19%	21%	24%	26%	28%	30%	33%	35%
bodemverdamping	19%	17%	16%	14%	12%	10%	9%	7%	5%
transpiratie	21%	23%	26%	28%	31%	33%	35%	37%	39%

- Tegelijkertijd zit een van de grootste onzekerheden in de berekening van de transpiratiereductie. We weten niet goed hoeveel en waar transpiratiereductie optreedt door een gebrek aan goede veldgegevens. Tegelijkertijd is de geschatte

transpiratiereductie voor veel jaren uit het verleden vrij beperkt (zie ook figuur 14). Daarom is deze term voor een geohydroloog die een stationaire modelberekening maakt van de huidige grondwaterstand niet de meest relevante term. Wel blijft transpiratiereductie in het licht van klimaatverandering en bosbeheer bijzonder relevant. De bepaling van transpiratiereductie kan doorslaggevend zijn in de berekening van de grondwateraanvulling onder een warmer klimaat. Daarom moet bij de keuze van nieuwe veldlocaties in de eerste plaats gekozen worden voor droogtegevoelige locaties (een diepe grondwaterstand) om de droogterespons te kunnen meten.

- De transpiratiereductie wordt sterk beïnvloed door het kaartmateriaal van de bodemfysische eigenschappen en de worteldiepte. Voor de monitoring is het bijzonder nuttig om pF-curves af te leiden door polymeren-tensiometer en bodemvochtmetingen te combineren om kritisch naar de parameters uit de bodemkaart te kijken.
- Dichte loofbossen en open naaldbossen verdienen extra aandacht, omdat deze typen weinig zijn bemeten in eerdere studies.

6 Referenties

- Boesten, J.J.T.I., Stroosnijder, L., 1986. Simple model for daily evaporation from fallow tilled soil under spring conditions in a temperate climate. *Netherlands J. Agric. Sci.* 34, 75–90.
- Feddes, R.A., 1971. Water, heat and crop growth. Wageningen Agricultural University.
- Hengl, T., Leenaars, J.G.B., Shepherd, K.D., Walsh, M.G., Heuvelink, G.B.M., Mamo, T., Tilahun, H., Berkhout, E., Cooper, M., Fegraus, E., Wheeler, I., Kwabena Nketia, K., 2017. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS ONE*, 12(2): e0169748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
- KNMI, 2023: KNMI'23-klimaatscenario's voor Nederland, KNMI, De Bilt, KNMI-Publicatie 23-03.
- Makkink, G.G., 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J. Inst. Wat. Engrs.* 11, 277–288.
- Moors, E. J., 2012. Water Use of Forests in the Netherlands. Alterra Scientific Contributions 41. Alterra, part of Wageningen UR, the Netherlands.
- Heinen, M., Brouwer, F., Teuling K., Walvoort, D., 2021. BOFEK2020 - Bodemfysische schematisatie van Nederland : update bodemfysische eenhedenkaart. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3056.
- Rutter, A.J., Kershaw, K.A., Robins, P.C., Morton, A.J., 1971. A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agric. Meteorol.* 9, 367–384. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0002-1571\(71\)90034-3](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0002-1571(71)90034-3)
- Tiktak, A., Bouten, W., 1994. Soil water dynamics and long-term water balances of a Douglas fir stand in the Netherlands. *J. Hydrol.* 156, 265–283. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90081-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90081-7)
- van den Burg, J. 1996. Beworteling van boomsoorten in Nederlandse bossen. Wageningen: instituut voor Bos- en Natuuronderzoek (IBN-DLO).
- van der Velde, R., Voortman, B.R., Veenvliet, M., van der Hauw, K., van Sijl, J., 2024. Plausibiliteit berekende grondwateraanvulling Veluwe. Ten behoeve van stationaire kalibratie van het grondwatermodelinstrumentarium midden Nederland (AZURE). Vitens rapport.
- van Engelenburg, J., Hueting, R., Rijpkema, S., Teuling, A. J., Uijlenhoet, R., & Ludwig, F. (2018). Impact of Changes in Groundwater Extractions and Climate Change on Groundwater-Dependent Ecosystems in a Complex Hydrogeological Setting. *Water Resources Management*, 32(1), 259-272. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1808-1>

van Huijgevoort, M.H.J., Voortman, B.R., Rijpkema, S., Nijhuis, K.H.S., 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, art. no. 2866 – DOI: 10.3390/w12102866

Voortman, B.R., 2024. Verdamping van bossen. Literatuorcijfers en een kaart met relatieve verschillen. OBN Kennisuur <https://www.natuurkennis.nl/activiteit/kennisuur-verdamping-van-bossen/>.

Voortman, B.R., Prikaziuk, E. van der Tol, C., 2023. Verdamping en bodemvochtdynamiek Speulderbos. Meetresultaten 2019-2023. Presentatie Moisture Matters, Universiteit Twente.

Voortman, B.R., 2022. Nexus - FluxPark technische beschrijving. Versie 1.4. Moisture Matters.

7 Bijlagen

Bijlage 1. Jaarcijfers van de verdamping in Nederland

Onderstaand geeft overzicht van verdampingstermen van bossen en andere begroeiingstypen. De tabel is gesorteerd op de totale verdamping (Evap totaal). Tabel komt uit Voortman (2024).

Begroeiing	T + E (mm/jaar)	Int (mm/jaar)	Evap totaal (mm/jaar)	Aanvulling (mm/jaar)	neerslag (mm/jaar)	Evap tot / neerslag (mm/jaar)	locatie	periode	Bron	techniek
Douglas	395	317	712	104	834	85.4%	Speulderbos	1960 - 1990	Tiktak en Bouten (1994)	eddy correlatie en bodemvocht balans, gekalibreerd model
Zwarte Den			692	150	842	82.2%	Castricum	1957 - 1981	van der Hoeven (2011)	Grote lysimeter
Beuk			636	131	767	82.9%	st. Arnold	2006 - 2014	Harsch et al. (2009)	Grote lysimeter
Grove den	385	245	630	270	900	70.0%	Loobos	1995-2001	Dolman et al. 2000	eddy correlatie
Witte Den			627	189	816	76.8%	st. Arnold	1981 - 2005	Harsch et al. (2009)	Grote lysimeter
Polulier	470	150	620	220	840	73.8%	Fleditebos	1995-1998	Dolman et al. 2000	eddy correlatie
Engels raaigras (potentieel)	535	64	599	199	798	75.1%	de Moer	1991-2021	Voortman et al. (2022)	modelberekening op basis van gewaseigenschappen (1991 - 2020)
Larijs	390	195	585	225	810	72.2%	Bankenbos	1995-1997	Dolman et al. 2000	eddy correlatie
Beuk			565	251	816	69.2%	st. Arnold	1981 - 2005	Harsch et. al (2009)	Grote lysimeter
Beuk	350	208	558	276	834	66.9%			Dolman et al. 2000	
Gemengd (vliegden en eik/beuk)	320	230	550	225	775	71.0%	Kampina	1996-1998	Dolman et al. 2000	eddy correlatie
Engels raaigras (werkelijk)			548	217	765	71.6%	de Moer	2021	van Deil (in prep)	modelberekening op basis van gewaseigenschappen (1991 - 2020)
Engels raaigras (werkelijk, klei op veen)			547	286	833	65.7%	Cabauw	1987 - 1996	Massop et al. (2005)	bowen ratio
Mais (potentieel, zonder groenbemester)	477	64	541	257	798	67.8%	Moergestel	1991-2021	Voortman et al. (2022)	modelberekening op basis van gewaseigenschappen (1991 - 2020)
Eik			526	316	842	62.5%	Castricum	1957 - 1981	van der Hoeven (2011)	Grote lysimeter
Mais (werkelijk, zonder groenbemester)			494	279	773	63.9%	Moergestel	2021	van Deil (in prep)	modelberekening op basis van gewaseigenschappen (1991 - 2020)
Droge heide			430	437	867	49.6%	Hoge Veluwe	1988 - 2017	Voortman et al. (2019)	lysimeter gebaseerd berekening
Pijpenstrootje (diep grondwater)			430	588	1018	42.2%	Kootwijk	1994	Gehrels (1999)	eddy correlatie
Droog natuurlijk grasland			333	543	876	38.0%	Soestduinen	2013	Voortman et al. (2015)	lysimeter gebaseerd berekening
Stabiele duinbodem			250	626	876	28.5%	Soestduinen	2013	Voortman et al. (2015)	lysimeter gebaseerd berekening
Stuifzand			200	642	842	23.8%	Castricum	1957 - 1981	van der Hoeven (2011)	Grote lysimeter