

A photograph of a forest research station. In the foreground, a tall, grey, cylindrical rain gauge stands on a bed of dry leaves and pine needles. To its right, a small, grey, rectangular data logger is mounted on a log, with various cables connected to it. In the background, a long, narrow, silver metal trough is supported by several vertical poles, likely for collecting precipitation. The forest is dense with tall trees and green foliage, with sunlight filtering through the canopy.

KWR Waterwijis

KWRW 2025.066 | September 2025

Bosverdamping - verkennde metingen en groeiringen als proxy voor droogtestress

Beknopte rapportage

Colofon

Bosverdamping - verkennende metingen en groeiingen als proxy voor droogtestress

Dit kraamkamer onderzoek is uitgevoerd in het kader van het thema Bronnen Watersysteem en Natuur als onderdeel van KWR Waterwijs, het collectieve drinkwateronderzoeksprogramma van KWR, de waterbedrijven en Vewin. Het onderzoek is mede gefinancierd met PPS financiering vanuit de Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat.

KWRW 2025.066 | September 2025

Projectnummer

404300-060

Projectmanager

Ir. Eric Broers

Opdrachtgever

KWR Waterwijs – Bronnen Watersysteem en Natuur

Auteurs

Dr. ir. Marjolein van Huijgevoort, Dr. ir. Gijsbert Cirkel, Dr. Ute Sass-Klasen, Dr. Linar Akhmetzyanov

Kwaliteitsborger

Prof. Dr. ir. Ruud Bartholomeus

Verzonden naar

Deze beknopte rapportage is verspreid onder deelnemers aan het KWR Waterwijs-programma.

Openbaarheid

Dit rapport is openbaar.

Keywords

Verdamping, grondwateraanvulling, bos, boomringen, Schijf, Rucphense bossen, droogte

Inhoud

Colofon	1
Inhoud	2
1 Inleiding	3
1.1 Doel	3
1.2 Achtergrond	3
1.3 Leeswijzer	5
2 Meetlocatie Schijf	6
2.1 Opzet meetlocatie	6
2.2 Chloride MassaBalans methode	10
2.3 Jaarringen onderzoek	11
3 Eerste meetresultaten locatie Schijf	12
4 Modelleren van bosverdamping met FluxPark	14
4.1 FluxPark	14
4.2 Resultaten	15
5 Dendrochronological research of Scots pine and Black pine in Schijf: growth and drought sensitivity	17
5.1 Introduction and research questions	17
5.2 Methods and results	17
5.3 Discussion	21
5.4 Conclusion	22
6 Samenvatting, conclusies en vervolg	23
6.1 Synthese en conclusies	23
6.2 Vervolg	24
7 Referenties	25

1 Inleiding

1.1 Doel

De actuele verdamping van bossen speelt een cruciale rol in het bepalen van de waterbalans op de hoge zandgronden in Nederland. Echter, de waarden van de actuele verdamping van bossen zijn nog omgeven met grote onzekerheden. Dat betekent dat ook de voor de drinkwatervoorziening belangrijke grondwateraanvulling niet goed bekend is op de hoge zandgronden. Binnen dit project hebben we ons daarom gericht op het verkennen van alternatieve methodes om de actuele verdamping te bepalen. Het doel van dit verkennende kraamkamer onderzoek is om te onderzoeken of een alternatieve methode om transpiratie van bossen te kwantificeren mogelijk is, waarbij de methode recht doet aan de complexiteit, maar toch praktisch uitvoerbaar en te parameteriseren is. De resultaten van de verkenning zijn vastgelegd in deze beknopte rapportage.

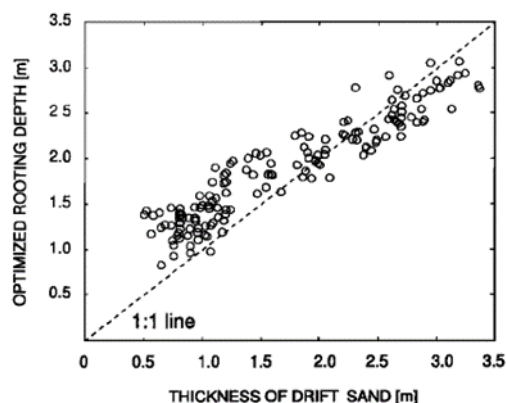
Om te onderzoeken of groeiringen een rol kunnen spelen bij het bepalen van de actuele verdamping, is samengewerkt met Hogeschool Van Hall Larenstein lectoraat Duurzaam bosbeheer. Door Van Hall Larenstein zijn in het kader van dit onderzoek kernen genomen uit grove dennen en zwarte dennen en onderzocht op de relatie tussen groei en droogte. Daarnaast is onderzocht waaraan een meetopstelling moet voldoen om zicht te krijgen op de belangrijkste waterbalansposten in een bos. Deze meetopstelling is vervolgens geïnstalleerd in een bosgebied van Brabant Water nabij de waterwinning Schijf, waar vragen zijn over de effectiviteit van bosomvorming voor de grondwateraanvulling. Met de meetopstellingen is praktische ervaring verkregen over het meten van waterbalanscomponenten in bos. Deze studie vormde de opmaat voor het in april 2025 gestarte 4-jarige RECHARGE project waarbinnen publiek-privaat onderzoek wordt gedaan naar bosverdamping en grondwateraanvulling op de hoge zandgronden (<https://www.tkiwatertechnologie.nl/projecten/recharge-watersysteemherstel-door-datagedreven-begrip-van-bosverdamping-en-grondwateraanvulling/>).

1.2 Achtergrond

Een goede inschatting van de grondwateraanvulling is belangrijk voor alle sectoren. Zo worden de omgevingseffecten van grondwaterwinningen mede bepaald door de grondwateraanvulling. Neemt de aanvulling af, dan neemt het effect van de winning toe (Witte et al. 2019). Ook in het licht van de bossenstrategie is het belangrijk om de grondwateraanvulling onder bossen goed te kennen om zo gedegen beleidsbeslissingen te kunnen nemen. In de meeste gevallen wordt gebruik gemaakt van hydrologische modellen om de grondwateraanvulling te bepalen. Er zitten echter een aantal versimpelingen in de modellen die het inschatten van de aanvulling onzeker maken.

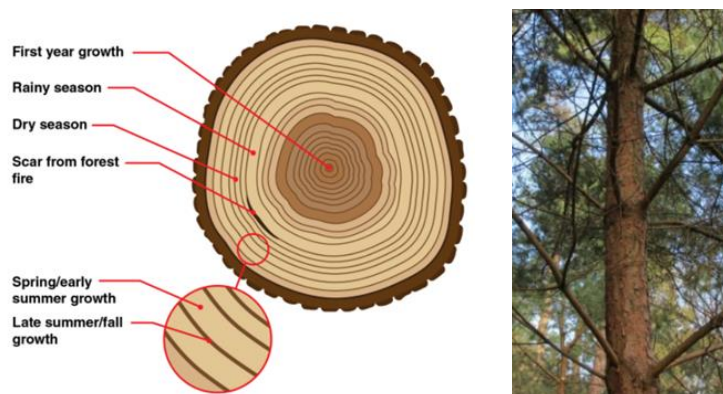
De huidige modellen voor transpiratieberekening doen waarschijnlijk onvoldoende recht aan de processen die spelen bij bomen. Zo zijn bomen sterk gekoppeld aan de atmosfeer en reageren huidmondjes minder direct op de vochttoestand in de bodem dan korte vegetaties (Lansu et al. 2020). De in de huidige modellen vaak gebruikte Feddes functie voor transpiratiereductie is hiermee mogelijk minder geschikt voor bossen. Een tweede belangrijke versimpeling is de worteldiepte van bomen in de modellen. Die is nu in de regel beperkt tot maximaal 1 meter terwijl we bijvoorbeeld uit de lysimeterproeven bij Castricum weten dat de bomen tot de bodem van de lysimeter op 2.5 meter diepte reikten (Stuyfzand en Rambags 2011). Ook uit wortelatlassen (o.a. Kutchera) en diverse internationale studies en databases (Fan et al. 2017) komen afhankelijk van soort en bodemgesteldheid aanzienlijk grotere dieptes naar voren. Musters en Bouten (1999) laten zien dat zwarte den veel dieper wortelt (tot 3.5 m-mv) en dat de worteldiepte vooral wordt beperkt door een onderliggende slecht penetreerbare laag dekzand (Figuur 1-1). Een grotere worteldiepte kan betekenen dat de bomen altijd voldoende vocht beschikbaar hebben en de verwachte transpiratiereductie niet optreedt. Dit beeld is in lijn met observaties in de jaren 2018-2020 waarbij de Nederlandse bossen m.u.v. enkele locaties met vooral fijnspar vrijwel geen droogterespons vertoonden.

Als bomen ook op diepe, veronderstelde 'grondwateronafhankelijke', profielen het freatisch vlak kunnen aantappen heeft dit mogelijk grote consequenties voor de waterbalans op de hoge zandgronden en de manier waarop we die met nationale en regionale hydrologische modellen berekenen. Omdat deze modellen gekalibreerd worden op grondwaterstanden en niet of heel beperkt op fluxen, kan een goed geijkt model er qua fluxen en daarmee waterbeschikbaarheid toch behoorlijk naast zitten. Dit blijkt ook uit de studie van Caljé et al. (2014) waaruit naar voren kwam dat juist bij bos op droge plekken de actuele verdamping door modellen werd onderschat ten opzichte van satellietbeelden en eddy-correlatiemetingen. Op basis van de huidige modellen is het beeld dat bijvoorbeeld de Veluwe natter wordt door de toenemende neerslag en (door transpiratiereductie) gelijkblijvende actuele verdamping. Dit rijmt echter niet met de in peilbuizen waargenomen jarenlange daling van de grondwaterstanden.

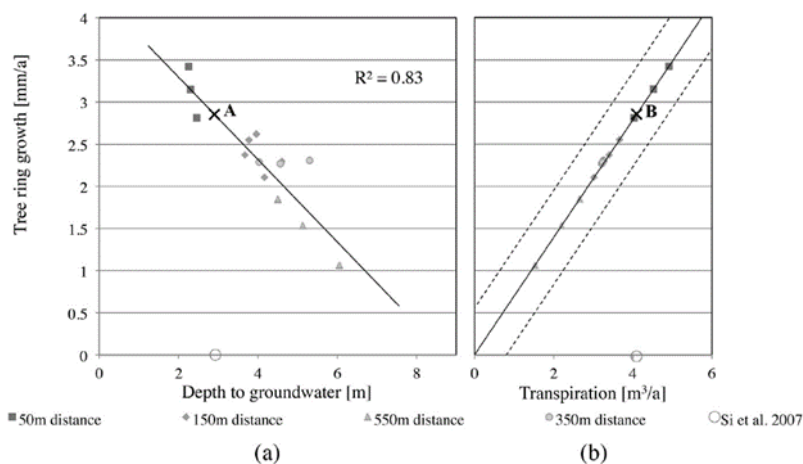


Figuur 1-1 Uit bodemvochtmetingen berekende worteldiepte als functie van de dikte van het tot 3.5 meter dikke pakket stuifzand (onder het stuifzand bevindt zich een slecht voor wortels doordringbare dekzandlaag) (Musters en Bouten 1999).

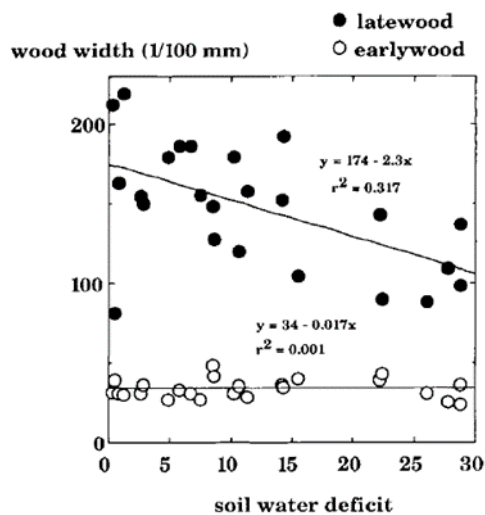
Binnen deze thematische verkenning onderzoeken we hoe we transpiratiereductie van bossen op een zo eenvoudig mogelijke manier kunnen iken aan waarnemingen. Een belangrijk onderdeel van het probleem is namelijk het gebrek aan voldoende waarnemingen waardoor meer vrijheidsgraden zorgen voor onnodige complicatie van het vraagstuk. Ook een simpel model (bijvoorbeeld het bakjesmodel FluxPark, <https://www.moisture-matters.nl/>) moet geijkt worden. We onderzoeken of het mogelijk is om dit te doen aan de hand van jaarringen (Yu et al. 2012, Schilling et al. 2014). Jaarringen bleken in een woestijn in China een goede proxy te zijn voor transpiratie (Figuur 1-3, Schilling et al. 2014). Bréda en Granier (1996) vonden op basis van jaarring onderzoek aan boorkernen een relatie tussen de groei van het late hout in Franse wintereiken en het door hun berekende vochttekort in de wortelzone (Figuur 1-4). Om de relatie tussen jaarringen en transpiratiereductie te verkennen zijn boomkernen genomen nabij de meetlocaties in het bosgebied bij Schijf.



Figuur 1-2 Gebrek aan water leidt tot uiterlijke veranderingen aan bomen. Zo is de breedte van jaarringen mogelijk een bruikbare proxy voor droogtestress. Bron: <https://climate.nasa.gov/news/2540/tree-rings-provide-snapshots-of-earths-past-climate/>.



Figuur 1-3 Relatie tussen jaarringbreedte en grondwaterstandsdiepte (a) en transpiratie (b) in Yinsu China (Schilling et al., 2014)



Figuur 1-4 Relatie tussen jaarringbreedte en berekend bodemvochtttekort voor wintereiken in Champenoux Frankrijk. Elk punt is één jaar (gemiddelde van 25 boringen), alleen jaren met een vochttekort zijn weergegeven (Breda & Granier, 1996)

Naast het opzetten van de meetlocaties en analyseren van de boomringen zijn ook modelresultaten van het hydrologisch model FluxPark beschikbaar gemaakt door Moisture Matters, meegenomen in het onderzoek. De modelresultaten geven een eerste inschatting van de verschillen in de waterbalansposten tussen de meetlocaties in Schijf.

1.3 Leeswijzer

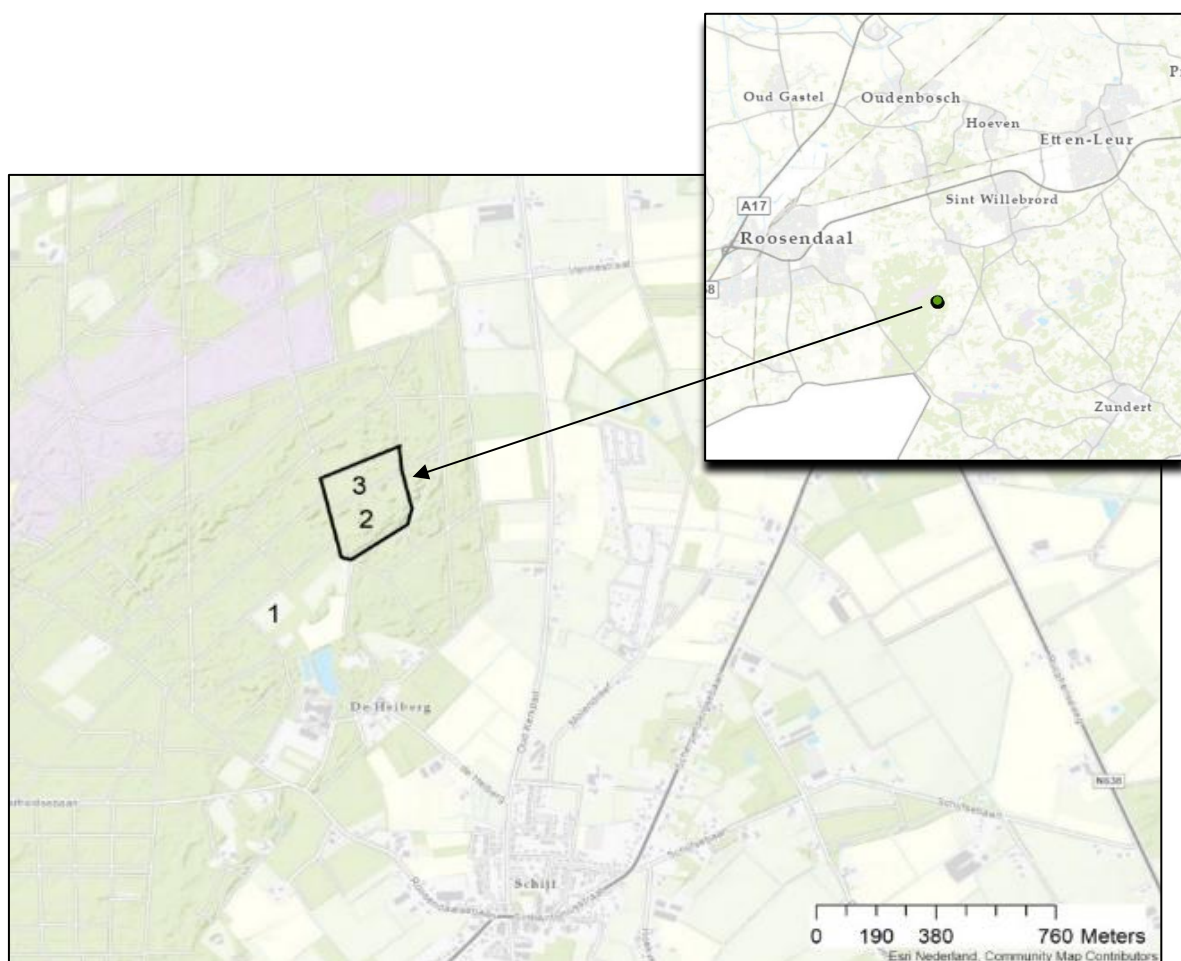
In deze beknopte rapportage wordt de opzet van de meetlocaties beschreven (Hoofdstuk 2) en geven we de eerste resultaten van deze metingen (Hoofdstuk 3). Vervolgens worden de modelresultaten uit FluxPark voor de meetlocaties bij Schijf beschreven in Hoofdstuk 4. De resultaten van de analyse van de jaarringen door experts van Van Hall Larenstein zijn vastgelegd in Hoofdstuk 5. Als laatste geven we een overzicht van de belangrijkste bevindingen en vervolgstappen (Hoofdstuk 6).

2 Meetlocatie Schijf

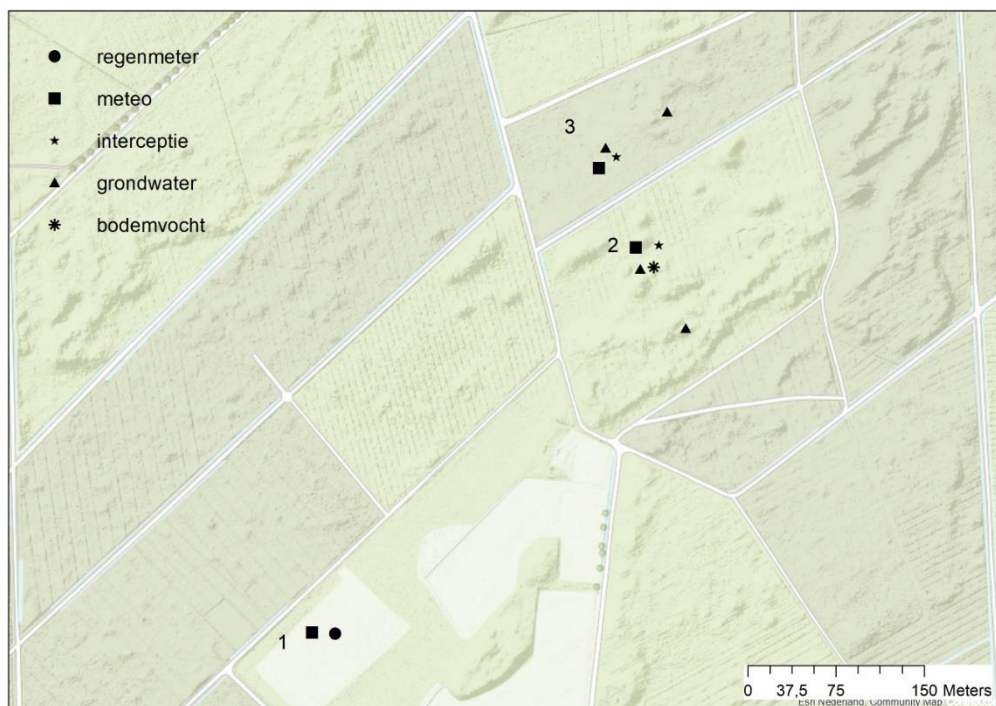
2.1 Opzet meetlocatie

In de Rucphense bossen bij Schijf zijn verschillende meetopstellingen ingericht om beter grip te krijgen op belangrijke waterbalanscomponenten. Er wordt op 3 locaties in het bos gemeten (Figuur 2-1):

- 1 Een referentieveld
- 2 Meting in een gemengd Amerikaanse eik/grove den perceel
- 3 Meting in een uniform zwarte den perceel



Figuur 2-1 Locaties van de verschillende meetopstellingen



Figuur 2-2 Locaties van de verschillende type metingen.

Bij de meetlocatie worden de volgende metingen verricht (Figuur 2-2).

Grondwater

Er is een raai van 3 meetpunten in noord-zuid richting aangelegd om de freatische grondwaterstand bij verschillende maaiveldhoogtes te meten. Daarnaast is nog een extra meetpunt geïnstalleerd in het gedeelte van het perceel met zwarte den, ten oosten van de raai. Langs de stijgbuis van de peilfilters zijn minifilters bevestigd om het bovenste grondwater te kunnen bemonsteren.

Meteorologische variabelen

Op de drie locaties worden de belangrijkste meteorologische variabelen gemeten. Bij locatie 1 en 2 worden wind, globale straling, temperatuur, neerslag en luchtvochtigheid gemeten, bij locatie 3 globale straling, temperatuur, neerslag en luchtvochtigheid (geen wind) (Figuur 2-3, Figuur 2-4 en Figuur 2-5).

Interceptie

Bij locatie 2 en 3 wordt interceptie gemeten door middel van zogenaamde doorvalgoten en een regenmeter (Figuur 2-4, Figuur 2-5). Drie goten zijn verbonden met één regenmeter. De goten hebben in totaal een lengte van 9 meter en zijn onder de bomen geplaatst. Een gootlengte van 9 meter wordt als afdoende beschouwd voor een representatieve meting van doorval percentages.

Bodemvocht

Om een idee te krijgen van hoeveel water de zandbodem bereikt (deels bestaande uit een zeer dikke strooisellaag) en hoe snel het water wegzakt, zijn bodemvochtsensoren geïnstalleerd in de bovenste 30 cm van het bodemprofiel bij locatie 2.



Figuur 2-3 Referentiemeetopstelling in het open veld (locatie 1). Onder de regenmeter bevindt zich een ingegraven container waar regenwater wordt opgevangen voor analyse.



Figuur 2-4 Meetopstelling in het gemengd Amerikaanse eik/grove den perceel (locatie 2).



Figuur 2-5 Meetopstelling in het zwarte den perceel (locatie 3).

Overzicht

Tabel 1 geeft een overzicht van alle geïnstalleerde meetapparatuur per locatie.

Tabel 1 Overzicht van de geïnstalleerde meetapparatuur.

Meting	Aantal	Methode	Locatie
Grondwater	4	Peilbuis met logger Minifilters langs de stijgbuis van de peilbuis rond freatisch vlak	-
Globale straling	3	1 Lufft weather station 2 pyranometers	1 2,3
Wind	2	1 Lufft weather station 1 anemometer	1 2
Temperatuur	3	1 Lufft weather station 3 HygroVue sensors	1 1,2,3
Relatieve luchtvochtigheid	3	1 Lufft weather station 3 HygroVue sensor	1 1,2,3
Neerslag	1	1 tipping bucket regenmeter	1
Interceptie	2	2 tipping bucket regenmeters Doorvalgoten (9m lengte)	2,3
Bodemvocht	4	Bodemvochtsensor	2
Opvangbakken	3	Geplaatst onder tipping buckets	1,2,3

2.2 Chloride MassaBalans methode

Voor aanvullend inzicht in de dynamiek van de grondwateraanvulling kunnen ook chlorideconcentraties gemeten worden in het bodemvocht of het bovenste grondwater. Pieter Stuyfzand heeft hiervoor de Chloride MassaBalans (CMB) methode ontwikkeld die is uitgewerkt in Stuyfzand (2018). Hiervoor zijn minifilters naast de peilbuizen geplaatst om steeds het bovenste water gericht te kunnen bemonsteren.

Door de in bodem of grondwater gemeten chlorideconcentraties te vergelijken met de atmosferische chloridedepositie (bepaald met een bulk regenvanger) kan met de CMB-methode een schatting worden gemaakt van de grondwateraanvulling. In deze studie wordt hiervoor hemelwater opgevangen op de referentielocatie, maar ook het water uit de doorvalgoten. De bemonstering wordt maandelijks uitgevoerd door Brabant Water.

In onderstaande tekstbox is de methode kort beschreven. Voor een uitgebreide beschrijving van de CMB-methode en complicaties bij gebruik, wordt verwezen naar Stuyfzand (2018).

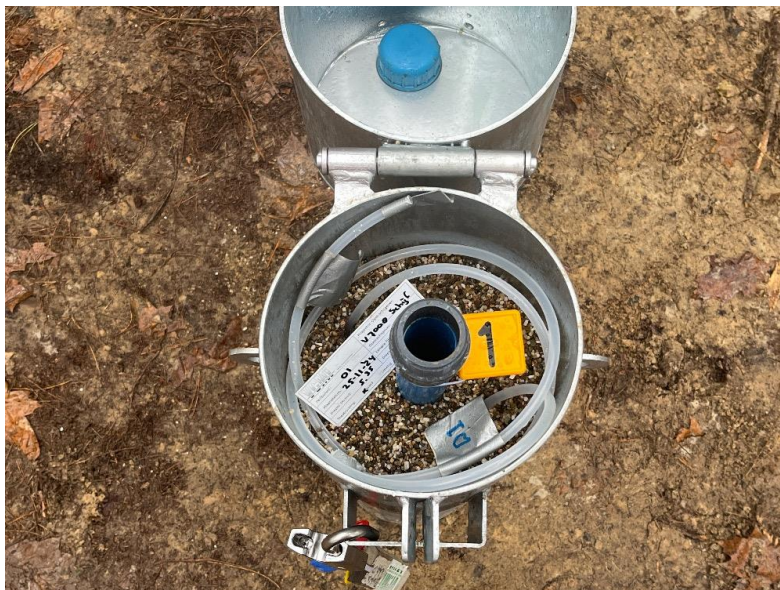
Chloride MassaBalans methode (Stuyfzand (2018))

Chloride is een *conservatieve tracer*, d.w.z. het is als opgeloste stof in water praktisch gesproken chemisch inert en verplaatst zich met het water zonder vertraging en zonder bodemreacties. Als de Cl in- en uitflux in de onverzadigde en/of verzadigde zone stationair zijn en er geen Cl 'sources' noch 'sinks' zijn, of anders gezegd wanneer periodieke opname en afgifte door vegetatie en periodieke neerslag en oplossing van NaCl elkaar compenseren, dan is de massabalans voor Cl in zandige infiltratiegebieden zonder oppervlakkige afvoer zoals normaliter in onze duinen als volgt (o.a. Allison et al. 1985, Appelo & Postma 2005):

$$P Cl_p + D = R Cl_R \quad (2.1A) \quad E = P - R = P - \frac{P Cl_p + D}{Cl_R} \quad (2.1B)$$

waarin: Cl_R = naar P gewogen gemiddelde Cl concentratie in bulkneerslag [mg/L]; Cl_k = gemiddelde Cl concentratie in hetzij bodemvocht (dan naar bodemvochtgehalte gewogen gemiddelde) hetzij grondwater, beneden de diepte waar evapotranspiratie plaatsvindt [mg/L]; D = extra droge Cl depositie van het terrein t.o.v. een altijd open (bulk) regenvanger [mg/m²/d]; R = netto grondwateraanvulling [mm/j]; P = bruto neerslag [mm/j]; E = evapotranspiratie [mm/j].

Het principe is dus eenvoudig: door meting van de hoeveelheid regenval, de Cl concentratie in regenwater en bodemvocht of grondwater, en schatting van de extra droge depositie (want moeilijk te meten), wordt met Eq.2.1A de grondwateraanvulling en met Eq.2.1B de verdamping verkregen.



Figuur 2-6 Peilbuis met twee minifilters om het freatisch vlak te bemonsteren.

2.3 Jaarringen onderzoek

Voor het onderzoek naar de jaarringen zijn eenmalig boomkernen genomen door medewerkers en studenten van Van Hall Larenstein in november 2024 (Figuur 2-8). Hiervoor zijn bij locatie 2 en 3 uit de dominante bomen per locatie 20 bomen geselecteerd en ingemeten (Figuur 2-7). Bij locatie 2 gaat het om grove den en bij locatie 3 om zwarte den. Van elke boom zijn de coördinaten en hoogte ingemeten. Een beschrijving van het onderzoek en de resultaten wordt gegeven in hoofdstuk 4.



Figuur 2-7 Locaties van de bomen waar boomkernen gestoken zijn.



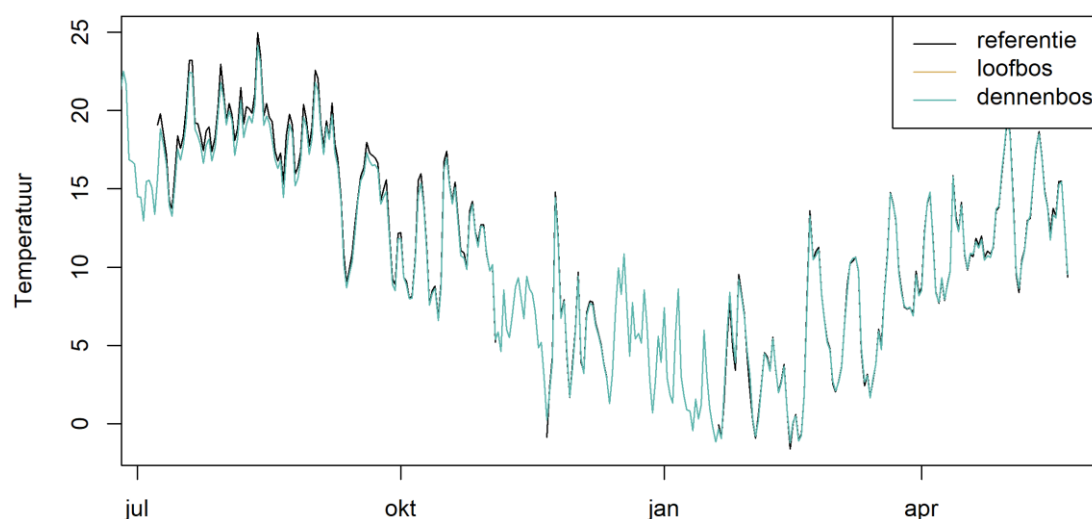
Figuur 2-8 Uitvoeren van de monsternamen boomkernen door medewerkers en studenten Van Hall Larenstein.

3 Eerste meetresultaten locatie Schijf

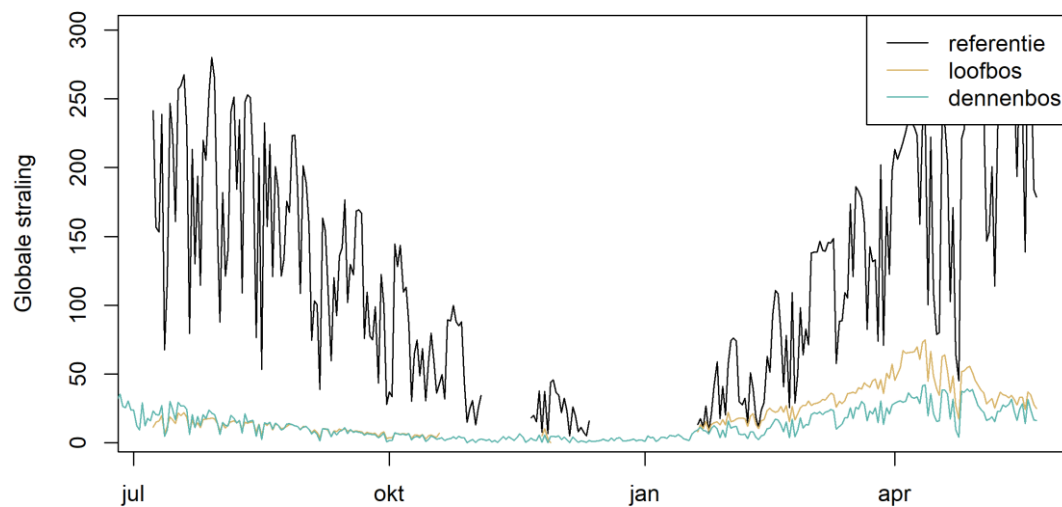
De meetlocaties bij Schijf zijn begin juli 2024 ingericht. Vanaf 16 juli 2024 zijn metingen beschikbaar voor de drie locaties. De peilbuizen voor de grondwaterstandsmetingen zijn eind november 2024 geplaatst, hiervan zijn nog geen metingen beschikbaar. Voor alle locaties zijn de metingen real-time beschikbaar. Bij de doorvalmetingen in het dennenbos is de regenmeter verstopt geraakt in september 2024, dit is eind september opgelost met aanpassingen aan de meetopstelling. Daarna is de regenmeter opnieuw verstopt geraakt in maart-april 2025 en op 18 april 2025 schoongemaakt. Verder waren er op de locatie in het dennenbos weinig problemen en zijn de reeksen voor de overige variabelen volledig.

Bij de referentielocatie en locatie in het loofbos waren er veel problemen met de stroomvoorziening, waardoor voor een groot deel van de winter metingen ontbreken. De zonnepanelen bleken in de winter niet voldoende stroom op te wekken, waardoor de accu's leeg raakten. Om dit in het vervolg te voorkomen zijn extra accu's aangeschaft, zodat er gerouleerd kan worden. Daarnaast is de Lufft sensor in het loofbos vervangen door een pyranometer en anemometer, omdat deze sensoren minder stroom verbruiken.

In Figuur 3-1, Figuur 3-2 en Figuur 3-3 worden eerste metingen voor alle locaties getoond. De gemiddelde dagelijkse luchttemperatuur vertoont zoals verwacht geen grote verschillen tussen de locaties (Figuur 3-1). De inkomende straling (globale straling) is zoals verwacht veel hoger op de referentielocatie dan in de bossen (Figuur 3-2). Een vergelijking tussen de locaties in de bossen is nog niet mogelijk, omdat in het loofbos weinig metingen beschikbaar zijn vanwege de problemen met de stroomvoorziening in de winter en vanwege het aanpassen van het type sensor. In de zomer van 2024 werd de inkomende straling in het loofbos gemeten met een Lufft sensor, maar vanaf 20 januari 2025 is deze vervangen door een pyranometer. De metingen vanaf die datum geven een hogere inkomende straling in het loofbos dan in het dennenbos.

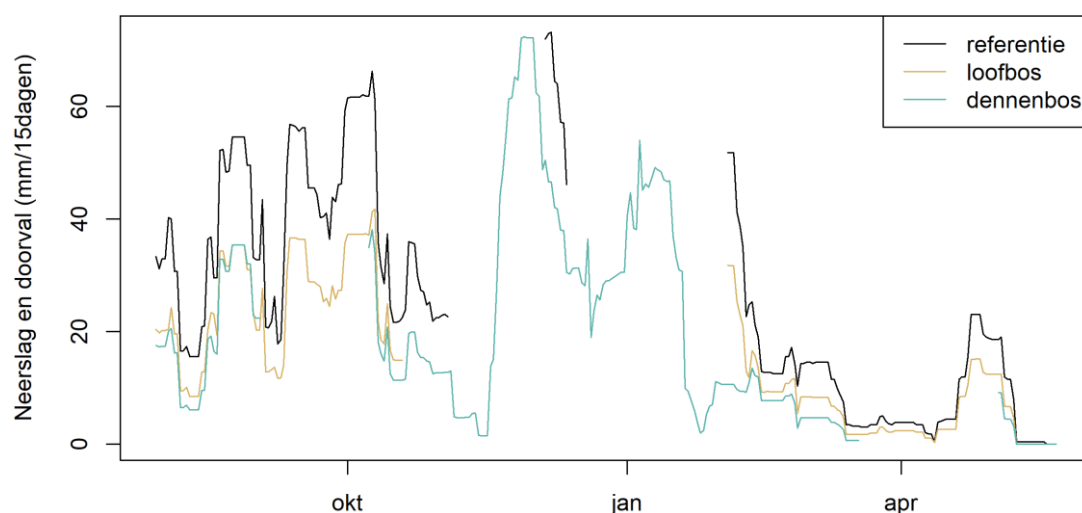


Figuur 3-1 Dagelijks gemiddelde luchttemperatuur (°C) voor de drie meetlocaties bij Schijf.



Figuur 3-2 Daggemiddelde inkomende straling (W/m^2) voor de drie locaties bij Schijf.

De neerslag wordt gemeten op het referentieperceel (de graanakker), op de andere twee locaties wordt de doorval door het bladerdak gemeten met de doorvalgoten (Figuur 3-3). Om de doorval te bepalen worden niet de dagsommen gebruikt, maar zijn verschillende aggregatieperiodes getest. Vanwege de problemen met de stroomvoorziening en verstopping van de doorvalmetingen zijn er nog geen lange meetreeksen beschikbaar. Daarom is hier gekozen voor de neerslagsom over 15 dagen. In de eerste metingen is in de periode juli-september 2024 weinig verschil te zien in de doorval in het loofbos en dennenbos. In de periode februari-maart 2025 is de doorval in het loofbos groter dan het dennenbos, zoals verwacht mag worden in de winterperiode. Omdat de meetperiode nog zo kort is, is het berekenen van percentages nog onbetrouwbaar. Als eerste inschatting liggen de doorvalpercentages voor het loofbos tussen de 60 en 70% en voor het dennenbos daar iets onder, maar de onzekerheid door de korte periode is groot. De interceptieverdamping komt hiermee op grofweg 30-40%. Een langere ononderbroken meetperiode is echter noodzakelijk om betrouwbare cijfers te genereren.



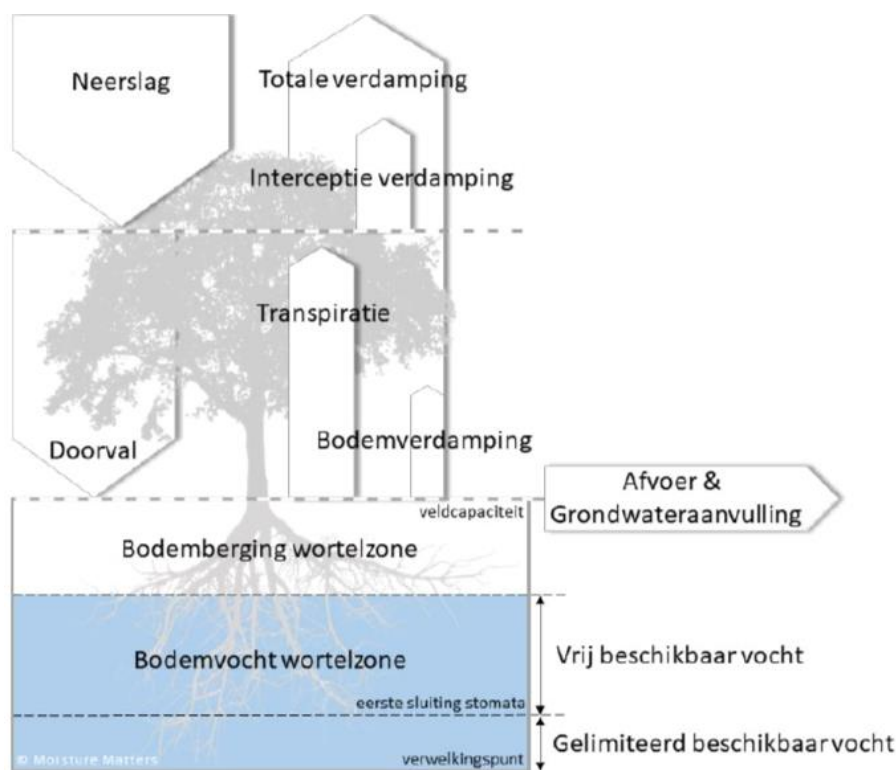
Figuur 3-3 Neerslag voor de referentielocatie en doorval voor de twee meetlocaties op basis van neerslagsommen over 15 dagen.

Het is binnen de projectmethode door vertragingen bij aanleg en opzet van de monsternamen helaas niet gelukt om te starten met de chloridebemonstering. Brabant Water zal hiermee starten in het najaar van 2025 waarna de resultaten worden meegenomen in het nieuwe RECHARGE project, waarbinnen ook de meetlocaties van Schijf een update krijgen en worden opgenomen in het grotere meetnetwerk.

4 Modelleren van bosverdamping met FluxPark

4.1 FluxPark

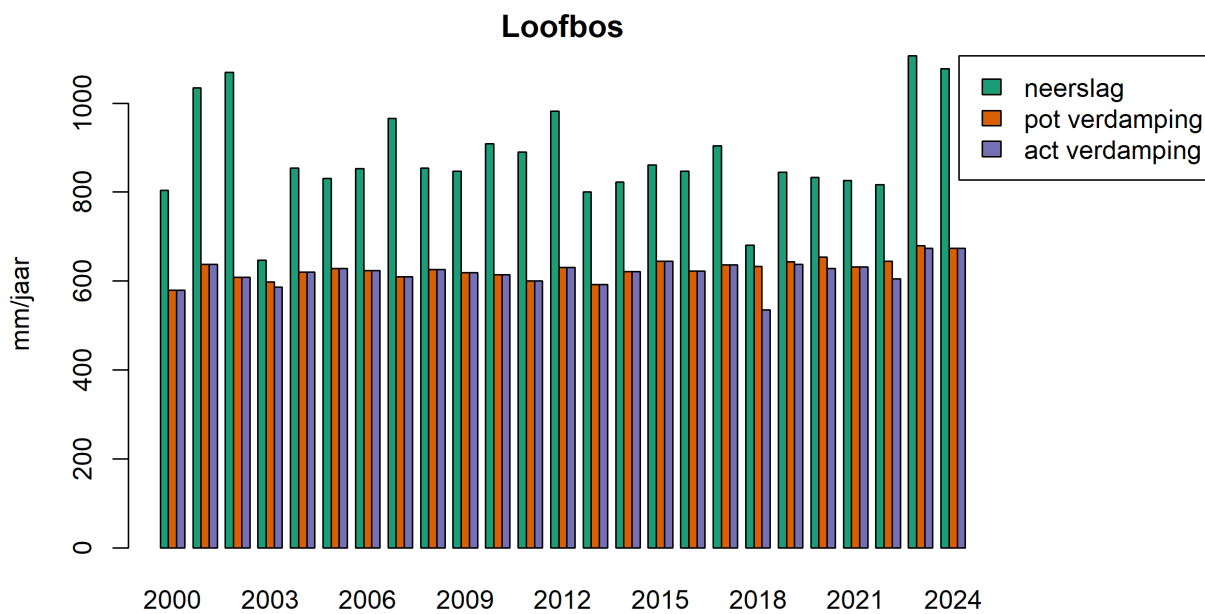
FluxPark is een hydrologisch model ontwikkeld door Moisture Matters. Het is een bakjesmodel, waarmee in- en uitgaande posten uit de wortelzone berekend kunnen worden, zoals interceptieverdamping, doorval, bodemverdamping, transpiratie en grondwateraanvulling (Figuur 4-1). Moisture Matters heeft voor twee punten in de omgeving van de meetlocatie Schijf tijdreeksen van deze fluxen berekend en aangeleverd voor de periode 2000-2024. Hiervoor is één tijdreeks voor een locatie met als vegetatie loofbos en één tijdreeks met als vegetatie naaldbos gekozen.



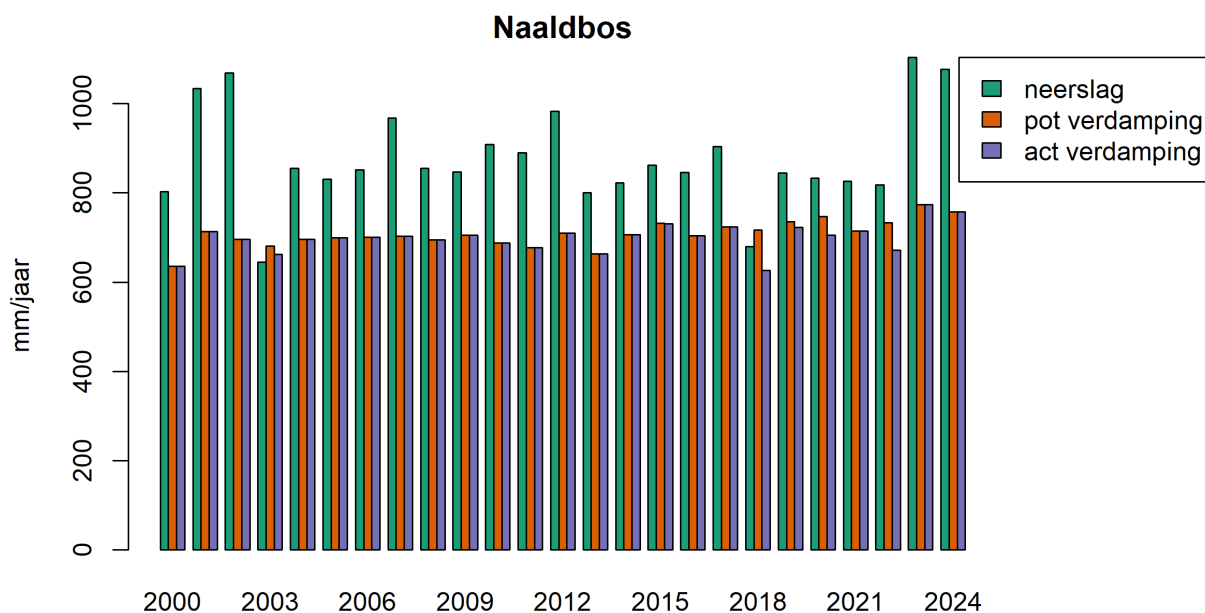
Figuur 4-1 Schematisch overzicht van de in FluxPark gemodelleerde componenten.

4.2 Resultaten

Uit de tijdreeksen met de gesimuleerde fluxen blijkt dat er volgens het model in de meeste jaren geen verdampingsreductie optreedt in beide bostypen, ofwel de potentiële verdamping is gelijk aan de actuele verdamping (Figuur 4-2 en Figuur 4-3). Alleen in droge jaren (2003, 2018, 2019, 2020, 2022) is een reductie te zien, waarbij in het extreem droge jaar 2018 de grootste verdampingsreductie zichtbaar is voor beide locaties.



Figuur 4-2 Jaarlijkse neerslag, potentiële verdamping en actuele verdamping voor een locatie met als vegetatie loofbos, berekend met FluxPark..



Figuur 4-3 Jaarlijkse neerslag, potentiële verdamping en actuele verdamping voor een locatie met als vegetatie naaldbos, berekend met FluxPark..

De totale actuele gesimuleerde verdamping is hoger voor het naaldbos dan het loofbos (Figuur 4-4). Dit komt door een hogere berekende interceptie en transpiratie in het naaldbos dan in het loofbos, terwijl bodemverdamping juist lager is in het naaldbos. Als de actuele verdamping van naaldbos wordt uitgesplitst in bodemverdamping, interceptie en transpiratie, dan blijkt dat de variatie in actuele verdamping vooral wordt bepaald door variatie in de berekende interceptie. Van sterke transpiratiereductie is in de berekeningen zelfs in 2018 geen sprake. Er is dus in het model voldoende vocht beschikbaar in de wortelzone. Of dit overeenkomt met de werkelijkheid is de vraag. Uit de dendrochronologische analyse (zie Figuur 5-6) blijkt een duidelijke afname in de cambiumgroei in droge jaren 1996 en 2018.



Figuur 4-4 Jaarlijkse bodemverdamping, interceptie en transpiratie voor het loofbos en naaldbos, berekend met FluxPark.

5 Dendrochronological research of Scots pine and Black pine in Schijf: growth and drought sensitivity

Dit hoofdstuk doet verslag van de dendrochronologische analyse zoals uitgevoerd door Dr. Linar Akhmetzyanov and Dr. Ute Sass-Klaassen, Van Hall Larenstein University of Applied Sciences, Lectoraat Duurzaam Bosbeheer, Velp 2025.

5.1 Introduction and research questions

Dendrochronological research, specifically tree-ring width analyses, was conducted on two pine species growing on two nearby sites on sandy soils in Schijf (Brabant, the Netherlands). This research was carried out as part of the Waterwijs programme.

The study aimed to address the following research questions:

- What are the differences in growth patterns between the two pine species?
- How do the two pine species respond to drought conditions?
- Which pine species is better adapted to water stress conditions?

5.2 Methods and results

To address the research questions, two increment core samples per tree were collected from 20 trees per species in November 2024. The extracted tree-ring samples were analyzed to measure annual ring widths, and mean growth curves were calculated for each species. To more accurately represent actual growth and mitigate the effects of age-related trends, the raw tree-ring width values were transformed into basal area increment (BAI) values. This standardization allows for a more reliable comparison of growth dynamics and responses to environmental factors (Speer, 2011).

Black pine trees were found to be younger compared to the Scots pine stand, with a mean diameter at breast height (DBH) of 47.26 cm². This suggests differences in stand structure and growth history between the two species.

Table 5-1 Basic dendrochronological characteristics of the analyzed pine stands (TRW – tree-ring width; DBH – diameter at breast height)

Species	Start year	Mean TRW [mm]	Mean DBH [cm ²]
Scots pine	1919	1.83	44.04
Black pine	1966	3.19	47.26

Similar patterns were observed in the time-series analysis, where the year-to-year growth variation between the two species showed strong similarities, but despite being significantly younger, Black pines have surpassed Scots pines in size (Figure 5-1).

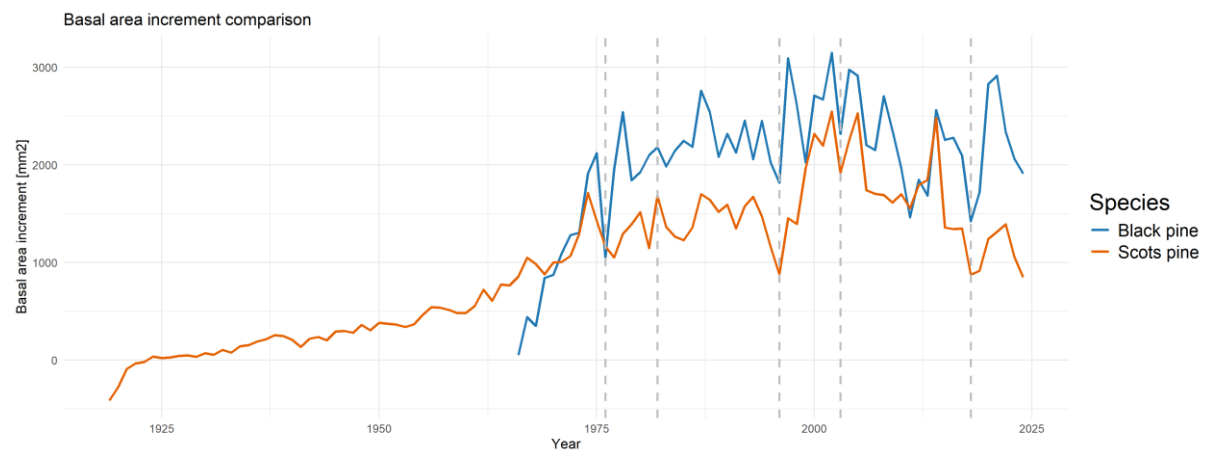


Figure 5-1. Mean basal area increment series of Scots and Black pine. Dashed vertical grey lines depict dry years in the area.

To analyze the effects of drought on the two species, the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), as an indicator of water availability, was calculated for three different time periods: one month (SPEI 1), three months (SPEI 3), and six months (SPEI 6) using *spei* package (Beguería & Vicente-Serrano, 2017) in R (R Core Team, 2021). The SPEI 6 represents the cumulative drought index for the entire growing season, with September values used as an indicator. Precipitation and temperature data for these calculations were obtained from the KNMI Climate Explorer webpage (Trouet & Van Oldenborgh, 2013) and from the nearest climate stations: Zundert for precipitation data and Gilze-Rijen for temperature. The aforementioned drought index was used to identify years with very severe dry or extremely dry conditions, defined as SPEI 6 September < -1.43 (Bouwman et al., 2025). The seasonal dry index revealed 1959, 1976, 1982, 1996 and 2018 as severe drought or extreme drought years (Figure 5-2).

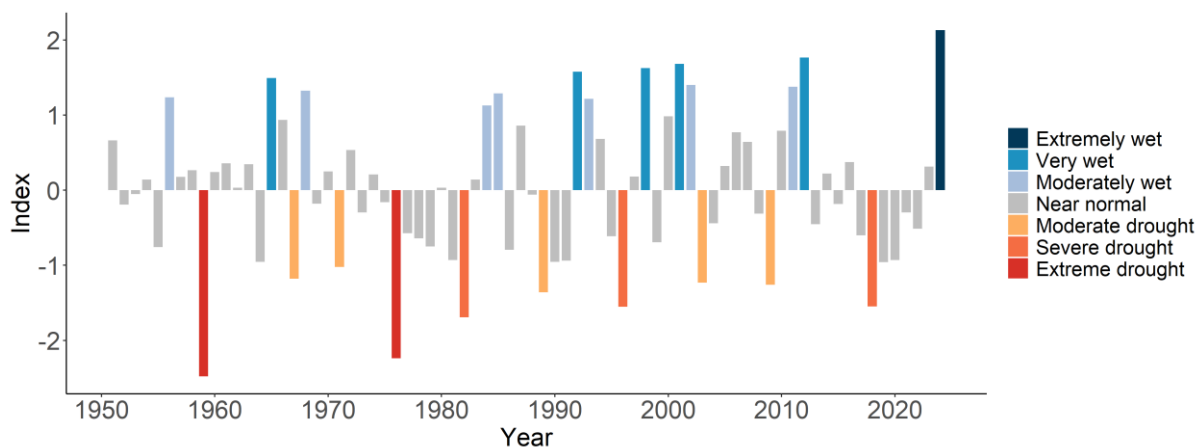


Figure 5-2 Seasonal drought index in the study area.

To ensure alignment between the occurrence of drought events and the active growth period of the tree species and to exclude the juvenile growth phase the years 1996 and 2018 were identified for drought event analysis. Detailed assessments of drought indices showed that the 1996 drought predominantly occurred during the spring, whereas the 2018 drought was concentrated in the summer months (Figure 5-3). Consequently, the inclusion of both years supports an evaluation of the effects of drought timing on the growth of the two species.

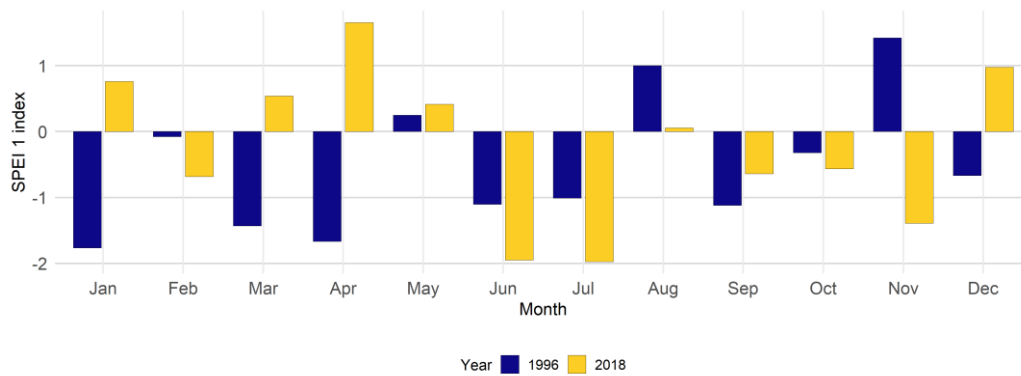


Figure 5-3 SPEI 1 index monthly values of the selected drought years.

To assess the effects of drought years, resilience–resistance–recovery (RRR) analyses were performed on individual BAI series and selected dry years (Lloret et al., 2011; Schwarz et al., 2020) using *pointRes* package (van der Maaten-Theunissen et al., 2021). Resistance is defined as the capacity of an individual tree to endure a disturbance event, specifically drought in this context. It is quantified as the ratio of growth during the drought year to the mean growth observed in the pre-drought period (Equation 1 and Figure 5-4). Recovery is defined as the ability of the individual to regain growth following the disturbance, and is expressed as the ratio of post-drought growth to growth during the drought event (Equation 2). Resilience represents the overall ability to return to pre-disturbance growth levels, calculated as the ratio of post-drought to pre-drought growth (Equation 3).

$$(1) \text{ Resistance } (R_t) = Dr / PreDr$$

$$(2) \text{ Recovery } (R_c) = PostDr / Dr$$

$$(3) \text{ Resilience } (R_s) = PostDr / PreDr$$

In these equations, *PreDr*, *Dr*, and *PostDr* correspond to growth measurements taken before, during, and after the drought period, respectively. Furthermore, refined resilience indices were computed in accordance with the methodologies proposed by Schwarz et al. (2020) and as applied by van der Maaten-Theunissen et al. (2021). These calculations used a standardized reference period of four years prior to the drought event and four years following it.

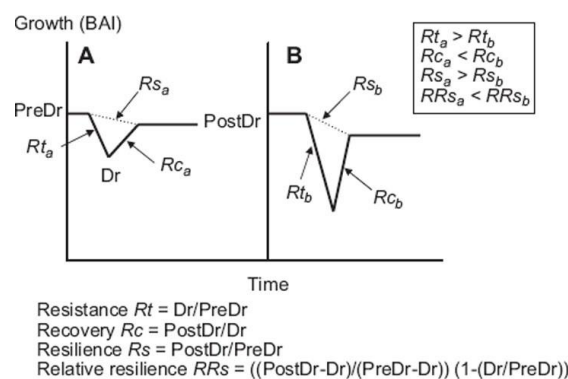


Figure 5-4 Resistance, recovery, resilience and relative resilience calculation schemes (Lloret et al., 2011).

The resilience values were found to be significantly higher in black pines for 2018 (one-way ANOVA, $p < 0.001$), with mean resilience values above 1, the critical threshold (Figure 5-5). However, in 1996, the mean difference in resilience values between the species was not significant. The relative resilience values (standardized by resistance) exhibited a similar trend for 2018, with significantly higher values for black pine (one-way ANOVA, $p < 0.01$), but the

opposite for the 1996 drought, where Scots pine trees showed significantly higher values ($p < 0.05$). The recovery period from drought was significantly longer in Scots pine individuals both for 1996 and 2018 droughts.

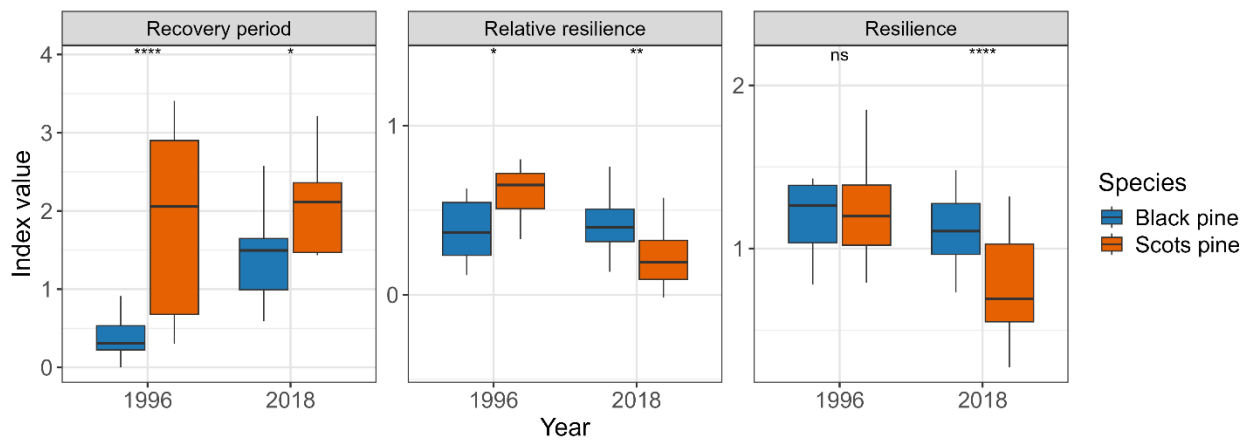


Figure 5-5. Recovery period, relative resilience and resilience values of black and Scots pine trees to 1996 and 2018 dry years. The stars indicate significance level (**** < 0.001, ** < 0.01, * < 0.05).

The difference in resilience to drought is also reflected in the relative growth change (the difference between growth during the dry years and the mean growth over other years) revealed through superposed epoch analyses (Figure 5-6). During the selected dry years, black pines exhibited a smaller growth decline compared to Scots pine (26.7% compared to 34.2% respectively).

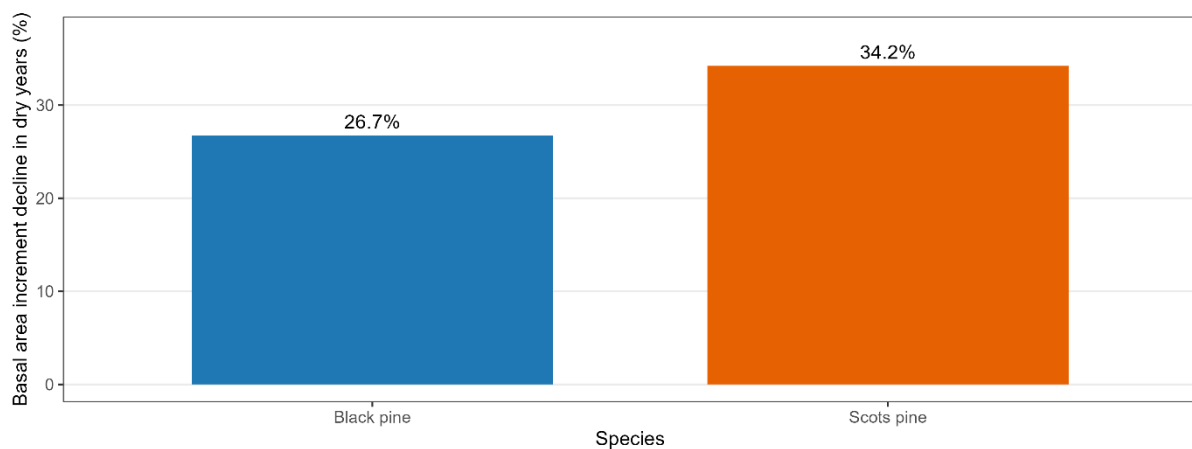


Figure 5-6. Basal area loss by the selected species in dry years (1996 and 2018) compared to non-dry years.

To evaluate the influence of climatic variables on tree growth throughout the entire study period, a bootstrapped correlation analysis was conducted between Basal area increment (BAI) values and multiple climate indicators, including SPEI1, SPEI3, monthly mean temperature, and total monthly precipitation. The analysis demonstrated a strong and statistically significant positive correlation between the BAI chronology of Scots pine and SPEI1 for July, as well as SPEI3 for August and September (Figure 5-7). In contrast, for black pine, significant positive correlations were observed between BAI and SPEI3 values for March and April, in addition to a notable correlation with SPEI1 for July.

Furthermore, the analysis of temperature and precipitation effects revealed that early spring temperatures exerted a positive influence on the growth of black pine, while July precipitation was positively associated with the growth of Scots pine (Figure 5-6).

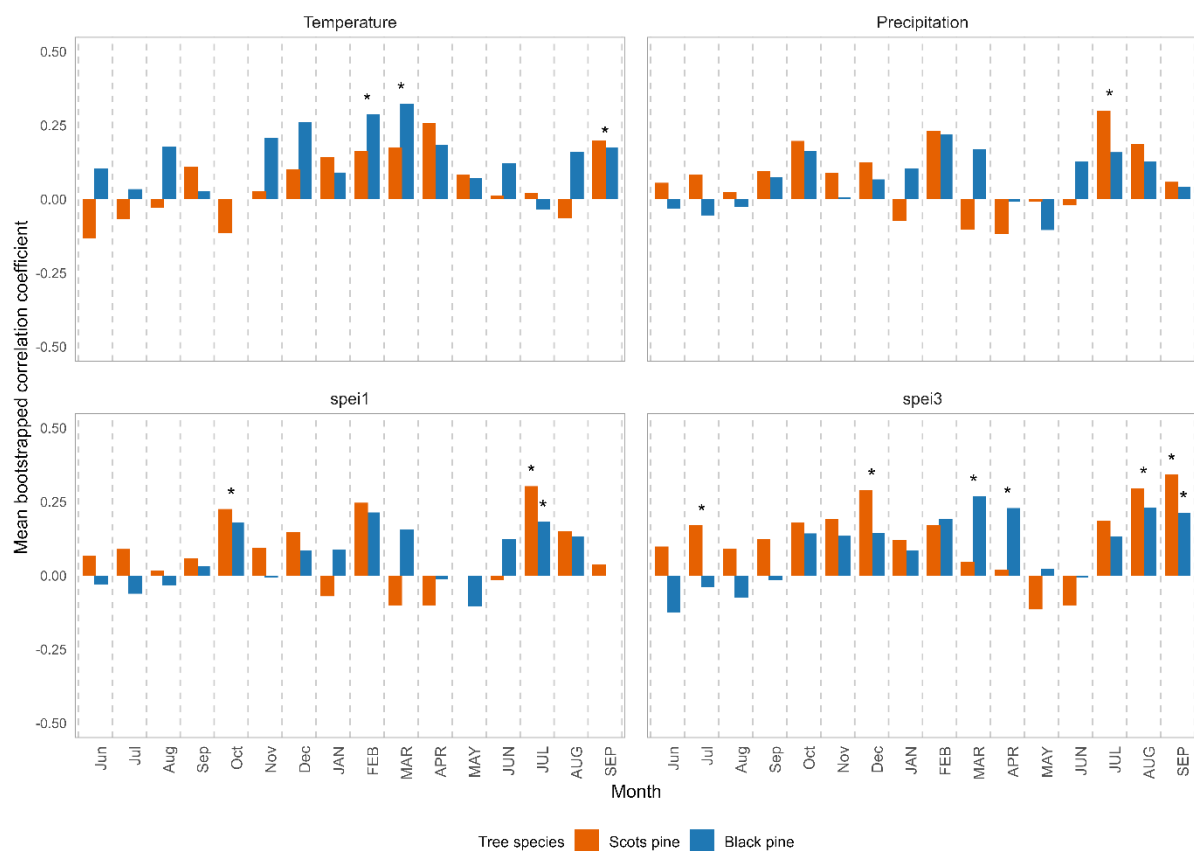


Figure 5-7 Bootstrapped climate-growth correlation values between Scots (orange bars) and black (blue bars) pines. Stars indicate significance, lower case months – month of the previous growing season, in upper case – current growing season.

5.3 Discussion

The observed differences in response to severe drought events between Scots pine (*Pinus sylvestris*) and Black pine (*P. nigra*) in the study can be explained by differences in their water-use strategies (Martin-Benito et al., 2017; Savi et al., 2019). Scots pine typically employs a more isohydric strategy, closing stomata early to conserve water indicating high intrinsic water-use efficiency (iWUE), which was found to be higher than in co-occurring Black pine (Martin-Benito et al., 2017). This conservative water-saving strategy helps avoid extreme negative water potentials but can lead to carbon limitation under prolonged drought (Savi et al., 2019). In contrast, Black pine is relatively more anisohydric (maintaining gas exchange longer during drought), supported by its more robust xylem. In practice, this means black pines tend to overshoot pre-drought growth levels once rainfall returns (resilience >1),

whereas Scots pines often remain below pre-drought growth for longer. On the other hand, timing of unfavorable conditions also plays an important role. Black pine is a Mediterranean-adapted pine that often resumes cambial activity early in spring when temperatures rise. For example, Şahan et al. (2024) found that Black pine cambium in western Anatolia was already active by late April under mild Mediterranean climates. Likewise, Proutsos & Tigkas (2020) show that Black pine annual ring width is driven mainly by winter and early-spring water availability. In short, Black pine tends to take advantage of late-winter/early-spring soil moisture, so March–April droughts have a direct impact on its wood formation. By contrast, *Pinus sylvestris* in temperate sites delays much of its growth until late spring and summer. Marqués et al. (2016) reported that Scots pine growth is primarily enhanced by warm, wet spring conditions, whereas Black pine growth responds more to spring precipitation. In practice this means Scots pine cambium and shoot growth are active later, so its ring-width formation depends heavily on summer rainfall and any soil moisture recharge from autumn–winter.

These patterns explain our findings from the 1996 (spring drought) versus 2018 (summer drought) events. In 1996, drought was concentrated in spring months (Figure 5-3), so Scots pine – which is less sensitive to early-spring moisture – showed relatively higher post-drought growth (higher relative resilience) than Black pine. Black pine’s reliance on spring moisture (evident in its SPEI correlations) meant its growth was more suppressed by the 1996 drought, resulting in lower resilience that year. By contrast, the 2018 drought occurred during summer, when Scots pine growth depends strongly on rainfall. Here Black pine outperformed Scots pine: its cavitation-resistant xylem and remaining access to earlier-season moisture allowed faster recovery (resilience > 1), whereas Scots pine experienced a larger BAI decline. In fact, superposed-epoch analysis showed Scots pine lost ~34% of basal area increment in drought years versus ~27% for Black pine. Scots pine, due to stringent stomatal closure, accumulated hydraulic safety at the cost of carbon and growth, whereas Black pine traded some water risk for sustained photosynthesis and stronger regrowth.

5.4 Conclusion

Our results indicate a high sensitivity of Scots pine to summer water availability, whereas black pine individuals did not exhibit a significant relationship with drought. This suggests that with an increase in summer dry events or enhanced moisture limitations, Scots pine growth could become even more restricted, potentially leading to local dieback of the species in the area. Yet early-season dependency of Black pine on growing conditions may still leave it exposed to spring droughts. The use of high-precision dendrometers, which record changes in stem diameter every 15 minutes, offers valuable opportunities to gain deeper insights into species-specific responses to drought. These instruments can help unravel how trees react to the timing of drought in relation to phenology, enabling distinguishing short-term stem shrinkage due to water deficit from longer-term growth responses

Moreover, with ongoing climate change, the combination of warmer and wetter springs could create favorable conditions for the spread of new pests and pathogens, posing a serious threat to black pine populations. Similar dieback events have already been observed in Brabant (the Netherlands) in response to emerging pests and diseases. These insights are vital for anticipating species performance under future climate conditions and should inform adaptive forest management and species selection strategies in drought-prone landscapes.

6 Samenvatting, conclusies en vervolg

6.1 Synthese en conclusies

Binnen deze thematische verkenning is onderzocht hoe we op een efficiënte manier hydrometeorologische componenten kunnen meten in het bos. Meten in een bos kent namelijk een aantal (praktische) uitdagingen ten aanzien van plaatsing van sensoren en beheer en onderhoud. Hiermee is binnen de drinkwatersector nog weinig ervaring. De beste manier om ervaring op te doen is door het daadwerkelijk bouwen van een meetopstelling en metingen uit te voeren. Hiervoor is, gezien het beperkte budget, gebruik gemaakt van reeds beschikbare sensoren en goedkope materialen (kunststof goten). Ten slotte is een opstelling geplaatst om op basis van een chloride-massabalans schattingen te kunnen maken van de grondwateraanvulling. Deze methode is met succes in de duinen toegepast. Monsternamen hiervoor wordt verzorgd door Brabant Water.

Daarnaast is onderzocht of boomringen een goede indicator zijn voor droogtestress bij bomen. Als dit het geval is kan boomringdata worden gebruikt om gemodelleerde transpiratiereductie teijken aan een 'historisch archief' zoals vastgelegd in de boomringen. Als veldwaarnemingen is gekozen voor de zogenaamde 'basal area increment' ofwel het oppervlakte jaarlijkse aangroei. Voor dit doel zijn 40 bomen bemonsterd, gelijk verdeeld over grove den (Scots pine) en zwarte den (Black pine). De uitvoering en analyse van deze monsternamen is gedaan door het lectoraat bosbeheer van Van Hall Larenstein. Uit de in de afgelopen 1,5 jaar uitgevoerde metingen kunnen een aantal conclusies worden getrokken:

Hydrometeorologische metingen

- Het is gelukt om met beperkte middelen meetopstellingen te bouwen. Wel bleek de energievoorziening en onderhoud van de opstellingen gecompliceerd. Door het zeer lage aantal zonuren was het moeilijk om de accu's voldoende opgeladen te houden in herfst en winter. Voor de energievoorziening is een accuwisselschema gemaakt.
- De aan de doorvalgoten gekoppelde regenmeters bleken zeer snel te verstoppert door fijn organisch materiaal afkomstig uit de bomen. Het tegengaan van verstopping bleek gecompliceerd. Hiervoor is geëxperimenteerd met verschillende vormen van gaas in de goten en het verruimen van de openingen naar de tipping bucket. Uiteindelijk kon hierdoor de verstopping beheersbaar worden gehouden.
- In de metingen zijn duidelijke verschillen zichtbaar in doorval (en dus interceptieverdamping) en straling die de bosbodem bereikt. Uit de metingen blijkt dat interceptieverdamping een aanzienlijke waterbalanspost vormt en dat straling slechts beperkt de bosbodem bereikt in de onderzochte sites. De meetreeksen zijn (mede door de gaten) nog te kort om betrouwbare percentages voor interceptieverdamping uit te rekenen.

Modellering bosverdamping met FluxPark

- Voor de meeste jaren in de periode 2000-2025 wordt geen verdampingsreductie gesimuleerd. Alleen in droge jaren (2003, 2018, 2019, 2020, 2022) wordt een reductie berekend.
- De reductie in totale verdamping wordt vooral veroorzaakt door reductie van de interceptieverdamping. De transpiratie door de bomen blijft volgens het model op peil. In 2003 is de transpiratie zelfs vrij hoog vergeleken met aangrenzende jaren. Kennelijk is voldoende bodemvocht beschikbaar om te voldoen aan de (hogere) atmosferische vraag.
- De reductie in cambium groei in 2018 zoals gemeten in de boorkernen uit de grove den en in mindere mate zwarte den geeft aanwijzingen dat de waterbeschikbaarheid in het model mogelijk wordt overschat. Beschouwing van indirecte indicatoren zoals cambiumgroei kan dus van nut zijn voor het verbeteren van modellen.

ChlorideMassaBalans methode

- De aanleg van een systeem om regenwater op te vangen en ondiep grondwater te bemonsteren is relatief eenvoudig.
- Helaas zijn er op dit moment nog geen analyseresultaten binnen om verdere conclusies te trekken.

Boomringen als historisch archief voor droogtestress

- Zowel de grove dennen als de zwarte dennen laten een groeirespons zien op extreem droge jaren.
- Uit een detailanalyse op de droge jaren 1996 en 2018 komt een sterk verschillende reactie van de onderzochte boomsoorten naar voren. Grove den blijkt zeer gevoelig voor zomerdroogte terwijl zwarte den dan vrijwel geen response laat zien. Wel is zwarte den gevoelig voor winter en voorjaarsdroogte.
- Deze verschillen kunnen verklaard worden uit de oorsprongsgebieden van beide soorten. Cambium van zwarte den is al eind april actief om gebruik te kunnen maken van bodemvocht in het relatief milde mediterrane klimaat waar deze boomsoort oorspronkelijk vandaan komt. Grove den daarentegen stelt cambium groei uit tot in de zomer wat aansluit bij de meer noordelijke gematigde gebieden waar deze soort van nature voorkomt. Daarnaast is het xyleem van zwarte dennen beter bestand tegen cavitatie waardoor zwarte dennen hun stomata langer open kunnen houden.
- De cambiumgroei is niet alleen afhankelijk van de hoeveelheid beschikbaar bodemvocht, maar ook van temperatuur en beschikbare energie. Opvallend is bijvoorbeeld de zeer beperkte aangroei in het extreem natte jaar 2024.
- Gebruik van groeiringen om hydrologische modellen te ijken vraagt om gedegen kennis van de wateropnamestrategieën van verschillende boomsoorten, maar ook om kennis over andere groeibelemerende factoren. Meer directe metingen zoals het gebruik van dendrometers om het zwellen en krimpen van de stam te meten bieden mogelijk meer perspectief zoals ook blijkt uit o.a. Salomón et al. (2018).

6.2 Vervolg

In de thematische verkenning is belangrijke kennis en ervaring opgebouwd met het meten van voor de grondwateraanvulling relevante hydrometeorologische parameters in bossen. Daarnaast heeft dit kraamkameronderzoek de mogelijkheid geboden om contacten te leggen en samen te werken met stakeholders en relevante onderzoeksgroepen zoals het lectoraat Duurzaam Bosbeheer van Van Hall Larenstein en Moisture Matters. Dit heeft geresulteerd in het samen met o.a. Vitens en Brabant Water opgestelde RECHARGE onderzoeksvoorstel wat gehonoreerd is binnen KIA Landbouw Water Voedsel (<https://www.tkiwatertechnologie.nl/projecten/recharge-watersysteemherstel-door-datagedreven-begrip-van-bosverdamping-en-grondwateraanvulling/>). Dit vervolgproject biedt de mogelijkheid om een groter aantal meetlocaties in te richten en de bestaande locatie bij Schijf te verbeteren en daarnaast ook modelleertechnieken te verfijnen en data breed beschikbaar te maken.

Specifiek voor de locatie Schijf betekent dit:

- Vervanging van de doorvalgoten en tipping buckets met een nieuw ontwikkelde meer verstoppingsbestendige uitvoering
- Uitbreiding van de metingen in de bodem met o.a. tensiometers
- Plaatsing van dendrometers om zwel en krimp van de stammen te meten
- Bemonstering van bulk neerslag, doorvalwater en freatisch grondwater en analyse op chloride
- Gedurende de komende 4 jaar doorgaan met metingen
- Verfijning van het hydrologische model fluxpark
- Verbetering parameterisatie van het model

Binnen RECHARGE worden daarnaast meetlocaties ingericht of uitgebreid in het Edese bos (Beuk en Eik), Deelerwoud (Eik en Grove den), Soestduinen (Grove den), Speuld (Douglas en Beuk) en Loobos (Grove den).

7 Referenties

- Beguería, S., & Vicente-Serrano, S. M. (2017). SPEI: Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index, R package version 1.7. 2017.
- Bouwman, M., Akhmetzyanov, L., Mohren, F., den Ouden, J., Sass-Klaassen, U., & Copini, P. (2025). Tree growth responses to severe droughts for assessment of forest growth potential under future climate. *Forest Ecology and Management*, 578, 122423. DOI: 10.1016/J.FORECO.2024.122423
- Bréda, N. en A. Granier (1996). "Intra- and interannual variations of transpiration, leaf area index and radial growth of a sessile oak stand (*Quercus petraea*)." *Ann. For. Sci.* **53**(2-3): 521-536.
- Caljé, R., F. Schaars en J. Heijkers (2014). *Vergelijking van enkele schattingsmethoden voor de actuele verdamping*, Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.
- Fan, Y., G. Miguez-Macho, E. G. Jobbágy, R. B. Jackson en C. Otero-Casal (2017). "Hydrologic regulation of plant rooting depth." *Proceedings of the National Academy of Sciences* **114**(40): 10572-10577 DOI: 10.1073/pnas.1712381114.
- Lansu, E. M., C. C. van Heerwaarden, A. I. Stegehuis en A. J. Teuling (2020). "Atmospheric Aridity and Apparent Soil Moisture Drought in European Forest During Heat Waves." *Geophysical Research Letters* **47**(6): e2020GL087091 DOI: 10.1029/2020GL087091.
- Lloret, F., Keeling, E. G., & Sala, A. (2011). Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos*, 120(12), 1909–1920. DOI: 10.1111/J.1600-0706.2011.19372.X
- Marqués, L., Camarero, J. J., Gazol, A., & Zavala, M. A. (2016). Drought impacts on tree growth of two pine species along an altitudinal gradient and their use as early-warning signals of potential shifts in tree species distributions. *Forest Ecology and Management*, 381, 157–167.
- Martin-Benito, D., Anchukaitis, K. J., Evans, M. N., Del Río, M., Beeckman, H., & Cañellas, I. (2017). Effects of drought on xylem anatomy and water-use efficiency of two co-occurring pine species. *Forests*, 8(9), 332.
- Musters, P. A. D. en W. Bouten (1999). "Assessing rooting depths of an austrian pine stand by inverse modeling soil water content maps." *Water Resources Research* **35**(10): 3041-3048 DOI: 10.1029/1999WR900173.
- Proutsos, N., & Tigkas, D. (2020). Growth response of endemic black pine trees to meteorological variations and drought episodes in a Mediterranean region. *Atmosphere*, 11(6), 554.
- R Core Team. (2021). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Şahan, E. A., Köse, N., Güner, H. T., Martin-Benito, D., Gea-Izquierdo, G., Conde, M., Almagro, D., Kızılaslan, I. S., Akkemik, Ü., & Dalfes, H. N. (2024). Monitoring Intra-Annual Wood Formation of *Pinus nigra* JF Arnold (Black Pine) to Understand the Fire Seasonality in Western Anatolia. *Forests*, 15(3), 494.
- Savi, T., Casolo, V., Dal Borgo, A., Rosner, S., Torboli, V., Stenni, B., Bertoincin, P., Martellos, S., Pallavicini, A., & Nardini, A. (2019). *Drought-induced dieback of Pinus nigra: a tale of hydraulic failure and carbon starvation*. *Conserv Physiol* 7: coz012.
- Schilling, O. S., J. Doherty, W. Kinzelbach, H. Wang, P. N. Yang en P. Brunner (2014). "Using tree ring data as a proxy for transpiration to reduce predictive uncertainty of a model simulating groundwater–surface water–vegetation interactions." *Journal of Hydrology* **519**: 2258-2271 DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.08.063.
- Schwarz, J., Skiadaresis, G., Kohler, M., Kunz, J., Schnabel, F., Vitali, V., & Bauhus, J. (2020). Quantifying growth responses of trees to drought—A critique of commonly used resilience indices and recommendations for future studies. *Current Forestry Reports*, 6, 185–200.
- Speer, J. H. (viaf)101556978. (2011). *Fundamentals of tree-ring research*. Tucson (Ariz.) : University of Arizona press. <http://lib.ugent.be/catalog/rug01:001976315>
- Stuyfzand, P. J. en F. Rambags (2011). Hydrologie en hydrochemie van de vier lysimeters te Castricum; overzicht van resultaten met uitzicht op haalbaarheid van reanimatie van het lysimeterstation. Nieuwegein, KWR: 104.
- Trouet, V., & Van Oldenborgh, G. J. (2013). KNMI Climate Explorer: A Web-Based Research Tool for High-Resolution Paleoclimatology. *https://Doi.Org/10.3959/1536-1098-69.1.3*, 69(1), 3–13. DOI: 10.3959/1536-1098-69.1.3
- van der Maaten-Theunissen, M., Trouillier, M., Schwarz, J., Skiadaresis, G., Thurm, E. A., & van der Maaten, E. (2021). pointRes 2.0: New functions to describe tree resilience. *Dendrochronologia*, 70, 125899. DOI: 10.1016/J.DENDRO.2021.125899

- Witte, J. P. M., W. J. Zaadnoordijk en J. P. Buyse (2019). "Forensic hydrology reveals why groundwater tables in the province of Noord Brabant (the Netherlands) dropped more than expected " Water **11**(3): art. no. 478 DOI: 10.3390/w11030478.
- Yu, P., H. Xu, M. Ye, S. Liu, J. Gong, H. An en J. Fu (2012). "Effects of ecological water conveyance on the ring increments of *Populus euphratica* in the lower reaches of Tarim River." Journal of Forest Research **17**(5): 413-420 DOI: 10.1007/s10310-011-0312-3.