

WATERWIJZER NATUUR - FASE 3: KLIMAATROBUUSTE MODELLERING VAN EFFECTEN VAN ZUUR- EN STIKSTOFDEPOSITIE OP NATUUR



RAPPORT

2022
08

WATERWIJZER NATUUR - FASE 3:
KLIMAATROBUUSTE MODELLERING VAN EFFECTEN
VAN ZUUR- EN STIKSTOFDEPOSITIE OP NATUUR

RAPPORT

2022

08

ISBN 978.90.5773.979.8



COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Jelmer Nijp, Ruud Bartholomeus, Janine de Wit, Sharon Clevers, Edu Dorland (KWR)
Gert-Jan Reinds, Hans Kros (WENR)
Yuki Fuijta (NMI)
Peter Hoefsloot (Hoefsloot Spatial Solutions)
Jan-Philip M. (Flip) Witte (FWE)

KWALITEITSBORGER
Ruud Bartholomeus (KWR)

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Frank van der Bolt (Waterschap Aa en Maas)
Wiebe Borren (Natuurmonumenten)
Doesjka Ertsen (Provincie Noord-Brabant)
Rob van Dongen (Staatsbosbeheer)
Chris Griffioen (Waterschap Drents Overijsselse Delta/ gepensioneerd, voorzitter)
Martin de Haan (Brabant Water)
Jeanine Hamers (Provincie Utrecht)
Arjen van Hinsberg (Planbureau voor de Leefomgeving)
Bernadette Raaijmakers en Jan Hoogendoorn (Vitens)
Leo Spoormakers (Provincie Limburg)
Jackie Straathof (Deltaprogramma Zoetwater / WWL)
Rob Ruijtenberg (STOWA, secretaris)
Teun Spek (Provincie Gelderland)
Johan van der Veer (Provincie Limburg)
Bas Worm (Waterschap Vechtstromen)

ONDERZOEK MEDE MOGELIJK GEMAAKT DOOR

Provincie Gelderland, Provincie Noord-Brabant, Provincie Limburg, Waterschap Aa en Maas, Waterschap Vechtstromen, Brabant Water, Vitens, Deltaprogramma Zoetwater/ministerie Infrastructuur en Waterstaat, KWR Watercycle Research Institute, STOWA

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau bv
STOWA STOWA 2022-08
ISBN 978.90.5773.979.8

Copyright Teksten en figuren uit dit rapport mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.
Disclaimer Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud van dit rapport.

TEN GELEIDE

WATERWIJZER NATUUR 3.0: KLIMAATROBUUST MODELLEREN VAN EFFECTEN VAN ZUUR- EN STIKSTOFDEPOSITIE OP NATUUR

Hoe richt je het regionale waterbeheer zo in, dat het de gebruiksfuncties in een gebied, zoals landbouw, natuur en wonen, optimaal bedient? En welke invloed hebben hydrologische veranderingen – die het gevolg kunnen zijn van menselijk ingrijpen in de waterhuishouding, of van klimaatverandering - op deze functies? Het zijn vragen waar waterbeheerders iedere dag mee bezig zijn. De Waterwijzer Natuur helpt bij het beantwoorden van deze vragen voor droge natuur. Dit rapport beschrijft de achtergronden bij de release van de nieuwste versie van het instrument 3.03. In vorige versies van de WWN is een gebruiksvriendelijke schil (WWN 1) tot stand gekomen en is de berekening van zuurgraad (WWN 2) verbeterd. Met deze versie kunnen gebruikers ook de effecten van veranderingen in atmosferische stikstofdepositie en de effecten hiervan op voedselrijkdom en de zuurgraad en hoe dit doorwerkt op de terrestrische natuur inschatten.

De Waterwijzer Natuur (WWN), het gebruiksvriendelijke en klimaatrobuuste toetsings- en voorspellingsinstrument, stelt waterbeheerders en beleidsmakers in staat hun beheer en beleid beter af te stemmen op de vegetatie van natuurgebieden. Sinds de eerste versie van de WWN in 2018 verscheen, is het model doorontwikkeld door een consortium van KWR Water, Wageningen Environmental Research, Flip Witte Ecohydrologie en het Nutriënten Management Instituut. De tweede versie (verschenen in voorjaar 2021) bevatte verbeteringen waardoor het instrument beter inzicht gaf in de invloed van zuurgraad op het voorkomen van de terrestrische natuur.

Dit rapport bevat de achtergronden bij de release van de Waterwijzer Natuur versie 3.03. U kunt met de nieuwe versie van de WWN nu ook eenvoudig ruimtelijk analyseren hoe de vegetatiesamenstelling eruit ziet bij een lagere of hogere stikstofdepositie, en hoe dat in combinatie met veranderingen in de waterhuishouding doorwerkt op de vegetatie. Met deze verbetering wordt aangesloten bij de actuele stikstofproblematiek.

De Waterwijzer Natuur is op dit moment het best beschikbare instrument voor effectberekeningen op natuur, in ieder geval voor hoog Nederland. STOWA beveelt het gebruik ervan dan ook van harte aan om te komen tot een robuuste inrichting van natuurgebieden.

De Waterwijzer Natuur 3.03 is vrij beschikbaar op www.waterwijzer.nl.

Joost Buntsma
Directeur STOWA

SAMENVATTING

Om te kwantificeren hoe effecten van waterbeheer en klimaatverandering doorwerken op terrestrische natuur is in opdracht van STOWA de Waterwijzer Natuur (WWN) ontwikkeld. Met de WWN worden veranderingen van klimaat en waterbeheer procesmatig gesimuleerd, waardoor voorspellingen in de toekomst robuuster zijn dan voorspellingen gebaseerd op kennisregels.

In vorige versies van de WWN is een gebruiksvriendelijke schil tot stand gekomen (WWN-1), en is de berekening van zuurgraad verbeterd (WWN-2). Het voorliggende onderzoek had als doel om de voorspelling van voedselrijkdom te verbeteren. De werkzaamheden maken deel uit van Fase 3 van de ontwikkeling van de WWN. Met deze voorziene verbetering van de voedselrijkdom in WWN wordt bovendien aangesloten bij de actuele stikstofproblematiek. De WWN is daarmee geschikt gemaakt voor inzet bij lokale herstel- en beheerplannen van (Natura 2000) natuurgebieden.

Ingegeven door de extreme droogte in recente jaren en op advies van de begeleidingscommissie van de ontwikkeling van de WWN, wordt de nieuwe WWN toegepast om het gecombineerd effect van droogte én verzuring te berekenen en te toetsen. Door de procesmatige aanpak is WWN-3 in staat het complexe samenspel tussen water, zuurgraad, en voedselrijkdom te verdisconteren, en daarom bij uitstek geschikt om dergelijke vraagstukken te behandelen. Naast de inhoudelijke verbeteringen in de WWN, zijn een aantal onderdelen geactualiseerd, om aan te sluiten bij recente invoergegevens en betrouwbare uitkomsten te leveren.

VERBETEREN VOEDSELRIJKDOM: AANPASSINGEN IN BEREKENINGEN EN DEFINITIE VAN VOEDSELRIJKDOM

In de vorige versies (WWN-1 en WWN-2) werd de voedselrijkdom berekend op basis van fosformineralisatie (P_{min}). Via een relatie met de indicatiewaarde voor voedselrijkdom (mN) van vegetatie werkt P_{min} door op de voorspelde kansrijkdom van ecotoopgroepen. Echter, hierdoor werd nog geen rekening gehouden met effecten van stikstofdepositie. Om dat mogelijk te maken, is de relatie tussen indicatie voor voedselrijkdom en P_{min} in WWN-3 vervangen door een relatie tussen stikstofmineralisatie (N_{min}), N-depositie, en P_{min} . Door deze aanpassingen aan te brengen, is het met de WWN-3 bijvoorbeeld mogelijk om eenvoudig ruimtelijk te analyseren hoe vegetatiesamenstelling er uit ziet met (veel) lagere of hogere N-depositie, of hoe N-depositie in combinatie met een andere waterhuishouding doorwerkt op vegetatie.

Naast effecten op voedselrijkdom heeft depositie (zowel zuur- als N-depositie) effect op de zuurgraad van de bodem. Dit effect is in de WWN-3 meegenomen door nieuwe metarelaties op te stellen tussen zuurgraad en depositieniveau. Bij hogere depositie neemt de pH van de bodem af. In WWN-3 kan de gebruiker door middel van een depositiefactor een (verwachte) verandering van de depositie opgeven. Hierbij worden depositie van zuur en stikstof tegelijkertijd en gelijkmatig geschaald met de door de gebruiker opgegeven depositiefactor. Met deze aanpassing worden ook effecten van zure depositie procesmatig meegenomen in de voorspelling van vegetatie in WWN-3, hetgeen de voorspelkwaliteit ten goede komt en leidt tot een betere schatting van de zuurgraad.

VERBETEREN VOEDSELRIJKOM: PLAUSIBILITEIT VAN RESULTATEN

Om te bepalen of de resultaten van de nieuwe berekeningen van de voedselrijkdom overeenkomen met verwachtingen, is een plausibiliteitstoets uitgevoerd. Daartoe is WWN-3 toegepast op het proefgebied Sang en Goorkens voor huidig klimaat, huidige waterhuishouding, maar met verschillende depositiefactoren (huidig, $0.15 \times$ huidig, en $1.5 \times$ huidig). De resultaten van deze plausibiliteitstoets zijn in lijn met verwachtingen: een lagere depositie leidt tot een hogere pH, een lagere voedselrijkdom, en een afname van het oppervlak van ecotoopgroepen van voedselrijke condities. De aanpassingen in de WWN-3 zijn daarmee als succesvol bestempeld.

Ook is een landelijke validatie uitgevoerd, waarbij de gesimuleerde N_{min} en P_{min} vergeleken zijn met uit vegetatieopnamen afgeleide indicatiewaarden voor voedselrijkdom. Deze plausibiliteitstoets gaf in beperkte mate ondersteuning voor de simulaties van WWN, maar was niet afdoende om met voldoende zekerheid het functioneren van de WWN-3 op landelijke schaal te valideren door onzekerheden. Deze onzekerheden bestaan onder andere uit de hydrologische invoer, de definitie van voedselrijkdom, de waarde van indicatiewaarden, metarelaties in de WWN, de gebruikte statistische relatie, en de eenheden die met elkaar vergeleken worden, en de (variërende) ouderdom van de opnamen. De schematisatie van de ondergrond is in landelijke studies noodgedwongen grover dan in lokale studies. Voorspelde grondwaterstanden en daarmee ook vegetatie, zijn daardoor met de nodige onzekerheid gemoeid. Door deze grove schematisatie is de WWN-3 daardoor (nog) niet erg geschikt om toe te passen op landelijke schaal.

INVLOED VAN EXTREEM DROGE JAREN OP STANDPLAATSCONDITIES

WWN-3 is gebruikt om te bepalen hoe een combinatie van langdurige verzuring (veroorzaakt door N-depositie) en een extreme droogte (zoals in het jaar 2018) doorwerkt op veranderingen in de standplaatscondities. Naast N-depositie, pH en aluminium zijn ook transpiratiestress (TS) en respiratiestress (RS) in deze analyse meegenomen. De ruimtelijke patronen van de gesimuleerde standplaatscondities zijn plausibel bevonden. Vervolgens is bepaald in hoeverre berekende veranderingen in de standplaatscondities kunnen hebben geleid tot waargenomen bossterfte. Voor dat laatste zijn gegevens uit de Nederlandse Bosinventarisatie gebruikt.

Er is vaak een negatief verband tussen transpiratiestress en bossterfte. Dat betekent dat bomen op natte en vochtige standplaatsen meer last hebben gehad van extreme droogtes (zoals in 2018) dan bomen op droge standplaatsen. Dit is een belangrijke uitkomst. De bijbehorende hypothese kan zijn dat bomen op droge standplaatsen al zodanig zijn aangepast dat ze tegen een langere droge periode opgewassen zijn. Vervolgonderzoek is nodig om deze hypothese te bevestigen.

ACTUALISATIE HUIDIGE ONDERDELEN WWN

Naast het inbouwen van nieuwe mogelijkheden in de WWN, is het nodig om de bestaande WWN-onderdelen te onderhouden. In WWN-3 zijn zowel de knikpuntentabel, onderdeel van deelprogramma WATERNOOD, als de gebruikte bodemfysische eigenschappen geactualiseerd. De knikpuntentabel, onderdeel voor berekening van doelrealisatie van vegetatie in WATERNOOD, is aangevuld met knikpunten volgens de gereviseerde plantengemeenschappen van Nederland. Ook zijn er nu rompgemeenschappen in de knikpuntentabel opgenomen, en kan worden gewerkt met een verbetering van de Staatsbosbeheer-typologie. Door aanpassingen van de bodemfysische eigenschappen in de metarelaties is WWN-3 aangesloten op de recentste bodemparameterisatie die op het moment van uitvoering van dit onderzoek beschikbaar was.

CONCLUSIES EN MEERWAARDE WVN-3

Voor de nieuwe versie van de Waterwijzer Natuur (WVN-3) zijn procesmatige verbeteringen doorgevoerd en is de gebruikersschil verbeterd. In WVN-3 wordt nu ook rekening gehouden met depositie van stikstof en zuur. Daartoe is nieuwe wetenschappelijke kennis operationeel gemaakt. Lokaal uitgevoerde toetsingen geven vertrouwen in deze versie van de WVN. De nieuwe WVN-3 biedt de gebruiker gelegenheid om eenvoudig door te rekenen hoe individuele én gecombineerde effecten van waterhuishouding, klimaat, en zuur- en stikstofdepositie ruimtelijk doorwerken op de natuur(waarde). Ondanks dat er natuurlijk aanbevelingen voor verdere verbeteringen en uitbreiding zijn, zijn deze mogelijkheden ongeëvenaard en van grote meerwaarde.

DOWNLOAD LINKS

De Waterwijzer Natuur is vrij beschikbaar en te downloaden op <https://www.kwrwater.nl/tools-producten/waterwijzer-natuur/> of via deze link: [Waterwijzer Natuur - KWR \(kwrwater.nl\)](#)

Zie [Waterwijzers: de relaties tussen klimaat, waterbeheer, landbouw en natuur in kaart - Stowa Waterwijzer](#) voor meer algemene informatie over de Waterwijzers.

DE STOWA IN HET KORT

STOWA is het kenniscentrum van de regionale waterbeheerders (veelal de waterschappen) in Nederland. STOWA ontwikkelt, vergaart, verspreidt en implementeert toegepaste kennis die de waterbeheerders nodig hebben om de opgaven waar zij in hun werk voor staan, goed uit te voeren. Deze kennis kan liggen op toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied.

STOWA werkt in hoge mate vraaggestuurd. We inventariseren nauwgezet welke kennisvragen waterschappen hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers. Het initiatief daarvoor ligt veelal bij de kennisvragende waterbeheerders, maar soms ook bij kennisinstellingen en het bedrijfsleven. Dit tweerichtingsverkeer stimuleert vernieuwing en innovatie.

Vraaggestuurd werken betekent ook dat we zelf voortdurend op zoek zijn naar de 'kennisvragen van morgen' – de vragen die we graag op de agenda zetten nog voordat iemand ze gesteld heeft – om optimaal voorbereid te zijn op de toekomst.

STOWA ontzorgt de waterbeheerders. Wij nemen de aanbesteding en begeleiding van de gezamenlijke kennisprojecten op ons. Wij zorgen ervoor dat waterbeheerders verbonden blijven met deze projecten en er ook 'eigenaar' van zijn. Dit om te waarborgen dat de juiste kennisvragen worden beantwoord. De projecten worden begeleid door commissies waar regionale waterbeheerders zelf deel van uitmaken. De grote onderzoekslijnen worden per werkveld uitgezet en verantwoord door speciale programmacommissies. Ook hierin hebben de regionale waterbeheerders zitting.

STOWA verbindt niet alleen kennisvragers en kennisleveranciers, maar ook de regionale waterbeheerders onderling. Door de samenwerking van de waterbeheerders binnen STOWA zijn zij samen verantwoordelijk voor de programmering, zetten zij gezamenlijk de koers uit, worden meerdere waterschappen bij één en het zelfde onderzoek betrokken en komen de resultaten sneller ten goede aan alle waterschappen.

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

Het samen met regionale waterbeheerders definiëren van hun kennisbehoeften op het gebied van het waterbeheer en het voor én met deze beheerders (laten) ontwikkelen, bijeenbrengen, beschikbaar maken, delen, verankeren en implementeren van de benodigde kennis.

WATERWIJZER NATUUR - FASE 3: KLIMAATROBUUSTE MODELLERING VAN EFFECTEN VAN ZUUR- EN STIKSTOFDEPOSITIE OP NATUUR

INHOUD

TEN GELEIDE
SAMENVATTING

DE STOWA IN HET KORT

1	INLEIDING	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Doelstelling	2
1.3	Leeswijzer	2
2	WWN-3: MODELLERING EFFECTEN ATMOSFERISCHE DEPOSITIE OP VOEDSELRIJKDOM EN ZUURGRAAD	4
2.1	Oorspronkelijke berekening voedselrijkdom in WWN-2	4
2.2	Aangepaste berekening voedselrijkdom in WWN-3	5
2.2.1	Methode	5
2.2.2	Meerwaarde van de aanpassing van berekening voedselrijkdom	7
2.3	Aangepaste berekening van zuurgraad in WWN-3	7
2.3.1	Oorspronkelijke berekening zuurgraad	7
2.3.2	Berekening zuurgraad WWN-3	8
2.3.3	Meerwaarde van de aanpassing van berekening zuurgraad	11
2.4	Harmonisatie VSD+ – CENTURY – SWAP	11
2.4.1	Achtergrond	11
2.4.2	Aandachtspunten en aanpassingen	12
2.4.3	Meerwaarde harmonisatie en modelanalyse VSD+ - CENTURY – SWAP	15
3	WWN-3: PLAUSIBILITEITSSTUDIE	16
3.1	Plausibiliteit effect stikstofdepositie	16
3.1.1	Verwachting	16
3.1.2	Beschrijving van Sang en Goorkens	16
3.1.3	Invoergegevens Sang & Goorkens (omschrijving overgenomen uit Witte et al., 2020)	18
3.1.4	Resultaten: effect van zuur- en stikstofdepositie op natuur	21
3.1.5	Resultaten: effecten van depositie bij klimaatverandering	24
3.2	Vergelijking WWN versies	25
3.3	Conclusie	26
3.4	Landelijke validatie	26
3.4.1	Methode	26
3.4.2	Resultaten	27
3.4.3	Conclusie	31

4	INVLOED VAN EXTREEM DROGE JAREN OP STANDPLAATSCONDITIES	32
4.1	Aanleiding	32
4.1.1	Achtergrond droogte	32
4.1.2	Aanpak en afbakening	33
4.1.3	Effect van droogte op bosvitaliteit	34
4.1.4	Gesimuleerde standplaatscondities in 2018	36
4.1.5	Resultaten	37
4.1.6	Discussie	41
4.1.7	Conclusie	43
4.1.8	Meerwaarde	43
5	ACTUALISATIE WATERWIJZER NATUUR	44
5.1	Uitbreiding van de knikpuntentabel	44
5.1.1	Achtergrond	44
5.1.2	Methode	45
5.1.3	Handleiding bij gebruik nieuwe knikpunten	46
5.1.4	Meerwaarde	46
5.2	Aanpassing in bodemfysische eenheden	47
5.2.1	Achtergrond	47
5.2.2	Metarelaties in WVN-3	48
5.2.3	Resultaten	48
5.2.4	Meerwaarde	49
6	CONCLUSIE	50
7	DISCUSSIE	52
7.1	Verbeteren van de voedselrijkdom	52
7.2	Invloed van extreem droge jaren op standplaatscondities	53
7.3	Actualisatie huidige onderdelen Waterwijzer Natuur	54
8	AANBEVELINGEN	55
8.1	Validatie door gebruikers van de nieuwe WVN-3.03	55
8.2	Meer inzicht geven in onderliggen processen	55
8.3	Centraal registreren van bodemfysische en -chemische gegevens	56
8.4	Aanpassen van stofconcentraties in kwelwater	56
8.5	Dynamische versie van de WVN	56
8.6	Initiële condities rechtstreeks ontleen aan procesmatige simulaties van CENTURY en VSD+	57
8.7	Aanpassen metarelaties en actualisatie	58
8.8	Aanbevelingen t.a.v. gebruik van de WVN-3	58
9	LITERATUUR	60
	BIJLAGEN	65
BIJLAGE I	PROCEDURE VOOR HET VERWERKEN VAN DE N-DEPOSITIEKAART	66
BIJLAGE II	CONVERSIETABEL VOEDSELRIJKDOM: VAN KLASSE NAAR INDICATIEWAARDE	68
BIJLAGE III	REVISIE VSD+ EN METARELATIES PH VOOR NATTE OMSTANDIGHEDEN	73
BIJLAGE IV	HARMONISATIE CENTURY – VSD+ – SWAP	79
BIJLAGE V	GECOMBINEERD EFFECT VAN DROOGTE EN VERZURING OP STANDPLAATSCONDITIES	88
BIJLAGE VI	VERZURENDE DEPOSITIE: SO _x EN NO _x	104
BIJLAGE VII	AANPASSEN KNIKPUNENTABEL	106

1

INLEIDING

1.1 ACHTERGROND

In 2012 heeft STOWA het initiatief genomen voor de ontwikkeling van een breed gedragen instrument waarmee kan worden bepaald wat de effecten van klimaatverandering en waterbeheer zijn op terrestrische vegetatie van natuurgebieden. Dit instrument is nodig om vragen te kunnen beantwoord zoals:

- Welke maatregelen zijn er nodig om natuurdoelen in de toekomst zeker te stellen?
- Welke alternatieve doelen kunnen we overwegen als in het verleden vastgestelde natuurdoelen niet meer haalbaar blijken te zijn onder een veranderd klimaat?
- Waar liggen straks, in het klimaat van de toekomst, de beste kansen voor het creëren van hotspots van biodiversiteit?

Ontbreekt het de waterbeheerder en beleidsmaker aan een dergelijk instrument, dan kan dat leiden tot een beleid en beheer dat onvoldoende is afgestemd op de natuur, en op een navenant suboptimale besteding van financiële middelen voor de natuur. Het is relevant voor zowel de overheid als voor gebiedspartijen te weten of een investering in de natuur blijvend resultaat oplevert, of dat er op termijn een nieuwe investering nodig zal zijn.

Het doel van STOWA was daarom om een breed gedragen gebruiksvriendelijk en klimaatrobuust toetsings- en voorspellingsinstrument te ontwikkelen waarmee waterbeheerders en beleidsmakers hun beheer en beleid beter kunnen afstemmen op de vegetatie van natuurgebieden. Dit instrument resulteerde in de ontwikkeling van de Waterwijzer Natuur (WWN).

STOWA, het ministerie van EZ, Rijkswaterstaat-WVL en de stichting Kennis voor Klimaat lieten een verkennend onderzoek verrichten waarin verschillende modelconcepten met elkaar werden vergeleken (Van Ek *e.a.*, 2014). Dit resulteerde in een visie van hoe zo'n Waterwijzer Natuur eruit zou moeten zien, welke bouwstenen daarvoor al klaarliggen, en welke kennis nog moet worden ontwikkeld. Samengevat was het advies:

- Gebruik het model PROBE (Witte *e.a.*, 2015b) als basis voor de ontwikkeling van de Waterwijzer Natuur;
- Besteed vooral aandacht aan de zwakste modelonderdelen: de berekening van de zuurgraad en nutriëntenstatus van de bodem;
- Zorg voor een gebruiksvriendelijke schil.

In de eerste fase is een gebruiksvriendelijke schil gemaakt op basis van bestaande kennis. Het opgeleverde model is getoetst op enkele natuurgebieden, in een workshop getest op gebruiksgemak, en voorzien van een handleiding (Witte *e.a.*, 2018a). Bovendien is er een inventariserende studie uitgevoerd naar de beschikbare modelconcepten en meetgegevens die nodig zijn om de zwakste onderdelen van de WWN te verbeteren: de berekening van de zuurgraad en de nutriëntenstatus van de bodem (Kros *e.a.*, 2017). In Fase 2 van de ontwikkeling zijn de werkzaamheden uitgevoerd om de berekening van de zuurgraad te verbeteren. De resultaten

daarvan zijn beschreven in (Witte *e.a.*, 2020a), en hebben geleid tot een vernieuwd versie van de WWN: WWN-2. In dit rapport worden de werkzaamheden beschreven die onderdeel zijn van Fase 3 van de ontwikkeling van de WWN, en bedoeld zijn om het onderdeel voedselrijkdom te verbeteren.

1.2 DOELSTELLING

In dit onderzoek wordt het onderdeel voedselrijkdom van de WWN verbeterd. De werkzaamheden maken deel uit van **Fase 3** van de ontwikkeling van de WWN (resultierend in de nieuwe versie WWN-3). Bij de verbetering van de voedselrijkdom wordt, naast een naar verwachting hogere voorspelkwaliteit van de WWN, bovendien aangesloten bij de actuele stikstofproblematiek. De WWN wordt als instrument geschikt gemaakt voor inzet bij lokale herstel- en beheerplannen van (Natura 2000) natuurgebieden. Het doel is om, na uitvoering van het project, met de WWN effecten van (verandering in) stikstofdepositie op de voedselrijkdom en vegetatie te kunnen bepalen. Hierbij dient te worden opgemerkt dat voedselrijkdom complexe materie betreft, en het op voorhand niet vast staat dat dit doel volledig behaald wordt.

Daarnaast, ingegeven door de extreme droogte in recente jaren en op advies van de begeleidingscommissie, wordt de nieuwe WWN toegepast om het gecombineerd effect van droogte én verzuring te berekenen en te toetsen. Door de procesmatige aanpak is de WWN in staat het complexe samenspel tussen water, zuurgraad, en voedselrijkdom te verdisconteren, en daarom bij uitstek geschikt om dergelijke vraagstukken te behandelen. Naast de inhoudelijke verbeteringen in de WWN, dienen een aantal onderdelen te worden geactualiseerd, om aan te sluiten bij recente invoergegevens en betrouwbare uitkomsten te leveren.

Samengevat zijn de doelen van deze projectfase:

1. De berekening van de voedselrijkdom met de WWN zodanig verbeteren en aan te passen zodat dit instrument geschikt wordt voor inzet bij lokale herstel- en beheerplannen van (Natura 2000) natuurgebieden;
2. Middels toepassing van de WWN inzichtelijk maken wat de invloed van extreem droge jaren is, in combinatie met stikstofdepositie;
3. Actualisatie van onderdelen van de huidige WWN

1.3 LEESWIJZER

In dit rapport is de essentie van de verschillende onderdelen beschreven in de hoofdtekst. Voor meer uitleg en wetenschappelijke onderbouwing wordt de lezer verwezen naar de bijlagen. Om de leesbaarheid te vergroten zijn daarom sommige figuren zowel in de hoofdtekst als in de bijlage opgenomen.

In het volgende hoofdstuk wordt ingegaan op de veranderingen in de WWN die zijn uitgevoerd om de berekening van voedselrijkdom te verbeteren. In hoofdstuk 3 wordt de plausibiliteit van de nieuwe WWN (WWN-3) getoetst. Daartoe wordt eerst geïllustreerd welke uitwerking depositiescenario's hebben op vegetatie. Vervolgens wordt WWN-3 toegepast op een proefgebied om de nieuwe WWN versie te vergelijken met eerdere WWN versies, en worden de uitkomsten op plausibiliteit getoetst met observaties op landelijk niveau. In Hoofdstuk 4 wordt de nieuwe WWN toegepast om te bepalen wat het gecombineerde effect van extreme droogte en langdurige verzuring, als gevolg van depositie, is op standplaatscondities. De actualisatie van de WWN met nieuwe knikpunten en aangepaste bodemfysische eigenschappen

komt in Hoofdstuk 5 aan bod. Elke paragraaf wordt besloten met een samenvatting van de meerwaarde van de ondernomen activiteiten.

In dit rapport wordt een groot aantal symbolen gebruikt. Om de lezer wat houvast te geven, volgt hier een korte toelichting van de symbolen die tot verwarring kunnen leiden.

Fm	= indicatiewaarde voor vocht
N	= stikstof
Nm	= indicatiewaarde voor voedselrijkdom
Nmin	= stikstof mineralisatie
Rm	= indicatiewaarde voor zuurgraad
Pmin	= fosfor mineralisatie

2

WWN-3: MODELLERING EFFECTEN ATMOSFERISCHE DEPOSITIE OP VOEDSELRIJKDOM EN ZUURGRAAD

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de veranderingen die in de WWN-3 zijn aangebracht om rekening te kunnen houden met atmosferische depositie van stikstof en zuur. Voor een technische beschrijving van de manier waarop deze veranderingen zijn doorgevoerd, verwijzen we naar Bijlage I. Atmosferische depositie heeft effect op zowel voedselrijkdom als zuurgraad. In dit hoofdstuk wordt voor deze standplaatsfactoren eerst kort samengevat hoe zuurgraad en voedselrijkdom in de vorige WWN versie (WWN-2) werden berekend. Daarna komt aan bod hoe deze standplaatsfactoren zijn aangepast om effecten van atmosferische depositie te verdisconteren. Vervolgens wordt beschreven welke stappen ondernomen zijn om de modellen SWAP – VSD+ - CENTURY beter op elkaar aan te sluiten. Het hoofdstuk wordt besloten met een toetsing van het nieuwe WWN-3 instrumentarium. Hoe verhouden resultaten zich ten opzichte van vorige modelversies, en in hoeverre komt het (beter) overeen met observaties van vegetatie?

2.1 OORSPRONKELIJKE BEREKENING VOEDSELRIJKDOM IN WWN-2

De vorige versies van de WWN (WWN-1 en WWN-2), onderdeel PROBE, maken voor het berekenen van de voedselrijkdom gebruik van een hybride oplossing: zowel kennisregels als procesmodellen worden gebruikt (Witte *e.a.*, 2015a; Witte *e.a.*, 2018a; Witte *e.a.*, 2020a). De uitgangstoestand van voedselrijkdom in het huidige klimaat wordt eerst in een beperkt aantal voedselrijkdomklassen ingedeeld aan de hand van de kennisregels uit de kansrijkdom-module van WATERNOOD (De Haan *e.a.*, 2010). Vervolgens worden deze klassen omgezet in de Runhaar-indicatiewaarde voor voedselrijkdom van de vegetatie (Nm) in de referentiesituatie (huidige klimaat en huidige hydrologie op basis van een conversietabel (Van Ek *e.a.* (2014), zie Bijlage II).

$$\text{Verg. 2-1: } Nm(\text{scenario}) = Nm(\text{referentie}) + \Delta Nm$$

Vervolgens wordt met een aangepaste versie van het model CENTURY (Fujita *e.a.*, 2013b) de verandering in de mineralisatie van fosfaat (P) procesmatig gesimuleerd. Voedselrijkdom wordt in deze WWN versies dus benaderd met fosfaatbeschikbaarheid en niet met stikstof (N). De hydrologische invoer in de CENTURY simulaties is afkomstig van het model SWAP (Van Dam *e.a.*, 2008), dat de waterhuishouding in de bodem simuleert. De P-mineralisatie wordt daarna gebruikt om de verandering in de Runhaar-indicatiewaarde voor voedselrijkdom te berekenen met een op veldmetingen gebaseerde empirische relatie tussen Nm en P-mineralisatie (Fujita *e.a.*, 2013a):

Deze werkwijze is gevolgd omdat we nog onvoldoende vertrouwen hebben in de berekening van de referentie met CENTURY en meer vertrouwen hebben in de gesimuleerde verandering van P_{min} en N_m . Dit komt vooral doordat de relatie tussen indicatiewaarde N_m en gesimuleerde P_{min} zwak is. Bovenstaande procedure kent een aantal nadelen:

1. De procedure is niet volledig procesmatig: de referentiesituatie wordt nog geschat met behulp van kennisregels
2. Er wordt geen rekening gehouden met het effect van atmosferische depositie van stikstofverbindingen op voedselrijkdom
3. Er wordt geen rekening gehouden met effecten van depositie op de bodem-pH

2.2 AANGEPASTE BEREKENING VOEDSELRIJKDOM IN WWN-3

2.2.1 METHODE

In de nieuwe WWN versie blijven we voor het inschatten van voedselrijkdom uitgaan van dezelfde combinatie van kennisregels en het procesmodel CENTURY als in de vorige versies. Binnen het huidige project hebben we niet kunnen onderzoeken of het verantwoord is om van de initialisatie (referentie scenario) met kennisregels af te stappen. Daardoor blijft het in de vorige paragraaf genoemde eerste bezwaar dus behouden. De andere twee bezwaren zijn wel aangepakt. In deze paragraaf wordt ingegaan op het tweede bezwaar, in paragraaf 2.3 wordt het effect van depositie op de bodem-pH behandeld.

Als maat voor de voedselrijkdom van de bodem wordt in de nieuwe versie (WWN-3) niet meer alleen gebruik gemaakt van de P-mineralisatie, maar ook van de N-mineralisatie: N_{min} (kg N/ha/jr). Beide worden in WWN-3, net als in de vorige WWN versies, afgeleid uit transpiratiestress en respiratiestress (Witte *e.a.*, 2018a). De N-mineralisatie wordt bepaald met een metarelatie met transpiratie- en respiratiestress, zoals dat ook in de eerdere WWN versies gebeurde (Witte *e.a.*, 2020a). Om rekening te houden met atmosferische N-depositie tellen we daar vervolgens de helft van de atmosferische N-depositie bij op: $0.5 \times N_{atm}$ (kg N/ha/jr). De helft, omdat we veronderstellen dat deze N-bron alleen beschikbaar is voor de vegetatie tijdens het groeiseizoen; in de andere helft van het jaar vervluchtigt deze bron door denitrificatie. Vervolgens wordt de voedselindicatie mN berekend aan de hand van de empirische relatie in Verg. 2-2 (Figuur 2.3) die is gebaseerd op 122 metingen van Fujita *e.a.* (2013a) in natuurlijke systemen. Voor technische uitwerking van de totstandkoming van deze vergelijking verwijzen we naar Bijlage II.I.

$$\text{Verg. 2-2: } mN = 0.37 + 0.24 \times \ln(N_{min} + 0.5 \times N_{atm} + e) + 0.70 \times \frac{\ln(P_{min} + e)}{\ln(N_{min} + e)}$$

In Verg. 2-2 is e het grondtal van de natuurlijke logaritme (2.718). Om rekening te houden met het feit dat vegetatie vaak óf P- óf N-gelimiteerd is, is ook de N:P ratio meegenomen. De bovenstaande relatie verklaart 35% van de variatie in mN ($R^2_{adj} = 0.34$). In eerdere versies van deze metarelatie was ook zuurgraad meegenomen, die ook invloed heeft op nutriëntenbeschikbaarheid. Weliswaar leidde dat tot een hogere R^2_{adj} , maar ging dat ook gepaard met theoretische vraagstukken en foutieve voorspellingen in de WWN. In Bijlage II.I wordt hier verder op in gegaan.

De atmosferische stikstofdepositie N_{atm} in Verg. 2-2 is nieuw, en is voor de referentiesituatie afgeleid uit de Grootchalige Depositiekaart Nederland (GDN) van het RIVM¹ voor het

1 <https://www.rivm.nl/gcn-gdn-kaarten/depositiekaarten/cijfers-achter-depositiekaarten/gdn-depositiebestanden-achterliggende-jaren>

jaar 2019 (Figuur 2.3). Deze N_{atm} kan rechtstreeks in Verg.2-2 worden gebruikt. Hierbij wordt aangenomen dat de extra stikstofaanvoer via depositie een verwaarloosbaar effect heeft op de mineralisatiesnelheid van stikstof en fosfor.

Depositie-scenario's kunnen in de WWN-interface worden opgegeven met behulp van een depositiefactor (Figuur 2.1). De depositie in de referentiesituatie (2019) wordt met deze depositiefactor vermenigvuldigd. Deze factor heeft een bereik van 0.15 x de minimale landelijke N-depositie in 2019 tot 1.5 x de maximale landelijke N-depositie in 2019. Deze factor wordt voor het gehele modeldomein toegepast. In overleg kan de WWN worden opengesteld voor toepassingen waarin de procentuele toe- of afname van de depositie ruimtelijk varieert.

FIGUUR 2.1 DE DEPOSITIEFACTOR IN WWN-3 WAARMEE DE DEPOSITIE (ZUUR EN STIKSTOF GELIJKTIJDIG) KAN WORDEN Aangepast. EEN KLEINE VISUELE AANPASSING IN DE SCHIL DIE DE MOGELIJKHEDEN VOOR DE WWN-gebruiker AANZIENLIJK VERGROOT

Voorspellen met PROBE

Type berekening: Scenario

KNMI klimaatscenario: WH Ander scenario

Zichtjaar: 2050 Ander zichtjaar

Vegetatiestructuur: Vegetaties met huidige vegetatiestructuur en ligging van natuurgebieden

Natuurwaarderingsmethode: Methode Gelderland (Hertog & Rijken, 1992)

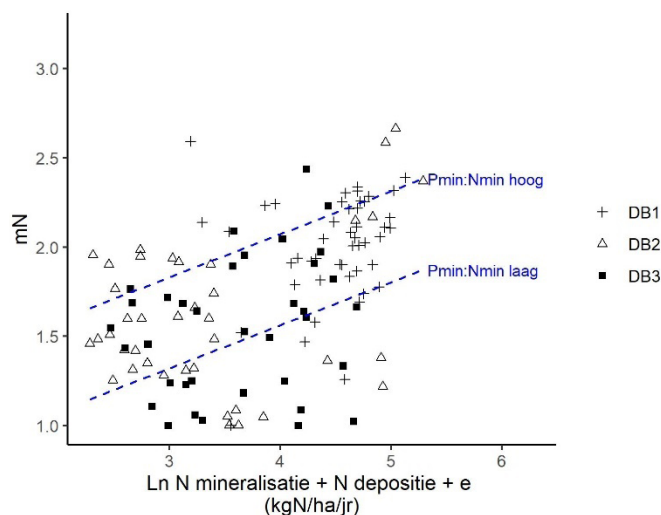
Depositiefactor: (waarde tussen 0.15 - 1.50)

Specificeer hydrologische invoer

Vegetatietypologie

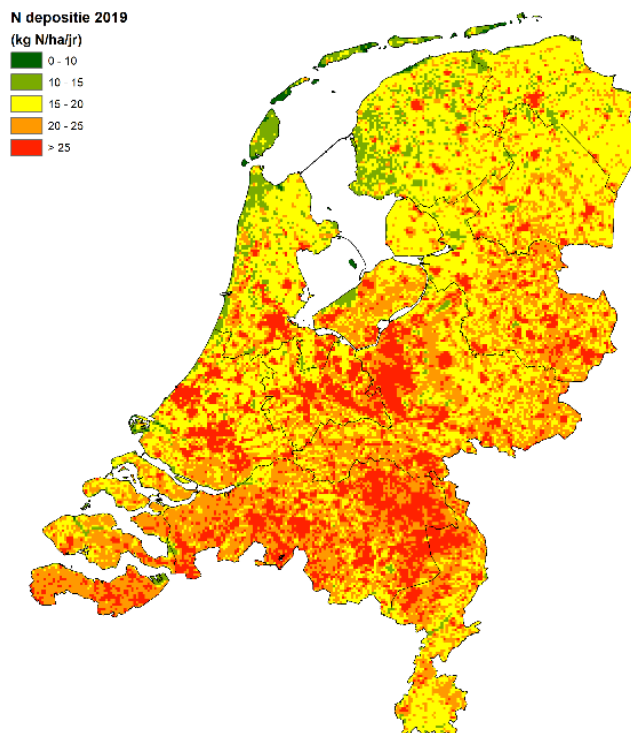
Run Probe

FIGUUR 2.2 RELATIE TUSSEN GEMIDDELDE INDICATORWAARDE VAN NUTRIËNTEN (mN) EN TOTALE N BESCHIKBAARHEID (IN KG N/HA/JR). N BESCHIKBAARHEID IS DE SOM VAN JAARLIJKE N MINERALISATIESNELHEID VAN DE BODEM EN N-DEPOSITIE TIJDENS HET GROEISEIZOEN (HELFT JAARLIJKE DEPOSITIE). DE BLAUWE STIPPELLIJNEN TONEN DE REGRESSIELIJN BIJ HOGE (95% PERCENTIEL; 1.05) EN LAGE $P_{min}:N_{min}$ RATIOS (5% PERCENTIEL, 0.32). VERSCHILLENDE SYMBOLEN GEVEN DRIE VERSCHILLENDE DATABASES WEER (DB1: OLDE VENTERINK ET AL. 2002, DB2: ORDONEZ ET AL. 2010, DB3: FUJITA ET AL. 2013B). DE RELATIE HEEFT EEN R^2_{adj} VAN 0.34 EN IS GEBASEERD OP 122 OBSERVATIES VAN N_{min}



FIGUUR 2.3

DE TOTALE N DEPOSITIE ($\text{NO}_x + \text{NH}_3$) VOOR HET JAAR 2019 OP EEN RESOLUTIE VAN 1 KM \times 1 KM GEBASEERD OP DE DEPOSITIEKAARTEN VAN HET RIVM ([HTTPS://WWW.RIVM.NL/GCN-GDN-KAARTEN/DEPOSITIEKAARTEN/CIJFERS-ACHTER-DEPOSITIEKAARTEN/GDN-DEPOSITIEBESTANDEN-ACHTERLIGGENDE-JAREN](https://www.rivm.nl/gcn-gdn-kaarten/depositiekaarten/cijfers-achter-depositiekaarten/gdn-depositiebestanden-achterliggende-jaren))



2.2.2 MEERWAARDE VAN DE AANPASSING VAN BEREKENING VOEDSELRIJKDOM

De nieuwe berekening van de voedselrijkdom heeft de volgende voordelen ten opzichte van vorige WWN-versies:

1. Met de nieuwe WWN versie (WWN-3) is het mogelijk om de effecten van stikstof- en zuurdepositie op natuur te kwantificeren.
2. In de vorige versies kon de WWN-gebruiker scenario's voor klimaat en waterhuishouding opgeven. In de WWN-3 komt daar een depositiescenario bij. Daardoor is het mogelijk om gecombineerde en interactieve effecten tussen stikstofdepositie, verdroging, en klimaatverandering op natuur te kwantificeren. Met scenario-analyse is het nu eenvoudig mogelijk het aandeel van atmosferische depositie, waterhuishouding, en klimaat op natuur te kwantificeren.
3. Door het meer procesmatig modelleren van de voedselrijkdom wordt een realistischere inschatting gegeven van de voedselrijkdom in de referentiesituatie. Ook de voorspelde effecten van klimaatverandering op de N-beschikbaarheid zijn daardoor realistischer.

2.3 AANGEPASTE BEREKENING VAN ZUURGRAAD IN WWN-3

2.3.1 OORSPRONKELIJKE BEREKENING ZUURGRAAD

De berekening van de zuurgraad van de bodem is uitgevoerd met het VSD+ model (Bonten *e.a.*, 2016)2016. Voor de berekening van de bodem-pH zijn diverse aanpassingen gedaan aan het VSD+ model. Allereerst is VSD+ geschikt gemaakt voor de aanvoer van kwelwater naar de wortelzone. Kwelwater is vaak baserijk en kan daardoor zorgen voor een vrij stabiele en neutrale tot basische bodem-pH. Daarnaast zijn omzettingsprocessen die door de zuurgraad worden beïnvloed (en vice versa) zo goed mogelijk gekwantificeerd aan de hand van

literatuuronderzoek en veldmetingen: de afbraak van organische stof (mineralisatie) en de omzetting van stikstofverbindingen (nitrificatie en denitrificatie). Dit zijn processen die in sterke mate de zuurproductie en zuurconsumptie beïnvloeden. Samen met mineraalverwerking en de uitwisseling met kationen zijn deze processen van invloed op de basenverzadiging van de bodem. De beschrijving tussen basenverzadiging en pH is in deze studie voor vier grondsoorten (zand, klei, veen, löss) verbeterd. Met een validatie aan veldmetingen tonen wij aan dat VSD+ voor het beoogde doel de pH in natte en vochtige ecosystemen adequaat simuleert. Dat is relevant, omdat de pH (en niet de basenverzadiging) vervolgens wordt gebruikt in PROBE om de kansrijkdom van vegetatietypen te voorspellen. PROBE rekent met metarelaties: statistische verbanden op basis van talloze modelsimulaties tussen invoervariabelen en benodigde uitvoervariabelen (Figuur 2.4).

2.3.2 BEREKENING ZUURGRAAD WVN-3

Ten opzichte van de eerdere VSD+ versie zijn een aantal aanpassingen gemaakt om deze geschikter te maken voor natte omstandigheden in gebieden onder sterke kwelinvloed (zie bijlage III voor details). In VSD+ vinden omzettingen van stikstof plaats die invloed hebben op de zuurgraad. Nitrificatie produceert zuur, en denitrificatie consumeert zuur. De nitrificatie en denitrificatie zijn afhankelijk van vochtgehalte, en geparameteriseerd op basis van meetgegevens. Het bereik van deze meetgegevens omvat echter niet de zeer natte omstandigheden zoals die bestaan in een deel van de kwelgebieden waar de bodem het hele jaar door volledig waterverzadigd is. In deze waterverzadigde systemen berekende VSD+ een toename van de pH bij toenemende N depositie doordat de nitrificatie (vrijwel) volledig werd geremd. In VSD+ zijn de nitrificatie en denitrificatie snelheden nu begrensd, waardoor bij hoge kwelfluxen de berekende pH weer gelijk wordt aan de pH van het kwelwater wat realistisch is in deze door kwel gedomineerde bodems. Opgemerkt dient te worden dat de huidige versie van VSD+, buiten nitrificatie/denitrificatie, geen overige redox-processen omvat waarin bijvoorbeeld sulfaat een rol speelt. Dergelijke processen kunnen juist in kwelzones effect hebben op de zuurgraad.

In VSD+ wordt de aanvoer van ionen via kwel bepaald door de kweltype. Bij elk kweltype horen concentraties van ionen en een pH. Doordat die concentraties zijn gemiddeld over alle waarnemingen, klopt de pH niet met de ladingsbalans van de ionconcentraties. In VSD+ is dit gecorrigeerd door aan de kwel fosfaat toe te voegen in een zodanige concentratie dat de ladingsbalans weer klopt en bij zeer hoge kwelflux de bodem pH vrijwel gelijk wordt aan die van het kwelwater (Witte *e.a.*, 2020a). Behalve in de ladingsbalans speelt fosfaat in deze versie van VSD+ geen rol in de chemische reacties.

Met VSD+ worden voor iedere bodemfysische eenheid (BOFEK) simulaties uitgevoerd om een zuurgraad te berekenen (Figuur 2.4). Per BOFEK eenheid worden berekeningen gedaan met 100 verschillende kwelfluxen (van geen kwel tot veel kwel), voor 5 vegetatietypen en voor alle 5 kweltypes (beschreven in Witte et al., 2020). Dit levert in de basis 2500 combinaties van kwelflux met kweltype op. Daar worden dan in WVN-3 nog 15 scenario's met N depositie aan toegevoegd, zodat er per BOFEK eenheid uiteindelijk 37500 simulaties worden uitgevoerd waarvoor de pH wordt berekend (Figuur 2.4). De simulaties starten in 1880 en lopen door tot 2050. Het is belangrijk om de simulaties in 1880 te beginnen om het model goed te initialiseren: we veronderstellen dat er dan (pre-industrieel) een stabiele situatie is tussen de depositie, geadsorbeerde kationen en ionen in de bodemoplossing. Om het model VSD+ te kunnen toepassen, is informatie nodig over de hydrologie, bodem (o.a. kleigehalte, dichtheid, organisch stofgehalte) en vegetatie.

De benodigde hydrologische invoer bestaat uit jaarsommen van neerslag, verdamping en kwel/infiltratie. Daarnaast zijn maandgegevens nodig van het gemiddelde vochtgehalte en temperatuur van de wortelzone (15 cm) voor het berekenen van de organische-stofdynamiek. De benodigde hydrologische invoer is afkomstig uit SWAP, waarmee het transport van water in de onverzadigde zone op dagbasis is gesimuleerd voor het huidige klimaat en klimaatscenario's. Zie Witte *e.a.* (2020a) voor meer informatie.

De parameterisatie van bodem en vegetatie is gebaseerd op toepassingen voor de modellen SMART2 en VSD+ voor Nederland. Voor de bodem zijn zeven verschillende typen gedefinieerd: arm zand, rijk zand, kalkrijk zand, kalkloze klei, kalkrijke klei, veen en löss (Kros *e.a.*, 2016). De VSD+ bodemtypen zijn afgeleid uit de BOFEK. Naast de bodemparameters zijn er modelparameters die afhangen van alleen het vegetatietype: deze parameters, zoals nutriëntengehalten in stammen en bladeren, zijn gedefinieerd voor vijf vegetatietypes: loofbos, dennenbos, sparrenbos, heide en onbemeste graslanden (Kros *e.a.*, 2016). De groei van de vegetatie (die de opname van nutriënten uit de bodem bepaalt) is afhankelijk van de combinatie bodem × vegetatie. Daarbij is rekening gehouden met de invloed van veranderingen in klimaat, N-depositie en ozonconcentraties tussen 1880 en 2050 op de bosgroei op basis van berekeningen van De Vries *e.a.* (2017). Per jaar is een factor bepaald waarmee de groei is vermenigvuldigd.

De depositie van verzurende stoffen (SO_x , NO_x , NH_3) voor de periode 1880-2020 is per BOFEK-eenheid bepaald op basis van ruimtelijk expliciete ($1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$) gegevens van het RIVM voor de jaren 1981, 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2018 (Velders *e.a.*, 2015) en voor de depositie van basische kationen en chloride (Ca, Mg, K, Na, Cl) voor de periode 2000-2005 (Van Jaarsveld *e.a.*, 2010). Per BOFEK-eenheid is de gemiddelde depositie bepaald op basis van alle $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ cellen die binnen de betreffende BOFEK-eenheid voorkomen. Voor de verzurende stoffen zijn waarden voor de tussenliggende jaren bepaald met lineaire interpolatie tussen de beschikbare gegevens. Voor het bepalen van de verzurende depositie voor 1981 is gebruik gemaakt van schattingen van het verloop van de depositie in Nederland op basis van data uit Schöpp *e.a.* (2003). De depositie van basische kationen is constant in de tijd verondersteld.

Voor het jaar 2030 en daarna zijn 15 verschillende depositie scenario's gebruikt. Het verzurend vermogen van een stof wordt uitgedrukt in zuur-equivalenten per hectare (zuur-eq/ha). Een zuur-equivalent is een maat voor de hoeveelheid zuur (H^+ in mol/ha) die kan ontstaan in bodem of water. Hierbij geldt: 1 mol zwaveldioxide kan 2 mol zuur vormen, 1 mol stikstofoxiden kan 1 mol zuur vormen en 1 mol ammoniak kan 1 mol zuur vormen. Voor het scenario met de laagste depositie is uitgegaan van 200 zuur-eq/ha/yr voor de som van NO_x en SO_x . Dit komt ongeveer overeen met de waarde van de depositie in Nederland in 2030 wanneer alle technische maatregelen worden ingezet om de emissies van SO_x en NO_x te verminderen (Amann *e.a.*, 2015). Ook voor NH_3 is voor de laagste waarde 100 zuur-eq/ha/yr aangenomen; dit is lager dan op basis van alleen technische maatregelen zou kunnen worden bereikt, waarmee we rekening houden met mogelijk andere, ruimtelijke en locatie-specifieke maatregelen die de ammoniak uitstoot verminderen. Het scenario met de hoogste depositie heeft een SO_x depositie van 450 zuur-eq/ha/yr (ongeveer 1.5 keer de huidige gemiddelde depositie in Nederland), een NO_x -depositie van 1500 eq/ha/yr en een NH_3 -depositie van 6000 zuur-eq/ha/jaar (voor beide stoffen is dat 1.5 keer de hoogste waarde in Nederland in 2020). Tussen deze laagste en hoogste waarde zijn 15 gelijke stappen in zuurdepositie (de som van SO_x , NO_x en NH_3) gedefinieerd via lineaire interpolatie tussen de hoogste en laagste waarden. De depositie van basische kationen is voor de scenario's constant in de tijd verondersteld. VSD+ rekt vervolgens alle scenario's door en schrijft per scenario de gebruikte depositie en de berekende

pH en Al concentratie tussen 1970 en 2050 elke tien jaar weg naar een uitvoerfile die gebruikt wordt voor het afleiden van de metarelaties.

NIEUWE METARELATIES VOOR PH

In de vorige WWN versie (WWN-2) werd de pH afgeleid uit de combinatie van bodemtype, klimaatscenario, klimaatdistrict, kweltype, GLG en kwelflux (Witte *e.a.*, 2020a). In de WWN-3 versie wordt deze combinatie aangevuld met de berekende zuur-depositie (zie Figuur 2.4). Op landelijk niveau is deze zuurdepositie voornamelijk afkomstig van N-verbindingen (75%) en SO_4 (ca. 15%) (Velders *e.a.*, 2015).

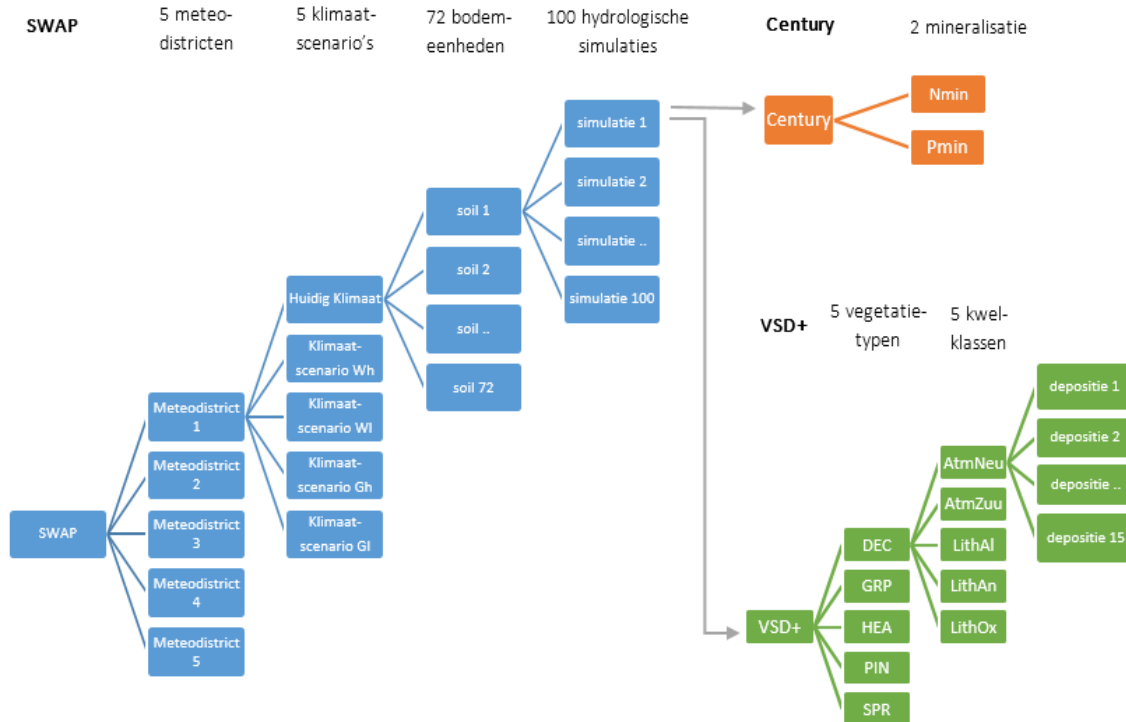
Er is aangenomen dat bij veranderingen in depositie-beleid de trend van atmosferische SO_x depositie gekoppeld is aan die van de N-depositie; we gaan ervanuit dat beleid gericht op het verminderen van emissies naar de lucht voor zowel N als S gelden. Door dit aan te nemen is voor verzurende depositie geen aparte zuurdepositiekaart nodig, maar leiden we deze af uit de stikstofdepositiekaart (Fig. 2.2) en de depositiefactor (zie sectie 2.2.1). Bij een afzonderlijke trend in S depositie t.o.v. N depositie wordt het aantal mogelijke combinatie te groot om nog door te rekenen en ontstaan er teveel metarelaties.

In de metarelaties van de voorgaande WWN versie (WWN-2) werd de bodem-pH bepaald op basis van GLG, kwelintensiteit, bodemtype, klimaat, en kwelkwaliteitsklasse. In de WWN-3 is daar het stikstofdepositieniveau aan toegevoegd, dat de gebruiker aan kan passen. Effecten van stikstofdepositie kunnen worden bepaald voor het referentieklimaat (zichtbaar 1995), en voor de 4 KNMI '14 scenario's (WH, WL, GH, GL (KNMI, 2015)) voor zichtjaar 2050.

Naast bovengenoemde aanpassingen, is de voorspelde zuurgraad nu niet meer begrensd. In vorige metarelaties werd de zuurgraad bij gegeven kwelflux en GLG begrensd door de minimum en maximum voorspelde pH die bij de betreffende GLG zou kunnen voorkomen. Deze begrenzing leek aanvankelijk nuttig, maar achteraf ook tot onrealistische voorspelde zuurgraad te leiden. Daarom is deze begrenzing van zuurgraad in de huidige WWN-3 verwijderd, wat heeft geleid tot realistischere gesimuleerde (verandering van) pH (Bijlage III.IV). Daarnaast leidde in sommige gevallen (kalkrijke situaties met ondiepe GLG of veel kwel, 0.25% van de situaties die voorkomen in het landoppervlak van Nederland) een hogere kwelflux tot een lagere pH. In deze gevallen overstemt kwelaanvoer kalkbuffering op kalkbodems, wat niet in overeenstemming is met de werkelijkheid. Dit is aangepast zodat kwel op deze bodems niet meer tot een lagere pH kan leiden dan op basis van een kalkrijke bodem verwacht kan worden.

FIGUUR 2.4

OVERZICHT VAN SIMULATIES MET DE MODELLEN SWAP, CENTURY EN VSD+ WAARMEE METARELATIES IN WATERWIJZER NATUUR 3 WORDEN OPGESTELD. VOOR ELKE HYDROLOGISCHE SIMULATIE UIT SWAP WORDEN CENTURY EN VSD+ DOORGEREKEND



2.3.3 MEERWAARDE VAN DE AANPASSING VAN BEREKENING ZUURGRAAD

In de nieuwe versie van WWN wordt nu ook rekening gehouden met de effecten van verzurende depositie op de bodem-pH. Door rekening te houden met effecten van verzurende depositie op de bodem-pH wordt nu ook het effect van verzurende depositie op de zuurgraad en daarmee op kansrijkdom van vegetatietypen gesimuleerd. Als gebruiker kan je via het stikstofdepositieniveau (de depositiefactor) de verzurende depositie aanpassen.

2.4 HARMONISATIE VSD+ – CENTURY – SWAP

2.4.1 ACHTERGROND

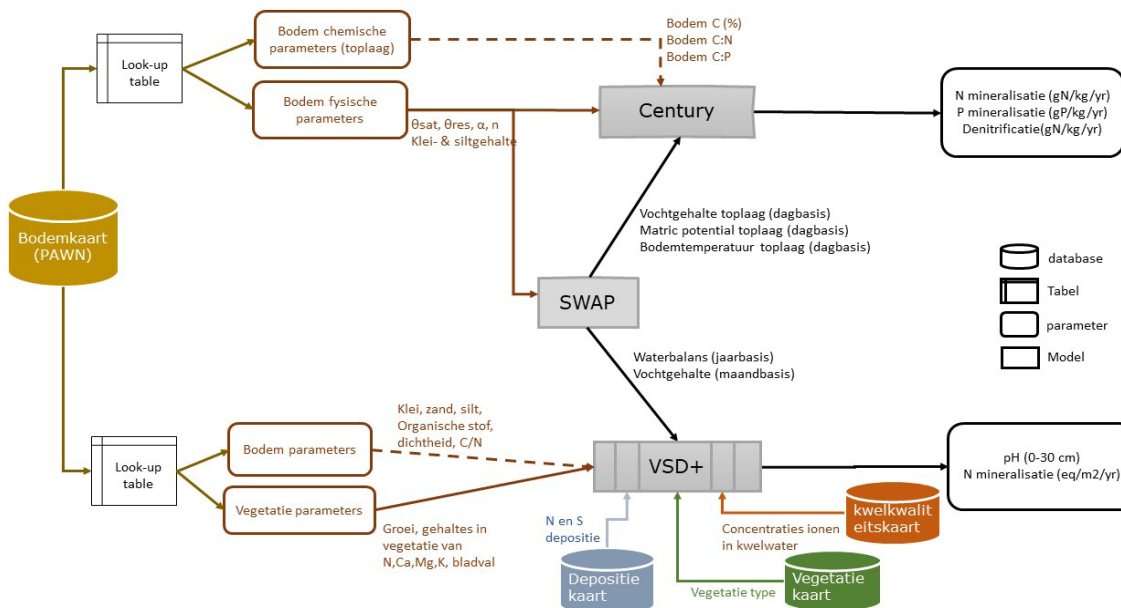
Om voedselrijkdom te berekenen kunnen zowel het procesmodel VSD+ (Bonten *e.a.*, 2016)2016 als CENTURY (Fujita *e.a.*, 2013b) worden gebruikt. In de vorige WWN versie (WWN-2) werd hiervoor de fosfaatmineralisatie in CENTURY voor gebruikt en VSD+ voor simulatie van de zuurgraad. In eerder onderzoek was geconcludeerd dat CENTURY geschikter was voor voedselrijkdom, maar dat VSD+ essentieel is voor de zuurgraad (Witte *e.a.*, 2018a). Beide modellen hebben informatie over het klimaat en bodemschematisatie nodig. Hoewel het CENTURY-model en VSD+ veel vergelijkbare processen en parameters omvatten, gebruiken de modellen verschillende waarden voor de invoerparameters. Dit is onwenselijk, gezien door verschillen in modelinstellingen systematische fouten kunnen ontstaan in de schatting van zuurgraad (VSD+) of voedselrijkdom (CENTURY) die niet op elkaar afgestemd zijn. Verder is onbekend of het meenemen van sommige gedetailleerdere processen met betrekking tot voedselrijkdom tot een belangrijke modelverbetering leidt.

Om deze redenen is een afstemming (harmonisatie) tussen de modellen en een potentiële aanpassing in gebruikte modelconcepten nodig. In paragraaf 2.4 wordt ingegaan op de verschillen in modelconcepten en benodigde invoergegevens tussen VSD+ en CENTURY en welke verbeteringen zijn aangebracht. Hierbij is gepoogd de beschrijving beknopt te houden, en wordt de lezer verwezen naar Bijlage III voor meer details en wetenschappelijke onderbouwing. Meetgegevens van N-mineralisatie zijn gebruikt om keuzes in gebruikte modelconcepten te onderbouwen.

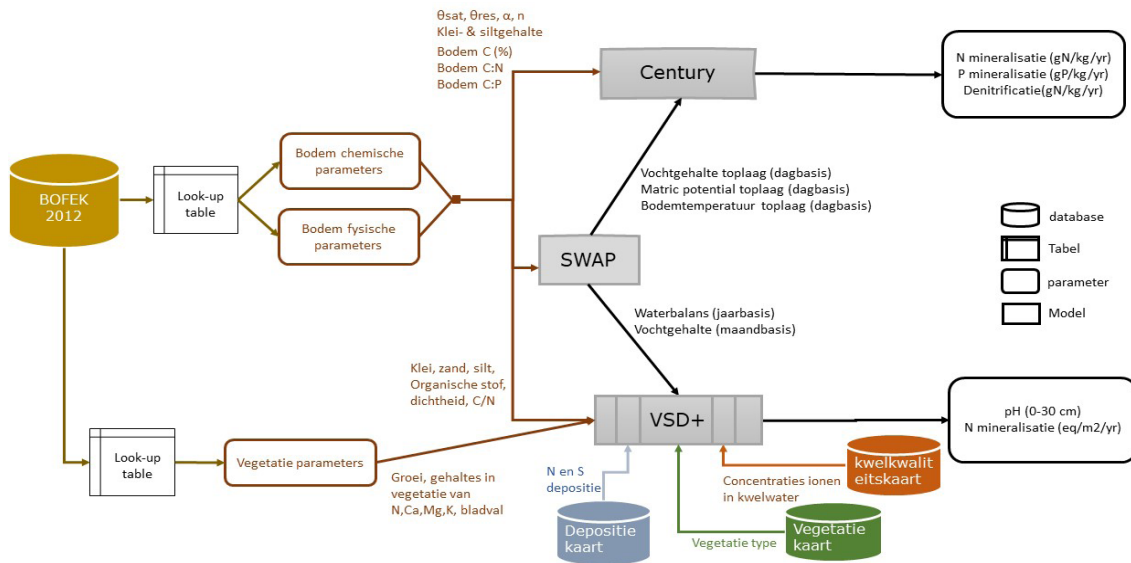
2.4.2 AANDACHTSPUNTEN EN AANPASSINGEN

Bij de afbraak van organisch stof (mineralisatie) komt stikstof beschikbaar. Deze N-mineralisatie in de bodem kan zowel in CENTURY als VSD+ worden gesimuleerd. De modellen verschillen van elkaar in een aantal opzichten. Beide modellen zijn systematisch met elkaar vergeleken op basis van de gebruikte modelconcepten (formules), invoergegevens, en parameters (Kros *e.a.*, 2017). Verschillen in modelconcepten kunnen niet zondermeer worden aangepast: deze vormen de kern van de modellen. Verschillen in benodigde invoergegevens en parameters kunnen daarentegen wel worden geharmoniseerd. In Figuur 2.5 worden de koppelingen tussen CENTURY, SWAP en VSD+ in de WWN-2 en benodigde invoergegevens en parameters weergegeven. Hier zijn sommige invoerwaarden, zoals bodem C en N, ontleend aan verschillende broninformatie (onderbroken lijnen in Figuur 2.5). In WWN-3 werd de schatting van invoerwaarden gestroomlijnd en daardoor gebruiken de twee modellen zoveel mogelijk dezelfde invoerwaarden voor elk BOFEK bodemeenheid (Figuur 2.6).

FIGUUR 2.5 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HUIDIGE KOPPELINGEN TUSSEN SWAP, CENTURY, EN VSD+ MODEL IN WWN-2. DE INVOERPARAMETERS DIE AFKOMSTIG ZIJN VAN VERSCHILLENDE BRONNEN TUSSEN VSD+ EN CENTURY WORDEN WEERGEGEVEN MET ONDERBROKEN LIJNEN



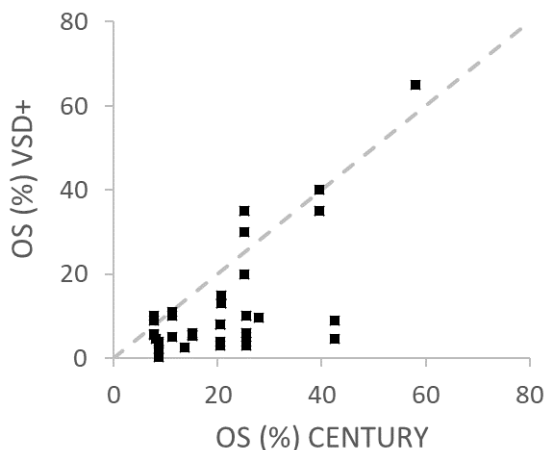
FIGUUR 2.6 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN NIEUWE KOPPELINGEN TUSSEN SWAP, CENTURY, EN VSD+ MODEL IN WWN-3



Harmonisatie gehalten bodem C, N en P

Een belangrijk verschil is de gebruikte modelinvoer voor bodem C, N en P gehalten. Deze werken door op berekende pH en Nmin. Voor een groot aantal bodems is het organisch stofgehalte behoorlijk verschillend tussen VSD en CENTURY (Figuur 2.7).

FIGUUR 2.7 VERGELIJKING TUSSEN DE INVOERWAARDEN VAN HET BODEM ORGANISCHE STOFGEHALTE VAN TOPLAAG, GEBRUIKT VOOR DE HUIDIGE VERSIE VAN HET CENTURY-MODEL (X-AS) EN VSD+ MODEL (Y-AS) IN WWN-2, GEAGGREGEERD VOOR BOFEK2012 BODEMFYSISCHE EENHEDEN



In CENTURY werd onderscheid gemaakt in 23 bodem-eenheden (zogenaamde PAWN eenheden). In VSD+ is daarentegen gebruik gemaakt van de BOFEK eenheden. In de nieuwe WWN wordt voor zowel VSD+ als CENTURY gebruik gemaakt van de schematisatie van de bodemfysische eenheden kaart (BOFEK-2012; Wösten *e.a.* (2013a)) met de Staringreeks 2018 (Heinen *e.a.*, 2020). De indeling van de bodemfysische eenheden in de BOFEK2012 wordt ook gebruikt voor de berekeningen van transpiratie- en respiratiestress. Door deze indeling ook te hanteren voor parameters met betrekking tot nutriëntencycli, wordt beter aangesloten bij de rest van het WWN-instrumentarium.

Per bodemfysische eenheid (in totaal 72) zijn C, N en P gehalten bepaald voor de toplaag. Deze gehalten zijn gebaseerd op 659 bodemgegevens verzameld uit verschillende databronnen. De bodemparameters zijn eerst samengevat op het niveau van de Staring-bouwsteen van de toplaag, en vervolgens toegewezen aan de overeenkomstige bodemfysische eenheid

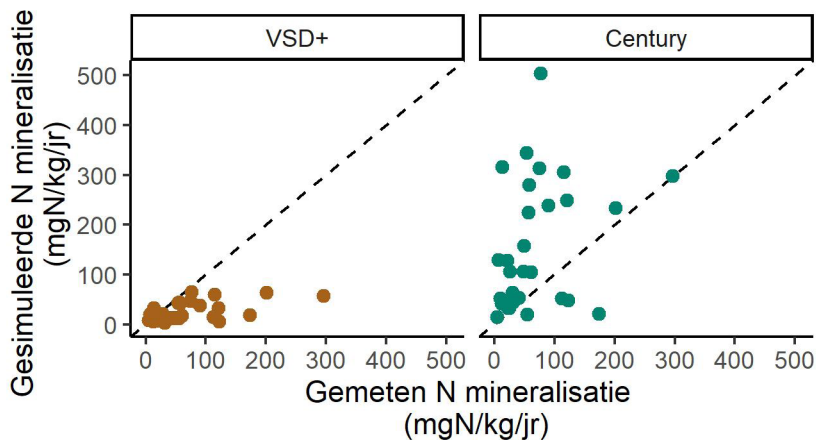
(Bijlage IV.II voor meer informatie). De resulterende nieuwe reeks invoerwaarden wordt gebruikt voor zowel CENTURY als VSD+ in WWN-3.

Vergelijking gesimuleerde N-mineralisatie in VSD+ en CENTURY

De N-mineralisatie van de huidige WWN wordt berekend met het model CENTURY, maar VSD+ (dat wordt gebruikt voor de simulatie van de pH van de bodem) simuleert ook de N-mineralisatie. Om de aannemelijkheid van de twee modellen te vergelijken en te kiezen welk model in WWN wordt toegepast voor voedselrijkdom, is de gesimuleerde N-mineralisatie gevalideerd met veldmetingen op 36 (semi)-natuurlijke locaties in Nederland (Bijlage IV.III voor meer informatie).

Uit deze vergelijking komt naar voren dat beide modellen moeite hebben om de gemeten N-mineralisatie te reproduceren (Figuur 2.8). Omdat VSD+ de N-mineralisatie niet beter simuleert dan CENTURY wordt dit laatste model, dat al eerder was gebruikt in eerdere WWN versies, gehandhaafd in WWN-3. Hierbij dient te worden opgemerkt dat verschillen tussen gemeten en gemodelleerde N-mineralisatie niet enkel veroorzaakt worden door tekortkomingen in modellen die de complexe interacties tussen water, bodemchemie en het bodemleven onvoldoende kunnen ondervangen: het meten van N-mineralisatie is zeer bewerkelijk en kent een grote onzekerheid mede ook omdat de metingen over een relatief korte periode zijn uitgevoerd. Ondanks de soms grote verschillen tussen gemeten en gemodelleerde N-mineralisatie, kunnen we daarom redelijk tevreden zijn met het resultaat.

FIGUUR 2.8 GEMETEN VERSUS GESIMULEERDE N-MINERALISATIE MET VSD+ (LINKS) EN CENTURY (RECHTS) MODEL. DE ONDERBROKEN LIJNEN ZIJN 1:1 LIJNEN



Reductie van N-mineralisatie bij lage pH

In literatuur wordt beschreven dat de afbraak van organisch stof, en dus N-mineralisatie, lager is bij lagere pH (Witte *e.a.*, 2020a). Dit proces is tot nu toe niet meegenomen in de WWN. Om het belang van deze gereduceerde N-mineralisatie bij lagere pH te bepalen, zijn zowel VSD+ als CENTURY uitgebreid met een pH-reductiefunctie. Op basis van dezelfde validatiedataset van 36 locaties is bepaald of deze uitbreiding tot een verbeterde N-mineralisatie leidde.

Op basis van deze validatiedataset kan worden geconcludeerd dat het opnemen van het pH-effect de modelvoorspelling niet verbetert. In de WWN-3 wordt daarom geen rekening gehouden met gereduceerde N-mineralisatie bij lage pH (Bijlage IV.III voor meer informatie).

Afstemmen worteldiepte VSD+ en CENTURY

Net als het gebruik van bodemchemische en bodemfysische gegevens (zie Figuur 2.15), is ook de laagdikte gestandaardiseerd op 0-15 cm. Verder is de gebruikte eenheid voor het bodemgehalte nu voor beide modellen gestandaardiseerd op basis van oppervlakte (gX/m^2 , $X = \text{C}, \text{N}, \text{P}$) in combinatie met een gestandaardiseerde diepte van 15 cm, in plaats van op basis van gewicht (g/kg bodem).

2.4.3 MEERWAARDE HARMONISATIE EN MODELANALYSE VSD+ - CENTURY – SWAP

De harmonisatie en analyse van de modellen heeft geleid tot de volgende voordelen:

- In CENTURY en VSD+ worden nu dezelfde invoerwaarden van bodemgehalten van C, N en P gebruikt, waardoor mogelijke inconsistentie tussen gemodelleerde pH en N-beschikbaarheid wordt vermeden. In de oude versie (toen de modellen niet geharmoniseerd waren) was dit vooral het geval bij kalkloze kleigronden.
- De systematische vergelijking van gesimuleerde en gemeten N-mineralisatie is doorslaggevend geweest om kwantitatief te kunnen onderbouwen welk model het meest geschikt is om N-mineralisatie te simuleren.
- Dezelfde vergelijking met veldgegevens gaf uitsluitsel dat extra complexiteit van effecten van zuurgraad op N-mineralisatie onnodig is.
- Bovendien sluit de nieuwe C-, N- en P-gehalten aan bij hydrologische toepassingen omdat ze voor de bodemfysische eenheden van de BOFEK2012 gekarakteriseerd zijn. Hierdoor sluiten de modellen SWAP – VSD+ – CENTURY naadloos op elkaar aan.
- Deze karakterisering is toegespitst op (semi-)natuurlijke bodems, en is daardoor juist voor de WWN geschikt. Dit is een belangrijke verbetering ten opzichte van de voorheen gebruikte database van VSD+, die hoofdzakelijk uit landbouwbodems bestond.
- De standaardisatie van eenheid voor bodemgehalte maakt vergelijking tussen VSD+ en CENTURY gemakkelijker. Ook als in de toekomst een deel van de modellen moet worden uitgewisseld, is de overgang nu gemakkelijker dankzij het consistente gebruik van input en eenheden.

3

WWN-3: PLAUSIBILITEITSSTUDIE

In het vorige hoofdstuk is beschreven welke aanpassingen zijn doorgevoerd in de WWN-3, om deze naar verwachting realistischer te maken. Om te bepalen hoe de aanpassingen doorwerken op voorspellingen, en in hoeverre de WWN-3 simulaties overeenkomen met de werkelijkheid, wordt in deze sectie een plausibiliteitstoets uitgevoerd. Eerst wordt de WWN-3 toegepast op het gebied Sang en Goorkens, dat ook in vorige versies diende als referentiegebied (Witte *e.a.*, 2018a; Witte *e.a.*, 2020a), waarbij wordt bepaald of effecten van stikstofdepositie op voorspelde vegetatie plausibel zijn. Tevens dient dit als illustratie van de toegevoegde waarde van stikstofdepositie in WWN-3. Vervolgens worden de verschillende WWN versies (WWN-1, WWN-2.30 en WWN-3) met elkaar vergeleken. Ten slotte worden de WWN-3 resultaten getoetst aan indicatiewaarden afgeleid uit landelijke vegetatieopnamen.

3.1 PLAUSIBILITEIT EFFECT STIKSTOFDEPOSITIE

3.1.1 VERWACHTING

Bij de beoordeling van de plausibiliteit van resultaten hoort een beschrijving van de verwachtingen van hoe veranderingen in de WWN doorwerken. Onze verwachting is dat een afname van depositie leidt tot een hogere pH, een lagere voedselrijkdom, en een afname van het oppervlak aan voedselrijke ecotoopgroepen. Het laatste getal in de ecotoopgroepaanduiding indiceert zowel voedselrijkdom als zuurgraad en kan worden gebruikt om de resultaten te duiden (Tabel 3.1). Omdat een afname van depositie leidt tot een afname van voedselrijkdom, maar ook tot een hogere pH, is deze verandering niet altijd eenduidig vast te stellen. De voedselrijkdom in de referentiesituatie wordt in alle WWN versies nog gebaseerd op kennisregels, en is dus in alle WWN versies hetzelfde.

TABEL 3.1 OVERZICHT INDELING VOEDSELRIJKDOM ZOALS GEBASEERD OP INDICATIEGETAL VAN ECOTOOPGROEPEN. HET INDICATIEGETAL VAN VOEDSELRIJKDOM IN ECOTOOPGROEPEN IS HET LAATSTE GETAL IN DE CODE. BIJ K21 GEEFT HET GETAL 1 DUS DE INDICATIE VOOR VOEDSELRIJKDOM (VOEDSELARM, ZUUR). NB: VOEDSELRIJKDOMCATEGORIE 4 BESTAAT NIET

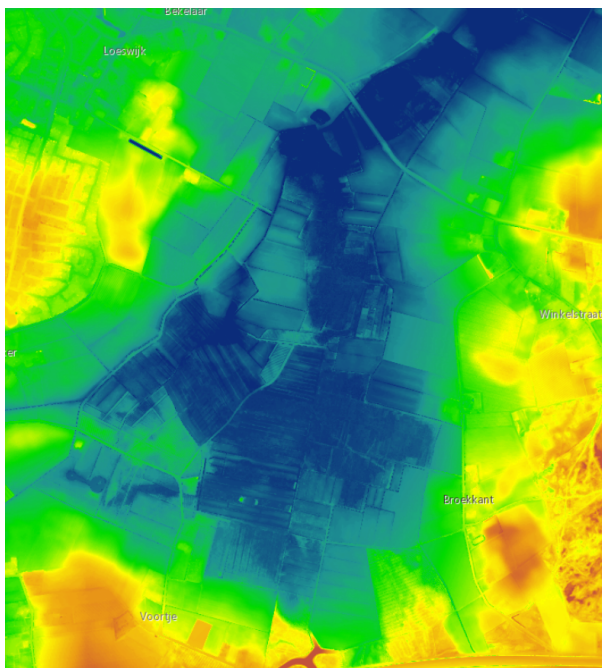
Klasse voedselrijkdom in ecotoopgroep	Voedselrijkdom
1	Voedselarm, zuur
2	Voedselarm, zwak zuur
3	Voedselarm, basisch
5	Matig voedselrijk, zuur-zwak zuur
6	Matig voedselrijk, basisch
7	Matig voedselrijk
8	Zeer voedselrijk

3.1.2 BESCHRIJVING VAN SANG EN GOORKENS

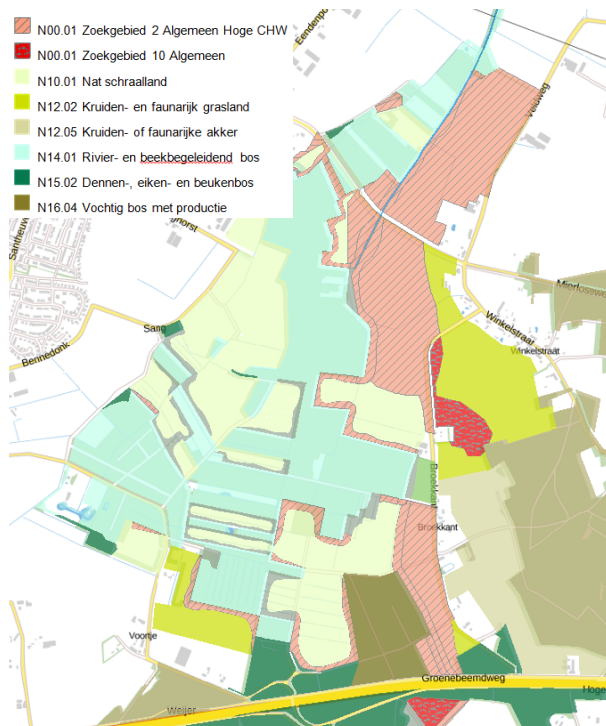
Alvorens in te gaan op de toetsing van Sang en Goorkens, volgt hier eerst een beschrijving van het gebied. Deze is gebaseerd op de beschrijving uit eerdere WWN rapportages (Witte *e.a.*, 2020). Sang en Goorkens is een natuurgebied in een beekdallandschap, met in de natte

kern Elzenbroekbos, Berken-elzenbroekbos, Wilgenstruweel en Blauwgrasland, met soorten als grote ratelaar, blauwe knoop, gevlekte orchis, veldrus, ronde zonnedauw, waterviolier, holpijp, dotterbloem en duizendknoopfonteinkruid (Boute & Van de Wielen, 2007). Om hogere natuurwaarden te bereiken (Figuur 33), is het gebied recent hydrologisch hersteld.

FIGUUR 3.1 MAAIVELDHOOGTE SANG & GOORKENS VOLGENS AHN3. BLAUW ZIJN LAGE GEBIEDEN, ROOD ZIJN HOGE GEBIEDEN

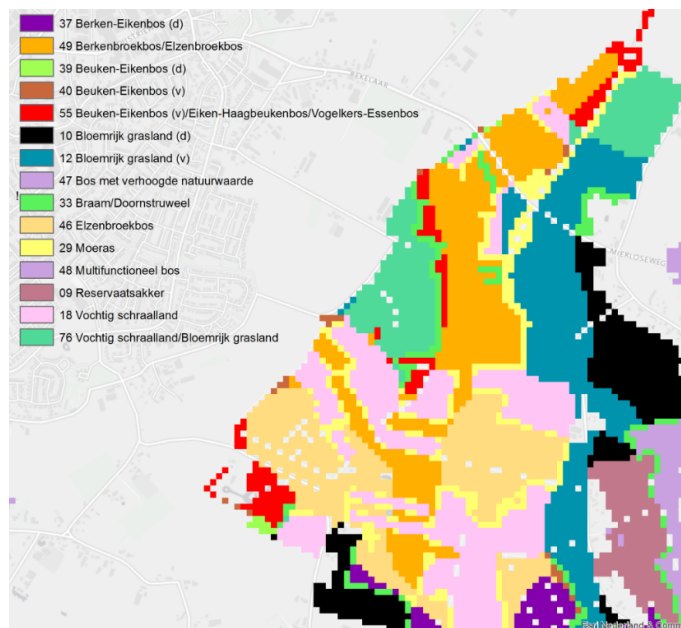


FIGUUR 3.2 BEHEERTYPEN SANG & GOORKENS (BRON: KAARTENBANK.BRABANT.NL)



FIGUUR 3.3

NATUURDOELTYPEN SANG & GOORKENS (NAAR: AT SMA E.A., 2012)

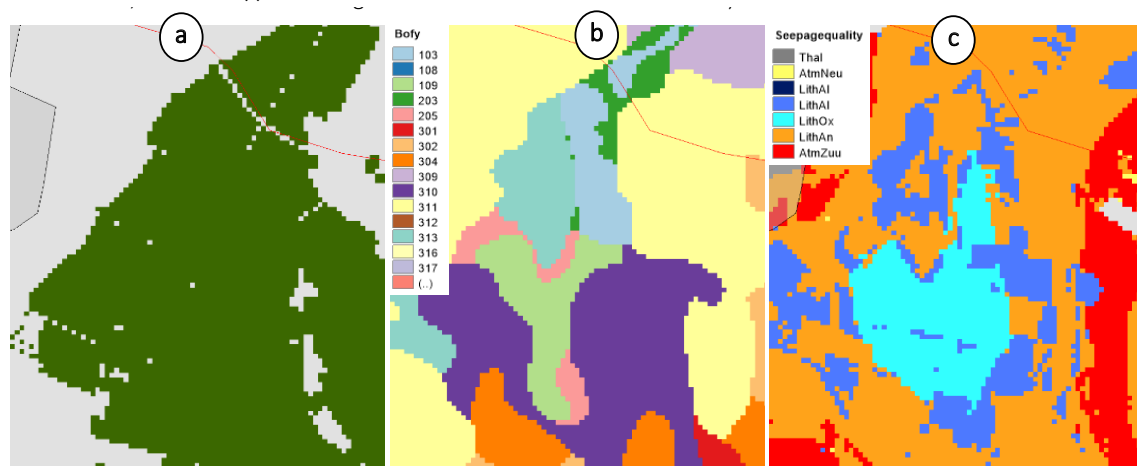


3.1.3 INVOERGEGEVENS SANG & GOORKENS (OMSCHRIJVING OVERGENOMEN UIT WITTE ET AL., 2020)

Om de verschillende WVN versies met elkaar te kunnen vergelijken, is in alle versies dezelfde modelinvoer gehanteerd. De kwelkwaliteitskaart is sinds WVN-2 in gebruik genomen, en is dus alleen in WVN-2 en WVN-3 gebruikt. De volgende kaarten zijn met de gebruiksvriendelijke schil van WVN gegenereerd voor natuurgebied Sang & Goorkens en omgeving: Figuur 3.4 toont de ligging van natuurgebieden, de bodemfysische eenheden en de kwelkwaliteit. Dit zijn statische invoerkaarten, die de eigenschappen van het gebied vastleggen (net als de bodemkaart, de kaart met het landgebruik en kaart met klimaatdistricten).

FIGUUR 3.4

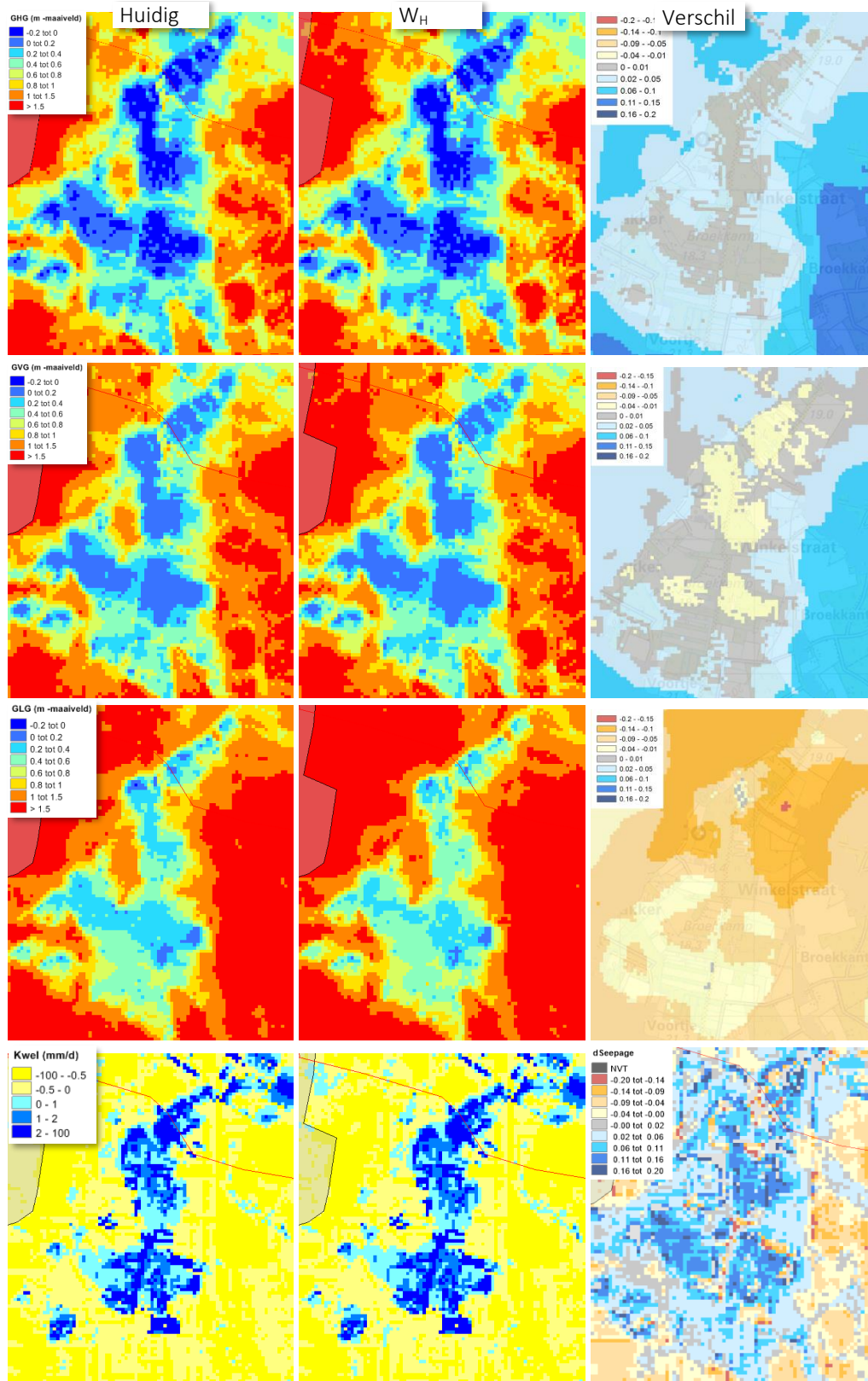
DRIE STATISCHE GEOGRAFISCHE INVOERKAARTEN VOOR SANG & GOORKENS EN OMGEVING: (A) LIGGING NATUURGEBIEDEN, (B) BODEMFYSISCHE EENHEDEN, (C) KWELKWALITEITSKAART



De hydrologische invoer, opgenomen in Figuur 3.5, is berekend met een ruimtelijke gedetailleerde versie (resolutie 25 m) van het Brabant Model (Verhagen *e.a.*, 2014) en aangeleverd door Waterschap Aa & Maas. Volgens het Brabant Model leidt klimaatscenario W_H in het lager gelegen beekdal tot een *GHG* die gelijk blijft of iets stijgt, tot een lichte toename van de kwelintensiteit, tot een *GLG* die iets daalt, en tot een *GVG* die nauwelijks verandert (Figuur

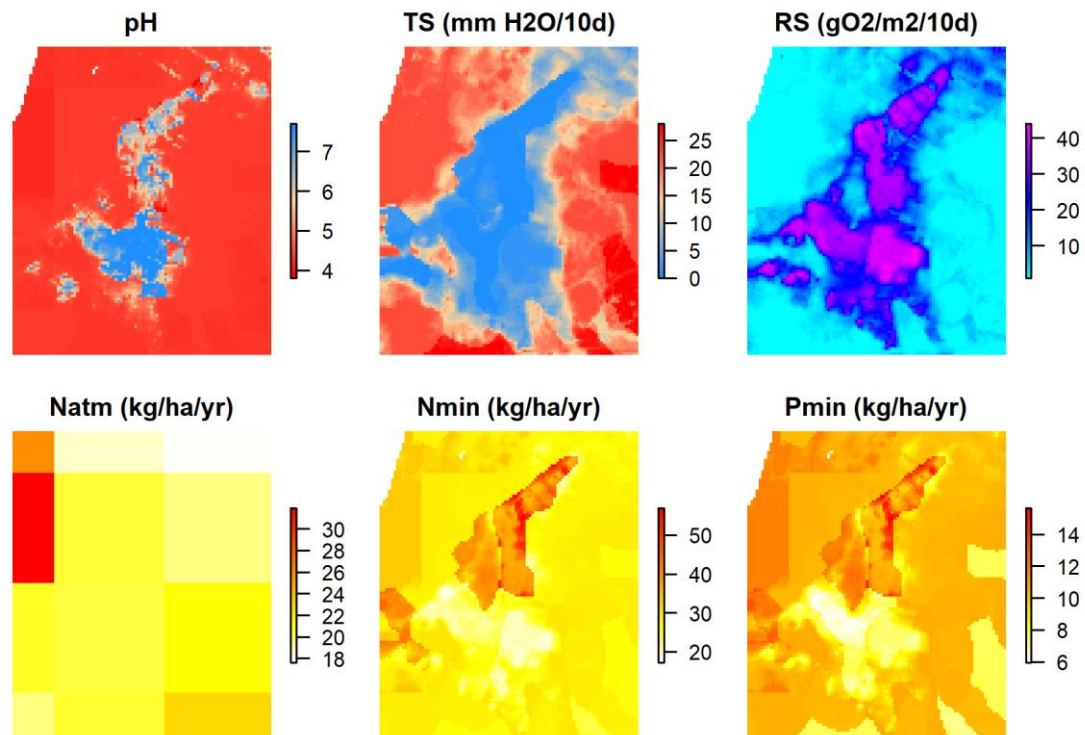
352-13). Het vrijwel gelijk blijven van de GVG komt doordat het voorjaar op de overgang ligt van winters die natter en zomers die droger worden: de GVG is daardoor redelijk inert voor dit klimaatscenario. Een andere reden is vermoedelijk dat het hydrologisch model waarschijnlijk zo is ingesteld dat alle standen boven maaiveld worden afgekap: in Figuur 3.5 heeft de donkerblauwe natste klasse van de GHG overal exact de waarde 0 m-mv. In de hoger gelegen infiltratiegebieden en intermediaire zone stijgen de GHG en GVG en daalt de GLG.

FIGUUR 3.5 MET HET BRABANT MODEL (VERHAGEN E.A., 2014) GESIMULEERDE GHG, GVG, GLG EN KWELINTENSITEIT ONDER HET HUIDIGE KLIMAAT (LINKS) EN ONDER SCENARIO W_H IN 2050 (MIDDEN). RECHTER KOLOM: VERSCHILKAARTEN (2050 – HUIDIG)



FIGUUR 3.6

GESIMULEERDE STANDPLAATSFACTOREN MET DE WVN-3, GEBASEERD OP BOVENSTAANDE INVOER VOOR DE REFERENTIESITUATIE (KLIMAAT EN HYDROLOGIE VOOR 1981 – 2010), DEPOSITIEFACTOR = 1) VOOR SANG EN GOORKENS. pH IS DE GESIMULEERDE ZUURGRAAD ($\text{pH H}_2\text{O}$), TS = TRANSPIRATIESTRESS (HOGERE WAARDEN = HOGER VOCHTTEKORT), RS = RESPIRATIESTRESS (HOGERE WAARDEN = GROTER TEKORT AAN ZUURSTOF). NATM IS DE STIKSTOFDEPOSITIE, ALS INVOER VOOR DE WVN AFGELEID UIT DE GROOTSCHALIGE DEPOSITIEKAART NEDERLAND (GDN) VAN HET RIVM VOOR HET JAAR 2019. NMIN EN PMIN ZIJN DE GESIMULEERDE STIKSTOF- EN FOSFORMINERALISATIE



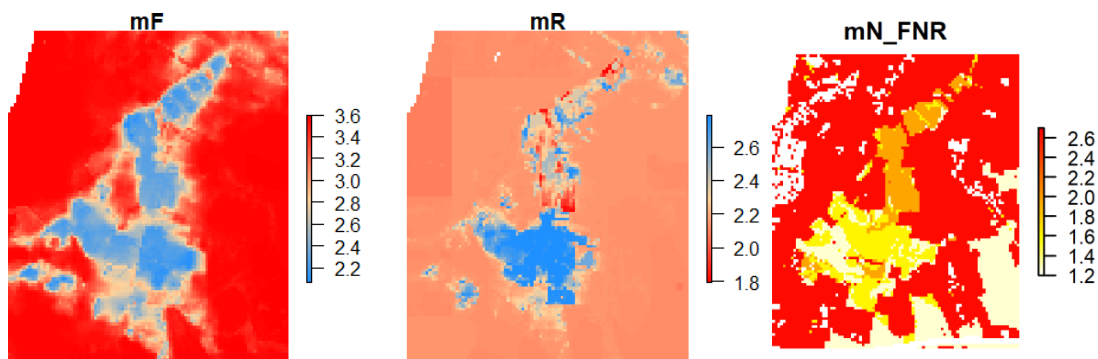
PLAUSIBILITEIT REFERENTIESITUATIE

De modelinvoer (Figuur 3.4, Figuur 3.5) bij huidig klimaat, huidige waterhuishouding, en een depositiefactor van 1 (i.e. huidige depositie), leidt tot een plausibel beeld van zuurgraad, respiratiestress, en transpiratiestress. In het centrale, lagere en nattere deel van het gebied met kwel is de pH hoger, is er minder transpiratiestress en hogere respiratiestress. Ook het ruimtelijk beeld van N- en P-mineralisatie ogen plausibel: De zuurdere en drogere zandgronden hebben lagere mineralisatiesnelheden dan nattere bodems. Ruimtelijke variatie binnen natte bodems is te verklaren door verschil in bodemtype en gehalten in N, P en C. **De veranderingen die zijn doorgevoerd in WVN-3 voor de berekening van zuurgraad en N-mineralisatie geven plausible resultaten.**

De vertaling van standplaatscondities naar indicatiewaarden van vegetatie (Figuur 3.7) zijn ook volgens verwachting in de referentiesituatie: de hoge droge landschapsposities hebben een hoge (droge) indicatiewaarde voor vocht (mF), laaggelegen plekken een lage mF (vochtig). Gezien de doorgevoerde veranderingen voor de berekening van voedselrijkdom en zuurgraad, is het echter met name van belang om de indicatiewaarden van zuurgraad (mR) en voedselrijkdom (mN) te beschouwen. Uit de resultaten komt naar voren dat de ruimtelijke patronen van zuurindicatie plausibel zijn. In de laaggelegen gebieden komen plekken voor waar de zuurindicatie lager (zuurder) uitvalt, en die komen overeen met plekken met lagere pH en lagere kwelaanvoer (Figuur 3.5). De patronen van voedselrijkdomindicatie mN patronen ogen op het eerste gezicht omgekeerd ten opzichte van Nmin en Pmin (Figuur 3.6): op de hoge droge zandgronden is mN hoog, op lage natte locaties laag. Dit beeld wordt veroorzaakt doordat in de op kennisregels gebaseerde mN (zoals toegepast voor het vaststellen van de referentiesituatie) het landgebruik ook wordt meegenomen. De gronden rondom de natuur in

Sang en Goorkens zijn in landbouwkundig gebruik, en hebben daardoor via de kennisregels (De Haan *e.a.*, 2010), een relatief hoge voedselrijkdom en mN waarde. Gezien er geen depositieverandering is opgenomen in dit basisscenario (depositiefactor = 1), is er geen effect van stikstofdepositie op mN, en komt de kaart waarin wel rekening gehouden wordt met stikstofdepositie (mN Century) exact overeen met de op kennisregels gebaseerde mN.

FIGUUR 3.7 MET DE WVN-3 GESIMULEERDE INDICATIEWAARDEN VOOR SANG EN GOORKENS IN DE REFERENTIESITUATIE (KLIMAAT EN HYDROLOGIE VOOR 1981 – 2010, DEPOSITIEFACTOR = 1). MF, MR EN MN ZIJN INDICATIEWAARDEN VOOR RESPECTIEVELIJK VOCHT (1 = NAT, 4 = DROOG), ZUURGRAAD (1 = ZUUR, 3 = BASISCH) EN VOEDSELRIJKDOM (1 = ARM, 3 = RIJK). MN_FNR IS DE INDICATIEWAARDE VAN VOEDSELRIJKDOM GEBASEERD OP KENNISREGELS UIT WATERNOOD VOOR DE REFERENTIESITUATIE

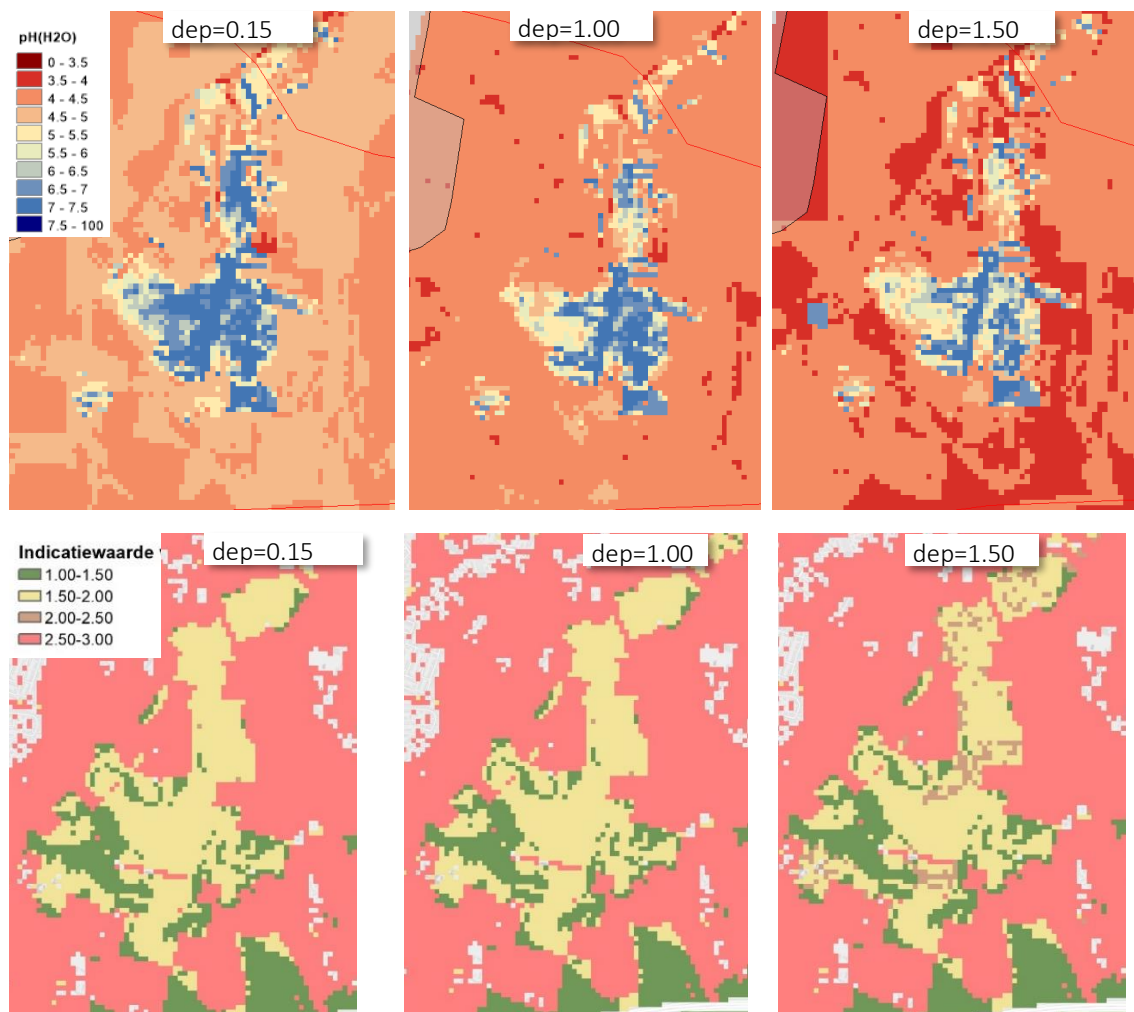


3.1.4 RESULTATEN: EFFECT VAN ZUUR- EN STIKSTOFDEPOSITIE OP NATUUR

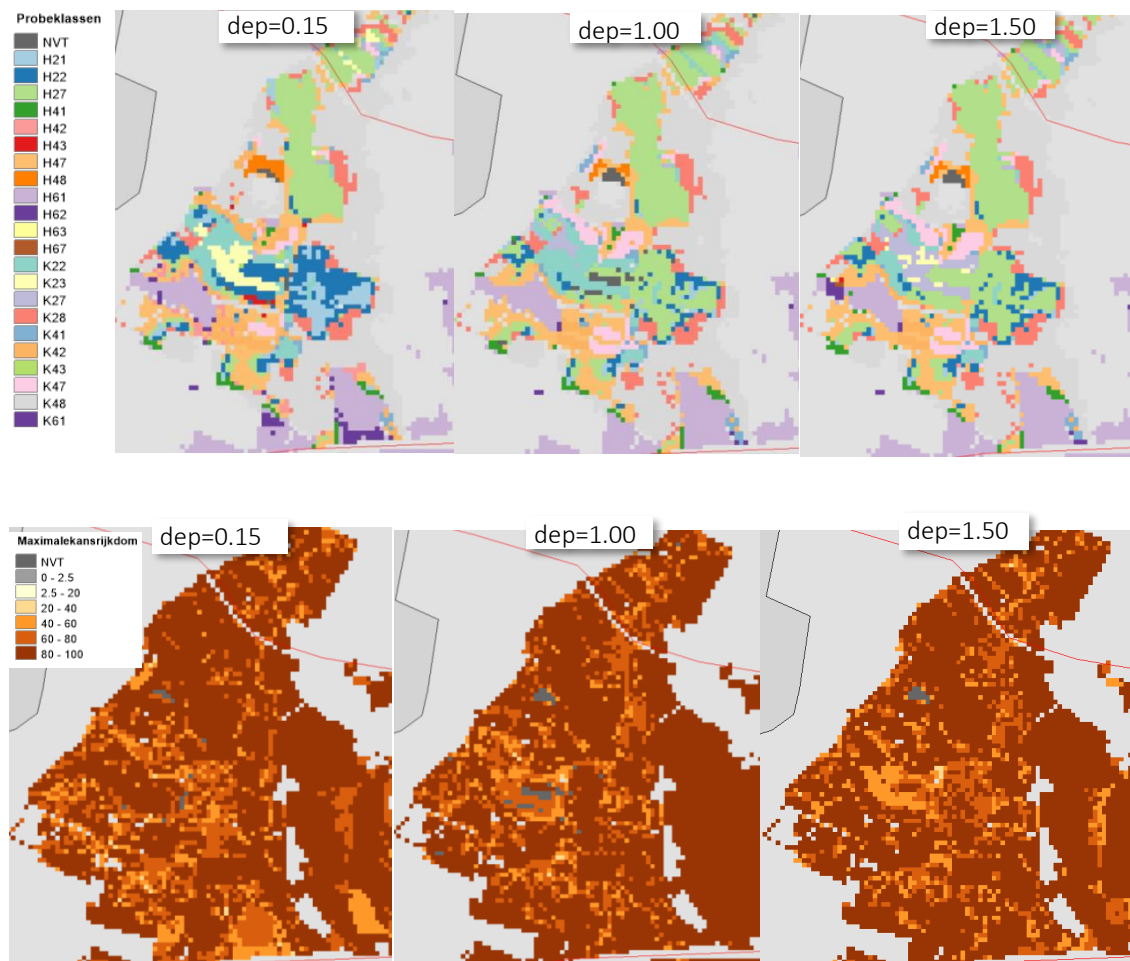
Eén van de belangrijkste aanpassingen in de WVN-3 is dat de gebruiker de mogelijkheid heeft de depositie van stikstof en zuur aan te passen. De invloed van de depositiefactor op de uitkomsten uit de WVN-3 voor het natuurgebied Sang en Goorkens is onderzocht door voor het huidige klimaat (1981 – 2010) te rekenen met een minimale ($0.15 \times$ depositie) en maximale depositiefactor ($1.5 \times$ depositie), en een depositiefactor van 1 (depositie gelijk aan Figuur 23). De resultaten zijn weergegeven in Figuur 3.8, Figuur 3.9 en Tabel 3.2.

Bij een hogere depositie (verhoging depositiefactor van 1 naar 1.5), treedt verzuring op en neemt de pH af (Figuur 3.8). Bij een verlaging van depositie (depositiefactor van 1 naar 0.15) treedt precies het omgekeerde effect op. De pH veranderingen als gevolg van depositie zijn naar verwachting (paragraaf 3.1.1). De indicatiewaarde voor voedselrijkdom neemt in het centrale deel toe wanneer de stikstofdepositie verhoogd wordt tot een factor 1.5. Ook dit effect is zoals verwacht. Wanneer de depositie wordt verlaagd tot een factor 0.15 van de huidige depositie, zijn veranderingen in indicatiewaarde voor voedselrijkdom vrij klein en niet zichtbaar door de indeling in de categorieën in Figuur 3.6. Als gevolg van de toegenomen voedselrijkdom bij een toename van depositie, verschuiven voorspelde ecotoopgroepen naar voedselrijkere varianten. Zo is duidelijk te zien dat er met een toename van N-depositie een duidelijke toename van K22 ten koste van K27 in het oosten van het gebied optreedt (Figuur 3.9). Bij een verlaging van depositie treedt het omgekeerde effect op: voedselrijke ecotoopgroepen verschuiven naar voedselarme (zie bijvoorbeeld H27 naar H22). De resultaten van de plausibiliteitsstudie zijn goed verklaarbaar en komen overeen met onze verwachtingen (paragraaf 3.1.1).

FIGUUR 3.8 DE INVLOED VAN DE DEPOSITIEFACTOR BIJ HUIDIG KLIMAAT OP DE pH (BOVEN) EN RUNHAAR-INDICATIEWAARDE VAN VOEDSELRIJKDOM MN VOOR SANG EN GOORKENS, BEREKEND MET WVN-3.03



FIGUUR 3.9 DE INVLOED VAN DE DEPOSITIEFACTOR IN DE REFERENTIESITUATIE (HUIDIG KLIMAAT EN WATERHUISHOUDING) OP HET VOORKOMEN VAN ECOTOOPGROEPEN (BOVEN) EN MAXIMALE KANSRIJKDOM (ONDER) VAN DEZE ECOTOOPGROEPEN VOOR SANG EN GOORKENS, ZOALS BEREKEND MET WVN-3.03



De uitvoer van de WVN levert naast de ruimtelijke kaarten hierboven ook tabellen met voor-
 spelde oppervlakten per ecotoopgroep. Hieruit is afgeleid hoe oppervlakten van ecotoop-
 groepen met verschillende voedselrijkdomindicaties (zoals geïndiceerd met het laatste getal
 in de codering van ecotoopgroepen) veranderen als gevolg van verandering in depositiefactor
 (Tabel 3.2). Ook hieruit komt naar voren dat bij een afname van depositie het oppervlakte aan
 voedselrijke ecotoopgroepen (voedselrijkdomklasse 7) afneemt, en verschuift naar voedsel-
 arme ecotoopgroepen (voedselrijkdom klasse 2). In Figuur 3.9 komt dat tot uiting in bijvoor-
 beeld een verschuiving van H27 naar H22. Deze verschuivingen komen overeen met wat
 verwacht mag worden (paragraaf 3.1.1).

TABEL 3.2

OPPERVLAKTEN EN AANDEEL VAN HET TOTAAL PER VOEDSELRIJKDOMKLASSE (ZOALS GEÏNDICEERD MET HET LAATSTE GETAL IN DE ECOTOOPGROEPAANDUIDING) BIJ VERSCHILLENDE DEPOSITIESCENARIO'S (DEP) VOOR SANG EN GOORKENS BIJ DE REFERENTIESITUATIE (HUIDIG KLIMAAT EN WATERHUISSHOUING). DE DEPOSITIE IS DEP* HUIDIGE DEPOSITIE

Klasse Voedselrijkdom	Oppervlak (aantal pixels)			Relatieve aandeel (%)		
	dep = 0.15	dep = 1.0	dep = 1.5	dep = 0.15	dep = 1.0	dep = 1.5
1 Voedselarm, zuur	1183	1194	1153	21.9	22.2	21.3
2 Voedselarm, zwak zuur	741	403	392	13.7	7.5	7.2
3 Voedselarm, basisch	99	1	27	1.8	0.0	0.5
7 Matig voedselrijk	947	1360	1414	17.5	25.3	26.1
8 Zeer voedselrijk	2439	2415	2426	45.1	44.9	44.8
Totaal	5409	5373	5412	100	100	100

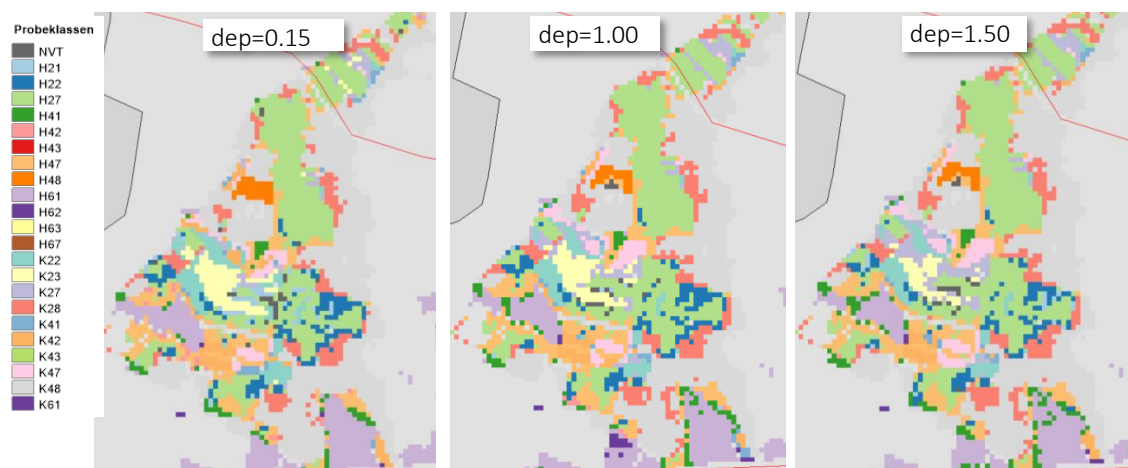
3.1.5 RESULTATEN: EFFECTEN VAN DEPOSITIE BIJ KLIMAATVERANDERING

Voor het klimaat onder KNMI scenario WH (zichtjaar 2050) zijn verschillen zichtbaar tussen verschillende depositiescenario's (Figuur 3.10). Met afnemende depositie neemt het aandeel van ecotoopgroepen van matig voedselrijke standplaatsen duidelijk af, en dat van voedselarme toe (Tabel 3.3). Ook de veranderingen in ecotoopgroepen bij klimaatverandering zijn plausibel en verklaarbaar (paragraaf 3.1.1). Reduceren we de toekomstige depositie met een factor 0.15, dan leidt dat tot een afname van indicatiewaarde voor voedselrijkdom (Figuur 3.11, voedselarmere condities) ten opzichte van de referentie (huidige klimaat, waterhuishouding, en depositie). Deze resultaten zijn zeer goed verklaarbaar en plausibel.

Het aandeel zeer voedselrijke ecotoopgroepen neemt heel licht toe (1.5%) bij een afname van 0.15 x de verwachte depositie in 2050. Dit is niet te verklaren alleen op basis van voedselrijkdom, maar juist ook door de combinatie met klimaatverandering, die doorwerkt op bodemvocht en kwelfluxen en zo voedselrijkdom kan beïnvloeden. Klimaatverandering resulteert namelijk in diepere grondwaterstanden, maar ook wat hogere jaargemiddelde kwelfluxen in de kwelzones (Figuur 3.4). De drogere omstandigheden hebben als gevolg dat mineralisatie toeneemt, wat duidelijke tot uiting komt in een stijging van gesimuleerde indicatiewaarde van voedselrijkdom (Figuur 3.11, links).

FIGUUR 3.10

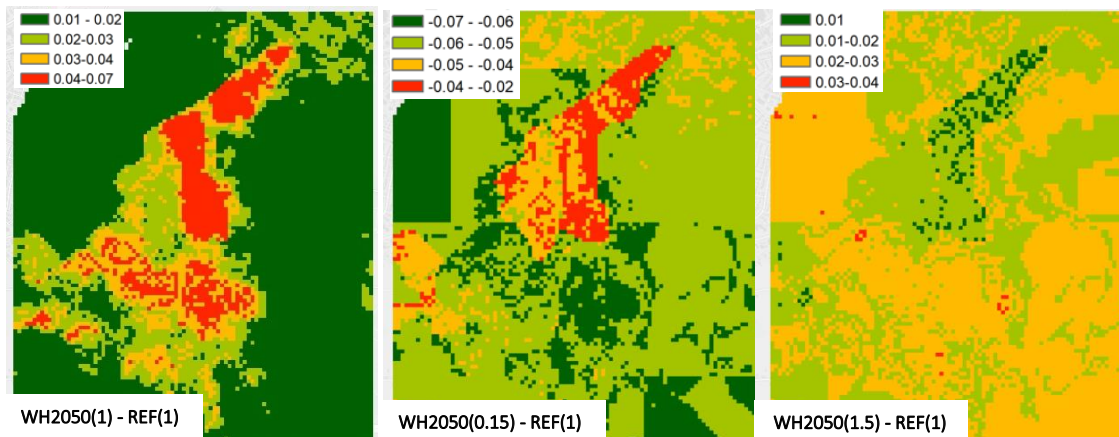
MET WVN-3 GESIMULEERD EFFECT VAN ZUUR- EN STIKSTOFDEPOSITIE (VIA DEPOSITIEFACTOR DEP) ONDER KLIMAATSCENARIO WH, ZICHTJAAR 2050, OP DE VOORSPELDE ECOTOOPGROEPEN VOOR SANG EN GOORKENS



Vooraf de hoge en drogere gebieden zijn gevoelig voor veranderingen in toekomstige depositie (Figuur 3.11). Dat kan verklaard worden doordat effecten van depositie ten dele gecompenseerd worden door natte omstandigheden in het centrale deel (hoge denitrificatie). Een

toename van toekomstige stikstofdepositie leidt tot een toename in indicatiewaarde van voedselrijkdom. Ook de veranderingen in toekomstig klimaat zijn daarmee goed te voorspellen.

FIGUUR 3.11 LINKS: MET WVN-3 GESIMULEERD EFFECT VAN KLIMAATVERANDERING (KNMI SCENARIO WH, ZICHTJAAR 2050) OP VERANDERING VAN INDICATIEWAARDE VOOR VOEDSELRIJKDOM (MN) VOOR SANG EN GOORKENS ZONDER AANPASSING IN DEPOSITIE (DEP = 1). MIDDEN: VERSCHIL IN MN BIJ KLIMAATVERANDERING EN 0.15 X TOEKOMSTIGE DEPOSITIE. RECHTS: VERSCHIL IN MN BIJ KLIMAATVERANDERING EN 1.5 X TOEKOMSTIGE DEPOSITIE. DE GETALLEN TUSSEN HAAKJES IN DE FIGUREN GEVEN DE DEPOSITIEFACTOR WEER



TABEL 3.3 OPPERVLAKTEN EN AANDEEL VAN HET TOTAAL PER VOEDSELRIJKDOMKLASSE (ZOALS GEÏNDICEERD MET HET LAATSTE GETAL IN DE ECOTOOPGROEPAANDUIDING) BIJ VERSCHILLENDE DEPOSITIE-SCENARIO'S (DEP) VOOR SANG EN GOORKENS IN COMBINATIE MET KLIMAATVERANDERING EN DAARBIJ HORENDE WATERHUISHOUDING (SCENARIO WH, ZICHTJAAR 2050). DE DEPOSITIE IS DEPOSITIEFACTOR DEP * HUIDIGE DEPOSITIE)

Klasse Voedselrijkdom	Oppervlak (aantal pixels)			Relatieve aandeel (%)		
	dep = 0.15	dep = 1.0	dep = 1.5	dep = 0.15	dep = 1.0	dep = 1.5
1 Voedselarm, zuur	1147	1073	1026	21.2	19.8	19.0
2 Voedselarm, zwak zuur	494	430	463	9.1	7.9	8.6
3 Voedselarm, basisch	110	76	53	2.0	1.4	1.0
7 Matig voedselrijk	1158	1376	1410	21.4	25.4	26.1
8 Zeer voedselrijk	2490	2454	2460	46.1	45.4	45.5
Totaal	5399	5409	5412	100	100	100

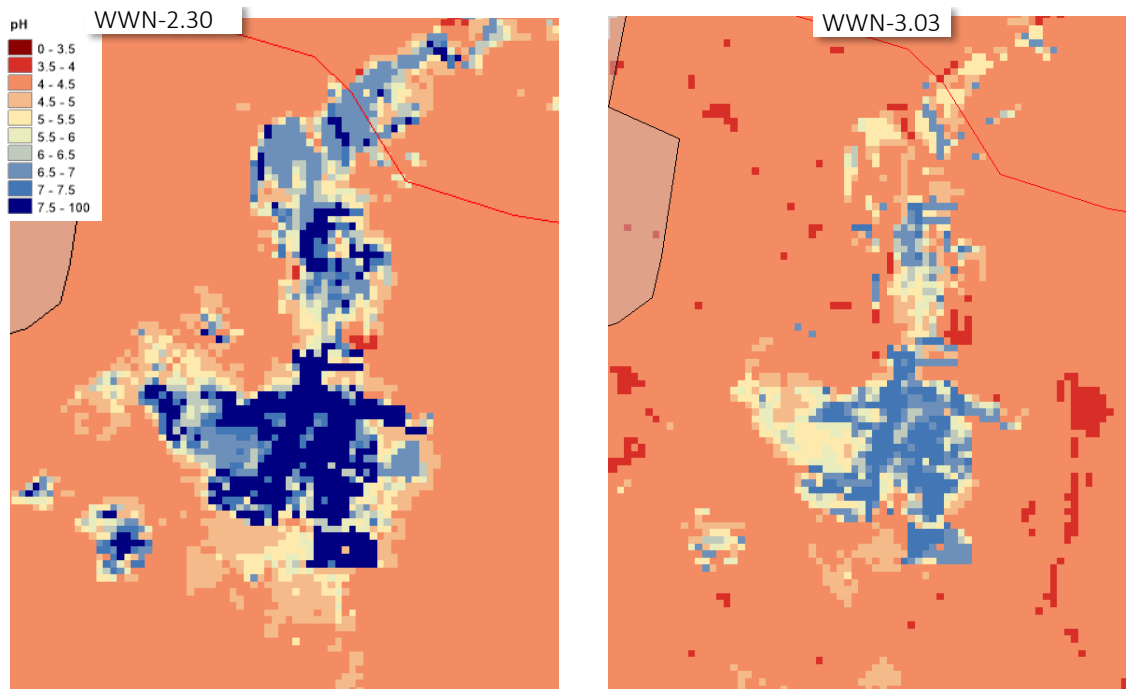
3.2 VERGELIJKING WVN VERSIES

Deze paragraaf beschrijft of de resultaten van de WVN-3 verklaarbaar zijn, en in hoeverre deze overeenkomen dan wel verschillen met eerdere versies. De referentiesituatie is voor voedselrijkdom in alle modelversies gebaseerd op kennisregels, waardoor een vergelijking van ecotoopgroepen minder zinvol is. Wel is het zinvol om de gesimuleerde ruimtelijke patronen van WVN-2.30 en WVN-3 met elkaar te vergelijken.

Op basis van de in de vorige paragrafen beschreven invoer is de pH van het bodemvocht in de wortelzone gesimuleerd met WVN-2.30 en WVN-3 (Figuur 3.12). De met WVN-2.30 gesimuleerde pH onder het huidige klimaat varieert van iets minder dan 4 op de drogere zandgronden tot maximaal 7.7 in het kwelgebied. Het patroon is plausibel, want kenmerkend voor een beekdallandschap in het hogere zandlandschap van Nederland (Witte et al. 2020). Hetzelfde plausibele patroon wordt gevonden bij WVN-3.03, al is de pH in het referentiescenario bij de WVN-3 lager dan bij WVN-2.30 als gevolg van de aanpassingen in de manier waarop zuurgraad berekend wordt en de aanpassingen in de metarelaties. In het beekdal zorgt dit voor wat minder basische condities; op de hogere gronden voor zuurdere condities.

De voorspelde zuurgraad was in de WWN-2.30 wat aan de hoge kant en komen niet overeen met aanwezige vegetatie. De aanpassingen die in de WWN-3 zijn doorgevoerd, hebben dus geleid tot plausibelere pH waarden.

FIGUUR 3.12 GESIMULEERDE pH_{H_2O} VAN HET BODEMVOCHT ONDER DE REFERENTIESITUATIE (HUIDIGE KLIMAAT EN HYDROLOGIE) VOOR DE WWN-2.30 EN WWN-3.03. BIJ WWN-2.30 IS HET DEPOSITIE SCENARIO 'VOORTZETTING HUIDIG BELEID' GEHANTEERD, BIJ WWN-3 IS EEN DEPOSITIEFACTOR VAN 1.0 GEHANTEERD



3.3 CONCLUSIE

De nieuwe versie van de WWN ziet er voor het gebied Sang en Goorkens wat betreft de gesimuleerde pH (Figuur 3.8) en ecotoopgroepen (Figuur 3.9) plausibel uit. De ruimtelijke patronen en veranderingen in ecotoopgroepen als gevolg van klimaatverandering en zuur- en stikstofdepositie zijn verklaarbaar en worden als plausibel bevonden (Figuur 3.10). Validatie op basis van veldgegevens en een vegetatiekaart van het gebied is zeer wenselijk om dit beeld te bevestigen en nog meer vertrouwen in de resultaten te krijgen.

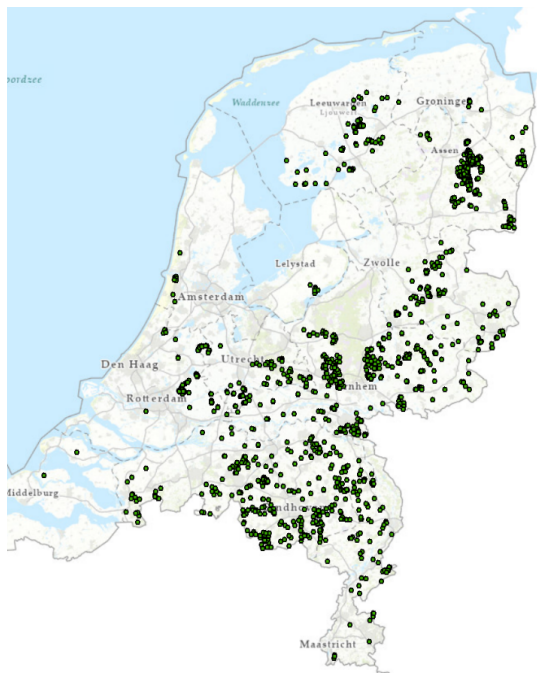
3.4 LANDELIJKE VALIDATIE

3.4.1 METHODE

Om te bepalen of de gesimuleerde pH en voedselrijkdom overeenkomen met indicatiewaarden voor zuurgraad en voedselrijkdom, worden deze vergeleken met een nationale database van goed gelocaliseerde vegetatieopnamen. Een dergelijke analyse werd eerder uitgevoerd voor de indicatiewaarde voor vocht (Witte *e.a.*, 2011) en later voor alle drie de indicatiewaarden op de voorloper van de WWN (Van Ek *e.a.*, 2014). Hier herhalen we die validatie, maar maken we gebruik van standplaatsfactoren die met metarelaties zijn berekend, in plaats van rechtstreeks met een landelijk bodemchemisch model. Vergelijking van onze validatie met die uit 2014 is daarom niet goed mogelijk en laten we dus na.

Bovendien baseren we, anders dan (Van Ek *e.a.*, 2014) de validatie op een recente versie van het Landelijk Hydrologisch Model (LHM), met uitkomsten die zijn neergeschaald met Darcian Downscaling (Hoogewoud & Bootsma, 2019) naar een ruimtelijke resolutie van 25 m. Het gaat uiteraard om hydrologische uitkomsten voor de huidige situatie (langjarig gemiddelde grondwaterstanden en kwelfluxen voor de periode 1981 – 2010). Omdat de neerschaling niet overal is geslaagd of geen hydrologische invoer beschikbaar was, maar ook omdat de WVN niet voor alle rastercellen een uitkomst kon berekenen, houden we voor deze validatie 1945 vegetatieopnamen over (Figuur 3.13).

FIGUUR 3.13 VEGETATIEOPNAMEN GEBRUIKT VOOR DE LANDELIJKE PLAUSIBILITEITSSTUDIE (GROENE BOLLETJES) EN LIGGING VAN NATUURGEBIEDEN (ORANJE)

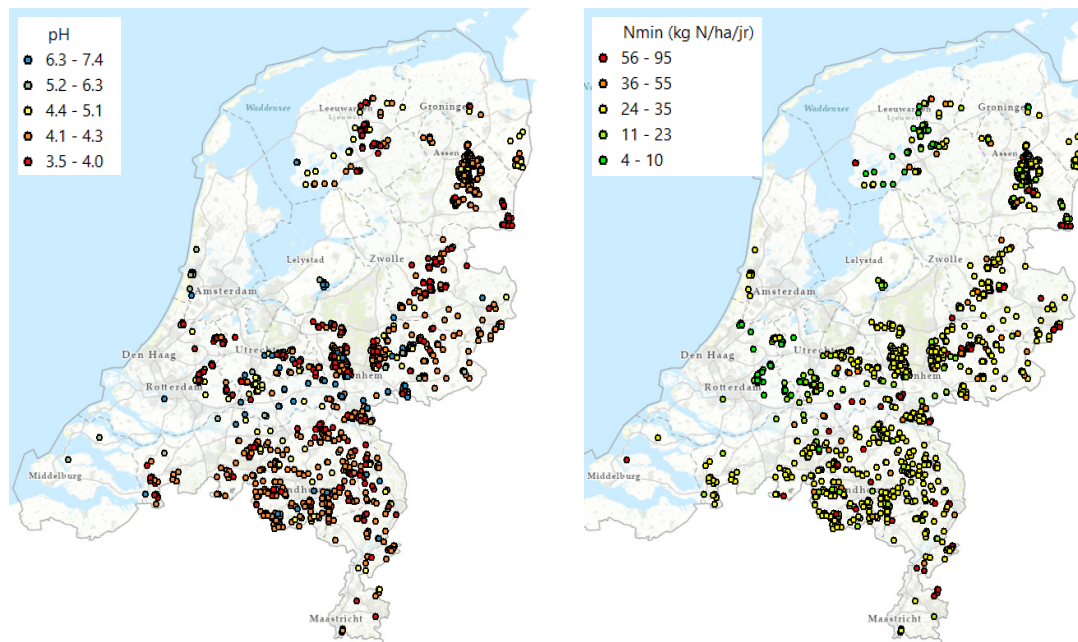


3.4.2 RESULTATEN

PLAUSIBILITEIT GESIMULEERDE KAARTEN VAN PH EN VOEDSELRIJKDOM

De ruimtelijke patronen van zowel de gesimuleerde zuurgraad als mineralisatie van stikstof zijn op landelijk niveau plausibel. De hogere zandgronden hebben een lage pH in het bereik van 3.5 – 4.3, terwijl in het laaggelegen rivierengebied met meer buffering een zuurgraad van 5.2 – 6.4 optreedt. De stikstofmineralisatie is zeer beperkt in de veenweidegebieden in het westen van het land door de ondiepe grondwaterstanden en hoge denitrificatie, matig op de hogere zandgronden zoals de Veluwe, waar een vochttekort de mineralisatie binnen de perken houdt. Onverklaarbaar is de hoge mineralisatie in bijvoorbeeld het Bargerveen. Mogelijk ligt dit aan de hydrologische invoer op landelijke schaal van het LHM, waar op dit moment onvoldoende rekening gehouden kan worden met schijnspiegels.

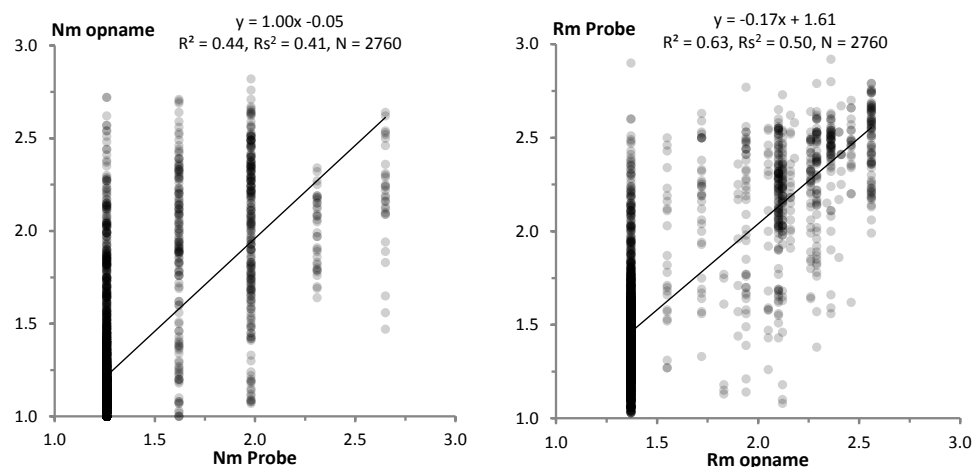
FIGUUR 3.14 GESIMULEERDE ZUURGRAAD (LINKS; PH) EN N-MINERALISATIE (RECHTS; KG N/HA/JR)



VERGELIJKING VAN MODELSIMULATIES MET INDICATIEWAARDEN VEGETATIEOPNAMEN

Als eerste laten we hier zien hoe de met vuistregels uit de bodemkaart en de hydrologische invoer afgeleide indicatiewaarden voor voedselrijkdom (Nm) en zuurgraad (Rm) corresponderen met de waarnemingen in vegetatie-opnamen (Figuur 3.15). Zowel de Pearson-, als de Spearman correlatiecoëfficiënten zijn hoog te noemen, gegeven alle onzekerheden in de LHM-uitkomsten en het aanzienlijk verschil in ruimtelijke resolutie tussen een vegetatieopname (enkele vierkante meter) en een neergeschaalde LHM-cel (25 m²). Hierbij dient te worden opgemerkt dat dit een andere set gegevens betreft dan die in Figuur 3.14.

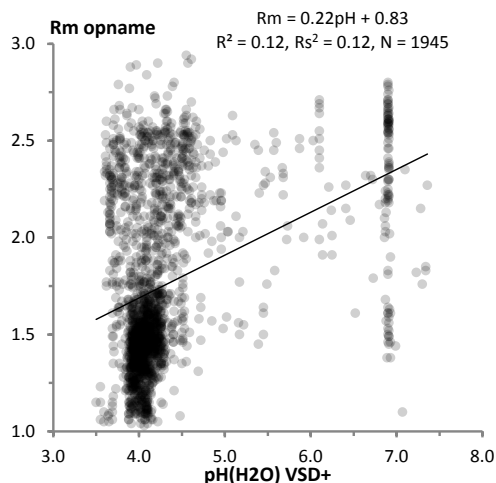
FIGUUR 3.15 GESIMULEERDE INDICATIEWAARDE VOOR VOEDSELRIJKDOM NM EN ZUURGRAAD RM (NM PROBE, RM PROBE) TEGEN DE UIT VEGETATIEOPNAMEN AFGELEIDE NM EN RM



De met VSD+ gesimuleerde pH is uitgezet tegen de zuurindicatie uit opnamen (Figuur 3.16). Er is een positieve relatie tussen pH en Rm, maar het verband is niet sterk. Dat komt niet alleen door het verschil in ruimtelijke schaal (Rm uit vegetatieopnamen vergelijken we met in gridcellen van 25 m gesimuleerde bodem-pH), maar ook doordat er zeer veel opnamen in het zure bereik van pH < 4.5 voorkomen. De verdeling in de opnamen is zo extreem scheef, dat een log-transformatie van de pH-as onvoldoende soelaas biedt.

FIGUUR 3.16

RELATIE TUSSEN GESIMULEERDE STIKSTOFBESCHIKBAARHEID (NMIN + NDEP) EN UIT VEGETATIEOPNAMEN AFGELEIDE INDICATIEWAARDE VOOR VOEDSELRIJKDOM NM



De betrekking tussen voedselrijkdom van de bodem (uitgedrukt in zowel stikstofmineralisatie vermeerderd met 50% van de atmosferische depositie, als in de fosfaatmineralisatie) en de voedselrijkdomindicatie van de vegetatie is zeer zwak (Figuur 3.17). Nemen we daarentegen zowel P- als N-mineralisatie en hun interactie mee als verklarende variabelen, net zoals dat het geval is in de metarelatie voor voedselrijkdom, dan kan 33% van de variatie in 'geobserveerde' mN verklaard worden (Figuur 3.18). De grotere verklaarde variantie door het meenemen van andere variabelen dan alleen N mineralisatie en N-depositie geeft weer dat voedselrijkdom niet te beschrijven is met slechts N-beschikbaarheid, maar ook vraagt om de (interactie met) P-beschikbaarheid. De exacte metarelatie (verg. 2.2) die wordt toegepast bij scenario's in de WWN is hier niet gebruikt: in de referentiesituatie wordt mN ook in de WWN-3 immers nog geschat op basis van kennisregels.

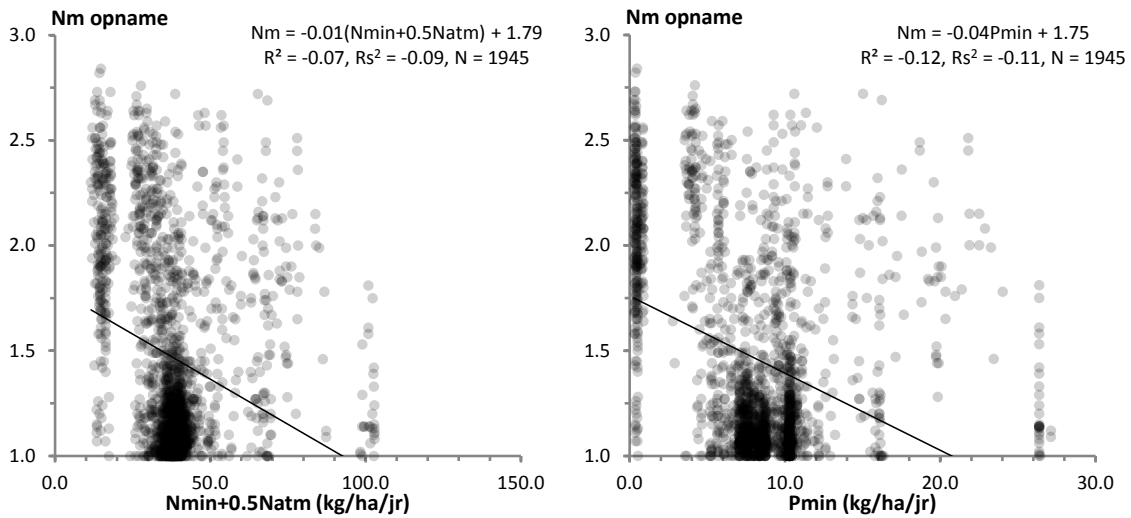
Ook na het meenemen van effecten van P-mineralisatie is het verband tussen gesimuleerde voedselrijkdom en uit opnamen afgeleide indicatiewaarde voor voedselrijkdom niet bijzonder sterk. De voornaamste reden hiervoor is dat de absolute waarden van met CENTURY gesimuleerde N- en P-mineralisatie ongeschikt zijn voor gebruik; alleen de berekende verschillen zijn betrouwbaar. De absolute waarden in CENTURY zijn alleen voldoende betrouwbaar in natuurgebieden die niet oorspronkelijk in landbouwkundig gebruik zijn geweest. Daarom wordt de voedselrijkdom in de WWN in de referentiesituatie gebaseerd op kennisregels. Een vergelijking met gesimuleerde N- en P-mineralisatie is daarom dan ook weinig zinvol. Dit betekent ook dat deze landelijke plausibiliteitstoets slechts beperkte waarde heeft.

Naast bovenstaande kan de zwakke relatie te maken hebben met processen die niet (juist) zijn meegenomen in de procesmodellen, maar ook (mede) een gevolg zijn van onzekerheden in de hydrologische en bodemchemische invoer (o.a. CNP gehalten per BOFEK eenheid), of de procedure waarmee LHM-resultaten zijn neergeschaald van 250 m naar 25 m. Bovendien is er veel spreiding in de gegevens, en komen observaties met lage indicatiewaarde voor voedselrijkdom onevenredig vaak voor. Hierdoor stuurt deze groep van observaties zeer sterk de uitkomsten van de regressie. Ook zijn veel vegetatieopnamen reeds verouderd en kan vegetatie veranderd zijn.

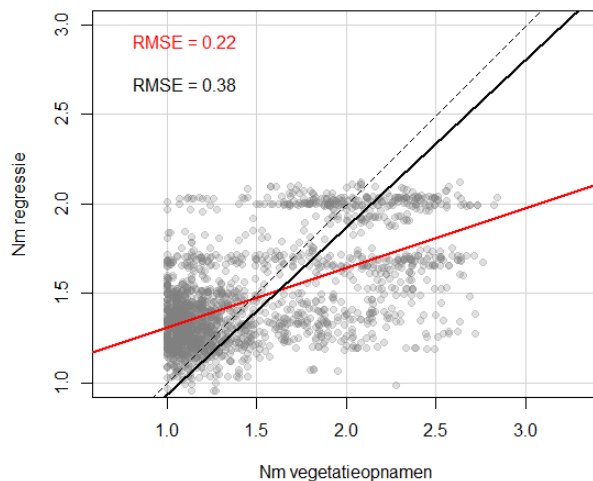
Alhoewel deze resultaten wellicht lijken tegen te vallen, dient te worden opgemerkt dat ook in de voorloper van WWN een zwak verband bestond tussen gesimuleerde standplaatscondities en indicatiewaarden (van Ek *e.a.*, 2019). Verschillende aspecten kunnen hieraan ten grond-

slag kunnen liggen. Uitschieters en (onrealistische) waarden buiten het bereik van (combinaties van omstandigheden in) metarelaties zijn niet verwijderd, maar kunnen een groot effect hebben op de relatie. Daarnaast is er discussie over wat de indicatiewaarde van voedselrijkdom beschrijft, en hoe die meetbaar te maken is. Voedselrijkdom omvat beschikbaarheid van verschillende stoffen in de bodem, waarvan stikstof er slechts één is. Ook wordt indicatiewaarde van voedselrijkdom niet alleen beïnvloed door de beschikbaarheid van voedingsstoffen, maar ook de mate waarin planten daar gebruik van kunnen maken (Bartelheimer & Poschlod, 2016). Daarbij spelen interacties met andere bodemvariabelen een rol, waarbij zuurgraad een voorname rol speelt. Bij lage zuurgraad kan bijvoorbeeld Aluminium in oplossing gaan, waardoor het wortelstelsel van planten wordt aangetast en zo de water- en nutriëntenopname beperkt wordt (Rout *e.a.*, 2001), ondanks dat deze in ruime mate beschikbaar kunnen zijn. In de regressie in Figuur 316 wordt het effect van zuurgraad niet meegenomen. Dit geeft aan dat N-beschikbaarheid niet per definitie een geschikte maat is voor voedselrijkdom, en dat de indicatiewaarde voor voedselrijkdom niet eenduidig te interpreteren is.

FIGUUR 3.17 LINKS: GESIMULEERDE STIKSTOFMINERALISATIE PLUS 50% VAN DE ATMOSFERISCHE STIKSTOFDEPOSITIE TEGEN DE OPNAMEGEMIDDELDE VOEDSELINDICATIE MN. RECHTS: GESIMULEERDE FOSFAATMINERALISATIE TEGEN DE OPNAMEGEMIDDELDE VOEDSELINDICATIE MN



FIGUUR 3.18 OPNAMEGEMIDDELDE VOEDSELINDICATIE MN VERSUS MIDDELS REGRESSIE VOORSPELDE MN. DE STAPSGEWIJZE MEERVOUDIGE REGRESSIE GEBASEERD OP AIC LEIDT TOT HET MODEL $NM = 0.11 - 1.99 NATM + 1.20 NMIN - 1.23 PMIN + 0.0008 NMIN:PMIN$. ALLE VARIABELEN ZIJN SIGNIFICANT ($P < 0.001$, $R^2_{ADJ} = 0.33$). IN ROOD IS DE REGRESSIELIJN EN STANDAARDFOUT (RMSE) VOOR DE RELATIE VOOR DE FIT MÉT INTERCEPT, IN ZWART ZONDER INTERCEPT. DE REGRESSIE ZONDER INTERCEPT LEIDT TOT HET MODEL $NM_{VOORSPELD} = 0.93 * OPNAMEGEMIDDELDE MN$ ($P < 0.001$)



3.4.3 CONCLUSIE

In landelijke plausibiliteitstoets is de relatie tussen de met WWN-3 gesimuleerde voedselrijkdom en de voedselrijkdom afgeleid uit vegetatieopnamen zwak. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de schematisatie van de ondergrond in het landelijke hydrologische model. Deze is te grof om nauwkeurige invoer te leveren voor de WWN-toepassingen waarbij een relatie wordt gelegd met vegetatieopnamen op lokale schaal (in grasland doorgaans 2 x 2 m). De conclusie is dat de landelijke plausibiliteitstoets door te grote onzekerheid in model in- en uitvoer en de beperkte omvang van de validatiedata van weinig toegevoegde waarde is om het functioneren van de WWN-3 te kunnen beoordelen.

4

INVLOED VAN EXTREEM DROGE JAREN OP STANDPLAATSCONDITIES

4.1 AANLEIDING

De WWN is er tot dusver gericht op het bepalen hoe klimaat en waterbeheer doorwerken op de potentiële vegetatie. Dat gebeurt aan de hand van simulaties over perioden van dertig jaar. Die dertig jaar komt voort uit de definitie van klimaat, dat de variatie in weersomstandigheden over een periode van dertig jaar samenvat. Vooral na de droge zomers van afgelopen jaren (2018 t/m 2020) is duidelijk geworden dat kennis ontbreekt over hoe extreme jaren doorwerken op bodemchemie, beschikbaarheid van voedingsstoffen en vochtvoorziening, en hoe dit in potentie zou kunnen doorwerken op de vegetatie.

Een doel van de ontwikkeling in WWN-3 was om te verkennen in hoeverre de WWN-3, met uitbreiding van stikstofdepositie, kan worden gebruikt om inzicht in effecten van klimaatextremen op natuur te verkrijgen. In een enquête gaven natuurbeheerders aan dat de droogte van 2018 vooral schadelijk was ten gevolge van de verzuring: verdroging en verzuring zouden een giftige mix vormen, fataal voor bijvoorbeeld inlandse eiken (Witte *e.a.*, 2020b). In dit hoofdstuk wordt daarom tevens verkend of de in de WWN gesimuleerde processen ook kunnen worden gebruikt voor het beoordelen van de gecombineerde gevolgen van droogte en bodemverzuring. Op basis van de uitkomsten van deze verkenning kan worden bepaald welke stappen nodig zijn om analyse van extreme gebeurtenissen eventueel verder te operationaliseren in volgende versies van de WWN.

Zoals in ieder hoofdstuk van dit rapport is in de hoofdtekst een samenvatting gegeven, en zijn details te vinden in de bijlage (Bijlage V).

4.1.1 ACHTERGROND DROOGTE

Droogte heeft zowel direct als indirect effect op vegetatie. Directe effecten ontstaan door vochttekorten, waardoor de vitaliteit van vegetatie afneemt, of planten afsterven. In de WWN wordt vochttekort gekwantificeerd met behulp van transpiratiereductie van een referentiegewas, berekend op dagbasis over een periode van 30 jaar. Uit de dagelijkse transpiratiereductie wordt per jaar de maximale 10-daagse som berekend. Deze wordt vervolgens gemiddeld over een periode van 30 jaar, en levert de maat *transpiratiestress (TS)* op. Met deze procedure wordt per jaar de periode geselecteerd waarin de hoogste droogtestress optreedt (Bartholomeus & Witte, 2013).

Biotische indirecte effecten ontstaan door een toegenomen vatbaarheid voor ziekten, plagen (letterzetter) en natuurbranden. Dergelijke biotische zaken zijn niet expliciet in de WWN opgenomen. In plaats daarvan wordt druk van biotische factoren tijdens droogte impliciet meegenomen in de relatie tussen transpiratiestress en kansrijkdom van vegetatie over de

lange termijn. Abiotische indirecte effecten van droogte komen tot uiting in de bodemchemie. Door droogte en toegenomen bodemtemperatuur neemt de mineralisatie toe, waarbij op den duur nutriënten en zuur vrijkomen. Indien de buffercapaciteit van de bodem te klein is om dit vrijgekomen zuur te bufferen, wordt de bodem zuurder (i.e. daalt de pH). Bij een pH lager dan ongeveer 4,5 lossen Aluminium(hydr)oxiden op, en gaat **Aluminium** in oplossing als Al^{3+} . Hoge Al^{3+} concentraties zijn toxisch, en hebben als gevolg dat plantenwortels langzamer groeien of afsterven, waardoor minder water en voedingsstoffen kunnen worden opgenomen. Daarnaast interfereert Al^{3+} met de celdeling (Rout *e.a.*, 2001).

Op sommige plekken in ons landschap is die buffercapaciteit laag door lage verwerkingssnelheden van basische kationen (calcium, magnesium en kalium) en uitloging. De zandgronden op de Veluwe zijn bijvoorbeeld al vele millennia blootgesteld aan natuurlijke verzuring door regen, wortelactiviteit en de afbraak van organische stof. Bufferende stoffen zoals Calcium, Magnesium en Kalium zijn op die plekken uitgespoeld en minder voorradig in de bodem en worden maar beperkt aangevuld door de lage verwerkingssnelheid in deze arme gronden. Het natuurlijke verzuringsproces en de uitspoeling van bufferende kationen is de laatste halve eeuw aanzienlijk versneld door langdurige belasting met verzurende depositie van industrie, verkeer en landbouw.

HYPOTHESES

Op basis van bovenstaande hypothetiseren wij dat wanneer het gaat over de effecten van droogte op de bodemchemie het volgende zal gelden:

- Tijdens droogte op locaties met hoge zuurdepositie hogere aluminiumconcentraties aangetroffen worden dan op locaties met lagere depositie.
- Door aluminiumtoxiciteit tijdens droogte de kans op toegenomen mortaliteit en afgenomen vitaliteit groter is op locaties met hoge depositie.

Om deze hypotheses te toetsen is de nieuwe WWN-3 ingezet.

4.1.2 AANPAK EN AFBAKENING

Met de WWN-3 zijn de transpiratiestress (TS) en de jaargemiddelde zuurgraad (pH) en Aluminiumconcentratie (Al) berekend voor het jaar 2018. 2018 is een jaar met extreme droogte in de zomerperiode. Deze met WWN procesmatig gesimuleerde abiotische standplaatscondities zijn vergeleken met observaties van bossterfte en bosvitaliteit. Deze laatste zijn afkomstig uit de nationale bosinventarisaties (NBI6 en NBI7; zie volgende paragraaf). Met statistische analyses is vervolgens bepaald in hoeverre geobserveerde verandering in bossterfte en -vitaliteit kunnen worden verklaard door de gesimuleerde (combinaties van) transpiratiestress, zuurgraad, aluminiumconcentratie, en stikstofdepositie.

Gezien de focus op het gecombineerde effect van verzuring en droogte-effecten op bossen op hoge zandgronden, en omdat het doel is te illustreren in hoeverre de WWN in huidige vorm geschikt is voor effectbepaling van extremen, richt de WWN-analyse zich op grondwateronafhankelijke bossen (grondwatertrap \geq VII; GHG dieper dan 80 cm-mv, GLG dieper dan 120 cm-mv). Alleen bossen die in natuurgebied liggen zijn meegenomen in de analyse. **Belangrijk** is dat de WWN simulaties niet gevalideerd zijn met metingen van abiotische condities in het veld, en dat de aantallen observaties per boomsoort in veel gevallen te beperkt zijn om gefundeerde uitspraken te doen. Dit hoofdstuk heeft dat dan ook niet als doel, maar dient vooral als verkenning van toepassingsmogelijkheden van de WWN-3.

4.1.3 EFFECT VAN DROOGTE OP BOSVITALITEIT

De vitaliteit van de Nederlandse bossen wordt periodiek geïnventariseerd en gebundeld in de Nationale Bosinventarisatie (NBI). In de meetgegevens wordt de dominante boomsoort, het aantal levende bomen, en het aantal dode bomen bijgehouden van een aantal vaste meetlocaties (plots met een straal van 20 m, \approx 0.13 ha). Om het effect van droogte op bos te kwantificeren, hebben we het aantal dode bomen ná de droogte in 2018 vergeleken met het aantal dode bomen vóór de droogte. De droogte van 2018 vond midden in de laatste bosinventarisatie plaats (NBI7; 2017 – 2021). Een aantal observaties stammen dus uit de periode van vóór de droge periode. Om deze reden zijn alleen plots vanaf 2019 meegenomen. Hierbij dient te worden opgemerkt dat ook jaren 2019 en 2020 extreem droog waren, en ook het aantal dode bomen zullen hebben beïnvloed. Met dit stapeffect van meerjarige droogte is in dit onderzoek verder geen rekening gehouden.

Uit de nationale bosinventarisatie komt naar voren dat op landelijk niveau, op zowel grondwaterafhankelijke als onafhankelijke locaties, het aantal dode bomen is door de droogte aanzienlijk gestegen; gemiddeld genomen stijgt het aantal dode bomen van 3 naar 5 per plot (stijging van 66%). Met name in bossen waarbij de dominante boomsoort kenmerkend is voor nattere standplaatscondities neemt de sterfte toe (Figuur 4.1).

Aanvullend op het aantal dode bomen is in de NBI7 indicatief verandering in bosvitaliteit en een potentiële oorzaak daarvan genoteerd, waaronder droogte (aanwezigheid natuurlijke verstoring droogte, gedefinieerd als ‘meerdere afgestorven bomen na duidelijk aanwijsbare droogteperiode’ (Daamen e.a., 2019)). Daaruit komt een ander, tegengesteld, patroon naar voren (Figuur 4.2). Vooral in het geval de dominante boomsoort een naaldboom betreft, is er een aanzienlijk effect van droogte waargenomen.

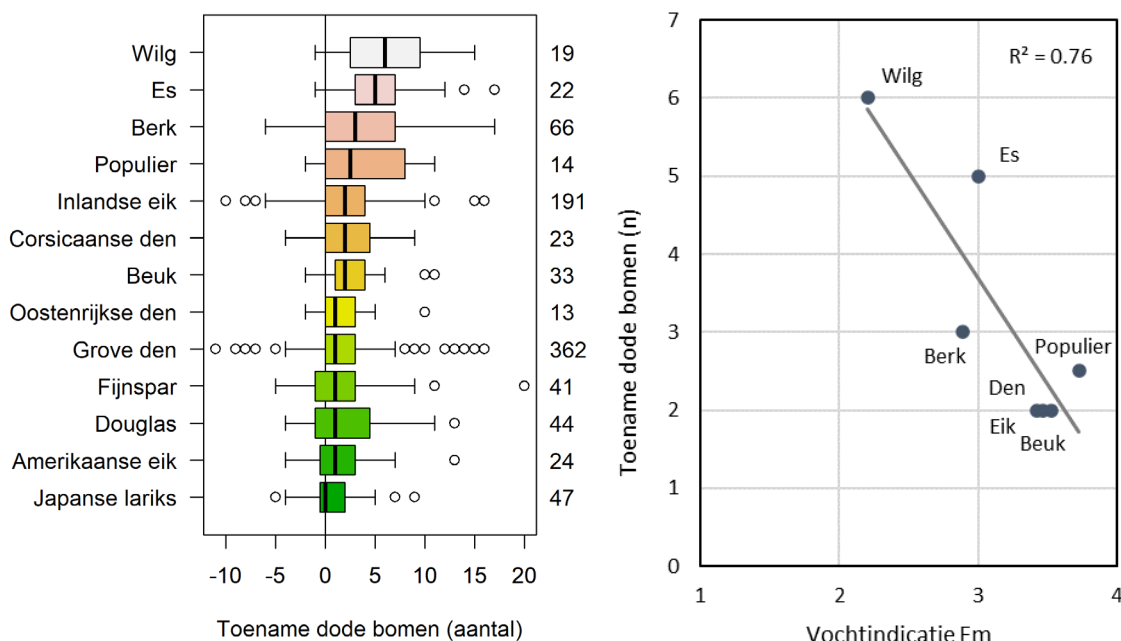
Het lijkt vreemd dat de twee ranglijsten zoveel van elkaar verschillen: waar Wilg, Es en Berk een relatief hoge mortaliteit kennen (Figuur 4.1), is de aantasting van hun vitaliteit (Figuur 4.2) juist relatief gering. Allereerst merken we op dat het aantal observaties (resp. 18, 22 en 66) van deze drie soorten vrij klein is. Maar als we mogen veronderstellen dat de uitkomsten desondanks representatief zijn, dan is een mogelijke verklaring voor hun hoge mortaliteit dat het om drie snelgroeiende loofbomen gaat, zogenaamde ‘competitors’ (Grime, 2001), die in staat zijn met hun snelle groei andere soorten weg te concurreren. Dat gaat echter ten koste van hun vermogen om situaties met grote stress te overleven. Onze hypothese is daarom dat sterfte bij deze soorten snel intreedt en dat de sterfte van andere soorten zich pas later openbaart. Bij bijvoorbeeld de Fijnspar verloopt het sterven dan langzamer: eerst wordt de bast aangetast, daar profiteren parasieten als de Letterzetter van, en dan pas gaat de boom dood. Waar de drie snelle groeiers meteen problemen ondervinden door vochtgebrek, verloopt het afsterven van Fijnspar niet direct via een gebrek aan vocht dat de fotosynthese stillegt, maar via kwetsbaarheid voor parasieten. Het effect daarvan openbaart zich pas later. Bekend is dat de Letterzetter (en ook de Zestand-dennenschorskever, Blauwe dennenprachtkever en Dennenscheerder) ook heeft huis gehouden op de Larix, Grove den en Corsicaanse den (Roskam & De Haeck, 2019).

Een andere verklaring, hiermee samenhangend, is dat bomen die heel langzaam groeien en oud worden, al vele decennia hebben weten te overleven, soms zelfs meer dan 100 jaar. Exemplaren van die soorten hebben ook de droge jaren 1976 en 1977 meegemaakt. Exemplaren die toen niet tegen droogte konden, hebben toen al het loodje gelegd zodat in de gegevens alleen de sterke exemplaren en de betere groeiplaatsen van die soorten overblijft. Die konden

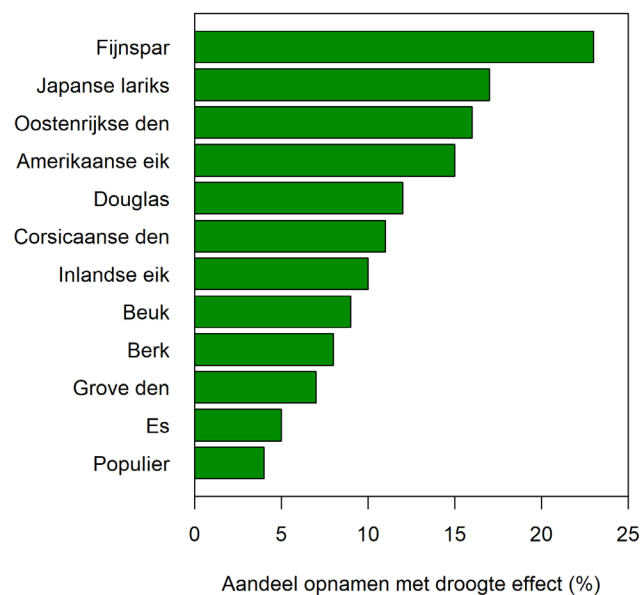
2018 ook al aan. Over de snelle groeiers is dit droogtefilter niet of in mindere mate heengegaan, daarvoor zijn veel exemplaren nog te jong, is onze hypothese.

Verder is het mogelijk dat een systematische verandering in beheer een rol speelt. Op veel plekken is de waterhuishouding aangepast om natte natuur te realiseren. Een toename in sterfte van aan vochtige standplaatsen gebonden soorten zou in dat geval kunnen worden verklaard door een te grote toename van zuurstofstress.

FIGUUR 4.1 VERANDERING (VOOR EN NA 2018) IN HET PLOTGEMIDDELDE AANTAL DODE EXEMPLAREN VAN EEN BOSTYPE (LINKS) EN DE RELATIE VAN DEZE VERANDERING MET DE VOCHTINDICATIE DIE DE STANDPLAATS VAN DE SOORT KARAKTERISEERT (RECHTS). GEBASEERD OP ALLE PLOTS DE NATIONALE BOSINVENTARISATIES NBI-6 EN NBI-7 (DUS OOK GRONDWATERAFHANKELIJKE LOCATIES) WAARVAN PER BOSTYPE (DOMINANTE BOOMSORT) MEER DAN 10 HERHALINGEN AANWEZIG WAREN. HET AANTAL OBSERVATIES IS WEERGEGEVEN IN DE GETALLEN RECHTS VAN HET LINKER FIGUUR. DE VOCHTINDICATIE GEEFT DE MEDIANE RUNHAAR-VOCHTINDICATIEWAARDE MF WEER VAN ALLE PLOTS VAN DE NATIONALE BOSINVENTARISATIE WAARIN DE SOORT IS AANGETROFFEN



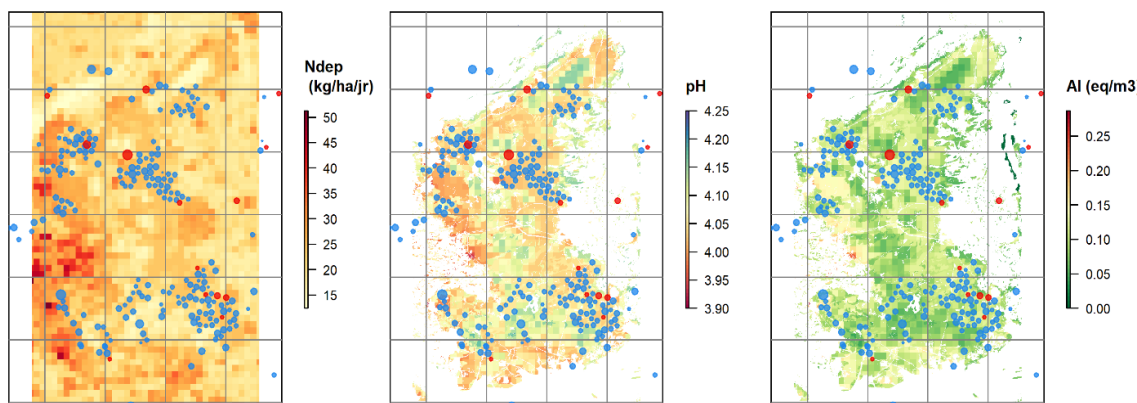
FIGUUR 4.2 AANDEEL VAN ALLE NBI7 OPNAMEN WAAR EEN AFNAME VAN BOSVITALITEIT DOOR DROOGTE IS TOEGEKEND. HET AANDEEL IS BEREKEND OP BASIS VAN ALLE OPNAMEN IN NEDERLAND VANAF 2019 (DUS NIET ALLEEN DE HOGE ZANDGRONDEN)



4.1.4 GESIMULEERDE STANDPLAATSCONDITIES IN 2018

Om een beeld te krijgen van de ruimtelijke samenhang tussen stikstofdepositie, zuurgraad, en Aluminium-concentratie, zijn hieronder enkele WWN-3 resultaten gepresenteerd voor alle grondwateronafhankelijke ($GT \geq VII$) natuurgebieden in en om de Veluwe (Figuur 4.3). Aan de randen is de Veluwe omringd door intensieve landbouw, en is de stikstofdepositie hoog (links). Dieper in de kern van de Veluwe zijn de depositie en daarmee ook de gesimuleerde zuurgraad (midden) en Aluminiumconcentratie (rechts) lager.

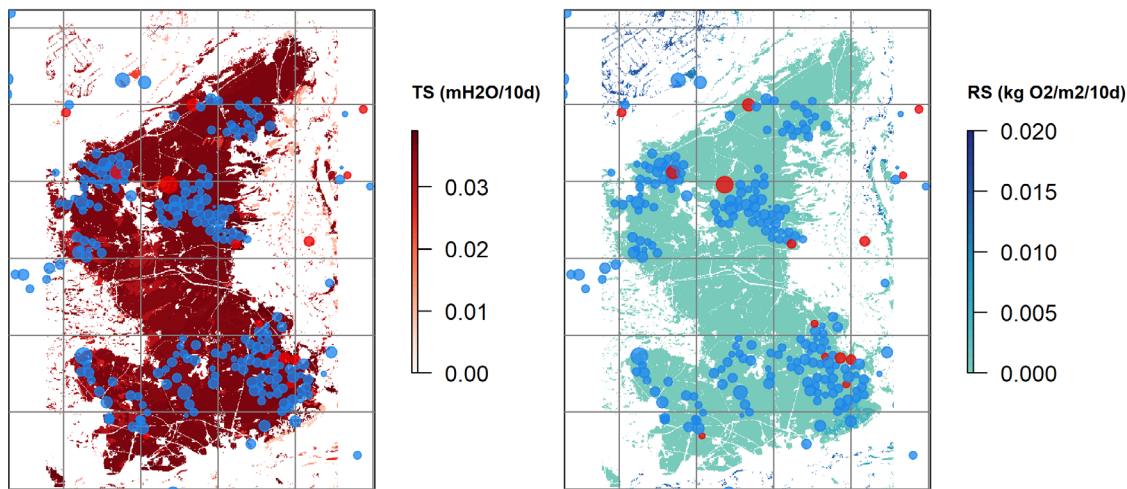
FIGUUR 4.3 STIKSTOFDEPOSITIE (LINKS), GESIMULEERDE ZUURGRAAD (MIDDEN) EN GESIMULEERDE ALUMINIUMCONCENTRATIE (RECHTS) VOOR HET JAAR 2018. DE CIRKELS GEVEN DE LOCATIES VAN DE NEDERLANDSE BOSINVENTARISATIEPLOTS WEER. DE KLEUR VAN DE CIRKELS GEEFT WEER OF ER EEN DROOGTE-EFFECT IS WAARGENOMEN (ROOD = JA), DE GROOTTE IS GESCHAALD NAAR DE TOENAME VAN HET AANTAL DODE BOMEN TUSSEN 2012-2013 EN 2019-2020. ALLEEN GRONDWATERONAFHANKELIJKE GEBIEDEN ZIJN GEPRÉSENTÉERD



Uit de WWN simulaties komt een stijging van de Aluminiumconcentratie en de zuurgraad (daling van pH) naar voren als gevolg van de droogte in 2018 (). Voor zandgrond is de jaargemiddelde Aluminiumconcentratie in 2018 ongeveer 2 keer zo hoog als in 2017 en 30% hoger dan in 2016. De jaargemiddelde zuurgraad daalt in 2018 met ca. 0.1 pH-eenheid ten opzichte van 2017. Uit de WWN-3 simulaties komt naar voren dat, zoals verwacht, de gesimuleerde pH afneemt met toenemende depositie, en de aluminiumconcentratie daarmee toeneemt (Figuur 4.5). Opmerkelijk is dat de toename van het aantal dode bomen toeneemt met respiratiestress, maar afneemt met transpiratiestress. Dit betekent dus dat bomen op relatief vochtige standplaatsen (relatief: alle standplaatsen hadden een diepe grondwaterstand zodat verschillen in RS en TS alleen samenhangen met de bodemfysische eigenschappen, i.e. BOFEK-eenheid) meer te lijden hadden van de droogte, dan relatief droge standplaatsen. Deze bevinding komt overeen met het resultaat dat soorten van vochtige milieus een hogere mortaliteit hadden dan soorten van droge milieus (Figuur 4.1 rechts). Hier wordt in sectie 4.1.6 nader op ingegaan.

Wat betreft vochtvoorziening is duidelijk dat er sprake was van een lagere vochtbeschikbaarheid in 2018 ten opzichte van normaal. Gemiddeld over de jaren 2010 t/m 2020 is de met WWN gesimuleerde transpiratiestress circa 0.006 m water in de droogste aaneengesloten periode van 10 dagen (dit betekent dat een standaardgewas(gras) in een droge periode van 10 dagen gemiddeld 6 mm water tekort komt om maximaal te kunnen transpireren). In 2018 was de transpiratiestress vaak groter dan 0.030 m $H_2O/10$ d, i.e. een factor 5 hoger dan langjarig gemiddeld. Daar staat tegenover dat er nauwelijks een zuurstoftekort (respiratiestress RS) optrad op de Veluwe, terwijl dat wel het geval is voor de periode van 2010-2020. Voor die periode is het zuurstoftekort gemiddeld 0.013 kg $O_2/m^2/10d$. Transpiratie- en respiratiestress zijn per bodemfysische eenheid berekend; bij gebrek aan hoge grondwaterstanden ten opzichte van maaiveld binnen een bodemfysische eenheid is er dus geen variatie, wat mede het homogene beeld van zowel TS als RS verklaart (Figuur 4.4).

FIGUUR 4.4 GESIMULEERDE TRANSPIRATIESTRESS (TS, LINKS) EN RESPIRATIESTRESS (RS, RECHTS) VOOR HET JAAR 2018. DE CIRKELS GEVEN DE LOCATIES VAN DE NEDERLANDSE BOSINVENTARISATIEPLOTS WEER. DE KLEUR VAN DE CIRKELS GEEFT WEER OF ER EEN DROOGTE-EFFECT IS WAARGENOMEN (ROOD = JA), DE GROOTTE IS GESCHAALD NAAR DE TOENAME VAN HET AANTAL DODE BOMEN TUSSEN 2012-2013 EN 2019-2020. ALLEEN GRONDWATERONAFHANKELIJKE GEBIEDEN ZIJN GEPRÉSENTEERD

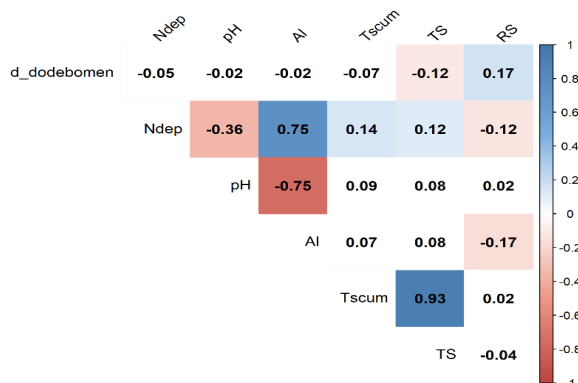


4.1.5 RESULTATEN

RELATIE TUSSEN STANDPLAATSCONDITIES TIJDENS DROOGTE EN TOENAME BOSSTERFTE

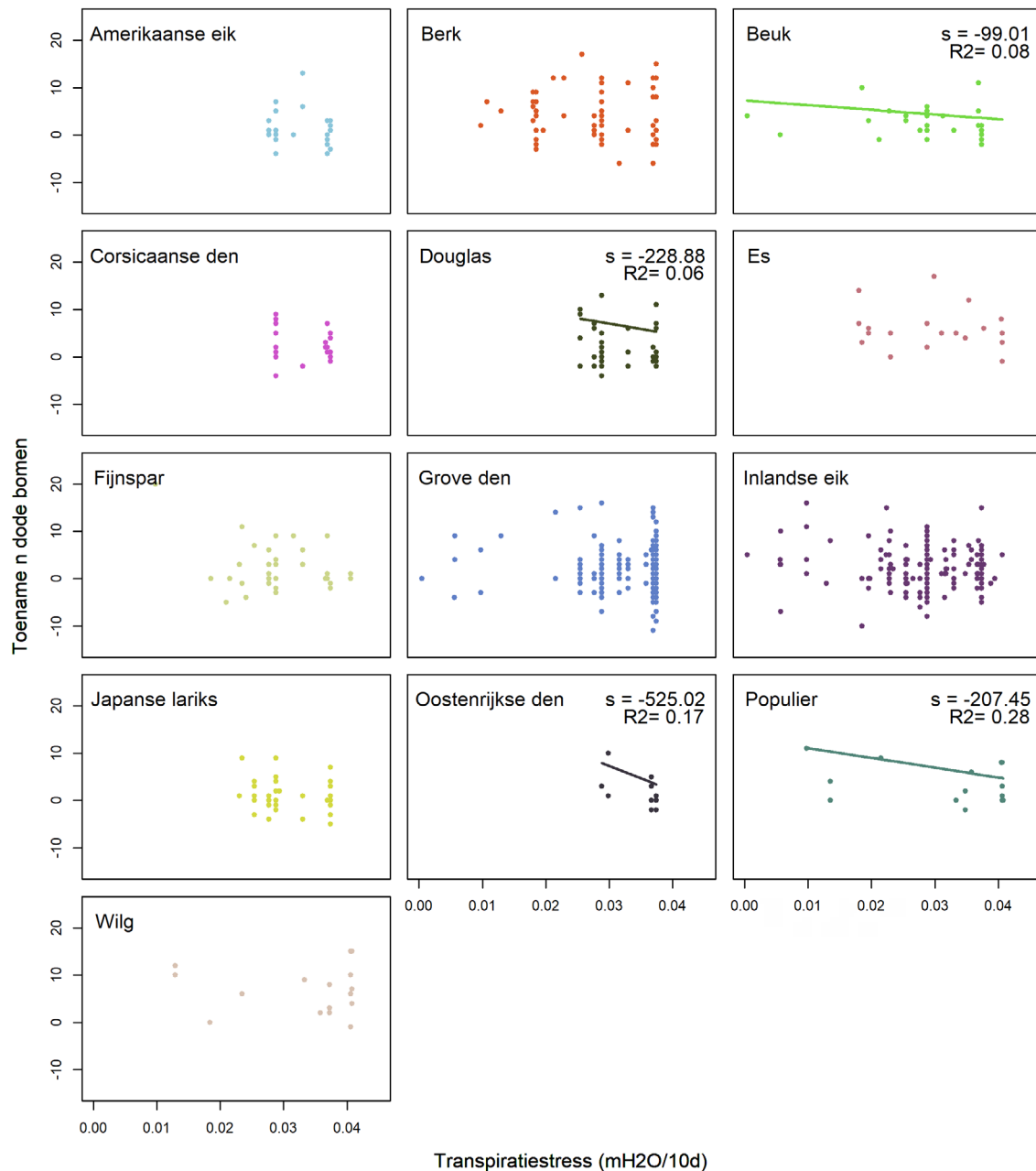
De verandering in het aantal dode bomen is – over alle boomsoorten gemiddeld – alleen (zeer zwak) gerelateerd aan gesimuleerde transpiratie- en respiratiestress (Figuur 4.5). Weliswaar is dit verband negatief, wat aan zou geven dat bossterfte toeneemt met minder transpiratiestress. Dit druist in tegen de oorspronkelijke hypothese dat droogte tot een toename van bossterfte heeft geleid. Zoals verwacht is de aluminiumconcentratie sterk gerelateerd aan depositie en zuurgraad. We hebben in deze analyse niet gekeken naar het verband tussen de afwijking in 2018 van standplaatsfactoren en de toename van het aantal dode bomen, c.q. de afname van de bodemvitaliteit. Het kan zo zijn dat plots die in 2018 meer transpiratiestress hadden dat in de voorgaande 30 jaar ook hadden, en ook gemiddeld meer dode bomen bevatten die mogelijk al beter aan droogte waren aangepast.

FIGUUR 4.5 PEARSON CORRELATIES TUSSEN DE TOENAME VAN HET AANTAL DODE BOMEN EN MET WVN-3 GESIMULEERDE STANDPLAATSCONDITIES. DE WAARDEN EN KLEUREN GEVEN DE CORRELATIECOËFFICIËNT WEER. ALLEEN SIGNIFICANTE CORRELATIES ($P < 0.05$) HEBBEN EEN KLEUR. NDEP = STIKSTOFDEPOSITIE, pH = ZUURGRAAD, AL = ALUMINIUMCONCENTRATIE, RS = RESPIRATIESTRESS, TS = TRANSPIRATIESTRESS, TSCUM = CUMULATIEVE TRANSPIRATIESTRESS, D_DODEBOMEN = TOENAME IN AANTAL DODE BOMEN



Ook uitgesplitst per boomsoort bleek transpiratiestress slechts een (klein) deel van de bossterfte in 2018 te kunnen verklaren (Figuur 4.6). Bij een aantal soorten is flinke spreiding (fijnspar, grove den), die mogelijk verklaard kan worden door andere standplaatsfactoren zoals pH, Al, N-depositie. De volgende paragraaf gaat hier op in.

FIGUUR 4.6 RELATIE TUSSEN TRANSPIRATIESTRESS EN TOENAME AANTAL DODE BOMEN (NBI-7, 2019-2020), UITGESPLITST PER BOOMSOORT. DE RESULTATEN HEBBEN BETREKKING OP GRONDWATERONAFHANKELIJKE ($GT \geq VII$) LOCATIES UIT DE NATIONALE BOSINVENTARISATIE IN NATUURGEBIEDEN. LINEAIRE REGRESSIELIJNEN ZIJN ALLEEN GETOOND INDIEN VOLDOENDE SIGNIFICANT ($P < 0.1$)



WELKE VARIABELEN VERKLAREN TOENAME BOSSTERFTE?

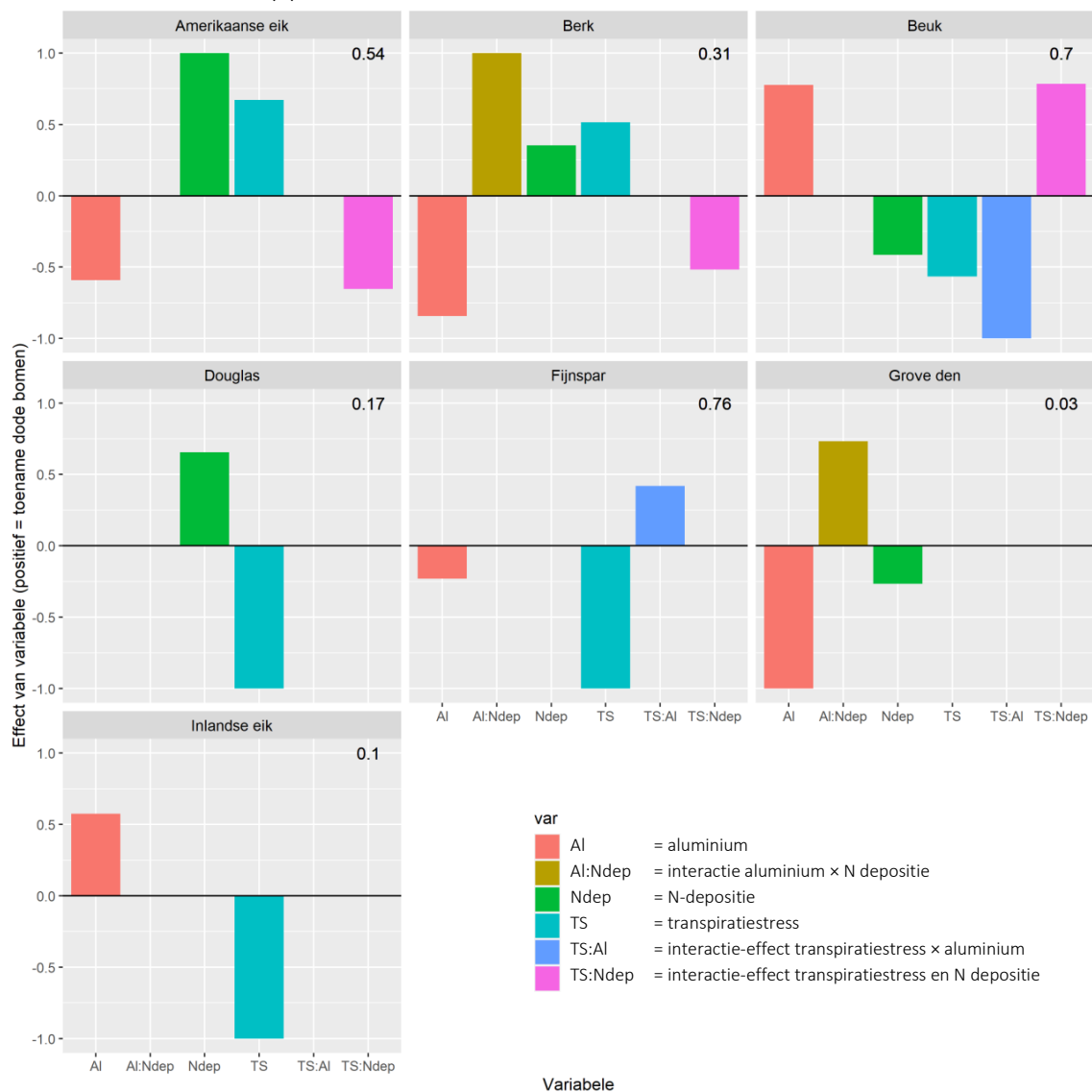
Met de statistische analyse is ook bepaald welke variabelen verder de bossterfte en afname in bosvitaliteit het best kunnen verklaren. Gezien het vrij beperkte aantal herhalingen zijn deze analyses als indicatief te beschouwen. Uit de analyses volgt dat de verandering van het aantal dode bomen voor de meeste bomen voor een groot deel verklaard kan worden door een combinatie van transpiratiestress, aluminiumconcentratie en stikstofdepositie (stikstofdepositie is meegenomen als verklarende variabele omdat deze kan bijdragen aan gevoeligheid van bossen voor ziektes en plagen). Vooral voor fijnspar, beuk en Amerikaanse eik zijn deze omgevingsvariabelen gerelateerd aan het aantal dode bomen (hoge R^2 , Figuur 4.7). Voor bossen met Corsicaanse den en Japanse lariks kon daarentegen geen van deze standplaatsfactoren de verandering in het aantal dode bomen verklaren (en zijn resultaten weggelaten). De sturende factor achter de verandering in het aantal dode bomen verschilt per boomsoort.

Kijken we naar de factoren die bijdragen aan een toename van het aantal dode bomen, dan lijkt vooral stikstofdepositie daartoe te behoren (Amerikaanse eik, berk, Douglas), al dan niet als combinatie effect met toename van aluminium (berk, grove den) of transpiratiestress (beuk). Ook de aluminiumconcentratie leidt tot een toename van aantal dode bomen bij inlandse eik en beuk. Hoge transpiratiestress leidt alleen bij Amerikaanse eik en berk tot toename van aantal dode bomen, maar daar zijn stikstofgerelateerde variabelen van groter belang.

Kijken we naar factoren die het grootste effect hebben op de verandering van het aantal dode bomen (dus ongeacht het een toe- of afname is), dan is in de meeste gevallen transpiratiestress de belangrijkste factor (Douglas, fijnspar, inlandse eik, en ook beuk in combinatie met Al). Het aantal dode bomen neemt in die gevallen echter ook nu af met toenemende transpiratiestress. Ook de aluminiumconcentratie speelt vaak een voorname rol in de verandering van het aantal dode bomen, zoals bij Grove den, Inlandse eik, Berk en Beuk. Bij Inlandse eik en Beuk lijkt een verhoogde aluminiumconcentratie gerelateerd aan een toename van het aantal dode bomen, maar bij de andere soorten juist aan een afname van het aantal dode bomen. Bij bossen met Amerikaanse eik is een toename van het aantal dode bomen voornamelijk gerelateerd aan een toename van transpiratiestress en stikstofdepositie. Ook bij Douglas, Grove den en Berk neemt het aantal dode bomen toe met verhoogde N-depositie. Bij Grove den en Berk komt dat vooral door een interactie met verhoogde aluminiumconcentratie.

FIGUUR 4.7

RELATIEVE BIJDRAGE VAN VARIABLEN AAN VARIATIE IN TOENAME VAN AANTAL DODE BOMEN (>2019 T.O.V. 2012-2013), UITGESPLITST PER DOMINANTE BOOMSORT. HET EFFECT IS BEPAALD MET DOMINANTIEANALYSE OP STAPSGEWIJZE AIC-GEBASEERDE LINEAIRE REGRESSIE (ZIE BIJLAGE V.III). HOE GROTER DE BALK, HOE GROTER HET EFFECT. NEGATIEVE GETALLEN GEVEN EEN NEGATIEF VERBAND MET TOENAME AANTAL DODE BOMEN WEER. INTERACTIES TUSSEN VARIABLEN ZIJN WEERGEVEN MET EEN ':'. HET GETAL RECHTSBOVEN GEEFT DE VERKLAARDE VARIATIE WEER (R^2)

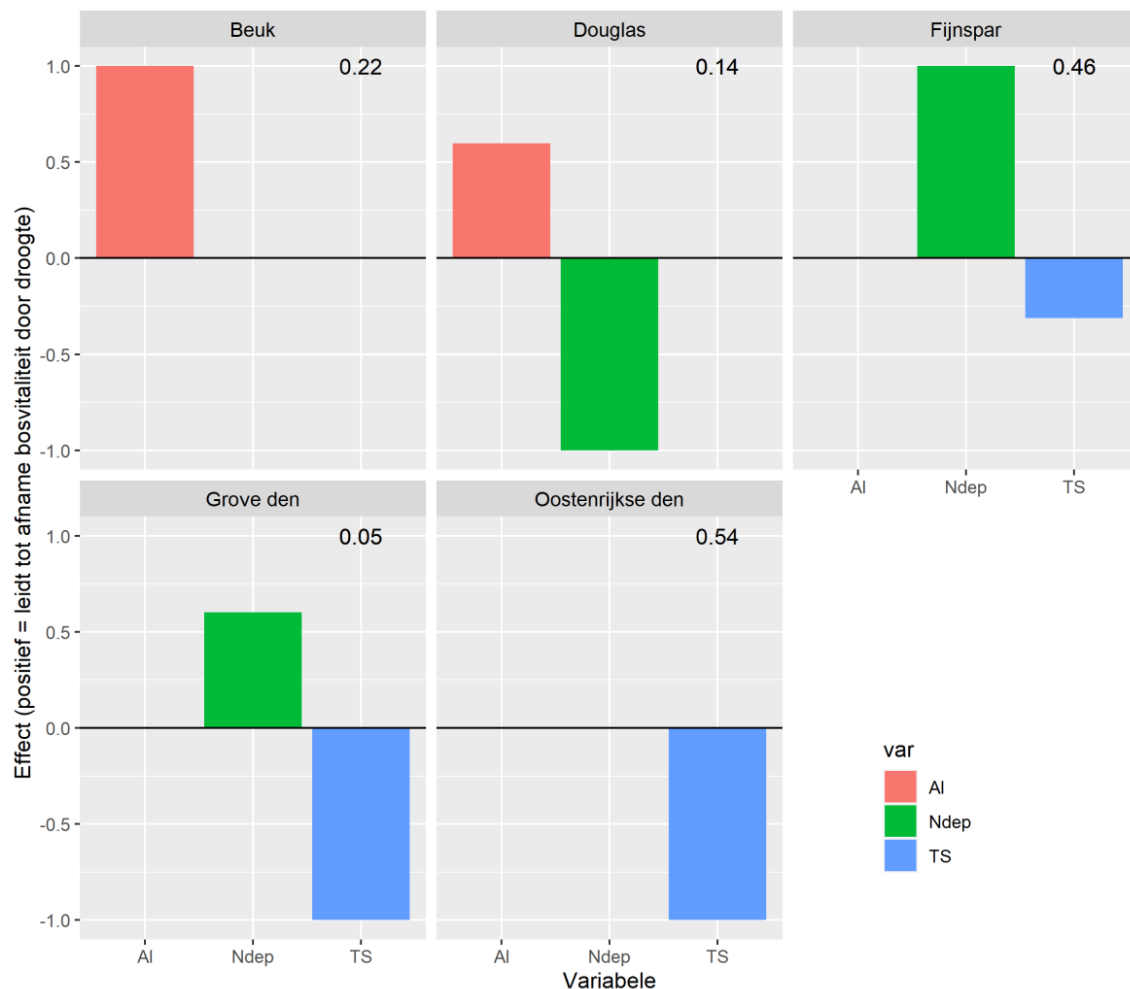


RELATIE TUSSEN STANDPLAATSCONDITIES EN WAARGENOMEN DROOGTE-EFFECT

Behalve het aantal dode bomen is bij de laatste bosinventarisatie (NBI7) aangegeven of verminderde bosvitaliteit is opgetreden door droogte (ja/nee). Een belangrijke kanttekening is dat het geobserveerde droogte-effect niet is vastgesteld in de voorgaande bosinventarisatie. Het is daardoor niet mogelijk te bepalen of bosvitaliteit is afgenomen door de droogte in 2018, of dat ook daarvoor al verminderde vitaliteit optrad.

In Figuur 4.8 is te zien dat een lage bosvitaliteit in NBI7 vooral optreedt op locaties met hoge stikstofdepositie (fijnspar en grove den) of hoge aluminiumconcentraties (beuk en Douglas); of dit duidt op causaliteit is op basis van deze beperkte dataset niet met zekerheid te zeggen. Opvallend is dat transpiratiestress geen rol speelt bij vitaliteit van Beuk en Douglas. Bij de overige boomsoorten leidt hogere transpiratiestress zelfs tot minder gevallen waar afgenomen bosvitaliteit is waargenomen.

FIGUUR 4.8 RELATIEVE BIJDRAGE VAN STANDPLAATSFACTOREN AAN GEOBSERVEERDE VERMINDERDE BOSVITALITEIT DOOR DROOGTE (NB17), UITGESPLITST PER DOMINANTE BOOMSOORT. HET EFFECT IS BEPAALD MET DOMINANTIE ANALYSE OP STAPSGEWIJZE (AIC-GEBASEERDE) LINEAIRE REGRESSIE. HOE GROTER DE BALK, HOE GROTER HET EFFECT. NEGATIEVE GETALLEN GEVEN EEN NEGATIEF VERBAND MET TOENAME AANTAL DODE BOMEN WEER. HET GETAL RECHTSBOVEN GEEFT DE VERKLAARDE VARIANTIE WEER (NAGELKERKE PSEUDO-R²)



4.1.6 DISCUSSIE

Alvorens in te gaan op de implicaties, is het belangrijk te vermelden dat de WWN simulaties niet gevalideerd zijn met metingen van abiotische condities in het veld, en dat de aantallen observaties per boomsoort in veel gevallen te beperkt zijn om gefundeerde uitspraken te doen over sturende factoren in bossterfte. Dit hoofdstuk heeft dat dan ook niet als doel, maar dient vooral ter verkenning van mogelijkheden met de WWN-3. De nadruk ligt hierbij op de simulatie van standplaatscondities.

De in dit hoofdstuk gepresenteerde resultaten lijken op het eerste gezicht weinig ondersteuning te bieden voor de hypothese dat transpiratiestress tijdens de droogte in 2018 sturend was voor afgenomen bosvitaliteit. Op het eerste gezicht lijkt dit aan te geven dat voor veel boomsoorten een watertekort geen directe rol speelde in geobserveerde afname van bosvitaliteit en toename van aantal dode bomen, en dat andere factoren van grote belang waren. Alleen voor Amerikaanse eik en Berk lijkt hogere transpiratiestress bij te dragen aan toename van het aantal dode bomen. In veel gevallen lijkt stikstof ook een rol te spelen, maar deze analyse biedt te weinig basis om hier concluderende uitspraken over te doen. Dat was niet het doel van deze exercitie, en zou ondersteuning van bijvoorbeeld metingen van zuurgraad, Al-concentratie en vochtgehalten benodigd zijn. Overigens is de verandering in

het aantal dode bomen niet noodzakelijkerwijs een (direct) gevolg van droogte. Ook andere (door droogte geïnitieerde) oorzaken, zoals essentaksterfte, storm, verandering in beheer, of zelfs vernatting, kunnen ten grondslag liggen aan deze verandering. Daarnaast kan niet uit de gegevens worden geëxtraheerd of de bomen die zijn gestorven behoren tot de dominante boomsoort van de betreffende plot, of dat het een andere soort betreft.

Verder is er vaak een negatief verband tussen transpiratiestress en toename van het aantal dode bomen en bosvitaliteit. Dat betekent dat bomen op natte en vochtige standplaatsen meer last hebben gehad van het droge jaar 2018 dan de bomen op droge standplaatsen. Dit is een belangrijk resultaat, het zou kunnen aangeven dat bomen op droge standplaatsen blijkbaar al zodanig zijn aangepast dat ze tegen een stootje kunnen. Op de natte en vochtige standplaatsen staan exemplaren van boomsoorten die niet in een goed wortelstelsel hebben geïnvesteerd. Observaties omtrent verminderde bosvitaliteit door droogte ontbreken helaas voor de uitgangssituatie vóór de droogte. We kijken nu dus niet naar een verandering in droogte-effecten als gevolg van droogte. Ook hebben we daardoor niet gekeken naar het verband tussen de afwijking in 2018 van standplaatsfactoren en de toename van het aantal dode bomen, c.q. de afname van de bodemvitaliteit. Het kan zo zijn dat plots die in 2018 meer transpiratiestress hadden dat in de voorgaande 30 jaar ook hadden, en ook gemiddeld meer dode bomen bevatten die mogelijk al beter aan droogte waren aangepast. Daarnaast heeft eerder onderzoek naar de relatie bosvitaliteit en standplaatsfactoren (in termen van bodemvochtconcentraties) geen duidelijke relatie aan kunnen tonen (Leeters et al. 2007). Zo concluderen Leeters et al. (2007) dat bosvitaliteit een reflectie is van vele omgevingsfactoren en dat het niet goed mogelijk is om, gegeven het grillige temporele verloop in de vitaliteit, hier een harde conclusie aan te verbinden.

De uitkomsten van dit onderzoek zijn deels contra-intuïtief, en onze oorspronkelijke hypothese (droogte leidt tot meer transpiratiestress en hogere aluminiumconcentraties, en verhoogt daarmee de mortaliteit en leidt tot afname van vitaliteit) kan met deze berekeningen niet worden ondersteund. Mogelijk is het zo dat locaties die in 2018 hoge transpiratiestress en Al-concentraties hadden, dat relatief – ten opzichte van andere locaties – in voorgaande jaren ook hadden (bijvoorbeeld in het droge jaar 2013). Gevoelige exemplaren zijn toen reeds al bezweken en uit de plots verdwenen. Een effect van de droogte in 2018 op vegetatie is alleen mogelijk als er nog schade aan te richten is. Dit beeld komt overeen met bevindingen in een recente landelijke studie door Van Ek *e.a.* (2021), waar geen duidelijke effecten van de droogte in 2018 op vegetatie aangetoond konden worden. In deze studie werd droogte gekwantificeerd met de laagste grondwaterstanden (LG3) in 2018 en effect op vegetatie als verandering in indicatiewaarden. De auteurs noemen dat het maximale neerslagtekort in Nederland de afgelopen vijftig jaar al is toegenomen, en waardoor effecten van droogte al in het verleden hebben plaatsgevonden en nu niet meer te constateren zijn.

Verdere kanttekeningen die de interpretatie in perspectief plaatsen zijn:

1. Deze studie is een eerste verkenning met een beperkte dataset. Conclusies zijn dan ook indicatief en zouden deels kunnen berusten op niet-causale correlaties.
2. Door de selectie op grondwateronafhankelijke standplaatsen is het bereik van transpiratiewaarden beperkt en is het aantal observaties beperkt. Voor boomsoorten van natte standplaatsen is het droogte-effect groter, zo laat de nationale bosinventarisatie zien. Deze boomsoorten zijn in deze demonstratie met focus op grondwateronafhankelijke standplaatsen niet meegenomen. Dat had wel gekund met de WWN maar is voor deze demonstratiefunctie niet uitgevoerd.

3. De aluminiumconcentratie betreft de jaargemiddelde waarde en niet een hogere zomerconcentratie in het jaar 2018. Deze zijn echter sterk met elkaar gecorreleerd.
4. Kansrijkdom vegetatie wordt in de WWN als functie van klimaat berekend en historische ontwikkeling speelt geen rol. We kunnen dus niet bepalen hoe vegetatie herstelt/zich ontwikkelt na een extreme gebeurtenis. Daar is een dynamische versie van WWN voor nodig.

4.1.7 CONCLUSIE

Het ruimtelijk beeld van de gesimuleerde standplaatscondities is plausibel. Dit geeft aan dat WWN-3 geschikt zou kunnen zijn om effecten van droogte op standplaatscondities te kunnen simuleren. Om dit hard te kunnen maken, is een vergelijking met geobserveerde standplaatscondities essentieel. Dergelijke gegevens worden niet structureel verzameld, zijn niet/slecht beschikbaar en zeer beperkt. Dit gebrek aan gegevens verhindert de validatie van - en de verdere ontwikkeling van modellen als de WWN. Om de gesimuleerde standplaatscondities te valideren, is daarom als alternatief gebruik gemaakt van observaties van bosvitaliteit. Hierbij dient te worden aangetekend dat de relatie tussen gemeten standplaatsfactoren en bosvitaliteit ook niet eenvoudig en eenduidig is (Leeters *e.a.*, (2007)). In deze validatie stond de hypothese dat bosvitaliteit zou afnemen bij toenemende transpiratiestress centraal. De resultaten van de WWN geven aanleiding voor het verwerpen van deze hypothese, en weerspiegelen dat de natuur complexer in elkaar steekt. Meer onderzoek is nodig om nieuw geformuleerde hypothesen te testen. Daarentegen geeft het complexe verband tussen gesimuleerde standplaatscondities en geobserveerde bosvitaliteit geen aanleiding om de plausibiliteit van WWN resultaten en toepasbaarheid voor extreme jaren te verwerpen.

4.1.8 MEERWAARDE

Met deze verkennende analyse hebben we gedemonstreerd dat de WWN kan worden gebruikt om, naast het bepalen van klimaatgemiddelde standplaatsfactoren, ook inzicht in klimatologische extremen te krijgen. Effecten van een droog jaar in combinatie met langdurige verzuuring op standplaatscondities kunnen met de WWN op procesmatige wijze worden gekwantificeerd en inzichtelijk worden gemaakt. De gesimuleerde veranderingen van standplaatscondities in 2018 ten opzichte van langjarige gemiddelde condities zijn plausibel. Het verband tussen verandering in standplaatscondities en bosvitaliteit beperkt en complex. De oorzaak daarvan is daarentegen niet per definitie een foutieve simulatie van standplaatscondities door de WWN; zoals beschreven ligt dit ook vooral bij de combinatie van validatiegegevens, ecohydrologische processen, en een benodigde bijstelling van de oorspronkelijke hypothese dat de droogte van 2018 een groot effect heeft gehad op vegetatie.

In de huidige vorm, waarbij wordt aangenomen dat vegetatie in evenwicht is met het heersende klimaat, leent de WWN zich echter niet om te bepalen in hoeverre vegetatie uit evenwicht wordt gebracht door extremen, en of/in hoeverre herstel kan plaatsvinden of dat veranderingen reeds kritische waarden (kantelpunten) overschreden hebben waarna herstel praktisch onmogelijk is (Scheffer *e.a.*, 2001). Dit is een belangrijk onderwerp dat veel aandacht krijgt, maar waar nog weinig over bekend is in de praktijk. Om dergelijke antwoorden te beantwoorden is het nodig om de interacties tussen bodem, water, en vegetatie dynamisch te modelleren, en de vegetatieontwikkeling door de tijd te volgen. In een voorganger van de WWN, het model PROBE-3, is een dergelijk successiemodel voor duinen ontwikkeld. Hierin is de vegetatiemodule van de WWN succesvol gekoppeld aan de modellen CENTURY en SWAP. Met de nodige inzet kan ook VSD+ onderdeel gemaakt worden van deze modellentrein, om zo de WWN breder toepasbaar te maken.

5

ACTUALISATIE WATERWIJZER NATUUR

Naast het verbeteren van de voorspelkwaliteit van de WWN door het inbouwen van nieuwe mogelijkheden, is het nodig om de bestaande WWN-onderdelen te onderhouden. De uitkomsten van de WWN hangen af van de invoergegevens, zoals bijvoorbeeld de bodemkaart en gehanteerde vegetatie-typologie. Net zoals er ontwikkelingen in de WWN zijn, zijn invoergegevens onderhevig aan verandering en worden verbeterd en geactualiseerd. Als gevolg daarvan kan het zo zijn dat onderdelen in het model niet meer goed op elkaar aansluiten, of leidt nieuwe invoer tot andere voorspellingen. Dat betekent dat het zo nu en dan noodzakelijk is om de bestaande WWN onderdelen en/of onderliggende modelinvoer te actualiseren. In Fase 3 van de ontwikkeling van de Waterwijzer Natuur is zowel een actualisatie van de knikpuntentabel uitgevoerd, als een aanpassing van de bodemfysische eigenschappen. Beide onderdelen worden in dit hoofdstuk samengevat. Voor meer detail en wetenschappelijke onderbouwing verwijzen wij de lezer door naar Bijlage VII.

5.1 UITBREIDING VAN DE KNIKPUNENTABEL

5.1.1 ACHTERGROND

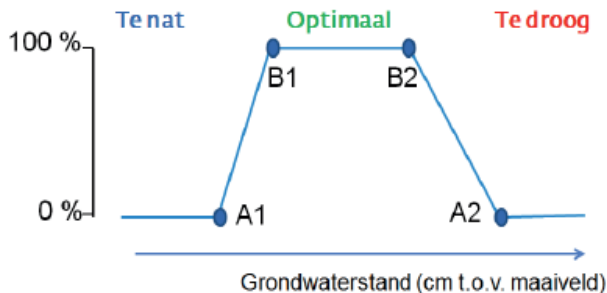
In het deelprogramma WATERNOOD dat is ondergebracht in de WWN, kan worden bepaald of de huidige waterhuishouding voldoet aan vegetatiedoelen. De waterhuishouding wordt hierbij gekarakteriseerd met drie variabelen (Witte *e.a.*, 2018b):

1. GVG : De gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (cm- maaiveld)
2. GLG : De gemiddeld laagste grondwaterstand (cm-maaiveld)
3. DS : Droogtestress: gemiddeld aantal dagen per jaar dat de zuigspanning in de bodem beneden het verwelkingspunt ligt (de waarde van -12000 cm onderschrijdt).

De doelrealisatie (uitgedrukt als percentage) van een doeltype (vegetatie) wordt voor alle drie variabelen bepaald aan de hand van trapeziumvormige functies (Figuur 10.32). Door de doelrealisaties van alle drie variabelen te vermenigvuldigen kan de totale doelrealisatie berekend worden. De trapeziumvormige functie wordt beschreven met zogeheten knikpunten. Deze knikpunten zijn voor plantengemeenschappen, natuurdoeltypen en Natura 2000 habitat-typen door Runhaar en Hennekens (2015) opgesteld op basis van literatuur, datasets, en bij afwezigheid of onvolledigheid van metingen, op expertkennis. De resulterende knikpuntentabel is in de WWN terug te vinden in de knikpuntentabel (...\\WWN\System\Tables\KnikpuntenWaterlood.csv).

FIGUUR 5.1

VOORBEELD VAN EEN TRAPEZIUMVORMIGE DOELREALISATIEFUNCTIE VOOR GRONDWATERSTAND (BV GVG). TUSSEN DE KNIKPUNTEN B1 EN B2 IS DE GVG OPTIMAAL EN DE DOELREALISATIE 100%, TUSSEN KNIKPUNTEN A1 EN B1, OF B2 EN A2, IS DE DOELREALISATIE TUSSEN 0 EN 100%. BIJ GRONDWATERSTANDEN ONDIEPER DAN A1 OF DIEPER DAN A2 IS DE DOELREALISATIE IN HET VOORBEELD 0%. FIGUUR OVERGENOMEN EN AANGEPAST UIT WITTE E.A. (2018B)



De huidige knikpuntentabel is op een aantal punten aan actualisatie toe:

- In de huidige tabel zijn de plantengemeenschappen uit de Vegetatie Van Nederland (VVN95) opgenomen, maar in 2017 is er een revisie van De Vegetatie van Nederland (rVVN17) gepubliceerd, mede om N2000-habitattypen beter te kunnen onderscheiden. De meeste typen zijn niet veranderd, maar een aantal wel, inclusief de nummering. Bovendien zijn er plantengemeenschappen gesplitst en toegevoegd.
- Ook ontbraken in de oude VVN95-typologie sommige vegetatietypen, met name rompgemeenschappen.
- In de huidige tabel is de SBB-typologie van vegetatietypen, een aanvulling op de typologie van VVN95, nog niet opgenomen. Dit betekent dat vegetatiekarteringen die gebruik maken van de SBB-typologie nog niet in de WWN kunnen worden ingelezen.

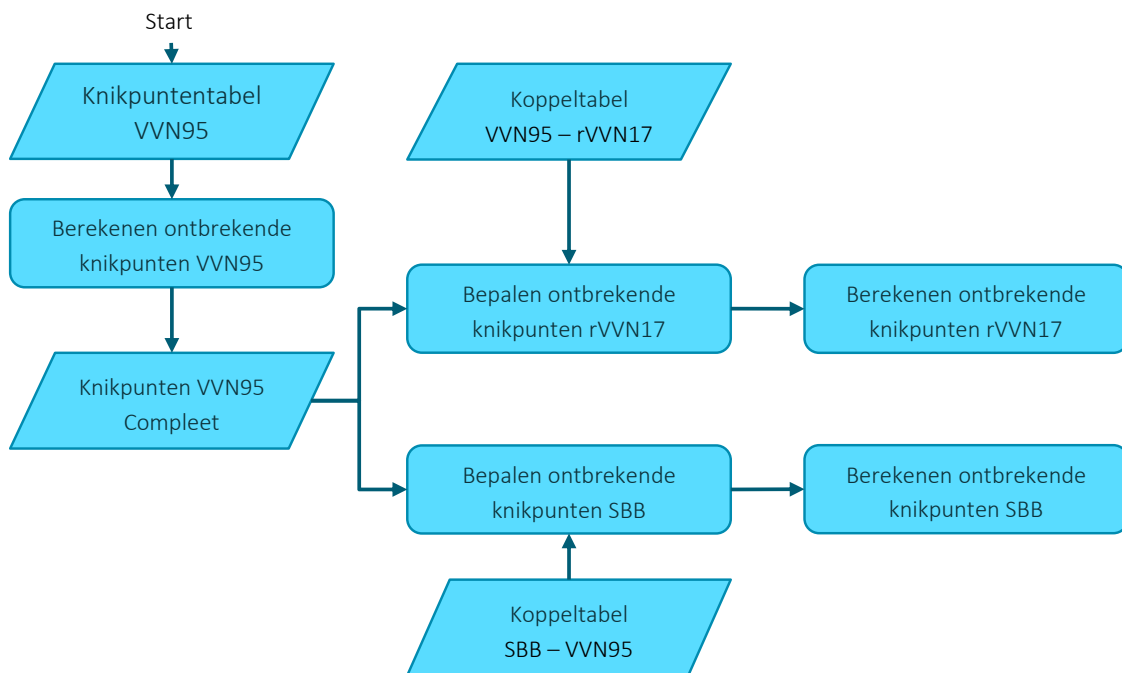
DOEL

Om het gebruiksgemak van WWN te vergroten en er voor de zorgen dat ook de meest actuele vegetatietypologie kan worden gehanteerd, wordt de knikpuntentabel uitgebreid met (1) ontbrekende VVN95 vegetatietypen (2) rVVN17-typen en (3) SBB-typen. Daarvoor hebben we met een generieke methode ontwikkeld waarmee in de toekomst eenvoudig knikpunten voor andere vegetatietypologieën kunnen worden berekend.

5.1.2 METHODE

In deze sectie is de gebruikte methode op hoofdlijn beschreven; zie Bijlage VII voor meer informatie. De totstandkoming van de knikpunten in WATERNOOD voor de plantengemeenschappen volgens de indeling van de Vegetatie van Nederland (VVN95) is beschreven in Runhaar en Hennekens (2015). Voor een deel van de in WATERNOOD gedefinieerde VVN95-syntaxa ontbreken knikpunten. Als eerst zijn voor de ontbrekende VVN95-syntaxa knikpunten berekend (Figuur 5.2). Het betreffen hier vooral rompgemeenschappen. Met een conversietabel, opgesteld door WEnR, tussen de vorige VVN indeling (VVN95) en de gereviseerde VVN indeling (rVVN17) zijn voor het grootste deel van de rVVN-syntaxa knikpunten. De nog ontbrekende knikpunten zijn berekend op basis van 578,345 vegetatie-opnamen uit de landelijke vegetatiedatabank waaraan voor beide indelingen de meest waarschijnlijke syntaxa zijn toegekend. Voor het bepalen van knikpunten voor syntaxa volgens de Staatsbosbeheer-typologie is dezelfde benadering gehanteerd.

FIGUUR 5.2 ALGEMENE WERKWIJZE AANVULLEN KNIKPUNTEN EN CONVERSIE TUSSEN VERSCHILLENDE INDELINGEN. WERKZAAMHEDEN ZIJN WEERGEGEVEN MET , DATABRONNEN MET 



5.1.3 HANDLEIDING BIJ GEBRUIK NIEUWE KNIKPUNTEN

De volgende aspecten zijn van belang voor een juiste herkenning van codering van plantengemeenschappen in de nieuwe knikpuntutentabel.

- De codering van de gereviseerde vegetatie van Nederland (rVVN) is in de knikpuntutentabel (WWN/System/Tables/KnikpuntenWaterlood.csv) aangeduid met R als eerste letter, bijvoorbeeld R01AB23. In overeenstemming met de codering in Synbiosys is, bij plantengemeenschappen die beginnen met een cijfer kleiner dan 10, altijd nul aan het begin toegevoegd (6Aa01 wordt dus 06Aa01)². Alle letters in de syntaxoncode worden in de WWN automatisch omgezet in hoofdletters (06Aa01 wordt 06AA01).
- Er is een kolom in de knikpuntutentabel (ORIGIN) toegevoegd die beschrijft wat de bron van de knikpunten is, met de volgende categorieën:

WATERNOOD	= oorspronkelijk gedefinieerd door Runhaar en Hennekens (2015).
CALC21	= nieuwe knikpunten berekend uit oorspronkelijke knikpunten
AFGELEID21	= VVN - rVVN conversie volgens WeNR vertaaltabel
- Alle codes zijn uniek, wat betekent dat de WWN bij een opgegeven vegetatiekaart alleen de bijpassende knikpunten tot zijn beschikking heeft.
- Steekproefgewijs is bepaald of de nieuw berekende knikpunten overeenkomen met ecologische indicatie van plantengemeenschappen. Dit is geen garantie dat alle nieuwe knikpunten juist berekend zijn. Het is aan te raden bij nieuwe knikpunten hier op bedacht te zijn.

5.1.4 MEERWAARDE

De actualisatie van de knikpuntutentabel heeft de volgende voordelen:

1. De gebruiker kan in het WATERNOOD onderdeel van de WWN nu ook kaarten invoeren waarin de in 2017 gereviseerde codering van De Vegetatie van Nederland wordt gehanteerd. Deze vernieuwde typologie zal langzamerhand de oorspronkelijke versie (1995) vervangen. Voorlopig blijven beide versies in de WWN beschikbaar.
2. In programma's als Excel, R, Python zijn deze 'leading zero's' eenvoudig in te voegen.

2. Rompgemeenschappen zijn nu ook in de knikpuntentabel opgenomen, waardoor een completer beeld met WATERNOOD kan worden verkregen.
3. De gebruiker kan nu ook werken met de Staatsbosbeheertypologie. Voorheen bestonden hier al knikpunten voor, maar die zijn nu verbeterd.

5.2 AANPASSING IN BODEMFYSISCHE EENHEDEN

5.2.1 ACHTERGROND

Deze paragraaf vat de veranderingen in input voor de methode om metarelaties af te leiden samen. De uitkomsten van de metarelaties, en dus de Waterwijzer Natuur, worden beïnvloed door de bodemfysische eenheden. Echter, de eerdere versie van WVN bevatten de bodemfysische eenheden behorend bij BOFEK2012 (Wösten *e.a.* (2013a)). Voor de harmonisatie van VSD+ – Century – en SWAP (paragraaf 2.4) is een update in de bodemfysische eenheden noodzakelijk. {Wösten, 2013 #131 }

De metarelaties zijn afgeleid met de procedure GTST (Groundwater To Stress Transfer). Met deze metarelaties wordt een complexe en rekentijd vretende aaneenschakeling van gedetailleerde modellen omzeild. De metarelaties vormen de rekenkern van de WVN. Zie Bartholomeus en Witte (2013) en Witte *e.a.* (2018a) voor een technische beschrijving van GTST.

Metarelaties in WVN-1

Met behulp van de metarelaties wordt in WVN-1 de uitvoer van hydrologische modellen (GxG-waarden en kwelfluxen) vertaald naar transpiratiestress (TS), zuurstofstress (RS) en de mineralisatie van stikstof en fosfaat (Witte *e.a.*, 2018c). Metarelaties tussen de standaarduitvoer van hydrologische modellen en TS, RS en mineralisatie van P en N zijn opgesteld met GTST volgens de procedure, beschreven in Tabel 5.1.

TABEL 5.1 KORTE OMSCHRIJVING VAN STAPPEN BIJ HET AFLEIDEN VAN METARELATIES IN GTST. OVERGENOMEN UIT WITTE E.A. (2018A)

Stap	Actie
1	Genereren van talloze hypothetische plots die verschillen in hydrologische en bodemfysische omstandigheden.
2	Op basis van 30 jaar weergegevens worden voor elke plot op dagbasis grondwaterstand, vochtgehalte, bodemtemperatuur en transpiratiereductie gesimuleerd met het hydrologisch model SWAP (Van Dam <i>et al.</i> , 2008). Hieruit worden voor elke plot GxG's, transpiratiestress <i>TS</i> en zuurstofstress <i>RS</i> berekend. De 30 jarige tijdreeks van weergegevens stelt een klimaatscenario voor, en kan voor ieder gewenst scenario worden doorgerekend (bijvoorbeeld huidige en toekomstige KNMI klimaatscenario's).
3	Gesimuleerd vochtgehalte en bodemtemperatuur worden in het biochemisch model CENTURY (Fujita <i>et al.</i> , 2013) gebruikt om opbouw en afbraak van organisch materiaal te schatten. Hieruit worden voor elke plot mineralisatie van stikstof N_{min} en fosfaat P_{min} afgeleid.
4	Statistische relaties tussen grondwaterstanden (GxG's) en standplaatscondities <i>TS</i> , <i>RS</i> , N_{min} en P_{min} worden gelegd voor elke bodemtype, weerstation en klimaatscenario: de metarelaties zijn tot stand gekomen.

Metarelaties in WVN-2

De metarelaties zijn in Waterwijzer Natuur 2 uitgebreid met de berekening van de zuurgraad, door de uitkomsten van het model SWAP als invoer te gebruiken voor het model VSD+ (Witte *e.a.*, 2020a). Per SWAP-run berekent VSD+ de bodemvocht-pH voor alle combinaties van: kwelwaterkwaliteitsklasse (5 klassen), depositiescenario (3x) en, begroeiingstype (5x). Voor al deze combinaties (5 x 3 x 5 = 75) en de hypothetische plots is de pH gesimuleerd waarna er een metarelatie is afgeleid, waarbij pH een functie is van de jaargemiddelde kwelflux uit een regionaal grondwatermodel (over de ondiepst gelegen scheidende laag) en de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) over een periode van 30 jaar (klimaat).

5.2.2 METARELATIES IN WVN-3

In Waterwijzer Natuur 3 zijn nieuwe metarelaties opgesteld, met een aantal aanpassingen t.o.v. Waterwijzer Natuur 2. In Waterwijzer Natuur 3 zijn in totaal 180000 (5x5x72x100) SWAP simulaties gedraaid. Per SWAP simulatie is vervolgens het model CENTURY (berekening Nmin en Pmin) gedraaid en het model VSD+ (25 simulaties, combinatie van 5 vegetatietypen met 5 kwelklassen) (Figuur 2.4).

De metarelaties zijn in Waterwijzer Natuur 3 op drie aspecten aangepast:

1. De meest recente bodemfysische eenheden zijn gebruikt
2. Eerst worden alle SWAP-simulaties uitgevoerd en bewaard. Daarna wordt voor alle SWAP-runs CENTURY en VSD+ gedraaid. Als er aanpassingen worden gedaan in CENTURY of VSD+, hoeven nu niet meer ook alle SWAP-simulaties worden gedraaid. Dit leidt tot snellere afleiding van metarelaties als een update van de SWAP-simulaties niet nodig is.
3. Nieuwe metarelaties zijn opgesteld voor de nieuwe VSD+ die rekening houdt met effecten van stikstofdepositie op pH (zie sectie 2.3).

Ad 1: de bodemparameters van de Staringreeks 2018 (Heinen *e.a.*, 2020) zijn gebruikt in combinatie met de BOFEK 2012 (Wösten *e.a.*, 2013b). Idealiter zou de Staringreeks 2018 ook gecombineerd worden met de recentste bodemeenheden (BOFEK 2020). Echter, op moment van het afleiden van de metarelaties Waterwijzer Natuur 3, was de BOFEK2020 nog niet beschikbaar. Aangeraden wordt de bodemfysische parameters in een vervolgonderzoek aan te laten sluiten op de recentste bodemeenheden.

Ad 2: in de eerdere WVN-versies werden de modellen SWAP, CENTURY, en VSD binnen het de procedure voor het afleiden van de metarelaties voor hypothetische plot direct alle drie aangevoeren. Hierdoor was het niet mogelijk op de modelsimulaties voor SWAP, CENTURY en VSD los van elkaar te draaien. Een herberekening in bijvoorbeeld CENTURY of VSD+ betekende veel rekentijd, omdat hiervoor ook SWAP opnieuw moest worden gedraaid. In de recente versie van WVN is de procedure aangepast. Dit betekent dat eerst alle talloze SWAP simulaties zijn gedraaid, en de resultaten hiervan zijn bewaard in een database. Vervolgens zijn de metarelaties van CENTURY opgesteld op basis van de SWAP resultaten, en als laatste zijn de VSD+ metarelaties opgesteld op basis van de SWAP resultaten. Dit heeft als voordeel dat er een database van de hydrologische resultaten aanwezig is. In een vervolgonderzoek kunnen metarelaties op basis van deze database sneller afgeleid worden, aangezien het hydrologische model SWAP niet gedraaid hoeft te worden.

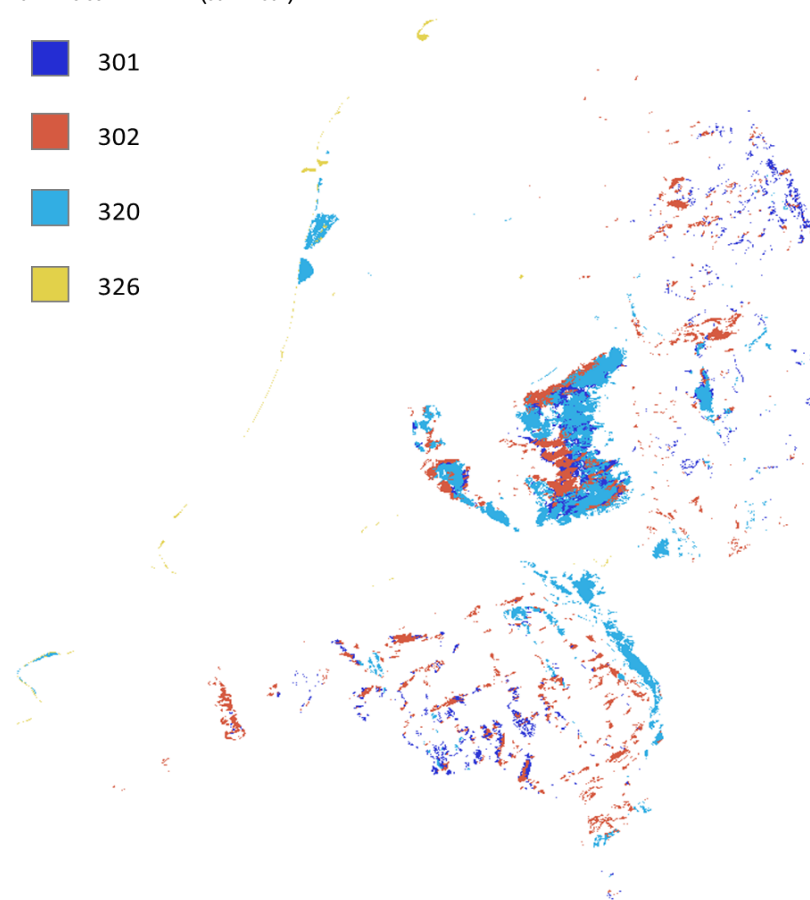
Ad 3: er zijn nieuwe metarelaties tussen depositie en zuurgraad opgesteld met nieuwe VSD+ simulaties. Deze zijn uitvoerig beschreven in sectie 2.3.

5.2.3 RESULTATEN

De implementatie van de meest recente bodemfysische eenheden is voltooid. Echter, de combinatie van de nieuwe bodemparameters en hydrologische randvoorwaarden leidde in SWAP tot numerieke problemen voor de bodemfysische eenheden 320 (podzol op grof zand) en 326 (grof zandige (mariene en fluviatiele) zandgronden). Op basis van overeenkomsten in de bodemfysische eigenschappen zijn voor deze bodemfysische eenheden daarom de metarelaties gebruikt van respectievelijk de eenheden 301 (podzol op leemarm zand) en 302 (leemarme (stuif)zanden). Met name het ontbreken van de podzol op grof zand (320) is een gebrek, gezien deze eenheid wijdverbreid in Nederland voorkomt op de hoge zandgronden van bijvoorbeeld stuwwallen. Eenheid 326 komt in beperkte oppervlakten voor langs de Nederlandse kust.

FIGUUR 5.3

LIGGING VAN TWEE BODEMFYSISCH EENHEDEN WAARVAN DE METARELATIES VERVANGEN ZIJN (320 EN 326; LICHE KLEUREN) DOOR ANDERE BODEMFYSISCH EENHEDEN (301 EN 302)



Voor bodems met hydrologische omstandigheden die resulteren in een zeer hoge kwelflux (bijvoorbeeld 998 mm kwel per jaar, i.e. ~ 2.7 mm/d) kan VSD geen pH berekenen omdat de bodem dan vrijwel altijd verzadigd is en er geen neerwaarts transport meer optreedt. Deze simulaties zijn daardoor niet meegenomen in het afleiden van de metarelaties van de desbetreffend bodemfysische eenheid. Uit een nadere analyse blijkt dat hierdoor gemiddeld ca. 0.25 % van de VSD+ resultaten niet bruikbaar zijn geweest. Dit is als acceptabel beoordeeld, gezien het effect op de metarelaties door de beperkte omvang naar verwachting beperkt is.

5.2.4 MEERWAARDE

In WWN 3 is door aanpassingen in de metarelaties i) aangesloten op de recentste bodemparameterisatie op het moment van uitvoering van dit onderzoek, ii) een database van hydrologische modelsimulaties beschikbaar gekomen, waardoor het afleiden van metarelaties bij aanpassing van CENTURY of VSD+ spoediger verloopt en iii) rekening gehouden kan worden met effecten van zuurdepositie op de zuurgraad.

6

CONCLUSIE

Hoge atmosferische depositie van stikstof (NO_x en NH_3) leidt direct tot een toename in voedselrijkdom en indirect tot verzuring van de bodem. Hoge depositie van zwavel (SO_x) draagt extra bij aan deze bodemverzuring. De Waterwijzer Natuur (versie 2) hield geen rekening met veranderingen in de atmosferische depositie van deze stoffen en doorwerking op de bodem en vegetatie. Het hoofddoel van de voorliggende studie was daarom de gevolgen van veranderingen in atmosferische depositie voor de voedselrijkdom, zuurgraad, en vegetatie in te bouwen in de Waterwijzer Natuur. De nieuwe versie WWN (3.03) is daarmee beter toegesneden op analyses ten behoeve van herstel- en beheerplannen van (Natura 2000) natuurgebieden, omdat effecten van klimaatverandering, stikstofdepositie, en maatregelen in waterhuishouding in samenhang kunnen worden geëvalueerd.

Als toets is de WWN 3 toegepast voor het natuurgebied Sang en Goorkens. De voorspellingen met de nieuwe WWN komen goed overeen met verwachtingen en aanwezige vegetatie. Ook scenario's met verschillende stikstofdepositieniveaus en veranderingen in de waterhuishouding door klimaatverandering leveren plausible resultaten. De nieuwe WWN-3 biedt de gebruiker daarmee de gelegenheid om procesmatig eenvoudig en ruimtelijk door te rekenen hoe individuele en gecombineerde effecten van waterhuishouding, klimaat, en zuur- en stikstofdepositie doorwerken op de vegetatie.

Met WWN-3 is het mogelijk geworden om op gebiedsniveau uitspraken te doen over verschuivingen in vegetatie (potenties), die optreden als gevolg van abiotische omstandigheden. Bij toepassing van het instrument dient de gebruiker rekening te houden met onzekerheden en systematische fouten in de invoer. Zo zal het meestal niet zinvol zijn om precieze veranderingen per pixel te beoordelen: daarvoor is de modelinvoer vaak veel te onzeker. Behoedzaamheid bij de interpretatie van de resultaten is nog meer op zijn plaats bij landelijke toepassingen, want daarbij is de schematisatie van de ondergrond noodgedwongen grover dan in lokale studies. De WWN is geschikt om voor een natuurgebied een uitspraak te doen over de kansrijkdom en het areaal van vegetatietypen, en globaal aan te geven waar die ruimte voorkomen.

Daarnaast had dit onderzoek als doelstelling om na te gaan of het mogelijk is om met de WWN inzichtelijk te maken wat de invloed is van extreem droge jaren op standplaatsfactoren en bossterfte. Met WWN-3 is voor de extreme droogte van 2018 ruimtelijk in kaart gebracht wat het effect van het in dat jaar opgetreden neerslagtekort is op de standplaatsfactoren transpiratiestress, respiratiestress, zuurgraad, en aluminiumconcentratie van het de wortelzone aanwezige bodemvocht. De relatie tussen de met WWN-3 gesimuleerde standplaatscondities en waargenomen effecten van droogte op bossterfte en -vitaliteit was over het algemeen niet sterk en verschilde per bostype. Een verklaring voor dit resultaat zijn de grote onzekerheden in de gegevens. Een andere mogelijke oorzaak is dat jaren met droge perioden en met een hoge atmosferische depositie al hebben geleid tot het overleven van alleen die afzonderlijke bomen die dergelijke stressfactoren weten te overleven: het verleden heeft al als selectiefilter

gewerkt zodat alleen de 'sterkste' individuen die tegen een stootje kunnen zijn overgebleven. De gesimuleerde extremen in standplaatscondities met WWN zijn door experts als plausibel bevonden. Validatie op basis van veldgegevens (die nu niet systematisch verzameld worden) zou nader moeten uitwijzen of de simulatieresultaten overeenkomen met werkelijk opgetreden effecten van extremen.

Ten slotte is de WWN weer up-to-date gemaakt. Het onderdeel WATERNOOD is nu ook geschikt voor de gereviseerde indeling van de plantengemeenschappen van Nederland, rompgemeenschappen, en de indeling van Staatsbosbeheer door berekening van nieuwe knikpunten. Ook zijn de metarelaties geactualiseerd met de parameterisatie van de bodemfysische eenheden uit de Staringreeks van 2018. Verder gebruiken de onderliggende modellen dezelfde invoerwaarden, zodat berekende standplaatscondities consistent zijn.

7

DISCUSSIE

7.1 VERBETEREN VAN DE VOEDSELRIJKDOM

In de nieuwe versie van WWN (WWN-3.03) waaraan in dit onderzoek is gewerkt, wordt voedselrijkdom niet meer alleen bepaald op basis van P-mineralisatie, zoals dat het geval was in de vorige WWN versie, maar ook op basis van stikstofdepositie en N-mineralisatie. Deze aanpassing is doorgevoerd om scenario's van atmosferische N depositie met WWN te kunnen simuleren. Daarmee zijn de complexe interacties tussen water, bodemchemie en nutriëntenhuishouding beter ondervangen en is het model daarmee veel robuuster om toekomstscenario's door te rekenen. Er zijn volgens de auteurs weinig modellen die kunnen voorspellen hoe deze combinaties doorwerken op natuur, en procesmatig in detail rekening houden met het complexe samenspel van de natuur. Modellen die dat wel kunnen, hebben vooral een wetenschappelijke betekenis; ze hebben veel parameters nodig en zijn daardoor beperkt toepasbaar. Ook de individuele effecten van veranderingen in waterhuishouding, klimaat en stikstofdepositie op vegetatie kunnen met de nieuwe WWN bepaald worden. Dat heeft meerwaarde om bijvoorbeeld te bepalen hoe vegetatie er in de toekomst uit zou kunnen zien mét en zónder reductie van depositie.

De nieuwe WWN-3 geeft plausibele resultaten voor het studiegebied Sang en Goorkens. Voor de voedselrijkdom kon dit goede resultaat niet geheel worden bevestigd bij een toetsing aan vegetatieopnamen op landelijk niveau. Ook de respons van de bodem-pH en de vegetatie op veranderingen in depositie en klimaatverandering zijn verklaarbaar en naar verwachting. Dit geeft vertrouwen in de toepassing van de nieuwe WWN-3.03. Daarentegen ondersteunt een landelijke validatie deze resultaten slechts deels. De waarde van deze landelijke validatie is daarentegen zeer beperkt. In de validatie wordt de gesimuleerde N- en P- mineralisatie bij huidig klimaat vergeleken met uit vegetatieopnamen afgeleide indicatiewaarde voor voedselrijkdom. In WWN worden deze simulaties echter niet gebruikt voor de huidige situatie: de voedselrijkdom wordt ook in de WWN-3 nog gebaseerd op kennisregels afkomstig uit WATERNOOD (De Haan *e.a.*, 2010). Een vergelijking tussen indicatiewaarde van voedselrijkdom met gesimuleerde N- en P-mineralisatie is daarom weinig zinvol. Daarnaast is een eerlijke vergelijking tussen model en observatie gemoeid met allerlei onzekerheden. Dit is ook gebleken uit een eerdere vergelijking van modeluitvoer van een voorloper van de WWN met observaties (Van Ek *e.a.*, 2014). Dit heeft te maken met (1) de oorspronkelijke schaal van de simulaties uit het landelijke grondwatermodel (250 m resolutie), waarbinnen nog veel heterogeniteit aan standplaatscondities kan bestaan en daardoor niet overeenkomt met de indicatiewaarde van vegetatieopnamen (ca 2 – 10 m), (2) onzekerheden en systematische fouten in de van 250 m naar 25 m neergeschaalde uitvoer van het LHM, (3) onzekerheden van bodem invoergegevens (bodem N, P) geschat op basis van de landelijke bodemkaart, die in hoofdzaak bepalend zijn voor de N- en P-mineralisatie, (4) de niet eenduidige definitie van voedselrijkdom en moeilijkheden bij het kwantificeren van de voedselrijkdom, en (5) de onzekerheid van kwantificatie van indicatiewaarden voor voedselrijkdom door expertkennis. In de aanbevelingen wordt nader ingegaan op hoe een plausibiliteitsstudie verbeterd zou kunnen worden. In deze paragraaf gaan we verder in op aspecten (3) en (4).

In dit onderzoek is nog weer eens gebleken dat voedselrijkdom zich lastig laat beschrijven. Voedselrijkdom is een samenraapsel van de beschikbaarheid van een veelheid aan voedingsstoffen (N, P, K, S, of sporenelementen als IJzer, Boor of Molybdeen). Hierbij gaat het niet enkel om de stofconcentraties, maar ook om de aanvoer van dergelijke stoffen naar de plantenwortels. Bij lage concentraties maar hoge aanvoerfluxen (kwel, overstroming) kan de beschikbaarheid van nutriënten hoog zijn (Aggenbach *e.a.*, 2020). Daarnaast wordt de opname van voedingsstoffen door de vegetatie sterk gestuurd door andere variabelen. Zo kan bij lage zuurgraad aluminiumtoxiciteit optreden, waardoor wortelstelsels aangetast worden en de opname van voedingsstoffen wordt beperkt (Rout *e.a.*, 2001). Ook in nutriëntenrijke bodems, maar met een groot vochtgebrek of juist natte omstandigheden, kunnen de meeste planten geen gebruik maken van voedingsstoffen. Verder varieert de beschikbaarheid van voedingsstoffen in ruimte (bv: worteldiepte) en tijd (bv: groeiseizoen), wat doorslaggevend kan zijn voor het welbevinden van de plant.

In dit onderzoek is gepoogd deze complexiteit deels te ondervangen door rekening te houden met meerdere factoren om de relatie tussen voedselrijkdom en indicatiewaarde van planten te beschrijven. Uit de plausibiliteitsstudie voor het gebied Sang en Goorkens bleek dat de effecten van verschillende scenario's van N-depositie op de vegetatie redelijk werden voorspeld met de aangepaste versie van de WWN 3.03. In de landelijke plausibiliteitsstudie wordt echter aangetoond dat geen van de proxy variabelen van voedselrijkdom die in de reprofunctie voor Nm worden gebruikt (i.e. N-mineralisatie plus N-depositie, of P-mineralisatie), verband houdt met de waargenomen Nm. Deze slechte relatie komt overeen met de bevindingen van (Schaffers & S kora, 2000) dat indicatiewaarde voor voedselrijkdom (Ellenberg-N) veel minder sterk gerelateerd is aan bodemvariabelen die voedselrijkdom beschrijven (zoals N-mineralisatie en NO₃ concentratie) dan planteneigenschappen als biomassa en N-accumulatie. Aangezien we nog steeds gebruik maken van kennisregels om de referentievegetatie te voorspellen en vervolgens de gemodelleerde bodemvariabelen gebruiken om de veranderingen ten gevolge van de scenario's te voorspellen, vormt de slechte relatie tussen de bodemvariabelen en de absolute waarden van Nm geen groot probleem. Wat de veranderingen in Nm ten opzichte van de veranderende N-beschikbaarheid betreft, is de relatieve veranderingen in de empirische relatie van onze lokale validatie dataset vrij consistent. Daardoor hebben we voldoende vertrouwen in onze voorspelling in Nm bij verschillende scenario's van N-depositie.

7.2 INVLOED VAN EXTREEM DROGE JAREN OP STANDPLAATSCONDITIES

Met de droogte analyse is geïllustreerd hoe met de WWN-3 standplaatscondities per jaar geschat kunnen worden. Daarmee is het met de WWN mogelijk om effecten van extremen, zoals het droge jaar 2018, op onder andere aluminium, zuurgraad, en transpiratiestress te bepalen. Met de nieuwe versie van de WWN (WWN-3.03) is het daarbij mogelijk geworden om de gecombineerde effecten van droogte en stikstof op standplaatscondities te bepalen. De koppeling van gesimuleerde standplaatscondities aan geobserveerde bossterfte was daarentegen complex. Voor sommige bostypen was de geobserveerde bossterfte aan de hand van landelijke bosstatistieken goed te verklaren met deze standplaatscondities. Hierin speelt zowel transpiratiestress als aluminiumtoxiciteit een rol. Het doel van deze analyse was niet om harde uitspraken te doen over gecombineerde effecten van droogte en stikstofdepositie op bossterfte. Door beperkt aantal observaties van een aantal boomsoorten is dat ook niet mogelijk. Het zou zinvol geweest zijn om de verandering in bossterfte en vitaliteit te relateren aan de verandering in bodemvitaliteit (zuurgraad, transpiratiestress, en aluminiumconcentratie), in plaats van enkel de waarde voor het extreme jaar 2018 te gebruiken. Het kan zo zijn dat

plots die in 2018 meer transpiratiestress hadden dan in de voorgaande 30 jaar ook hadden, en ook gemiddeld meer dode bomen bevatten die mogelijk al beter aan droogte waren aangepast.

De resultaten geven heel duidelijk een beeld van de toepassing van de Waterwijzer Natuur om effecten van extremen – gedefinieerd als extreme jaren, en niet extremen binnen jaren – te bepalen. Om te bepalen hoe extremen binnen een jaar effect hebben op vegetatie is de WWN in huidige vorm minder geschikt. Met dynamische modellering (zie paragraaf 8.5) is het wellicht mogelijk daar verbetering in aan te brengen.

7.3 ACTUALISATIE HUIDIGE ONDERDELEN WATERWIJZER NATUUR

In de nieuwe knikpuntentabel voor WATERNOOD zijn knikpunten voor de gereviseerde Vegetatie van Nederland (rVVN) en herziene knikpunten volgens de Staatsbosbeheer catalogus toegevoegd. De WWN gebruiker kan daardoor gebruik maken van diverse vegetatietyptologieën. Een kanttekening is dat er gebruik gemaakt is op basis van overeenkomsten tussen plantengemeenschappen. Hierbij is geen rekening gehouden met het feit dat ook de inhoud van plantengemeenschappen veranderd kan zijn in de revisies. Naar verwachting is het effect hiervan op berekende knikpunten beperkt.

Een aandachtspunt is dat voor twee bodemtypen door numerieke problemen geen meta-relaties konden worden afgeleid. De oorzaak hiervan is nog niet achterhaald. Alhoewel de bodemfysische eigenschappen van de vervangen bodemfysische eenheden niet in grote mate afwijken, dient in acht te worden genomen dat dit enig effect heeft op de voorspelling van ecotoopgroepen.

8

AANBEVELINGEN

Uit ons onderzoek volgende verschillende aanbevelingen voor het gebruik en doorontwikkeling van de WWN. Zij worden in de volgende paragrafen toegelicht:

1. Validatie van WWN-3 door gebruikers
2. Meer inzicht geven in onderliggen processen
3. Initiële condities rechtstreeks ontlenen aan procesmatige simulaties van CENTURY en VSD+.
4. Centraal registreren van bodemfysische en -chemische gegevens
5. Aanpassen van stofconcentraties in kwelwater
6. Dynamische versie van de WWN maken
7. Aanpassen metarelaties en actualisatie
8. Aanbevelingen t.a.v. gebruik van de WWN-3

8.1 VALIDATIE DOOR GEBRUIKERS VAN DE NIEUWE WWN-3.03

In de WWN-3 zijn metarelaties aangepast, waarbij de begrenzing van zuurgraadvoorspellingen is verwijderd. Deze begrenzing leidde eerder tot artefacten en onrealistische zuurgraadvoorspellingen. Het is uiteraard gewaagd zo'n begrenzing te verwijderen. In het studiegebied hebben wij daar een klein probleemgebied gevonden waar voorspellingen de mist in gaan. Er is toetsing, ervaring en feedback van gebruikers nodig voor meer gebieden, en toepassing van WWN-3 zal uitwijzen of/welke er verdere aanpassingen vereist zijn. Deze ervaring van gebruikers is niet alleen wat betreft de metarelaties van belang, maar ook om te bepalen in welke situaties WWN wel/niet tot onverwachte resultaten leidt. Juist door het vrijgeven van WWN 3.0.3 kan het worden toegepast en feedback worden verkregen.

8.2 MEER INZICHT GEVEN IN ONDERLIGGEN PROCESSEN

Net als bij ieder model, dient ook de WWN-3 gebruiker zich te realiseren dat voorspellingen nooit de werkelijkheid vertegenwoordigen. De gebruiker is en blijft, net als bij ieder model, verantwoordelijk voor juiste toepassing en interpretatie van de resultaten van de WWN. Dit vraagt om een goede kennisbasis bij de gebruiker. Een model leent zich er goed voor om inzicht en begrip te vergroten in ecosystemen. Door meer processen in te bouwen, wordt ook het inzicht vergroot. In de WWN krijgt de gebruiker echter slechts beperkt inzicht in hoe processen in elkaar grijpen. Het is lastig traceerbaar hoe veranderingen in invoer zich laat vertalen in uitvoer. Het zou van meerwaarde kunnen zijn om in een volgende WWN versie de tussenstappen tussen invoer naar uitvoer explicieter zichtbaar te maken. Dit kan bijvoorbeeld gedaan worden door het opzetten van een 1-D versie, een eenvoudige tool, waarin een gebruiker snel inzicht kan krijgen in hoe een verandering van bijvoorbeeld bodemtype, stikstofdepositie, of GxG's doorwerkt op standplaatsfactoren en vegetatie (al dan niet in combinatie met de aanbeveling in paragraaf 8.5).

8.3 CENTRAAL REGISTREREN VAN BODEMFYSISCHE EN –CHEMISCHE GEGEVENS

In dit onderzoek is de N-mineralisatie gevalideerd op basis van 36 meetpunten. Dit is een mooie validatie, gezien de inspanning die het vergt om goede N-mineralisatie metingen te verkrijgen. Echter, er zijn veel meer van dergelijke metingen uitgevoerd door verschillende personen bij verschillende instituten. Deze gegevens zijn bijzonder slecht toegankelijk. Alhoewel er veel (herhaaldelijk opnieuw) gemeten wordt, is er **behoefte aan een centrale en open plek waar bodemfysische en –chemische gegevens samengebracht wordt**, in, of vergelijkbaar met, de Basisregistratie Ondergrond (BRO). Om de empirische onderbouwing van onderliggende relaties in de WWN te verbeteren, is het samenbrengen van dergelijke gegevens essentieel.

8.4 AANPASSEN VAN STOFCONCENTRATIES IN KWELWATER

Uit recent onderzoek is gebleken dat in kwelgebieden de aanvoer van stikstof middels grondwater een aanzienlijke bijdrage kan leveren aan de jaarlijkse aanvoer van stikstof (Aggenbach *e.a.*, 2020). Deze kan, afhankelijk van de kwelflux, zelfs groter zijn dan stikstofdepositie. Gezien veel van de waardevolle natuur van Nederland op natte of vochtige en basenrijke standplaatsen voorkomt, verdienen deze extra bescherming. Het is daarom wenselijk om de aanvoer van stikstof middels kwel, en daarnaast ook basenaanvoer, beter in de vingers te krijgen. Voor de WWN-gebruiker is het dan wenselijk om de **stofconcentraties in kwelwater aan te (kunnen) passen**. Voor stikstofaanvoer is dat – met de nodige aannames – te realiseren middels de stikstofdepositiefactor. Voor basenaanvoer dienen dan aparte metarelaties te worden afgeleid. Zo kunnen de belangrijkste variabelen die kwelkwaliteit beschrijven worden aangepast. Daarnaast speelt voor kwelgebieden dat het onduidelijk is hoe goed de vertaling is van met grondwatermodellen gesimuleerde kwelflux op enige diepte, naar kwelflux naar de wortelzone (Witte *e.a.*, 2020a). Kwelkwaliteit en -kwantiteit zijn belangrijke aandachtspunten in natuurbeheer, maar zijn gebleken lastig in de vingers te krijgen. Daardoor is nog steeds onduidelijk hoe vegetatietypen aan kwel (kwantitatief en kwalitatief) gebonden zijn. Deze variabelen vragen daarom extra finesse in de WWN. Met dergelijke aanpassingen kan de WWN bijdragen aan adequaat waterbeheer om kwelkwantiteit en –kwaliteit te optimaliseren en zeldzame kwelgebonden natuur met hoge natuurwaarde in stand te houden en te herstellen.

8.5 DYNAMISCHE VERSIE VAN DE WWN

In dit onderzoek hebben we gedemonstreerd dat standplaatscondities tijdens een extreme droogte gesimuleerd kunnen worden met de WWN-3. Maar de respons en het herstel van vegetatie op een extreme gebeurtenis en de gesimuleerde standplaatscondities wordt hiermee nog niet expliciet meegenomen. Om dit wel te kunnen doen kan binnen de schil een **dynamische versie van de WWN aangeboden worden**, waarmee het verloop van standplaatscondities voor één punt in de ruimte door de tijd kan worden doorgerekend. Deze mogelijkheid is al ontwikkeld in een versie voor de duinen, die de vegetatieontwikkeling vanaf een kale duinbodem kan nabootsen in afhankelijkheid van onder meer de hoeveelheid binnenvallende zonnestraling en neerslag (afhankelijk van expositie en inclinatie) en atmosferische depositie (Fujita *e.a.*, 2016b; Witte *e.a.*, 2017). In de gebruiksvriendelijke schil zou de WWN gebruiker middels vooraf gedefinieerde bodemprofielen en klimaat, in combinatie met hydrologische invoer (bijvoorbeeld GxG of tijdreeks) en stikstofdepositiefactor, de ontwikkeling van standplaatscondities door de tijd kunnen volgen. Ook kan een versie worden aangeboden waarin parameters, zoals vochtretentie en gehalten voedingsstoffen van de bodem, aangepast

kunnen worden. De veranderingen in standplaatscondities gaan gepaard met veranderingen in kansrijkdom van vegetatietypen.

Een dergelijke uitbreiding van de WWN kan belangrijke inzichten geven in de hersteltijd en omkeerbaarheid van standplaatscondities na extreme gebeurtenissen. Zo kan ook worden vastgesteld of standplaatscondities, en daarbij vegetatie, ongewenst en onomkeerbaar veranderen naar een andere toestand (gelijk aan kantelpunten Scheffer *e.a.* (2001)). Modelsimulaties kunnen fungeren om situaties te herkennen waar dergelijke verschuivingen op kunnen treden (early-warning signals; Dakos *e.a.* (2012)), en waarbij het urgent is om maatregelen te treffen om onherstelbare schade aan natuur te voorkomen. Overigens kan een dergelijke exercitie gebruikt worden om te bepalen onder welke omstandigheden ecosystemen stabiel gehouden kunnen worden. Zo kan bepaald worden bij welke (toekomstige) waterhuishouding en stikstofdepositie natuurbeheersinspanningen en bijbehorende kosten beperkt kunnen worden, en bovendien de zelfregulering c.q. 'natuurlijkheid' van natuur vergroot kan worden.

Bij dergelijke dynamische uitbreidingen is het wenselijk dat bodemeigenschappen mee kunnen veranderen. Momenteel wordt in de WWN verondersteld dat de bodem statisch is. Echter, door bodemvormende processen en successie veranderen bodemeigenschappen, en door veranderende waterhuishouding of klimaat (bijvoorbeeld verdroging of droogte) verhoogt de mineralisatie van organisch stof. Door dergelijke processen veranderen bodemfysische en -chemische eigenschappen. In een aangepaste versie van PROBE zijn deze concepten al voor duinen uitgewerkt (Fujita *e.a.*, 2016a; Voortman *e.a.*, 2017; Witte *e.a.*, 2017). Maar ook, en misschien juist, op locaties met veel organisch stof is de wisselwerking tussen bodemeigenschappen en waterhuishouding erg sterk. De verzadigde doorlatendheid van veen kan bijvoorbeeld enorm variëren met het afbraakstadium waarin het verkeert. Recent gevormd veenmosveen heeft een verzadigde doorlatendheid van zo'n 1000 m/d, maar bij afgebroken veen is de doorlatendheid slechts <0.001 m/d (Boelter, 1969; Päivänen, 1973; Nijp *e.a.*, 2017). Dat is een factor van een miljoen (!) verschil, die een behoorlijk effect zal hebben op standplaatscondities en daarmee op voorspelde vegetatie. Het meenemen van de terugkoppelingen tussen bodem en water in modellen kan daardoor leiden tot aanzienlijke verbeteringen in voorspellingen van vegetatie en natuurwaarde.

8.6 INITIËLE CONDITIES RECHTSTREEKS ONTLENEN AAN PROCESMATIGE SIMULATIES VAN CENTURY EN VSD+

In de WWN-2 en WWN-3 wordt de uitgangssituatie van zuurgraad en voedselrijkdom gebaseerd op kennisregels uit de kansrijkdom-module van WATERNOOD. Het is echter ook mogelijk om deze **initiële condities rechtstreeks te ontnemen aan procesmatige simulaties van CENTURY en VSD+**. Afhankelijk van waterhuishouding en depositieniveau, en historisch landgebruik, kunnen deze daardoor ruimtelijk variëren. In potentie zijn de initiële condities daardoor realistischer. Een knelpunt is de vrij grote onzekerheid in de invoergegevens van de procesmatige modellen. Procesmatige modellen vereisen gedetailleerdere inputgegevens dan bijvoorbeeld WATERNOOD. Zoals blijkt uit de landelijke plausibiliteitstest, is de huidige relatie tussen de door het model voorspelde bodemcondities en de indicatorwaarde zeer zwak. Daarom is, vooral voor een grootschalige toepassing van WWN, het gebruik van procesmatige modellen voor de berekening van de uitgangscondities een stap te ver. Maar mogelijk biedt dit, zeker na beschikbaarheid van invoergegevens, wel kansen om geïntegreerde effecten van waterhuishouding, klimaat en stikstofdepositie te verbeteren.

8.7 AANPASSEN METARELATIES EN ACTUALISATIE

Alvorens vervolgcacties op actualisatie te nemen, is het van belang de juistheid van de huidige berekeningen te verifiëren. Pas daarna kunnen de volgende actualisaties in acht worden genomen. Met de uitgevoerde actualisatie zijn een aantal belangrijke aandachtspunten verbeterd in de WWN. Desalniettemin zijn er nog een paar punten die aan actualisatie toe zijn.

- De huidige metarelaties beslaan het bereik van droge tot natte standplaatsen, zoals te zien is in de standplaatsfactoren transpiratiestress en respiratiestress. Echter, voor de metarelatie voor zuurgraad is het van belang dat ook binnen het natte bereik voldoende variatie is in kwelfluxen. Een kleine toename in GLG en/of kwelflux kan zorgen voor een enorme toename in pH door aanvoer van basische kationen. Om dat beter te ondervangen, zijn meer simulaties in het natte bereik nodig (Bijlage III.III). Toevoegen van dergelijke simulaties leidt tot een aanzienlijke betere voorspelkwaliteit van de metarelaties voor zuurgraad en is daarmee een waardevolle actie.
- Voor een volgende versie van de WWN wordt aangeraden om de bodemfysische parameters aan te laten sluiten op de meest recente indeling van bodemfysische eenheden (BOFEK 2020). Op het moment van afleiden van de metarelaties voor WWN-3 was de BOFEK2020 nog niet beschikbaar. Om WWN simulaties aan te laten sluiten bij de BOFEK2020 en hydrologische uitvoer van bijvoorbeeld het landelijk hydrologisch instrumentarium, dienen nieuwe metarelaties afgeleid te worden. Alhoewel dit lange doorlooptijd vraagt, is de inzet beperkt. Met similariteitsanalyse (clustering) kan bepaald worden of er overlap tussen simulaties aanwezig is, en of daarmee de rekentijd in de toekomst beperkt kan blijven.
- Momenteel wordt voor de ruimtelijke verbreiding van natuurgebieden met de WWN nog een kaart meegeleverd van het Natuurbeheerplan uit 2013. In de tussentijd is er flink in oppervlakten verschoven, en zou gebruik gemaakt kunnen worden van een actuelere kaart voor ligging van natuurgebieden. Uiteraard heeft de gebruiker ook de optie om zelf een kaart aan te leveren, maar het is wenselijk als de meest recente versie van natuurgebieden gebruikt wordt.

8.8 AANBEVELINGEN T.A.V. GEBRUIK VAN DE WWN-3

In de huidige versie is een depositiefactor ingebouwd om stikstofdepositie naar wens aan te passen. Wellicht bent u, als WWN gebruiker, ietwat teleurgesteld door het ontbreken van de optie in de interface om uw eigen depositiekaart aan te leveren. Het is natuurlijk mogelijk om handmatig de meegeleverde stikstofdepositiekaart te vervangen met uw eigen depositiekaart. Alhoewel dit verleidelijk is, **raden wij ten zeerste af om de meegeleverde stikstofdepositiekaart te vervangen**. Niet voor niets is de optie voor een eigen kaart inladen wegge laten. In de achterliggende berekeningen (metarelaties) wordt namelijk rekening gehouden met historische depositie. Die is mede gebaseerd op de huidige depositiekaart, waarbij wordt aangenomen dat locaties waarin hedendaags een hoge depositie wordt waargenomen, dat ook in het verleden het geval was. Indien niet meer aan die aanname wordt voldaan, i.e. er vinden belangrijke ruimtelijke veranderingen in stikstofdepositie plaats, wordt de metarelatie tussen depositie en zuurgraad verstoord, wat doorwerkt in voorspelde standplaatscondities en kansrijkdom vegetatie.

Bij modellen die worden doorontwikkeld is het belangrijk om het gebruikte versienummer te vermelden. Inmiddels bestaat een aantal versies van de WWN, die voorname onderlinge verschillen kunnen vertonen en uitkomsten kunnen beïnvloeden. Wij vragen daarom van de WWN **gebruikers altijd de gebruikte versie (rechtsboven in de WWN-applicatie) te vermelden** bij WWN-toepassingen.

Met een aantal controles hebben we er voor gezorgd dat de nieuwe berekende knikpunten realistische waarden aannemen en een goede schatting leveren. Steekproefsgewijs is gecontroleerd of de nieuwe knikpunten realistisch waren. Het was echter onmogelijk om alle nieuwe knikpunten te controleren. Het is belangrijk om bij de nieuwe knikpunten (aangegeven met 'CALC21' in de knikpuntentabel) hier op bedacht te zijn.

Alle modelvoorspellingen zijn bevatten onzekerheid, maar dat geldt ook voor de waarnemingen/metingen in het veld. Hierdoor ontstaan soms grote en soms kleine afwijkingen tussen modelresultaten en (veld)waarnemingen/metingen. In sommige gevallen is die afwijking acceptabel, maar soms ook niet. De in dit rapport gepresenteerde resultaten laten zien dat de WWN-3 veelal plausibele en robuuste resultaten oplevert. Dat neemt niet weg dat u, als gebruiker, verantwoordelijk dient om te gaan met de modelresultaten, en altijd bedacht dient te zijn op afwijkende resultaten. Vaak kan men hier veel van leren voor doorontwikkeling van modellen. Ecohydrologisch verstand van zaken en een kritische houding blijft een vereiste. Mocht u tegen afwijkende of onverwachte resultaten aanlopen voor uw specifieke scenario's of studiegebieden, dan vernemen wij dat graag via bijvoorbeeld een email naar de WWN helpdesk (helpdesk_wnn@kwrwater.nl).

9

LITERATUUR

Aggenbach, C.J.S., Nijp, J.J., Huyghe, P. & Diggelen, R. (2020) *Invloed van met nutriënten verrijkt grondwater op kwelafhankelijke ecosystemen*, Driebergen. VBNE, Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren.

Akaike, H. (1973) Information theory as an extension of the maximum likelihood principle. *Second International Symposium on Information Theory* (ed. by B.N. Petrov and F. Csaki), pp. 267-281. Akademiai Kiado, Budapest, Hungary.

Amann, M., Bertok, I., Borken-Kleefeld, J., Cofala, J., Heyes, C., Höglund-Isaksson, L., Kiesewetter, G. & Klimont, Z., et al. . (2015) *Adjusted historic emission data, projections, and optimized emission reduction targets for 2030-a comparison with COM data 2013. Part B: Results for Member States.* , DG-Environment of the European Commission, Belgium

Atsma, G., Schouten, G. & Van Keulen, J. (2012) *Projectplan Waterwet: Aanpassing waterhuishouding Sang en Goorkens*, 's Hertogenbosch. Waterschap Aa en Maas.

Azen, R. & Budescu, D.V. (2003) The dominance analysis approach for comparing predictors in multiple regression. *Psychological methods*, **8**, 129.

Bartelheimer, M. & Poschlod, P. (2016) Functional characterizations of Ellenberg indicator values—a review on ecophysiological determinants. *Functional ecology*, **30**, 506-516.

Bartholomeus, R.P. & Witte, J.P.M. (2013) *Ecohydrological Stress - Groundwater To Stress Transfer. Theory and manual version 1.0.*, Nieuwegein. KWR Watercycle Research Institute.

Boelter, D.H. (1969) Physical Properties of Peat as Related to Degree of Decomposition. *Soil Science Society of America*, **33**, 606-609.

Bonten, L.T., Reinds, G.J. & Posch, M. (2016) A model to calculate effects of atmospheric deposition on soil acidification, eutrophication and carbon sequestration. *Environmental modelling & software*, **79**, 75-84.

Boute, M.G. & Van de Wielen, H. (2007) *Inrichtingsschets Sang en Goorkens; een glanzende parel? Tussenrapport*. Waterschap A & Maas, Dienst Landelijk Gebied.

CBS (2019) *Herkomst verzurende depositie, 2017 (indicator 0179, versie 16 , 12 juni 2019)*. Den Haag. Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), PBL Planbureau voor de Leefomgeving, RIVM Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Wageningen University and Research, Wageningen.

Coleman, K. (2005) ROTHC-26.3 A model for the turnover of carbon in soil-Model description and windows users guide, November 1999 issue (modified April 2005). http://www.rothamsted.bsrc.ac.uk/aen/carbon/mod26_3_dos.pdf,

- Cools, N., Wils, C., Hens, M., Hoffmann, M., Deutsch, F., Lefebvre, W., Overloop, S., Vancraeynest, L. & Van Vynckt, I. (2015) *Atmosferische stikstofdepositie en Natura 2000 instandhoudingsdoelstellingen in Vlaanderen. Verkennende gewestelijke ruimtelijke analyse van de ecologische impact, van sectorbijdragen en van de bijdrage van individuele emissiebronnen. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO.R.2015.6897993)*. , Brussel.
- Daamen, W., Clerckx, A. & Schelhaas, M.-J. (2019) *Veldinstructie Zevende Nederlandse Bosinventarisatie (2017-2021): Versie 2.0* Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu.
- Dakos, V., Carpenter, S.R., Brock, W.A., Ellison, A.M., Guttal, V., Ives, A.R., Kéfi, S., Livina, V., Seekell, D.A., van Nes, E.H. & Scheffer, M. (2012) Methods for Detecting Early Warnings of Critical Transitions in Time Series Illustrated Using Simulated Ecological Data. *PLOS ONE*, **7**, e41010.
- De Haan, M., Runhaar, H. & Cirkel, G. (2010) *Waterlood Kansrijkdommodule; Pilotstudie in Noord-Nederland en toepassing voor vervaardiging waterkansenkaarten voor natuur*, Nieuwegein. KWR.
- De Vries, W., Posch, M., Simpson, D. & Reinds, G.J. (2017) Modelling long-term impacts of changes in climate, nitrogen deposition and ozone exposure on carbon sequestration of European forest ecosystems. *Science of The Total Environment*, **605-606**, 1097-1116.
- Del Grosso, S., Ojima, D., Parton, W., Mosier, A., Peterson, G. & Schimel, D. (2002) Simulated effects of dryland cropping intensification on soil organic matter and greenhouse gas exchanges using the DAYCENT ecosystem model. *Environmental pollution*, **116**, S75-S83.
- Ertsen, A., Alkemade, J. & Wassen, M. (1998) Calibrating Ellenberg indicator values for moisture, acidity, nutrient availability and salinity in the Netherlands. *Plant Ecology*, **135**, 113-124.
- Fujita, Y., Van Bodegom, P.M. & Witte, J.-P.M. (2013a) Relationships between Nutrient-Related Plant Traits and Combinations of Soil N and P Fertility Measures. *PLoS ONE*, **8**, e83735.
- Fujita, Y., Bartholomeus, R.P. & Witte, J.-P.M. (2016a) *PROBE-3: A succession model for ecosystem services (BTO report)*, Nieuwegein. KWR.
- Fujita, Y., Bartholomeus, R.P. & Witte, J.P.M. (2016b) A climate-robust integrated model to predict ecosystem services: a case study in groundwater-independent coastal dune. *Littoral 2016. The changing littoral. Anticipation and adaptation to climate change. Biarritz 25-29 October 2016* (ed by Y. Battiau-Queney), p. 153. Biarritz, France.
- Fujita, Y., Van Bodegom, P.M., Olde Venterink, H., Runhaar, H. & Witte, J.-P.M. (2013b) Towards a proper integration of hydrology in predicting soil nitrogen mineralization rates along natural moisture gradients. *Soil Biology and Biochemistry*, **58**, 302-312.
- Grime, J.P. (2001) *Plant strategies, vegetation processes and ecosystem properties*, 2nd edn. John Wiley and Sons, Chicester, UK.
- Heinen, M., Bakker, G. & Wösten, J.H.M. (2020) *Waterretentie-en doorlatendheidskarakteristieken van boven-en ondergronden in Nederland: de Staringreeks: Update 2018*, Wageningen. Wageningen Environmental Research.
- Hoogerbrugge, R., Geilenkirchen, G., den Hollander, H., Schuch, W., van der Swaluw, E., de Vries, W. & Wichink Kruit, R. (2020) *Grootschalige concentratie-en depositiekaarten Nederland: Rapportage 2020*.

Hoogewoud, J. & Bootsma, H. (2019) *Neerschaling van gemodelleerde grondwaterstanden en fluxen voor de Waterwijzer Natuur. Een methodebeschrijving en validatie, toegepast op landsdekkende NWM resultaten*, Utrecht. Advies in Water & Deltares.

KNMI (2015) *KNMI '14 Klimaatscenario's voor Nederland*, De Bilt.

Kros, J., Mol, J., De Vries, W., Fujita, Y. & Witte, J.P.M. (2017) *Comparison of model concepts for nutrient availability and soil acidity in terrestrial ecosystem*, Nieuwegein. KWR & WEnR.

Kros, J., Mol-Dijkstra, J.P., Wamelink, G.W.W., Reinds, G.J., van Hinsberg, A. & de Vries, W. (2016) *Modelling impacts of acid deposition and groundwater level on habitat quality and plant species diversity. Ecological Processes*, **5**, 22.

Nguyen, T.T.N. & Lee, M.S. (2019) *Speciation of alumina in aqueous solution and its interaction with silicate ion. Geosystem Engineering*, **22**, 232-238.

Nijp, J.J., Metselaar, K., Limpens, J., Gooren, H.P.A. & van der Zee, S.E.A.T.M. (2017) *A modification of the constant-head permeameter to measure saturated hydraulic conductivity of highly permeable media. MethodsX*, **4**, 134-142.

Olde Venterink, H., Pieterse, N., Belgers, J., Wassen, M. & de Ruiter, P. (2002) *N, P and K budgets along nutrient availability and productivity gradients in wetlands. Ecological Applications*, **12**, 1010-1026.

Ordonez, J., van Bodegom, P., Witte, J., Bartholomeus, R., van Hal, J. & al., e. (2010) *Plant Strategies in Relation to Resource Supply in Mesic to Wet Environments: Does Theory Mirror Nature? . American Naturalist* **175**, 225-239.

Päivänen, J. (1973) *Hydraulic conductivity and water retention in peat soils. Acta Forestalia Fennica*, **129**

Roskam, P. & De Haeck, A. (2019) *De gevolgen van droogte en hitte op onze bossen*. In: INBO

Rout, G., Samantaray, S. & Das, P. (2001) *Aluminium toxicity in plants: a review. Agronomie*, **21**, 3-21.

Runhaar, H. & Hennekens, S. (2015) *Hydrologische randvoorwaarden natuur: gebruikershandleiding (waternoodapplicatie versie 3)* Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.

Schaffers, A.P. & S kora, K.V. (2000) *Reliability of Ellenberg indicator values for moisture, nitrogen and soil reaction: a comparison with field measurements. Journal of Vegetation science*, **11**, 225-244.

Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J.A., Folke, C. & Walker, B. (2001) *Catastrophic shifts in ecosystems. Nature*, **413**, 591-596.

Schipper, P.C. (2002) *Catalogus vegetatie en vegetatietypologie (tabbladen 4 en 5). In Catalogie Bedrijfssturing: Natuur, Bos, Recreatie en landschap (versie 2002)*, Driebergen. Staatsbosbeheer, afdeling Terreinbeheer.

Schollaardt, J. (2019) *Factsheet Emissies en Depositie van Stikstof in Nederland*.

Schöpp, W., Posch, M., Mylona, S. & Johansson, M. (2003) *Long-term development of acid deposition (1880-2030) in sensitive freshwater regions in Europe. Hydrology and Earth System Sciences*, **7**, 436-446.

Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A. & Kroes, J.G. (2008) *Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. Vadose Zone J.*, **7**, 640-653.

- Van der Sluijs, P. (1990) Grondwatertrappen. *Bodemkunde van Nederland* (ed. by W.P. Locher and H.D. Bakker). Malmberg, Den Bosch.
- van Ek, R., van 't Veer, R., Loeb, R. & Cusell, C. (2019) *Systeemanalyse Het Hol: Systeemanalyse voor het opstellen van een Inrichtings- en Herstelplan, fase 1*. Witteveen+Bos, Deventer.
- Van Ek, R., Klop, S., De Wit, J., Bartholomeus, R.P. & Witte, J.P.M. (2021) *Effecten van droogte 2018 op natuurlijke vegetatie. Analyse van vegetatieopnamen en grondwaterstanden op de Hogere Zandgronden van Nederland* Witteveen+Bos, FWE, KWR.
- Van Ek, R., Witte, J.P.M., Mol-Dijkstra, J.P., De Vries, W., Wamelink, G.W.W., Hunink, J., Van der Linden, W., Runhaar, J., Bonten, L., Bartholomeus, R., Mulder, H.M. & Fujita, Y. (2014) *Ontwikkeling van een gemeenschappelijke effect module voor terrestrische natuur*. K.G. Adviesbureau, Amersfoort. STOWA.
- Van Jaarsveld, J.A., Reinds, G.J., van Hinsberg, A., van Esbroek, M.L.P. & Buijsman, E. (2010) *De depositie van basische kationen in Nederland*, Bilthoven.
- Velders, G.J.M., Aben, J.M.M., Geilenkirchen, G.P., den Hollander, H.A., van der Swaluw, E., de Vries, W.J. & van Zanten, M.C. (2015) Grootchalige concentratie- en depositiekaarten Nederland : Rapportage 2015. In. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM
- Verhagen, F., Van der Wal, B.J., Moorman, J., Westerhof, H., Peerdeman, K. & Van Sijl, J. (2014) Ontwikkeling Brabants grondwatermodel tot kennissysteem ("Development of Brabant groundwater modeling system", in Dutch) *H2O-online*,
- Voortman, B., Fujita, Y., Bartholomeus, R., Aggenbach, C. & Witte, J. (2017) How the evaporation of dry dune grasslands evolves during the concerted succession of soil and vegetation. *Ecology*, **10**, e1848.
- Witte, J.-P., Nijp, J., Bartholomeus, R., de Wit, J., Kros, H., Reinds, G.J. & van de Vries, W. (2020a) *Modellering van de effecten van klimaat en waterbeheer op de bodem-pH met de waterwijzer natuur* Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA).
- Witte, J.-P.M., Bartholomeus, R.P., van Bodegom, P.M., Cirkel, D.G., van Ek, R., Fujita, Y., Janssen, G.M., Spek, T.J. & Runhaar, H. (2015a) A probabilistic eco-hydrological model to predict the effects of climate change on natural vegetation at a regional scale. *Landscape Ecology*, **30**, 835-854.
- Witte, J., Runhaar, J., Bartholomeus, R., Fujita, Y., Hoefsloot, P., Kros, J., Mol, J. & de Vries, W. (2018a) *De waterwijzer natuur: Instrumentarium voor kwantificeren van effecten van waterbeheer en klimaat op terrestrische natuur*. Stowa.
- Witte, J.P.M., Van Deijl, D. & Van den Eertwegh, G.A.P.H. (2020b) *Gevolgen voor de natuur van de droge jaren 2018 en 2019; resultaten van een enquête onder deskundigen. Deelrapport van het project: Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden- en Oost-Nederland*, Oosterbeek. FWE & KnowH2O.
- Witte, J.P.M., Fujita, Y., Bartholomeus, R. & Rood, K. (2017) Vegetatiedynamiek in droge duinen. Modellering ecosysteemdiensten onder invloed van klimaat en stikstof. *Landschap*, **2017**, 109-117.
- Witte, J.P.M., Pastoors, R., Van der Hoek, D.J., Bartholomeus, R.P., Van Loon, A. & Van Bodegom, P.M. (2011) Is het Nationaal Hydrologische Instrumentarium gereed voor het voorspellen van natuureffecten? *Stromingen*, **17**, 15-26.

Witte, J.P.M., Runhaar, J., Bartholomeus, R.P., Fujita, Y., Hoefsloot, P., Kros, J., Mol, J. & de Vries, W. (2018b) *De waterwijzer natuur: instrumentarium voor kwantificeren van effecten van waterbeheer en klimaat op terrestrische natuur* Stowa.

Witte, J.P.M., Runhaar, J., Bartholomeus, R.P., Fujita, Y., Hoefsloot, P., Kros, J., Mol, J. & De Vries, W. (2018c) *De Waterwijzer Natuur. Instrumentarium voor kwantificeren van effecten van waterbeheer en klimaat op terrestrische natuur.*, Amersfoort. STOWA.

Witte, J.P.M., Bartholomeus, R.P., Van Bodegom, P.M., Cirkel, D.G., Van Ek, R., Fujita, Y., Janssen, G.M., Spek, T.J. & Runhaar, H. (2015b) A probabilistic eco-hydrological model to predict the effects of climate change on natural vegetation at a regional scale. *Landscape Ecology*, **30**, 835–854.

Wösten, J., de Vries, F., Hoogland, T., Massop, H., Veldhuizen, A., Vroon, H., Wesseling, J., Heijkers, J. & Bolman, A. (2013a) *BOFEK2012, de nieuwe bodemfysische schematisatie van Nederland* Alterra.

Wösten, J.H.M., de Vries, F., Hoogland, T., Massop, H.T.L., Veldhuizen, A.A., Vroon, H.R.J., Wesseling, J.G., Heijkers, J. & Bolman, A. (2013b) *BOFEK2012, de nieuwe bodemfysische schematisatie van Nederland* Alterra.

BIJLAGEN

BIJLAGE I

PROCEDURE VOOR HET VERWERKEN VAN DE N-DEPOSITIEKAART

N-DEPOSITIE

1. Inlezen N-depositie N_{atm} van kaart `depo_n_201925.asc`. Eenheid kg N/ha/jr. Betreft de som van NH_3 -N en NO_x -N.
2. Mineralisatie van N en P worden met de metarelaties uitgedrukt in gram N/P per kg grond per 5 jaar (N_{min_gkg5yr} en P_{min_gkg5yr}). Dit zetten we als volgt om in N_{min} en P_{min} (beide in kg/ha/jaar) zodat de eenheden vergelijkbaar zijn met die van N_{atm} :
 - a. $N_{min} = 2 * N_{min_gkg5yr} * BD * D$
 - b. $P_{min} = 2 * P_{min_gkg5yr} * BD * D$

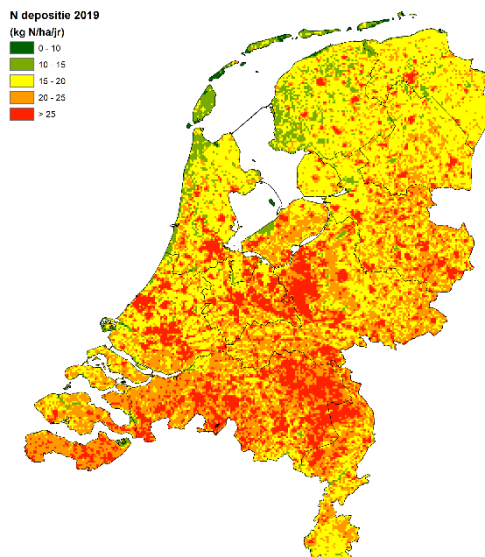
Met BD is de soil bulk density (kg/m^3) en D de bodemdikte (m). Voor D houden we een waarde van 0.15 m aan, BD lezen we af uit `BOFEK2012_profielen_versie2_1.xls` (laag 1).

3. Plotgemiddelde indicatiewaarde voor voedselrijkdom mN berekenen we als:

$$mN = 0.37 + 0.24 \times \ln(N_{min} + 0.5 \times N_{atm} + e) + 0.70 \times (\ln(P_{min} + e)) / (\ln(N_{min} + e))$$

In deze vergelijking zijn N_{min} en N_{atm} weer respectievelijk de stikstofmineralisatie en de atmosferische depositie (beide in kg N/ha/jaar) en is P_{min} de jaarlijkse P mineralisatiesnelheid van bodem (kgP/ha/jaar). N_{atm} wordt gehalveerd omdat deze term alleen relevant is voor het groeiseizoen.

INVLOED VAN ZUURDEPOSITIE OP DE BODEM-PH



1. Inlezen stikstofdepositie N_{atm} (NH_3 -N + NO_x -N) van kaart `depo_n_201925.asc`. Eenheid kg N/ha/jr (dus kg NH_3 -H plus kg NO_x -N).
2. Gebruiker geeft een vermenigvuldigingsfactor $DEPFAC$ op (getal tussen 0.15 en 1.5).
3. Omzetten N_{atm} naar N_{atm_eq} in $eq/m^2/jr$ onder toepassing $DEPFAC$: $N_{atm_eq} = DEPFAC * 0.00714 * N_{atm}$

4. Nu opzoeken welke indices i en $i+1$ van de metarelaties corresponderen met $Natm_eq$, waarbij i een geheel getal is tussen 2 en 17. Index i correspondeert met depositie $Natm_eq_t$ uit kolom B van tabel I2DEP.CSV die het dichtst onder $Natm_eq$ ligt, $i+1$ met de depositie $Natm_eq_t$ uit die tabel die het dichtst boven Neq ligt (de toevoeging t is van de 'threshold' in de opzoek-tabel). Dus: $Natm_eq_t(i) < Natm_eq \leq Natm_eq_t(i+1)$.
5. Twee keer metarelaties aanroepen geeft twee pH's: $pH(i)$ en $pH(i+1)$
6. Tussen deze twee waarden interpoleren voor de uiteindelijke pH:
 - a. $pH(i)$ en $pH(i+1)$ omzetten in $[H^+] = 10^{-pH}$
 - b. $H = (1 - f) \cdot H_i + f \cdot H_{i+1}$
met $f = (Natm_eq - Natm_eq_t_i) / (Natm_eq_t_{i+1} - Natm_eq_t_i)$
 - c. gewogen gemiddelde $[H^+]$ terugrekenen naar pH: $pH = -10 \log(H)$.

AD-HOC OPLOSSING

Met GTST is het niet gelukt metarelaties af te leiden voor de BFE's 36 en 42. Daarom zijn voor deze eenheden de relaties van respectievelijk BFE 17 en 18 genomen.

BIJLAGE II

CONVERSIETABEL VOEDSELRIJKDOM: VAN KLASSE NAAR INDICATIEWAARDE

Op basis van onderstaande tabel, afkomstig uit bijlage A uit Van Ek *e.a.* (2014), p 79, is met kennisregels de voedselrijkdom klasse van vegetatie vertaald naar Runhaar indicatiewaarden.

IN DE KANSRIJKDOMMODULE GEBRUIKTE KLASSEN VOOR VOEDSELRIJKDOM EN ZUURGRAAD (DE HAAN ET AL., 2010) EN DE VERTALING DAARVAN NAAR INDICATIEWAARDEN TEN BEHOEVE VAN PW.

Voedselrijkdom		Fm	Zuurgraad		Rm
1	voedselarm	1.26	1	zuur	1.37
2	1 en 3	1.62	2	1 en 3	1.55
3	matig voedselrijk	1.98	3	matig zuur	1.72
4	3 en 5	2.31	4	3 en 5	1.90
5	zeer voedselrijk	2.65	5	neutraal	2.12
			6	5 en 7	2.34
			7	basisch	2.56

II.I HER-EVALUATIE VAN VOEDSELRIJKDOM IN DE WWN

II.II OORSPRONKELIJKE BEREKENING (WWN 2)

In de vorige versies van WWN (WWN-1 en WWN-2) (Witte *e.a.*, 2018a; Witte *e.a.*, 2020a) was de empirische relatie tussen de beschikbaarheid van nutriënten en indicatiewaarde voor nutriënten gebaseerd op de P-mineralisatiesnelheid van de bodem, die als volgt werd geformuleerd:

$$mN = 0.58 + 0.58 \ln(P_{min} + e)$$

waarbij mN gemiddelde indicatorwaarde van nutriënten voor de voorkomende plantsoorten is, en P_{min} de gemodelleerde P mineralisatiesnelheid per kg bodem per jaar (gP/kg bodem/jaar) is.

II.III NIEUWE BEREKENING MN (WWN 3)

Om N-depositie als extra input in het model te kunnen opnemen, is de empirische relatie opnieuw opgesteld zodat deze ook de beschikbaarheid van N omvat. Aangezien N-depositie wordt uitgedrukt als hoeveelheid N per hectare, is de empirische relatie ook vertaald naar oppervlaktebasis.

Daartoe gebruikten we de dataset van 122 korte vegetaties, verspreid over Nederland en Noord-België (Fujita *e.a.*, 2013a). De mineralisatie van N en P van elk punt was gesimuleerd met het CENTURY-model voor een periode van 5 jaar voorafgaand aan het jaar waarin de meting plaatsvond. De invoerwaarden die voor de simulatie waren gebruikt, waren gemeten bodem-C (%), N (%), P (%), textuur, bodemvochtgehalten gesimuleerd met het SWAP-model. Gesimuleerde mineralisatiesnelheid van N en P (gN/kg soil /5 jaar en gP/kg/5 jaar) is omgerekend naar die per oppervlakte (kgN/ha/5 jaar en kgP/ha/5 jaar), door vermenigvuldiging met de bulkdichtheid (gemeten of geschat op basis van het organische stofgehalte) en de diepte (de diepte van de bovengrond op basis van de BOFEK2012 kaart). Tenslotte werd de jaarlijkse mineralisatiesnelheid van N en P (kgN/ha/jaar en kgP/ha/jaar) berekend door ze door 5 te delen.

De N-depositiewaarde was voor elk meetpunt in Nederland geschat op basis van de N-depositie voor de betreffende locatie van de N-depositiekaart voor het jaar 2019 van het RIVM (zie *Figuur 2.3*). Waarbij deze waarden geschaald waren naar het meetjaar met behulp van de jaarlijkse trend van de landelijk gemiddelde N-depositie (<https://www.clo.nl/indicatoren/nl018912-stikstofdepositie>). Hiertoe is de geschatte N-depositiewaarde van 2019 van elk meetpunt vermenigvuldigd met de ratio van de jaarlijkse gemiddelde N-depositie van de periode van 5 jaar vóór het meetjaar en die van 2019, voor N-NH₃ en N-NO_x afzonderlijk. De N depositiewaarden van de Belgische locaties waren op dezelfde manier geschat, door het lokale N-depositieniveau in 2011 (Cools *e.a.*, 2015) te vermenigvuldigen met de verhouding van de nationale jaarlijkse N-depositieniveau van 5 jaar vóór de meting en die van 2011 (<https://www.ceip.at/data-viewer>).

Stikstof dat via depositie wordt aangevoerd, wordt niet altijd door planten opgenomen. Het is bekend dat N depositie in de winter gemakkelijk uitspoelt naar het grondwater omdat de planten het buiten het groeiseizoen niet opnemen. Om deze seizoensgebonden dynamiek weer te geven, hebben we een correctiefactor van 0,5 ingevoerd; d.w.z. 50% van N-depositie is in potentie niet beschikbaar (spoelt uit of denitrificeerd) voor opname door de vegetatie. De N-beschikbaarheid wordt daarom berekend als de: jaarlijkse N-mineralisatie (kg N/ha) + 0,5× jaarlijkse N-depositie (kg N/ha).

HET DEFINIËREN VAN VOEDSELRIJKDOM

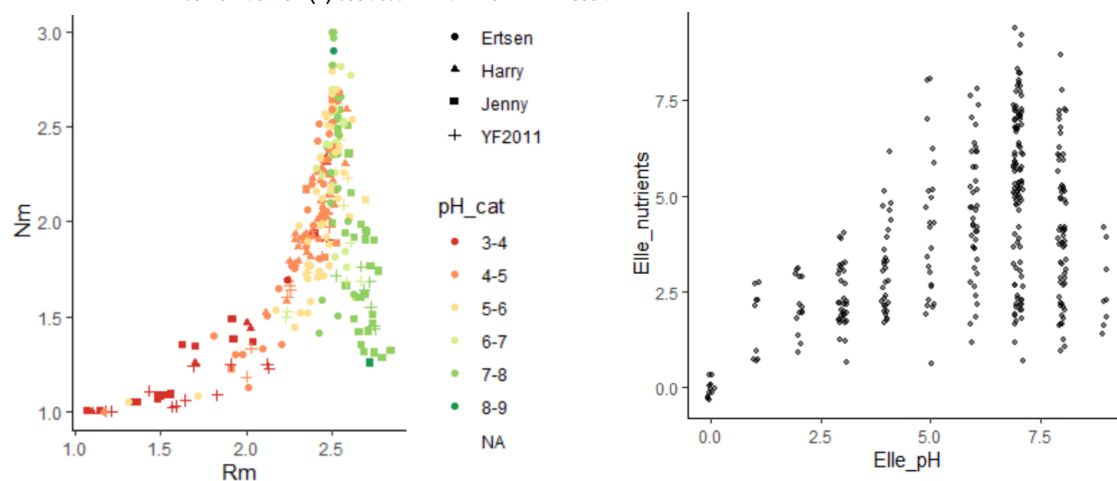
Van alle indicatiewaarden van plantensoorten en vegetatietypen is voedselrijkdom de factor met de meest onduidelijke definitie. Net als andere standplaatsfactoren varieert voedselrijkdom in ruimte ten tijd. Daar komt bovenop dat voedselrijkdom verschillende stoffen beschrijft. Zowel macronutriënten (bijvoorbeeld N, P, K, S, Ca, Mg) als sporenelementen (zoals B, Cl, Zn, Fe, Si) sturen niche differentiatie, competitie tussen plantensoorten en botanische soortenrijkdom. Niet alleen het type, maar ook de vorm en beschikbaarheid voor planten van deze stoffen is van invloed op de voedselrijkdom. Fosfaat en Kalium kunnen sterk gebonden worden aan de bodem, en bepaalde vormen van N zijn niet beschikbaar voor planten (opgeloste aminozuren, N opgenomen in organisch materiaal in de bodem dat eerst gemineraliseerd moet worden).

Bovendien beschrijven niet alleen de concentratie van stoffen in het bodemvocht of gehalten van stoffen in de bodem voedselrijkdom. Bij een grote aanvoer van lage concentraties (bijvoorbeeld via kwel of stikstofdepositie) kan een plant daardoor alsnog toegang hebben tot grote hoeveelheden voedingsstoffen.

Tenslotte wordt voedselrijkdom beïnvloed door de beschikbaarheid van water en zuurgraad. Bij een watertekort en zure omstandigheden heeft een plant geen mogelijkheid om voedingsstoffen op te nemen. De potentiële voedselrijkdom die de bodem biedt aan vegetatie, wordt dus beperkt door zuurgraad vocht. Het is dan ook bekend dat deze indicatiewaarden van planten aan elkaar gerelateerd zijn. Het verband tussen plot-gemiddelde indicatiewaarde voor zuurgraad R_m en voedselrijkdom N_m is heel duidelijk zichtbaar (Figuur 10.1 links): vegetatie met veel plantensoorten die zijn aangepast aan zure omstandigheden (lage R_m waarde) zijn meestal voedselarm (lage N_m waarde). Hetzelfde patroon is waarneembaar op soortenniveau (Figuur 10.1 rechts). Dit heeft waarschijnlijk te maken met de trade-off van soorteigenschappen: soorten die investeren in aanpassing aan een zure omstandigheden zijn gewoonlijk niet sterk concurrerend voor nutriënten (d.w.z. traaggroeiërs en stresstoleranten) en hebben bijgevolg een lage indicatorwaarde voor voedselrijkdom.

Voedselrijkdom beschouwen we hiermee als de potentiële voedselrijkdom van de bodem, mits er geen andere factoren (zoals droogte en lage pH) die de opname van beschikbare voedingsstoffen door planten beperken. Dit komt overeen met hoe de indicatiewaarde van voedselrijkdom is gedefinieerd volgens de Runhaar systematiek.

FIGUUR 10.1 LINKS: RELATIE TUSSEN PLOT-GEMIDDELDE INDICATIEWAARDE VOOR ZUURGRAAD (R_m) EN VOEDSELRIJKDOM (N_m), VOOR 271 VEGETATIEOPNAMEN. GEBASEERD OP DE 122 PUNTEN VAN DE VALIDATIEPLOTS (OLDE VENTERINK E.A., 2002; ORDONEZ E.A., 2010; FUJITA E.A., 2013B) PLUS 149 VELDMETINGEN VAN ITORS DATASET (ERTSEN E.A., 1998). RECHTS: RELATIE TUSSEN INDICATIEWAARDE VAN ZUURGRAAD (R) EN VOEDSELRIJKDOM (N) VOOR 677 NEDERLANDSE PLANTENSOORTEN



OPSTELLEN EMPIRISCHE RELATIE TUSSEN VOEDSELRIJKDOM EN INDICATIEWAARDE MN

Het mag duidelijk zijn dat de kwantificering van voedselrijkdom uiterst complex is, en niet eenvoudig te ondervangen is met simulatiemodellen. Om te bepalen hoe de indicatiewaarde mN het best gerepresenteerd kan worden met meetbare eenheden is onderzoek gedaan (Schaffers & Šýkora, 2000; Fujita *e.a.*, 2013a). De conclusies zijn echter niet eenduidig. Op basis van de hierboven beschreven 122 locaties is de relatie tussen mN en verschillende (combinaties van) variabelen die voedselrijkdom beschrijven gemaakt (Fujita *e.a.*, 2013a). Hiervoor zijn verschillende multivariate regressiemodellen opgezet met N-beschikbaarheid, P-mineralisatie, pH en bodem N- en P-gehalte van de bodem als maten voor voedselrijkdom en verklarende variabelen. Uit Fujita *e.a.* (2013a) blijkt dat P-mineralisatie over het algemeen beter gerelateerd is aan mN dan N-mineralisatie, hoewel de invloed van gemeenschappelijke effecten tussen N en P groot is. Verder is de mineralisatiesnelheid van N en P beter gerelateerd aan mN dan de concentratie van opgeloste N- en P of de ratio van N:C en P:C in de bodem. De periode waarin N- en P-mineralisatie bepaald is (zomer, jaarlijks, of perioden van 5 jaar) heeft daarentegen slechts een kleine invloed.

Op basis van deze bevindingen stellen wij een empirische relatie op om mN te voorspellen op basis van de N-mineralisatie, de P-mineralisatie, en bodem pH. Van alle mogelijke combinaties van verklarende variabelen in het multivariate regressiemodel werd het model met de laagste AIC-score gekozen (Akaike Information Criterium, een statistische maat voor selectie van het beste model waarbij het aantal benodigde parameters en de prestatie van het model geoptimaliseerd worden (Akaike, 1973)).

Het gekozen model ($R^2_{\text{adj}} = 0.49$; $N = 122$) is:

$$\text{Verg. 10.1} \quad mN = -0.26 + 0.24 \ln(N_{\text{ave}} + e) + 0.15 \ln(P_{\text{min}} + e) + 0.14 pH$$

Hierin is mN de gemiddelde indicatiewaarde voor voedselrijkdom, gebaseerd op de indicatiewaarde van voorkomende plantensoorten op de locaties, N_{ave} de N-beschikbaarheid voor planten (kgN/ha/jaar), P_{min} de jaarlijkse P mineralisatiesnelheid van de bodem (kgP/ha/jaar), en pH de bodemzuurgraad. N-beschikbaarheid is de som van jaarlijkse N mineralisatiesnelheid van bodem en N-depositie tijdens het groeiseizoen (d.w.z. $0.5 \times$ jaarlijkse N-depositie). Initieel is deze empirische relatie daarom gebruikt om modelsimulaties van procesmodellen te kunnen vertalen naar een indicatiewaarde.

II.IV HERZIENING METARELATIE MN

De bovenstaande metarelatie Verg 10.1 $mN = -0.26 + 0.24 \ln(N_{\text{ave}} + e) + 0.15 \ln(P_{\text{min}} + e) + 0.14 pH$ is ingebouwd in een nieuwe versie van de WWN (WWN-3). Om te bepalen of dit heeft geleid tot logische resultaten, is met een plausibiliteitstoets voor het gebied Sang en Goorkens bepaald of de resultaten hebben geleid tot een verklaarbaar en realistisch resultaat (zie onder). Deze toetsing suggereert dat een toename van stikstofdepositie leidt tot een afname van de voedselrijkdom. Dit is geheel tegen verwachting in. Uit nadere analyse komt naar voren dat de verandering in voedselrijkdom zeer gevoelig is voor veranderingen in zuurgraad. Het effect van zuurgraad op vegetatiesamenstelling wordt echter ook al ondervangen via de indicatiewaarde voor zuurgraad, die daar voor bedoeld is. Veranderingen in N- of P-mineralisatie doen er nauwelijks toe. Er is daarom besloten om het pH-effect op voedselrijkdom via zuurgraad te laten verlopen en niet via voedselrijkdom, met het argument dat zuurgraad de sturende variabele is, en de potentiële voedselrijkdom reduceert. Voedselrijkdom beschouwen we daarmee als de potentiële voedselrijkdom van de bodem.

Dit komt beter overeen met hoe de indicatiewaarde van voedselrijkdom is gedefinieerd volgens de Runhaar-systematiek.

Het gevolg van dit besluit is dat de daaropvolgende beste relatie een beduidend lager deel van de variatie in Nm kan verklaren (34% in plaats van 49%):

$$\text{Verg. 10-2} \quad Nm = 0.37 + 0.24 \times \ln(N_{min} + 0.5 \times N_{atm} + e) + 0.70 \times \frac{\ln(P_{min} + e)}{\ln(N_{min} + e)}$$

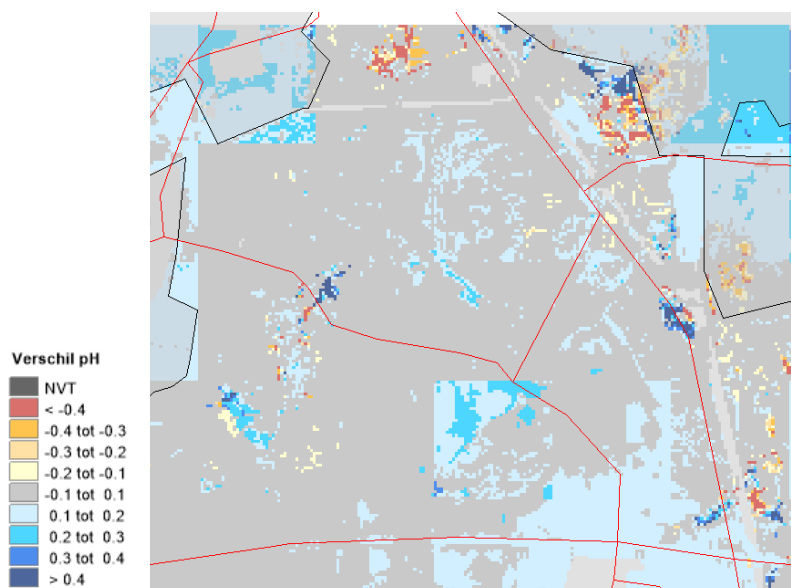
De conceptuele juistheid weegt in dit geval zwaarder dan hoe goed het statistische model de variatie in Nm kan verklaren. Bovendien is de helling van de $N_{min}+N_{atm}$ in het beste model zeer vergelijkbaar met de helling in andere alternatieve modellen (b.v. monovariaat regressiemodel alleen met $N_{min}+N_{atm}$), hetgeen suggereert dat ΔNm ten opzichte van $N_{min}+N_{atm}$ (die in WWN is gebruikt) vrij robuust is. Na de herziening van deze metarelaties, in combinatie met aanpassingen in het model VSD+ (zie volgende bijlage III), leidt dit tot een veel plausibeler resultaat (zie hoofdstuk 3 voor de uitgevoerde plausibiliteitsstudie).

BIJLAGE III

REVISIE VSD+ EN METARELATIES PH VOOR NATTE OMSTANDIGHEDEN

Het simulatiemodel VSD+ (Bonten *e.a.*, 2016)²⁰¹⁶ is gebruikt om de zuurgraad in de wortelzone te simuleren. Bij de plausibiliteitstoets van de WWN werd duidelijk dat de zuurgraadveranderingen op sommige plekken niet goed gesimuleerd werd. Een afname van de zuurdepositie resulteerde namelijk in een aantal gevallen in een forse toename van de zuurgraad (afname pH, Figuur 10.2). Dat is precies tegengesteld aan de verwachtingen, en niet te verklaren op basis van de in VSD+ gesimuleerde bodemchemische processen. Om te bepalen hoe deze resultaten tot stand zijn gekomen, is daarom op verschillende vlakken nader onderzoek verricht. Dit deelonderzoek heeft geresulteerd in (1) meer inzichten in de metarelaties voor pH, (2) een aanpak om metarelaties te toetsen, (3) aanpassingen in VSD+ om de uitkomsten robuuster te maken onder natte omstandigheden, en (4) nieuwe pH-metarelaties voor de nieuwe versie van WWN-3.03.

FIGUUR 10.2 VERANDERING IN ZUURGRAAD DOOR REDUCTIE VAN DEPOSITIE MET FACTOR 0.15 TEN OPZICHTE VAN DE REFERENTIESITUATIE. WATERHUISHOUDING EN KLIMAAT ZIJN GELIJK GEBLEVEN. DE BLOKKERIGHEID IN DE VERANDERING IN ZUURGRAAD WORDT VEROORZAAKT DOOR DE GROVE RESOLUTIE VAN DE INVOER VAN STIKSTOFDEPOSITIE (1 KM X 1 KM)



III.I AANPASSINGEN IN VSD+

Om te bepalen wat de oorzaak van de afwijkende veranderingen in zuurgraad zou kunnen zijn, zijn de pH simulaties uit VSD+ in detail onderzocht. Uit nader onderzoek bleek de toename in pH voornamelijk op te treden bij ondiepe grondwaterstanden en/of hoge kwelfluxen. Ten opzichte van de eerdere VSD+ versie zijn een aantal aanpassingen gemaakt om deze geschikter te maken voor natte omstandigheden in gebieden onder sterke kwelinvloed (zie bijlage III voor details). In VSD+ vinden omzettingen van stikstof plaats die invloed hebben op de zuurgraad. Nitrificatie produceert zuur, en denitrificatie consumeert zuur. De nitrificatie en deni-

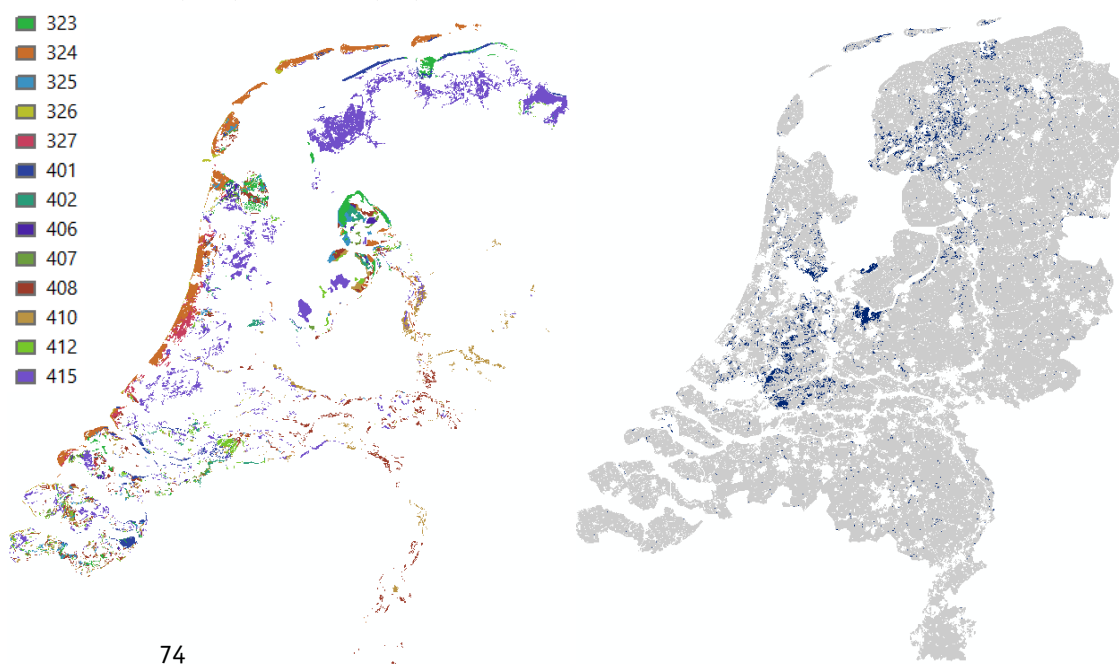
trificatie zijn afhankelijk van vochtgehalte, en geparameteriseerd op basis van meetgegevens. Het bereik van deze meetgegevens omvat echter niet de zeer natte omstandigheden zoals die bestaan in een deel van de kwelgebieden waar de bodem het hele jaar door volledig waterverzadigd is. In deze waterverzadigde systemen berekende VSD+ een toename van de pH bij toenemende N depositie doordat de nitrificatie (vrijwel) volledig werd geremd. In VSD+ zijn de nitrificatie en denitrificatie snelheden nu begrensd, waardoor bij hoge kwelfluxen de berekende pH weer gelijk wordt aan de pH van het kwelwater wat realistisch is in deze door kwel gedomineerde bodems. Opgemerkt dient te worden dat de huidige versie van VSD+, buiten nitrificatie/denitrificatie, geen overige redox-processen omvat waarin bijvoorbeeld sulfaat een rol speelt. Dergelijke processen kunnen juist in kwelzones effect hebben op de zuurgraad.

In VSD+ wordt de aanvoer van ionen via kwel bepaald door de kweltype. Bij elk kweltype horen concentraties van ionen en een pH. Doordat die concentraties zijn gemiddeld over alle waarnemingen, klopt de pH niet met de ladingsbalans van de ionconcentraties. In VSD+ is dit gecorrigeerd door aan de kwel fosfaat toe te voegen in een zodanige concentratie dat de ladingsbalans weer klopt en bij zeer hoge kwelflux de bodem pH vrijwel gelijk wordt aan die van het kwelwater (Witte *e.a.*, 2020a). Behalve in de ladingsbalans speelt fosfaat in deze versie van VSD+ geen rol in de chemische reacties. Na invoering van bovengenoemde aanpassingen waren metarelaties sterk verbeterd.

III.II REVISIE METARELATIES ZUURGRAAD

Behalve een nieuwe versie van VSD+, bleken ook aanpassingen in de metarelaties benodigd. Nadere inspectie levert echter op dat ook nu metarelaties nog niet volledig probleemloos zijn. Vooral voor kalkrijke gronden blijkt namelijk de zuurgraad af te nemen bij (basenrijke) kwel. Kalkrijke gronden beslaan 10% van het Nederlandse landoppervlak, met het merendeel in de duinen en kleigronden in het noorden van het land. In een groot deel van deze gebieden is wegzijging en diepe GLG. Kijken we naar het landoppervlak van Nederland waarbij de combinatie van ondiepe GLG's (GLG < 75 cm-mv; Figuur hieronder) met kalkrijke gronden optreden, gaat het om slechts 0.25%. Dat is behoorlijk beperkt en plaatst de foutieve metarelaties in perspectief. Daarentegen blijkt dat 50% van de foutieve metarelaties optreedt bij de overige kalkarme gronden.

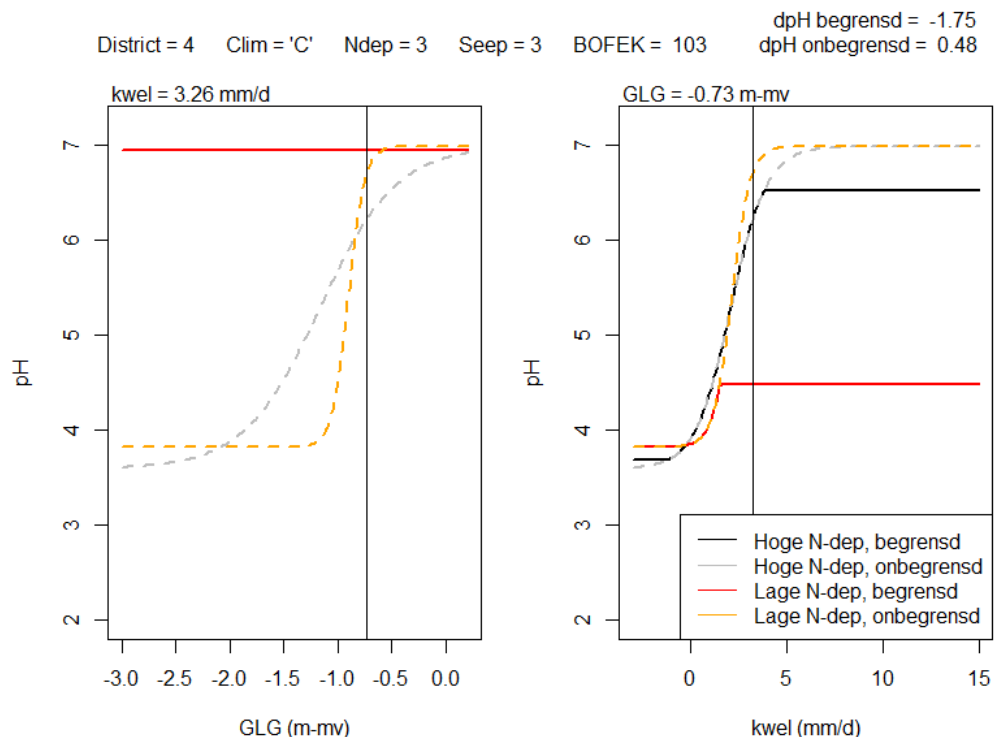
FIGUUR 10.3 LINKS: KAART MET LIGGING VAN KALKRIJKE BODEMFYSISCHE EENHEDEN (SMART INDELING BOFEKS). RECHTS: GEBIEDEN WAAR GLG < 75 CM-MV IS (BLAUW), NAAR GAAST E.A. (2010)



Bij metarelaties waarbij de zuurgraad afnam met hogere kwelflux of ondiepere GLG, is de zuurgraad gelijk gesteld aan de waarde bij diepe GLG of bij wegzijging. De zuurgraad wordt in dit bereik wél goed voorspeld, en is een betere voorspelling dan de oorspronkelijk voorspelde lagere pH.

Verder werd in de oorspronkelijke pH-metarelaties werd de voorspelde zuurgraad begrensd om te voorkomen dat een onrealistisch hoge of lage zuurgraad voorspeld werd. Deze begrenzing bleek tot ongewenste artefacten te leiden: de zuurgraad werd daardoor soms met meer dan een pH eenheid verminderd (Figuur 10.4). Daarmee leidde de begrenzing juist tot onrealistische voorspelling van zuurgraad. Het verwijderen van deze begrenzing leidde tot aanzienlijk realistischere voorspellingen van pH (Figuur 10.10). Er is daarom besloten om te werken met metarelaties zonder pH-begrenzing. Zelfs onder deze omstandigheden traden nog artefacten op, waarbij een toename van kwel of ondiepere GLG leidde tot negatievere zuurgraad. Dit wordt vooral gestuurd door een aantal onrealistische waarden bij ondiepe GLG of hoge kwelaanvoer. Hiervoor is dezelfde oplossing doorgevoerd als voor de hierboven beschreven kalkgronden. De situaties waar dermate hoge kwelfluxen en ondiepe grondwaterstanden optreden bij een beperkt aantal bodemfysische eenheden is overigens zeer beperkt. Daarmee heeft dit ook zeer beperkt gevolgen voor de toepasbaarheid van de WWN. Desalniettemin geeft dit aan dat de metarelaties toe zijn aan een nadere revisie in toekomstige WWN versies.

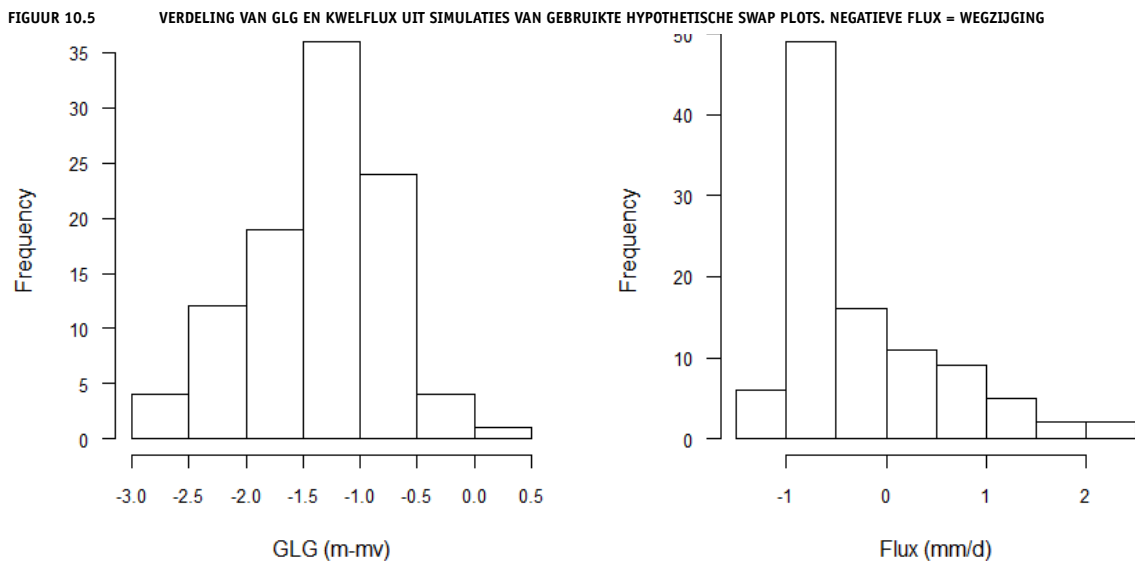
FIGUUR 10.4 METARELATIES MET (VASTE LIJNEN) EN ZONDER (STIPPELLIJNEN) BEGRENZING VAN VOORSPELDE ZUURGRAAD. LINKS: PH RELATIE MET GLG BIJ GEGEVEN KWELFLUX. RECHTS: INVLOED VAN KWEL OP PH BIJ GEGEVEN GRONDWATERSTAND



III.III GLG EN KWELFLUX BEREIK IN SWAP SIMULATIES

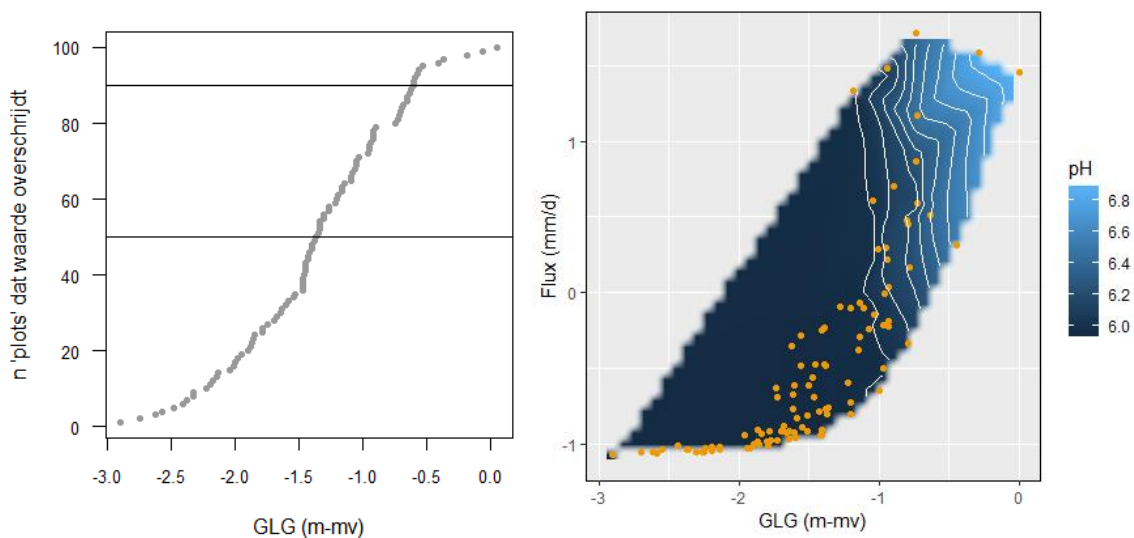
Ten grondslag aan de metarelaties voor pH liggen de SWAP simulaties. Deze leveren de hydrologische invoer die benodigd is voor VSD+. Alle metarelaties bouwen op dezelfde SWAP simulaties waarin op plotniveau de waterhuishouding is gesimuleerd. Dit is gedaan door hydrologische randvoorwaarden 100x willekeurig te variëren binnen een opgegeven bereik van mogelijkheden. Die simulaties bepalen uiteindelijk welke hydrologische omstandig-

heden doorgerekend worden en waar metarelaties op gebaseerd zijn. Voor de metarelatie $pH = f(GLG, kwelflux)$ is het dus van belang om te weten welk bereik van waarden is gebruikt. Er is een beperkt aantal simulaties met een ondiepe GLG (Figuur 10.5).



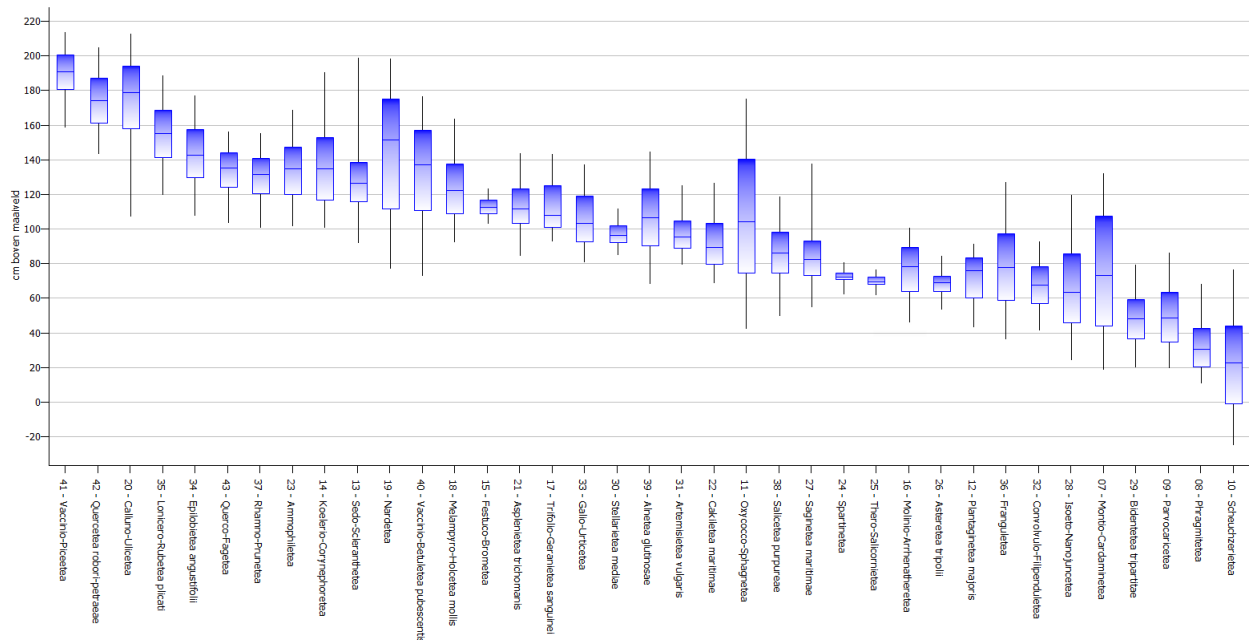
Dit komt nog duidelijker in Figuur 10.6 (links): In de helft van de gevallen is GLG dieper dan ca. 1.5 m-mv. In slechts 10 van de 100 simulaties is de gesimuleerde GLG ondieper dan ca. 0.7 m-mv. In dit GLG bereik zijn nóg minder combinaties beschikbaar met verschillende kwelintensiteiten (Figuur 10.6 (rechts)). Een ondiepe grondwaterstand kan echter optreden in situaties met lichte wegzijging (vennen en hoogveen, trilveen) of juist bij (zeer) sterke kwel. In dit deel van het spectrum hebben we dus weinig simulaties, die daarentegen juist relevant zijn voor pH-effecten in natte kwelgebieden (zie onder).

FIGUUR 10.6 LINKS: CUMULATIEVE FREQUENTIE VAN GESIMULEERDE GLG IN SWAP SIMULATIES. GLG IS OPLOPEND GESORTEERD; DE WAARDE OP DE Y-AS IS HET AANTAL SWAP PLOTS WAARVOOR DE GLG GELIJK OF DIEPER DAN DE BETREFFENDE GLG WAARDE IS. RECHTS: DE COMBINATIES TUSSEN GLG EN KWELFLUX (RECHTS) VOOR BOFEK 307. DE GELE CIRKELS GEVEN DE 100 SIMULATIES WEER, DE BLAUWE GRADIËNT OP DE ACHTERGROND DE BIJBEHOORENDE MET VSD GESIMULEERDE PH



Een snelle analyse levert het inzicht dat voor een groot deel van vegetaties op klasseniveau (Wamelink GLG uit Synbiosys) een GLG ondieper dan 70 cm-mv niet ongewoon is (zie onder). Bovendien is een groot deel van de zeldzame en waardevolle natuur van Nederland te vinden in natte systemen. Dit benadrukt de noodzaak voor voldoende simulaties in het natte bereik.

FIGUUR 10.7 GLG (SYNBIOSYS) VOOR EEN AANTAL PLANTENGEMEENSCHAPPEN IN NEDERLAND OP KLASSE-NIVEAU



Als gevolg van het beperkte aantal SWAP simulaties in het natte bereik, worden de metarelaties voor pH te sterk gestuurd door de simulaties in het droge bereik. Er zijn een aantal testsimulaties uitgevoerd om te bepalen wat het effect zou zijn van het toevoegen van 10 extra SWAP simulaties in het nattere bereik. Dit is bereikt door willekeurig 10 nieuwe parameters voor AQAVE (gemiddelde stijghoogte onderrand) en AQAMP (amplitude van stijghoogte onderrand) te trekken in het bereik tussen respectievelijk -75 tot -25 cm (was -250 tot -25 cm) en 10 tot 25 cm (was 10 tot 50 cm). Uit deze analyses komt naar voren dat de metarelatie de variatie in gesimuleerde pH beter kan verklaren met GLG en kwelflux, de verklaarde variantie verhoogt van 67% naar 79%. Een aanbeveling is daarom om in volgende WWN versies het aantal simulaties in het natte bereik te verhogen.

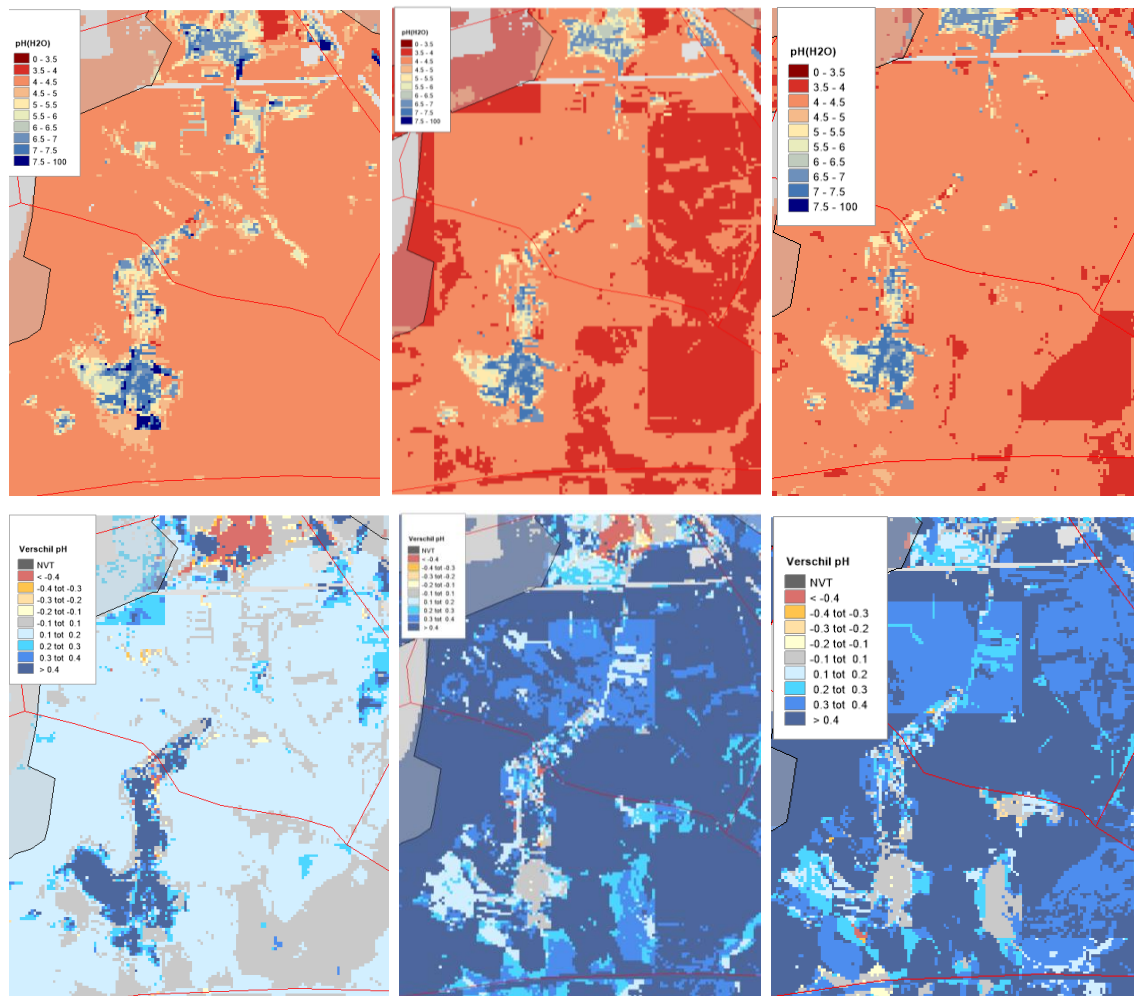
III.IV EFFECT VAN REVISIES OP VOORSPELDE ZUURGRAAD

Na de wijzigingen van de metarelaties is bepaald wat het effect er van is op de gesimuleerde zuurgraad. Dit is gedaan door de versie van WWN-3.00 (zonder aanpassingen in VSD+ en de in de vorige paragraaf beschreven metarelaties) te vergelijken met WWN-3 (met aanpassingen). De gesimuleerde zuurgraad was in WWN-3.00 aan de hoge kant, met name in de kwelzones (Figuur 10.10). Opvallend zijn de zeer sterke toename in pH op vooral de natte standplaatsen in het centrale deel van Sang en Goorkens en een onrealistisch grote afname in pH (soms 2 pH eenheden) door afname in depositie in het noordelijk deel, op plekken met hoge kwelfluxen.

De aanpassingen leiden over het algemeen tot een zuurdere referentiesituatie. Ook op de hogere zandgronden in de omgeving van Sang en Goorkens komen nu meer plekken voor waar de zuurgraad onder de 3 uit komt. De zuurgraad in het centrale deel is minder extreem (waarden boven de 7.5 treden niet meer op, Figuur 10.8 midden onder). Op de drogere zandgronden rondom Sang en Goorkens is de afname in zuurgraad groter geworden door afge-

nomen stikstofdepositie. De stijging in zuurgraad is over het algemeen 0.4-0.5 pH eenheid, wat plausibel geacht wordt met zo'n forse afname. Een deel van het centrale gebied in Sang en Goorkens, met veel kwelaanvoer, heeft nu een verwaarloosbare verandering in zuurgraad. Echter, de onrealistisch grote afname in pH bij afname van depositie blijft bestaan. Nemen we de begrenzing van zuurgraad in de metarelaties weg, dan leidt dat tot een beeld waarbij deze extremen in veel mindere mate optreden (Figuur 10.9, rechtsonder). De metarelaties lijken hier tot de meest realistische zuurgraad te leiden. Ook hier zijn echter nog een aantal gridcellen waar de zuurgraadverandering onrealistische waarden heeft (daling in pH bij daling depositie van > 1 pH eenheid). Het betreft hier een combinatie van situaties die in Nederland slechts zeer beperkt voor zullen komen. De resultaten van de begrensde metarelaties in WVN-3 geven voor het overgrote deel van het modelgebied een plausibel beeld van zuurgraad. Validatie in andere proefgebieden en aan veldmetingen is benodigd om dit beeld te bevestigen. Op basis van onderstaande resultaten is besloten om de begrensde metarelaties van WVN-3 te gebruiken in de nieuwe versie van de WVN.

FIGUUR 10.10 EFFECT VAN AANPASSINGEN IN VSD+ EN OPSTELLEN NIEUWE METARELATIES ZONDER BEGRENZING OP VOORSPELLING ZUURGRAAD (BOVENSTE RIJ) EN VERANDERING VAN ZUURGRAAD BIJ REDUCTIE VAN DEPOSITIE MET EEN FACTOR 0.15 VAN HUIDIGE DEPOSITIE (ONDERSTE RIJ). LINKERKOLOM: METARELATIES ZONDER AANPASSINGEN, ZOALS IN WVN-3.0. MIDDEN: METARELATIES MET AANGEPASTE VERSIE VAN VSD+. RECHTERKOLOM: METARELATIES MET AANGEPASTE VERSIE VAN VSD+, ZONDER BEGRENZING VAN ZUURGRAAD



BIJLAGE IV

HARMONISATIE CENTURY – VSD+ – SWAP

IV.I MODELCONCEPTEN VOOR N-MINERALISATIE IN VSD+ EN CENTURY

De N-mineralisatie van de bodem kan zowel in het CENTURY- als het VSD+-model worden gesimuleerd. Hieronder worden de basisstructuur en het concept van beide modellen kort beschreven.

Voor de berekening van de huishouding van organisch stof in de bodem gebruikt VSD+ het submodel RothC (Coleman, 2005). Mineralisatie van organische stof en dus ook van stikstof wordt door VSD+ berekend op basis van vijf verschillende pools organische stof in de bodem: goed afbreekbaar plantmateriaal, minder goed afbreekbaar plantmateriaal, microbiële biomassa, humus en inerte organische stof. De eerste vier pools breken af, inerte organische stof niet. De afbraaksnelheid is het hoogste voor goed afbreekbaar plantmateriaal en het laagste voor humus (voor inerte organische stof is de afbraaksnelheid nul). De afbraaksnelheden zijn verder een functie van temperatuur, vocht en pH. De verdeling van organische stof over de verschillende pools wordt grotendeels bepaald door de hoeveelheid bladval en de kwaliteit daarvan: bij goede afbreekbaarheid komt er meer terecht in de voorraad goed afbreekbaar plantmateriaal bij slechtere afbreekbaarheid meer in de voorraad minder goed afbreekbaar plantmateriaal. De C/N verhoudingen van de pools staan deels vast en worden deels bepaald door de C/N-verhouding van de bladval.

De bodem submodule van CENTURY omvat vier koolstofpools in de bodem: drie pools voor organische stof in de bodem (d.w.z. actieve, langzame en passieve pools), en een microbiële pool aan het oppervlak. Elke pool heeft een specifieke afbraaksnelheid. De afbraaksnelheid wordt verder beïnvloed door de bodemvochtigheid, de temperatuur en de textuur. Mineralisatie en immobilisatie van stikstof zijn sterk gekoppeld aan de afbraak van koolstof. De N-fluxen volgen daarom de C-fluxen, en zijn gelijk aan het product van de koolstofstroom en de N:C-ratio van de pool die de koolstof ontvangt. De N die gepaard gaat met koolstofverlies via respiratie wordt verondersteld gemineraliseerd te zijn en beschikbaar te komen voor planten. We maakten gebruik van de formulering en parameterwaarden van de dagelijkse versie van CENTURY, DAYCENT (Del Grosso *e.a.*, 2002), maar het effect van bodemvocht op N mineralisatie is aangepast. De oorspronkelijke maakt gebruik van een eenvoudige empirische formule om het effect van bodemvocht op de mineralisatie te bepalen, gebaseerd op de wekelijkse neerslag en de potentiële verdamping, zonder rekening te houden met het vochttransport in de bodem. Onze gewijzigde versie maakt gebruik van het dagelijkse vochtgehalte en de waterpotentiaal (die met SWAP worden gesimuleerd), waarbij de reductiefunctie op mineralisatie rekening houdt met de waterretentie-eigenschappen van de bodem, wat ontbreekt in de oorspronkelijke CENTURY formulering. Zie Fujita *e.a.* (2013b) voor meer details over de modelformulering.

IV.II CONSISTENTE MODELINVOER OP BASIS VAN BOFEK2012 SCHEMATISATIE

Hoewel het CENTURY-model en VSD+ veel vergelijkbare processen en parameters omvatten, gebruiken de modellen momenteel nog verschillende waarden voor de invoerparameters. De meeste locatie-specifieke parameters zijn voor CENTURY gedefinieerd op basis van de zoge-

naamde PAWN-schematisatie met 23 bodemfysische eenheden. CENTURY en VSD+ gebruikten eigen opzoektabelen om de invoerwaarden af te leiden van de betreffende bodemfysische PAWN eenheid.

Voor de nieuwe versie van WWN (WWN-3) worden zoveel mogelijk gemeenschappelijke invoerwaarden voor CENTURY en VSD+ gebruikt. De basiseenheid van de bodem wordt de BOFEK2012 schematisatie (Wösten *e.a.*, 2013a), waarin 72 bodemfysische eenheden worden onderscheiden. Voor elke van 72 bodemfysische eenheden werden in de vorige WWN-versies de waterretentie-eigenschappen en bodemtextuur reeds uit de Staringreeks afgeleid (Wösten *e.a.*, 2013a). Echter, het organische stofgehalte en het N-gehalte in de bodem, die tot de belangrijkste invoerwaarden voor de N-mineralisatie behoren, zijn niet in de Staringreeks beschikbaar. Daarom hebben wij gepubliceerde gegevens van (semi-)natuurlijke vegetatie en (voormalige) landbouwlocaties gebruikt om het C- en N-gehalte van de bodem per BOFEK2012-eenheid te schatten. Van 659 bodemgegevens, verzameld van verschillende databronnen (Fujita et al. 2013b, Olde Venterink et al. 2002, Ordonez et al. 2010, Mantor & Kemmers 1987, Herwaarden 1990, Ertsen 1998, Van Delft 2001, Beets et al. 2000), zijn bodem C (%), bodem N (%), en bodem P (%) van de toplaag en bijbehorende bodemcode van de 1:50.000 bodemkaart toegekend, die vervolgens is omgezet in een BOFEK2012 code. Omdat het aantal bodemmonsters niet groot genoeg is om voor alle BOFEK-codes afzonderlijk schattingen te maken, zijn de bodemparameters eerst samengevat op het niveau van de Staring-bouwsteen van de toplaag, en vervolgens toegewezen aan de overeenkomstige BOFEK-code. De koppeling tussen BOFEK-code en de typische bouwsteen van toplaag is gemaakt volgens Bijlage 4 van Wösten *e.a.* (2013a). De mediaanwaarden van de bodem C, N, en P per bouwsteen werden vervolgens toegewezen aan elke corresponderende BOFEK-code.

De modellen CENTURY en VSD+ gebruikten in vorige WWN-versies ieder een andere parameterisatie van de gehalten C, N en P in de bodem. Voor beide modellen zijn deze gehalten in de nieuwe WWN-versie (WWN-3) per bodemfysische eenheid uit de BOFEK2012 gedefinieerd (zie onderstaande tabel). Deze zijn gebaseerd op de Staring-bouwsteen van de toplaag van de betreffende bodemfysische eenheid.

Voor toepassing binnen de WWN is de laagdikte van de modellen CENTURY en VSD+ geharmoniseerd. Beide modellen rekenen voor de toplaag 0-15 cm, welke als een homogeen compartiment wordt verondersteld (zie ook paragraaf 2.4.2).

TABEL 10.1

BODEMCHEMISCHE PARAMETERS PER PAWN BODEMFYSISCHE EENHEDEN, GEBRUIKT VOOR DE HUIDIGE VERSIE VAN CENTURY IN WVN-2

PAWN bodemfysische eenheden	bouwsteen toplaag	Bodem C (%)	Bodem N:C (ratio)	Bodem P:C (ratio)
1	B18	29.00	0.072	0.009
2	B16	19.80	0.063	0.009
3	B11	21.29	0.077	0.009
4	B11	21.29	0.077	0.009
5	B2	3.85	0.061	0.012
6	B18	29.00	0.072	0.009
7	O1	4.32	0.058	0.009
8	B1	4.34	0.050	0.008
9	B2	3.85	0.061	0.012
10	B2	3.85	0.061	0.012
11	B3	7.61	0.056	0.009
12	B2	3.85	0.061	0.012
13	B3	7.61	0.056	0.009
14	B1	4.34	0.050	0.008
15	B8	10.21	0.082	0.014
16	B10	5.61	0.085	0.015
17	B12	13.96	0.082	0.010
18	B12	13.96	0.082	0.010
19	B8	10.21	0.082	0.014
20	B8	10.21	0.082	0.014
21	O15	6.86	0.107	0.012
22	-	-	-	-
23	-	-	-	-

TABEL 10.2 BODEM C, N, EN P GEHALTE VAN TOPLAAG PER BOFEK2012 BODEMFYSISCHE EENHEDEN, GEBRUIKT VOOR CENTURY EN VSD+ IN WVN-3

BOFEK2012	Bouwsteen toplaag	Mediaan waarde (%)			BOFEK2012	Bouwsteen toplaag	Mediaan waarde (%)		
		Bodem C	Bodem N	Bodem P			Bodem C	Bodem N	Bodem P
101	B17	18.1	1.5	0.17	321	B9	5.1	0.4	0.06
102	B17	18.1	1.5	0.17	322	B5	3.1	0.1	0.02
103	B16	28.5	1.3	0.15	323	B2	3.1	0.2	0.03
104	B16	28.5	1.3	0.15	324	B1	1.8	0.1	0.01
105	B17	18.1	1.5	0.17	325	B8	8.9	0.5	0.10
106	B4	4.0	0.2	0.03	326	O5	0.2	0.0	0.02
107	B18	34.8	1.5	0.11	327	B1	1.8	0.1	0.01
108	B16	28.5	1.3	0.15	401	B10	6.3	0.6	0.07
109	B15	15.8	0.9	0.13	402	O9	1.5	0.6	0.07
110	B15	15.8	0.9	0.13	403	B9	5.1	0.4	0.06
201	B17	18.1	1.5	0.17	404	B12	9.1	0.8	0.14
202	B9	5.1	0.4	0.06	405	B11	10.3	0.8	0.08
203	B15	15.8	0.9	0.13	406	B8	8.9	0.5	0.10
204	B15	15.8	0.9	0.13	407	B9	5.1	0.4	0.06
205	B2	3.1	0.2	0.03	408	B8	8.9	0.5	0.10
206	B2	3.1	0.2	0.03	409	B8	8.9	0.5	0.10
301	B1	1.8	0.1	0.01	410	B9	5.1	0.4	0.06
302	B1	1.8	0.1	0.01	411	B9	5.1	0.4	0.06
303	B9	5.1	0.4	0.06	412	B10	6.3	0.6	0.07
304	B2	3.1	0.2	0.03	413	B9	5.1	0.4	0.06
305	B2	3.1	0.2	0.03	414	B10	6.3	0.6	0.07
306	B2	3.1	0.2	0.03	415	B11	10.3	0.8	0.08
307	B8	8.9	0.5	0.10	416	B8	8.9	0.5	0.10
308	B8	8.9	0.5	0.10	417	B8	8.9	0.5	0.10
309	B2	3.1	0.2	0.03	418	B9	5.1	0.4	0.06
310	B2	3.1	0.2	0.03	419	B9	5.1	0.4	0.06
311	B2	3.1	0.2	0.03	420	B10	6.3	0.6	0.07
312	B3	4.9	0.2	0.05	421	B10	6.3	0.6	0.07
313	B3	4.9	0.2	0.05	422	B11	10.3	0.8	0.08
314	B3	4.9	0.2	0.05	501	B9	5.1	0.4	0.06
315	B3	4.9	0.2	0.05	502	B6	3.4	0.4	0.07
316	B8	8.9	0.5	0.10	503	B11	10.3	0.8	0.08
317	B3	4.9	0.2	0.05	504	B13	7.4	0.5	0.05
318	B3	4.9	0.2	0.05	505	B13	7.4	0.5	0.05
319	B3	4.9	0.2	0.05	506	B13	7.4	0.5	0.05
320	B5	3.1	0.1	0.02	507	B14	6.0	0.6	0.06

IV.III VALIDATIE VAN N MINERALISATIE MET CENTURY EN VSD+

De N-mineralisatie van de huidige WVN wordt berekend met het model CENTURY, maar VSD+ (dat wordt gebruikt voor de simulatie van de pH van de bodem) simuleert ook de N-mineralisatie. Om de aannemelijkheid van de gesimuleerde N-mineralisatie door de twee modellen te vergelijken, is de gesimuleerde N-mineralisatie gevalideerd met veldmetingen op 36 locaties in Nederland. Het vegetatietype van de locaties betreft (semi-)natuurlijke korte vegetaties en heide. Bodemonsters van 15 cm diepte zijn gedurende 6 weken in-situ geïncubeerd (in een PVC-buis, gesloten met dop aan onder- en bovenkant). Zie Fujita *e.a.* (2013b) voor gedetailleerde informatie over de metingen. De bodemtemperatuur fluctueerde met de omgevingstemperatuur, terwijl de bodemvochtigheid constant bleef gedurende de 6 weken. De gemeten N-mineralisatie van de in-situ incubatie is vervolgens zowel CENTURY als VSD+ gesimuleerd, om te bepalen in welke mate de modellen de N-mineralisatie kunnen reproduceren.

VSD+ is toegepast op de bovengenoemde 36 locaties met korte vegetaties in Nederland. Voor elke locatie zijn zoveel mogelijk lokale meetgegevens gebruikt als invoer voor VSD+: voorraad

organisch stof, kleigehalte, bulkdichtheid, bodemvoorraden aan C en N, bodem pH (terugerekend uit de gemeten pH (pH-KCl)), gemeten C- en N-gehalte in de bovengrondse biomassa van de vegetatie op de locatie, gemeten temperatuur, vochtgehaltes en bodemfysische karakteristieken. Voor de locaties met gras als vegetatie is er vanuit gegaan dat alle boven- en ondergrondse biomassa als bladval in de bodem komt. Voor de twee heidelocaties is een vaste bladval van 300 g C/m² aangenomen en een C/N verhouding van 15.

Vervolgens is een berekening gemaakt voor de periode 1990-2000 en is de berekende mineralisatie in 2000 vergeleken met de door CENTURY berekende mineralisatie en de gemeten mineralisatie in mei – juli 2011. De reductiefunctie voor mineralisatie is berekend m.b.v. de gemeten bodem temperatuur en het gemeten vochtgehalte; de afhankelijkheid van pH is in deze simulatie uitgeschakeld om een beter vergelijking met CENTURY, dat geen pH-afhankelijkheid bevat, te kunnen maken.

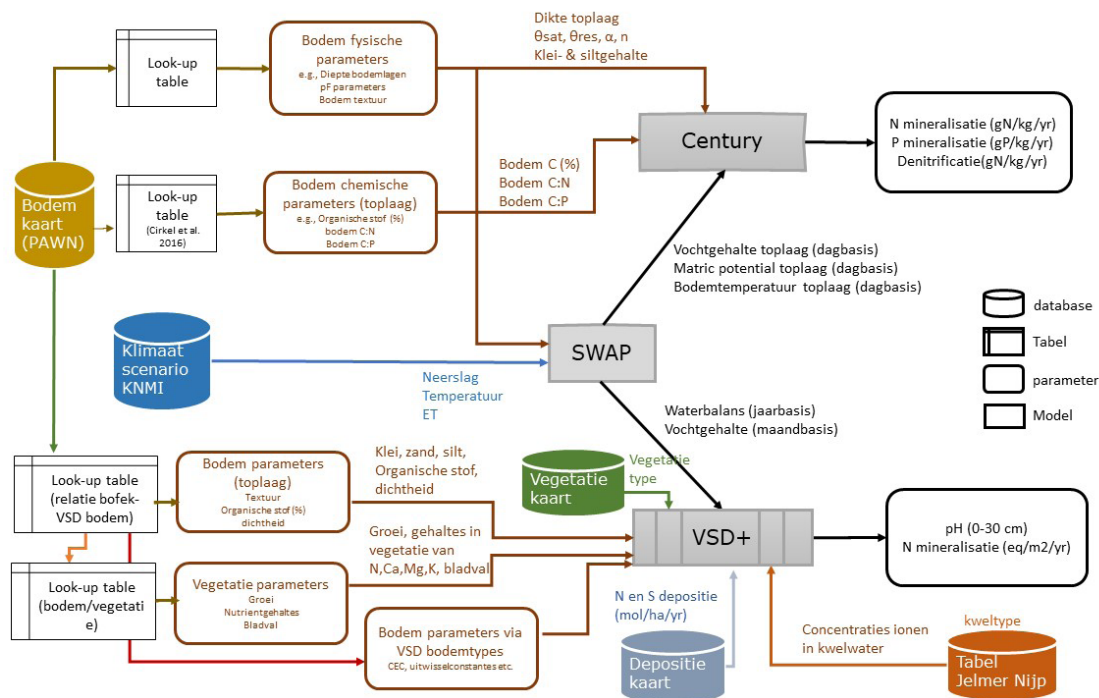
CENTURY simuleert de dynamiek van organische stof in de bodem zonder invloed van de strooiselininput van de vegetatie. De N-mineralisatie werd alleen gedurende 6 weken gesimuleerd, met de gemeten bodemvochtigheid en temperatuur. De gebruikte invoerwaarden zijn: bodem totaal N, bodem totaal C, bodemtextuur, dagelijkse luchttemperatuur, bodemvocht (constant), en waterretentie parameters.

IV.IV RESULTATEN

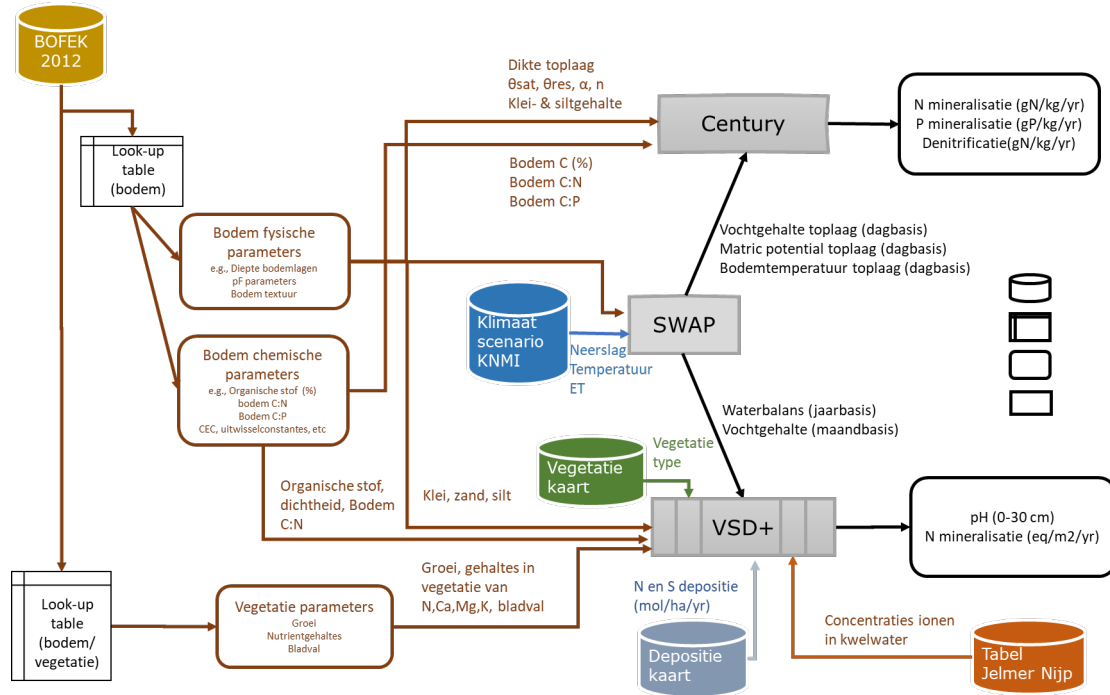
VERBETERING MODELAFSTEMMING SWAP – VSD+ – CENTURY

De relaties tussen SWAP – VSD+ – CENTURY in de vorige versie van de WWN (versie 2.3) is weergegeven in Figuur 10.11. Figuur 2 geeft deze relatie na de harmonisatie van SWAP – VSD+ – CENTURY, (WWN-3).

FIGUUR 10.11 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HUIDIGE KOPPELINGEN TUSSEN SWAP, CENTURY, EN VSD+ MODEL

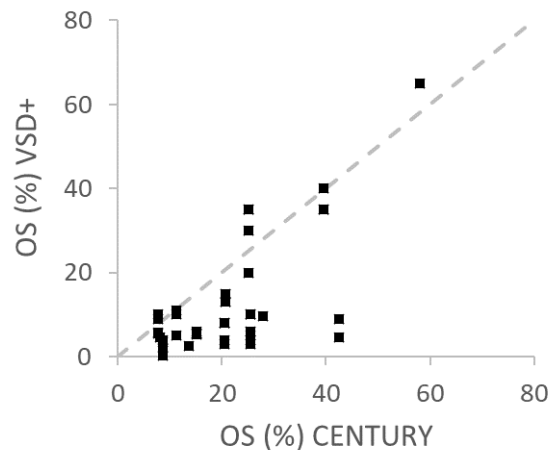


FIGUUR 10.12 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN NIEUWE KOPPELINGEN TUSSEN SWAP, CENTURY, EN VSD+ MODEL IN WWN-3?



Het organische stofgehalte van VSD+ en organische C van CENTURY dat in de vorige versie (WWN2-3) worden gebruikt zijn vergeleken op het niveau van BOFEK2012 bodemfysische eenheden. Organische C van CENTURY werd vermenigvuldigd met 2 om om te rekenen naar organische stofgehalte. Ze zijn grotendeels vergelijkbaar voor zand- en veengronden. Het verschil tussen de twee modellen is echter vrij groot voor sommige bodemtypes, zoals kalkloze kleigronden. Dit komt door het relatief geringe aantal brongegevens en/of grote variatie voor dit bodemtype bij het schatten van de C waarde voor CENTURY. Bovendien is CENTURY gebaseerd op natuurbodems en VSD+ op alle bodems, waardoor de organisch stofgehalten in de CENTURY parameterisatie systematisch hoger zijn. Daarom worden in volgende versie van WWN (WWN-3) nieuwe invoerwaarden gebruikt die voor beide modellen consistent zijn. De nieuw geschatte waarden van bodem C, N, en P voor elke BOFEK2012 bodemfysische eenheid zijn weergegeven in Bijlage IV.I.

FIGUUR 10.13 VERGELIJKING TUSSEN DE INVOERWAARDEN VAN HET BODEM ORGANISCHE STOFGEHALTE VAN TOPLAAG, GEBRUIKT VOOR DE HUIDIGE VERSIE VAN HET CENTURY-MODEL (X-AS) EN VSD+ MODEL (Y-AS), GEAGGREGIEERD VOOR BOFEK2012 BODEMFYSISCH EENHEDEN



STIKSTOF MINERALISATIE BEREKEND MET VSD+ EN CENTURY

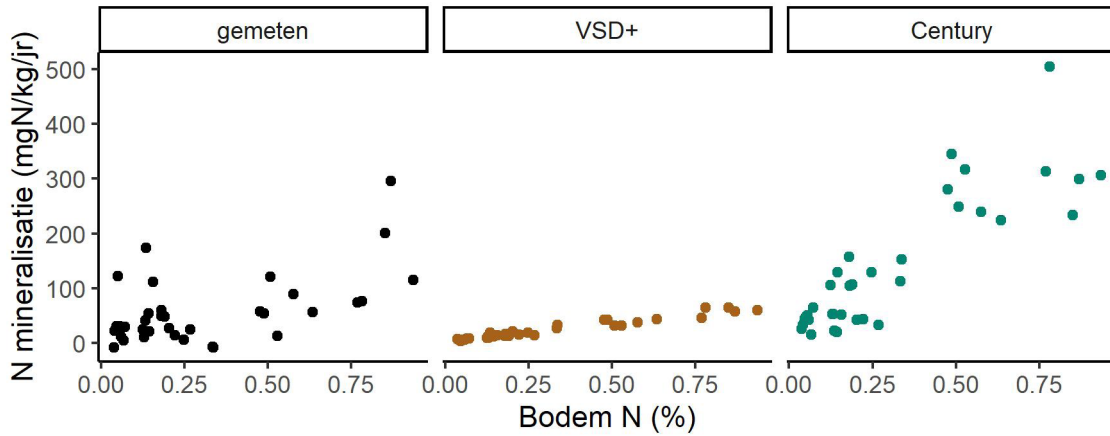
Zoals te verwachten is er een positief verband tussen de voorraad N in de bodem en de gemeten N mineralisatie: hoe hoger de voorraad, hoe hoger de mineralisatie (Figuur 10.14 links). Er zijn echter aanzienlijke variaties in de relatie omdat veel andere factoren ook van invloed zijn op de N-mineralisatie. De gesimuleerde N mineralisatie met VSD+ en CENTURY model zijn ook sterk gerelateerd aan het bodemtotaal N (Figuur 10.14 midden en rechts). De gesimuleerde N mineralisatie wordt in het algemeen onderschat door VSD+ (mediaan 15 mgN/kg/jaar) en overschat door CENTURY (mediaan 105 mgN/kg/jaar) in vergelijking tot de gemeten N-mineralisatie (mediaan 36 mgN/kg/jaar). Hoewel de modellen de absolute niveaus van N-mineralisatie niet nauwkeurig konden voorspellen, konden de modellen het verschil in N-mineralisatie tussen de locaties redelijk goed weergeven: de Spearman rangcorrelatie-coëfficiënt tussen gemeten en gesimuleerde N-mineralisatie was 0,44 ($P < 0,01$) voor VSD+ en 0,37 ($P < 0,05$) voor CENTURY (Figuur 10.15). De genormaliseerd kwadratische gemiddelde fout (nRMSE), een mate van model efficiëntie die voorspelingsfout kan kwantificeren als een percentage van de bereik van metingen, zijn matig voor beide modellen: 23% voor VSD+ en 30% voor Century.

Het blijkt dat beide modellen een grotere afwijking van gemeten waardes hebben in natte bodems (Figuur 10.16 links). CENTURY maakt vooral een grote overschatting voor natte bodems, ondanks het feit dat CENTURY een sterk zuurstof stress op mineralisatie gebruikt, terwijl VSD+ geen zuurstof stress effect gebruikt. Aangezien sommige bodemmonsters zeer nat waren, is het mogelijk dat de gemeten N-mineralisatie was onderschat als gevolg van N-verlies door denitrificatie tijdens de incubatieperiode. Daarom hebben we de gemeten N-mineralisatie gecorrigeerd voor (gesimuleerde) denitrificatie. Na deze correctie wordt de correlatie tussen gemeten en gesimuleerde N mineralisatie aanzienlijk verbeterd, vooral voor Century: nRMSE wordt 21% voor VSD+ en 19% voor Century (Figuur 10.17).

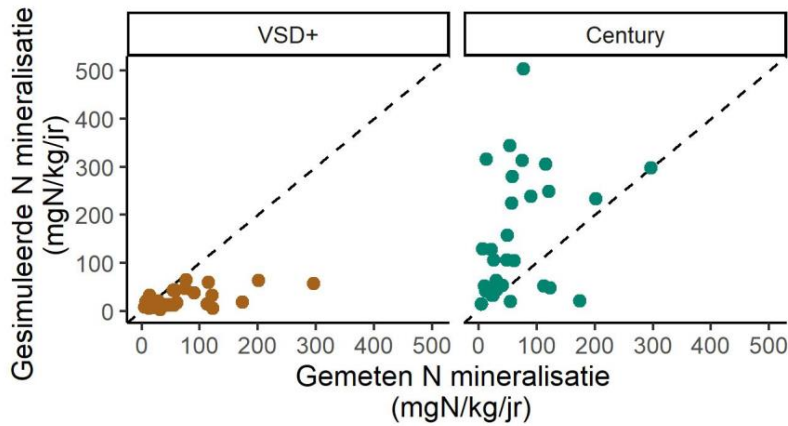
Een lage pH kan een remmend effect hebben op N-mineralisatie (Witte *e.a.*, 2020a). Dit pH-effect op N-mineralisatie kan als optie worden opgenomen in VSD+ en CENTURY. De trend die is waargenomen bij de 36 validatiepunten laat echter zien dat de modellen de N-mineralisatie overschatten bij hoge pH (Figuur 10.16 rechts), hetgeen tegengesteld is aan wat de modellen veronderstellen. Op basis van deze validatiedataset kan worden geconcludeerd dat het opnemen van het pH-effect de modelvoorspelling niet verbetert. In de WWN-3 wordt daarom geen rekening gehouden met gereduceerde N-mineralisatie bij lage pH.

Opvallend is dat slechts minder dan de helft van de variatie in gemeten N-mineralisatie in verband kon worden gebracht met de factoren die expliciet in de modellen kunnen worden opgenomen (bodem N voorraad, bodemvocht, bodemtextuur en pH): slecht 44% van de variatie kon worden verklaard door een multivariate lineair regressiemodel met deze factoren. Zelfs als we andere potentiële factoren meerekenen die theoretisch van invloed zijn op de N-mineralisatie (b.v. microbiële biomassa, bodem-C:N- en C:P-verhouding), blijft een groot deel van de variatie onverklaard (resultaten niet weergegeven). Dit wijst op complexe processen die de N-mineralisatie beïnvloeden, en op de moeilijkheden om de N-mineralisatie te valideren met veldgegevens wegens mogelijke meetfouten. Rekening houdend met deze grote onzekerheid, kunnen beide modellen de N-mineralisatie redelijk voorspellen, zowel in absolute termen als wat de verschillen tussen de locaties betreft.

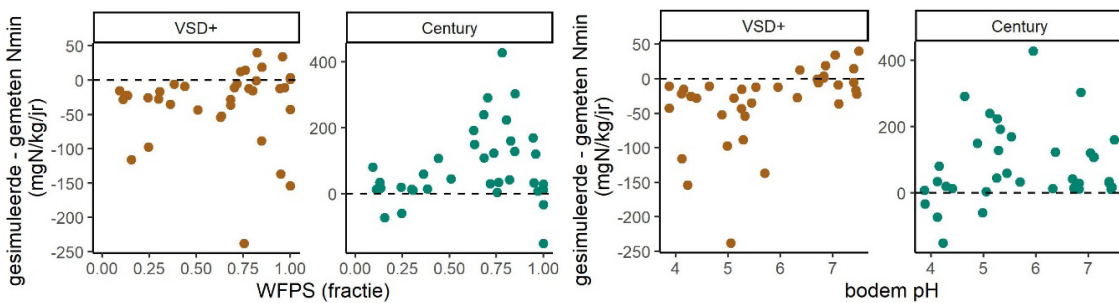
FIGUUR 10.14 GEMETEN EN GESIMULEERDE N MINERALISATIE IN VERHOUDING TOT BODEM VOORRAAD N. DE N MINERALISATIE ZIJN GESIMULEERD MET HET VSD+ EN CENTURY MODEL, MET DEZELFDE INVOERWAARDES VAN BODEM PARAMETERS EN KLIMAAT



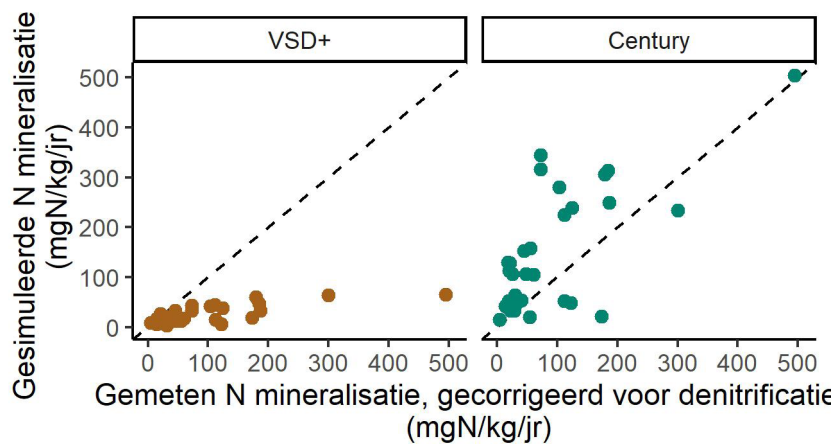
FIGUUR 10.15 GEMETEN VERSUS GESIMULEERDE N-MINERALISATIE MET VSD+ (LINKS) EN CENTURY (RECHTS) MODEL. DE ONDERBROKEN LIJNEN ZIJN 1:1 LIJNEN



FIGUUR 10.16 RELATIE TUSSEN MODEL ERROR (GESIMULEERDE N MINERALISATIE MINUS GEMETEN N MINERALISATIE) EN WATER-FILLED PORE SPACE (LINKS) EN BODEM PH (RECHTS). EEN POSITIEVE WAARDE OP DE Y-AS BETEKEND DAT HET MODEL N MINERALISATIE OVERSCHAT. WATER-FILLED PORE SPACE WAS CONSTANT TIJDENS DE 6-WEKEN INCUBATIEPERIODE. DE BODEM pH WERD GEMETEN AAN HET BEGIN VAN DE INCUBATIE EXPERIMENT



FIGUUR 10.17 GEMETEN VERSUS GESIMULEERDE N-MINERALISATIE MET VSD+ (LINKS) EN CENTURY (RECHTS) MODEL. DE GEMETEN N MINERALISATIE IS GECORRIGEERD VOOR MOGELIJKE N VERLIEZEN DOOR DENITRIFICATIE. DENITRIFICATIE WAS GESIMULEERD MET HET DAYCENT MODEL. DE ONDERBROKEN LIJNEN ZIJN 1:1 LIJNEN



BIJLAGE V

GECOMBINEERD EFFECT VAN DROOGTE EN VERZURING OP STANDPLAATSCONDITIES

V.1 AANLEIDING

De WWN is er tot dusver gericht op het bepalen hoe klimaat en waterbeheer doorwerken op de potentiële vegetatie. Dat gebeurt aan de hand van simulaties over perioden van dertig jaar. Die dertig jaar komt voort uit de definitie van klimaat, dat de variatie in weersomstandigheden over een periode van dertig jaar samenvat. Vooral na de droge zomers van afgelopen jaren (2018 t/m 2020) is duidelijk geworden dat kennis ontbreekt over hoe extreme jaren doorwerken op bodemchemie, beschikbaarheid van voedingsstoffen en vochtvoorziening, en hoe dit in potentie zou kunnen doorwerken op de vegetatie.

Dit hoofdstuk heeft als doel om te verkennen in hoeverre de huidige WWN-3 kan worden gebruikt om inzicht in effecten van klimaatextremen op de natuur te verkrijgen. In een enquête gaven natuurbeheerders aan dat de droogte van 2018 vooral schadelijk was ten gevolge van de verzuring: verdroging en verzuring zouden een giftige mix vormen, fataal voor bijvoorbeeld inlandse eiken (Witte *e.a.*, 2020b). In dit hoofdstuk wordt daarom tevens verkend of de in de WWN gesimuleerde processen ook kunnen worden gebruikt voor het beoordelen van de gecombineerde gevolgen van droogte en bodemverzuring. Op basis van de uitkomsten van deze verkenning kan worden bepaald welke stappen nodig zijn om dit eventueel verder te operationaliseren in een volgende versie van de WWN.

V.II ACHTERGROND DROOGTE

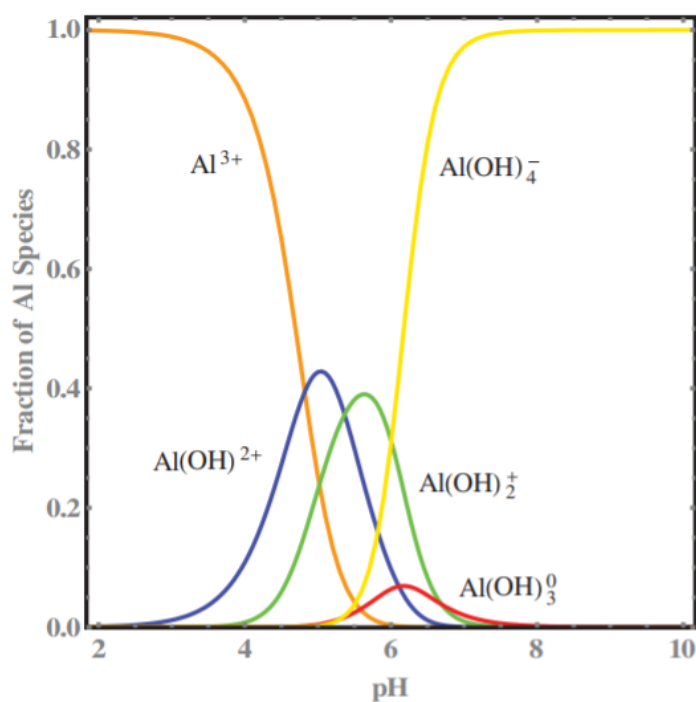
Een periode van meteorologische droogte (een periode zonder regen) kan leiden tot een gebrek aan water in de wortelzone van planten. Het directe effect van dat vochttekort is dat planten hun huidmondjes sluiten. Houdt de bodemvochtdroogte lang aan, dan kunnen planten hun bladeren verliezen, verwelken en uiteindelijk zelfs afsterven. Om te groeien (fotosynthese) hebben planten water nodig. Door huidmondjes te sluiten of bladeren te laten vallen, worden vochtverliezen tegengegaan. Als de huidmondjes dicht zijn, kunnen planten geen CO₂ opnemen, en deze omzetten in suikers en andere stoffen die nodig zijn voor de energievoorziening. Bij een te lang tekort aan energie zal een plant uiteindelijk dood gaan. Veelal zal droogte leiden tot verzwakking, en hoeft het niet de directe oorzaak te zijn van vegetatiemortaliteit.

In de WWN wordt vochttekort gekwantificeerd met behulp van transpiratiereductie van een referentiegewas, berekend op dagbasis over een periode van 30 jaar. Uit de dagelijkse transpiratiereductie wordt per jaar de maximale 10-daagse som berekend. Deze wordt vervolgens gemiddeld over een periode van 30 jaar, en levert de maat *transpiratiestress* op. Met deze procedure wordt per jaar de periode geselecteerd waarin de hoogste droogtestress optreedt (Bartholomeus & Witte, 2013).

Biotische indirecte effecten van droogte, zoals toegenomen vatbaarheid voor ziekten, plagen (letterzetter) en natuurbranden, worden in de WWN niet expliciet meegenomen. In plaats daarvan wordt druk van biotische factoren tijdens droogte impliciet meegenomen in de relatie tussen transpiratiestress en kansrijkdom van vegetatie over de lange termijn.

Abiotische indirecte effecten van droogte komen tot uiting in de bodemchemie. Door droogte en toegenomen bodemtemperatuur neemt de mineralisatie toe, waarbij nutriënten en zuur vrijkomen. Indien de buffercapaciteit van de bodem te klein is om dit vrijgekomen zuur te bufferen, stijgt de zuurgraad (i.e. daalt de pH). Bij een pH lager dan ongeveer 4,5 lossen Aluminium(hydr)oxiden op, en gaat Aluminium in oplossing als Al^{3+} (Figuur 10.18). Aluminium is bij concentraties vanaf ca. 0.2 mol_c per m³ bodemvocht toxisch voor planten. Plantenwortels groeien langzamer of sterven af, waardoor minder water en voedingsstoffen kunnen worden opgenomen. Daarnaast interfereert Al^{3+} met de celdeling (Rout *e.a.*, 2001).

FIGUUR 10.18 CONCENTRATIES VAN VERSCHILLENDE ALUMINIUM SOORTEN ALS FUNCTIE VAN ZUURGRAAD. OVERGENOMEN UIT: (NGUYEN & LEE, 2019)



Op sommige plekken in ons landschap is die buffercapaciteit laag door lage verwerkingssnelheden van basische kationen (calcium, magnesium en kalium) en uitloging. De zandgronden op de Veluwe zijn bijvoorbeeld al vele millennia blootgesteld aan natuurlijke verzuring door regen, wortelactiviteit en de afbraak van organische stof. Bufferende stoffen zoals Calcium, Magnesium en Kalium zijn op die plekken uitgespoeld en minder voorradig in de bodem en worden maar beperkt aangevuld door de lage verwerkingssnelheid in deze arme gronden. Het natuurlijke verzuringsproces en uitspoeling van bufferende kationen is aanzienlijk versneld door langdurige belasting met verzurende depositie van industrie, verkeer en landbouw.

HYPOTHESEN

Op basis van bovenstaande hypothetiseren wij dat

- Tijdens droogte op locaties met hoge zuurdepositie hogere aluminiumconcentraties aangetroffen worden dan op locaties met lagere depositie.
- Door aluminiumtoxiciteit tijdens droogte de kans op toegenomen mortaliteit en afgenomen vitaliteit groter is op locaties met hoge depositie.

Om deze hypothese te toetsen wordt de nieuwe WWN-3 ingezet.

V.III AANPAK

ALGEMEEN

De WWN-3 is toegepast om het gecombineerde effect van extreme droogte en langdurige verzuring door depositie op standplaatscondities te bepalen. Met de WWN-3 zijn transpiratiestress TS , het cumulatieve transpiratietekort TS_{CUM} , jaargemiddelde pH en Aluminiumconcentratie Al berekend voor het jaar 2018. 2018 is een jaar met extreme droogte in de zomerperiode. Om te bepalen of waargenomen bossterfte te relateren is aan de gesimuleerde standplaatscondities, zijn de WWN resultaten vergeleken met observaties uit de nationale bosinventarisatie (NBI).

AFBAKENING

Gezien de focus op het gecombineerde effect van verzuring en droogte-effecten op bossen op hoge zandgronden, en omdat het doel is te illustreren in hoeverre de WWN in huidige vorm geschikt is voor effectbepaling van extremen, richt deze analyse zich op bossen op grondwateronafhankelijke landschapsposities. Op basis van de grondwatertrappenkaart (Van der Sluijs, 1990) zijn gebieden geselecteerd waar de grondwatertrap hoger is dan VI (GHG dieper dan 80 cm-mv en GLG dieper dan 120 cm - mv). Alleen bossen die in natuurgebied liggen zijn meegenomen in de analyse.

AFLEIDEN VAN STANDPLAATSCONDITIONS IN 2018 MET WWN-3

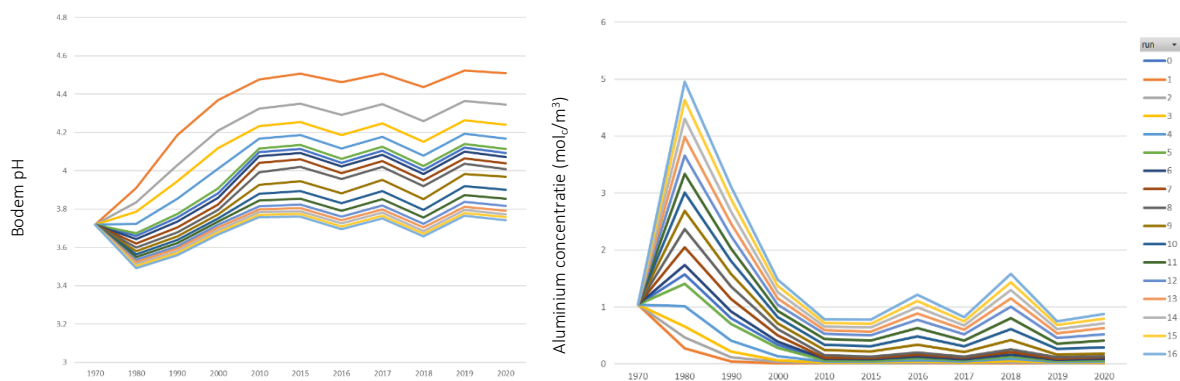
Voor het bepalen van de transpiratiestress in 2018 is dezelfde procedure gehanteerd als voor de WWN (Witte *e.a.*, 2018a), met het enige verschil dat deze waarde gebaseerd is op één jaar en niet op dertig jaar. Gezien de selectie op grondwateronafhankelijke bossen was het echter niet nodig om metarelaties af te leiden. Er is immers sprake van een hangwaterprofiel, waardoor kan worden volstaan met simulaties met diepe grondwaterstanden. Per BOFEK-eenheid is de transpiratiestress TS , de zuurstofstress RS en het cumulatieve transpiratietekort voor een grondwaterstand van 2.5 m-mv bepaald. Deze zijn berekend voor het jaar 2018 op basis van weersgegevens van het KNMI station Twente, met een aanloopperiode vanaf 2010. Weerstation Twente is geselecteerd omdat deze representatief is voor het klimaatdistrict (Witte *e.a.*, 2018a) waar grondwateronafhankelijke milieus voorkomen. Gezien er op deze plekken geen kwel optreedt, hoeft geen rekening te worden gehouden met kwelklassen.

Vervolgens is de hydrologische modeluitvoer gebruikt als invoer voor het model VSD+ om te bepalen hoe droogte doorwerkt op zuurgraad en Al^{3+} concentratie ($[Al]$). In VSD+ is eerst het historisch verloop van zuurdepositie bepaald, om te komen tot een realistische basenverzadiging. Voor elke BOFEK eenheid is daartoe voor de periode van 1880 tot 1970 de gemiddelde depositie voor die BOFEK-eenheid gebruikt. Na 1970 zijn scenario's doorgerekend in stapjes van lage tot hoge depositie, analoog zoals de procedure van WWN-3. Per BOFEK-eenheid is zo per depositieniveau een pH en $[Al]$ berekend voor alle jaren na 1970. Vanaf 1970 gaan de

gesimuleerde pH en [Al] daarom uiteenlopen, afhankelijk van het depositieniveau, tot er na ca. 30 jaar (het jaar 2000) een nieuw dynamisch evenwicht is bereikt dat hoort bij het depositieniveau (Figuur 10.19). Uit de tijdreeksen komt een stijging van de zuurgraad (daling van pH) en stijging van [Al] naar voren als gevolg van de droogte in 2018 (Figuur 10.19). Voor zand is [Al] in 2018 ongeveer 2 keer zo hoog als in 2017 en 30% hoger dan in 2016. Gezien de droogte logischerwijs tot uiting komt in het zomerseizoen (april – sept), is eerst gepoogd om [Al] in de zomer te berekenen. Aangezien VSD+ op jaarbasis rekt, kon dit alleen door het toepassen van een omrekenprocedure op basis van het maandelijks neerslagoverschot. Dit leverde geen meerwaarde ten opzichte van de jaargemiddelde concentratie, waardoor deze laatste gehandhaafd is. VSD+ houdt rekening met effecten van begroeiing op pH en [Al]. Omdat (1) in 95% van de gevallen het effect van vegetatie op pH kleiner was dan 0.08 pH-eenheden en (2) vegetatie een extra complicerende factor is in de interpretatie van de simulaties, is in deze analyse uitgegaan van loofbos als begroeiing.

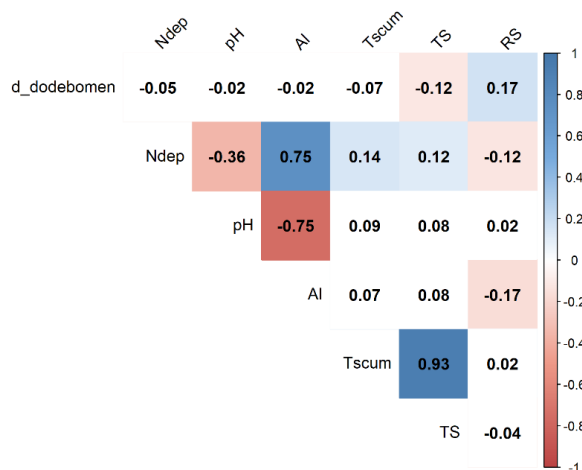
Vervolgens zijn de pH en [Al] ruimtelijk als functie van BOFEK-eenheid en depositie bepaald. Dit is gedaan middels lineaire interpolatie van stikstofdepositie per BOFEK-eenheid.

FIGUUR 10.19 GESIMULEERDE ZUURGRAAD IN DE WORTELZONE (LINKS) EN ALUMINIUM CONCENTRATIE (RECHTS) DOOR DE TIJD MET VSD+ VOOR ZAND (BOFEK 301; LEEMARME PODZOL). DE VERSCHILLENDE KLEUREN GEVEN VERSCHILLENDE DEPOSITIENIVEAUS WEER. ZOWEL BODEM-PH ALS ALUMINIUM CONCENTRATIE ZIJN GEMIDDELTE JAARLIJKSE WAARDEN



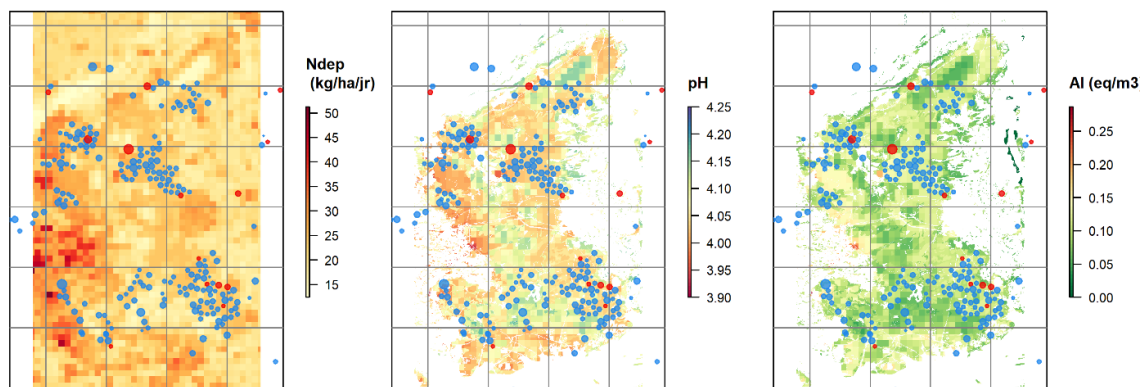
Zoals verwacht neemt de met WWN-3 gesimuleerde pH af met toenemende N-depositie (negatieve correlatie), en neemt de Al concentratie daarmee toe (Figuur 4.5). Verder is er vanzelfsprekend een zeer sterk verband tussen cumulatieve transpiratiestress en maximale transpiratiestress TS gedurende 10 dagen. Wegens deze collineariteit wordt daarom in de volgende analyses alleen gebruik gemaakt van TS. Opmerkelijk is dat de toename van het aantal dode bomen toeneemt met respiratiestress, maar afneemt met transpiratiestress. Dit betekent dus dat bomen op relatief vochtige standplaatsen (relatief: alle standplaatsen hadden een diepe grondwaterstand zodat verschillen in RS en TS alleen samenhangen met de bodemfysische eigenschappen, i.e. BOFEK-eenheid) meer te lijden hadden van de droogte, dan relatief droge standplaatsen. Hier wordt in sectie 4.1.6 nader op ingegaan.

FIGUUR 10.20 PEARSON CORRELATIES TUSSEN DE TOENAME VAN HET AANTAL DODE BOMEN EN MET WVN-3 GESIMULEERDE STANDPLAATSCONDITIES. DE WAARDEN EN KLEUREN GEVEN DE CORRELATIECOËFFICIËNT WEER. ALLEEN SIGNIFICANTE CORRELATIES ($P < 0.05$) HEBBEN EEN KLEUR



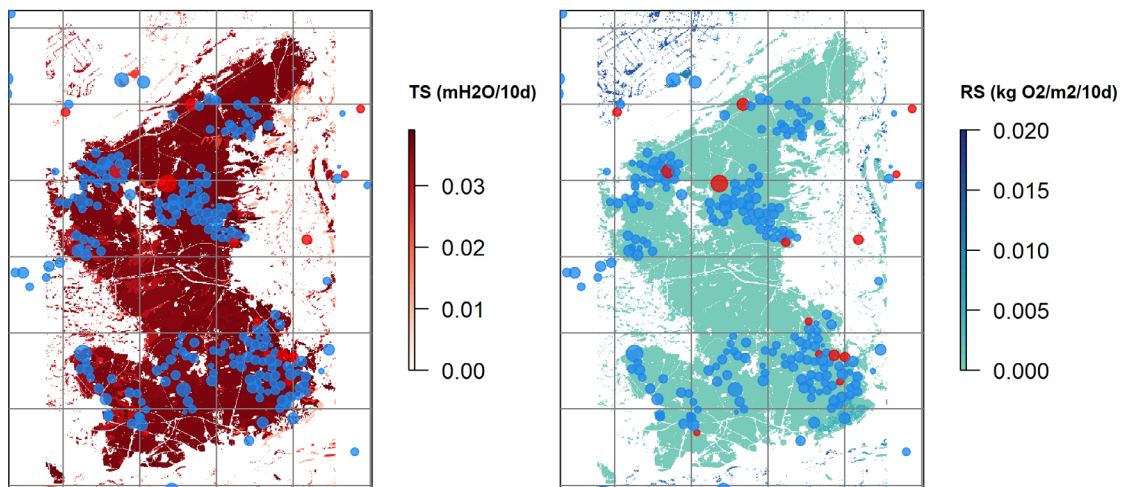
Om een beeld te krijgen van de ruimtelijke samenhang tussen stikstofdepositie, zuurgraad, en Aluminium concentratie, zijn als voorbeeld WVN-3 resultaten gepresenteerd voor alle grondwateronafhankelijke natuurgebieden in en om de Veluwe (Figuur 4.3). Het centrale deel van de Veluwe ligt verder van intensieve landbouw in bijvoorbeeld de Gelderse vallei, waardoor dit deel een lagere stikstofdepositie ontvangt. Dit is terug te zien in de zuurgraad en Aluminiumconcentratie. De gesimuleerde zuurgraad is iets hoger in deze centrale delen, en leidt tot een lagere gesimuleerde Aluminiumconcentratie.

FIGUUR 10.21 STIKSTOFDEPOSITIE (LINKS), GESIMULEERDE ZUURGRAAD (MIDDEN) EN GESIMULEERDE ALUMINIUMCONCENTRATIE (RECHTS) VOOR HET JAAR 2018. DE CIRKELS GEVEN DE LOCATIES VAN DE NEDERLANDSE BOSINVENTARISATIEPLOTS WEER. DE KLEUR VAN DE CIRKELS GEEFT WEER OF ER EEN DROOGTE-EFFECT IS WAARGENOMEN (ROOD = JA), DE GROOTTE IS GESCHAALD NAAR DE TOENAME VAN HET AANTAL DODE BOMEN TUSSEN 2012-2013 EN 2019-2020. ALLEEN GRONDWATERONAFHANKELIJKE GEBIEDEN ZIJN GEPRESENTEERD



Wat betreft vochtvoorziening is duidelijk dat er sprake was van een lagere vochtbeschikbaarheid in 2018 ten opzichte van normaal. Gemiddeld over de jaren 2010 t/m 2020 is het vochttekort om te kunnen transpireren (transpiratiestress) circa 0.006 m water in de droogste aaneengesloten periode van 10 dagen. Daar staat tegenover dat er nauwelijks een zuurstoftekort optrad op de Veluwe, terwijl dat wel het geval is voor de periode van 2010-2020. Voor die periode is het zuurstoftekort gemiddeld 0.013 kg $O_2/m^2/10d$. TS en RS zijn per bodemfysische eenheid berekend; binnen een bodemfysische eenheid is dus geen variatie, wat mede het homogene beeld van zowel TS als RS verklaart (Figuur 4.4).

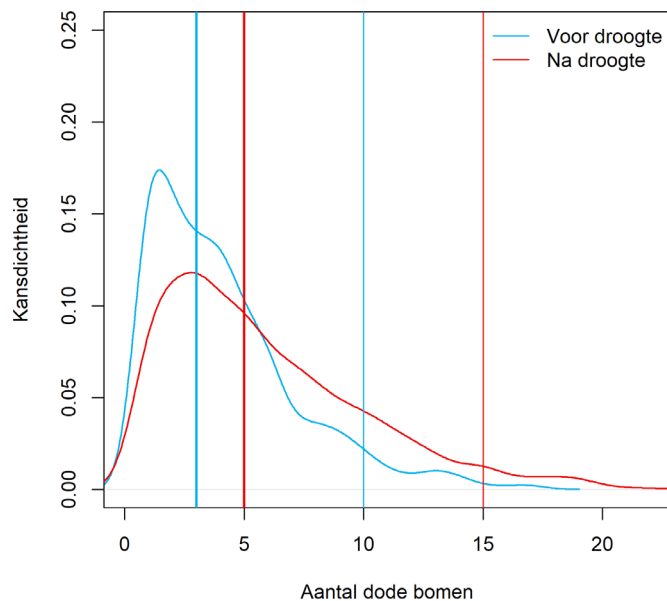
FIGUUR 10.22 GESIMULEERDE MAXIMALE TRANSPIRATIESTRESS (LINKS) EN RESPIRATIESTRESS (RECHTS) GEDURENDE EEN 10-DAAGSE PERIODE VOOR HET JAAR 2018. DE CIRKELS GEVEN DE LOCATIES VAN DE NEDERLANDSE BOSINVENTARISATIEPLOTS WEER. DE KLEUR VAN DE CIRKELS GEEFT WEER OF ER EEN DROOGTE-EFFECT IS WAARGENOMEN (ROOD = JA), DE GROOTTE IS GESCHAALD NAAR DE TOENAME VAN HET AANTAL DODE BOMEN TUSSEN 2012-2013 EN 2019-2020. ALLEEN GRONDWATERONAFHANKELIJKE GEBIEDEN ZIJN GEPRESENTEERD



BOSVITALITEIT

De vitaliteit van de Nederlandse bossen wordt periodiek geïnventariseerd en gebundeld in de Nationale Bosinventarisatie (NBI). In de meetgegevens wordt de dominante boomsoort, het aantal levende bomen, en het aantal dode bomen bijgehouden van een aantal vaste meetlocaties (plots met een straal van 20 m, ≈ 0.13 ha). Om het effect van droogte op bos te kwantificeren, hebben we het aantal dode bomen ná de droogte in 2018 vergeleken met het aantal dode bomen vóór de droogte. De droogte van 2018 vond midden in de laatste bosinventarisatie plaats (NBI7; 2017 – 2021). Een aantal observaties stammen dus uit de periode van vóór de droge periode. Om deze reden zijn alleen plots vanaf 2019 meegenomen. Hierbij dient te worden opgemerkt dat ook jaren 2019 en 2020 extreem droge jaren waren, en ook het aantal dode bomen zullen hebben beïnvloed. Met dit stapeffect van meerjarige droogte wordt in dit onderzoek verder geen rekening gehouden. Alleen plots waarbij zowel gegevens van de laatste als de voorlaatste (NBI6; 2012-2013) inventarisatie beschikbaar waren zijn meegenomen. Uit een eerste verkenning blijkt dat het aantal dode bomen na de droogte aanzienlijk gestegen is (Figuur 10.23). Gemiddeld genomen stijgt het aantal dode bomen van 3 naar 5 (stijging van 66%).

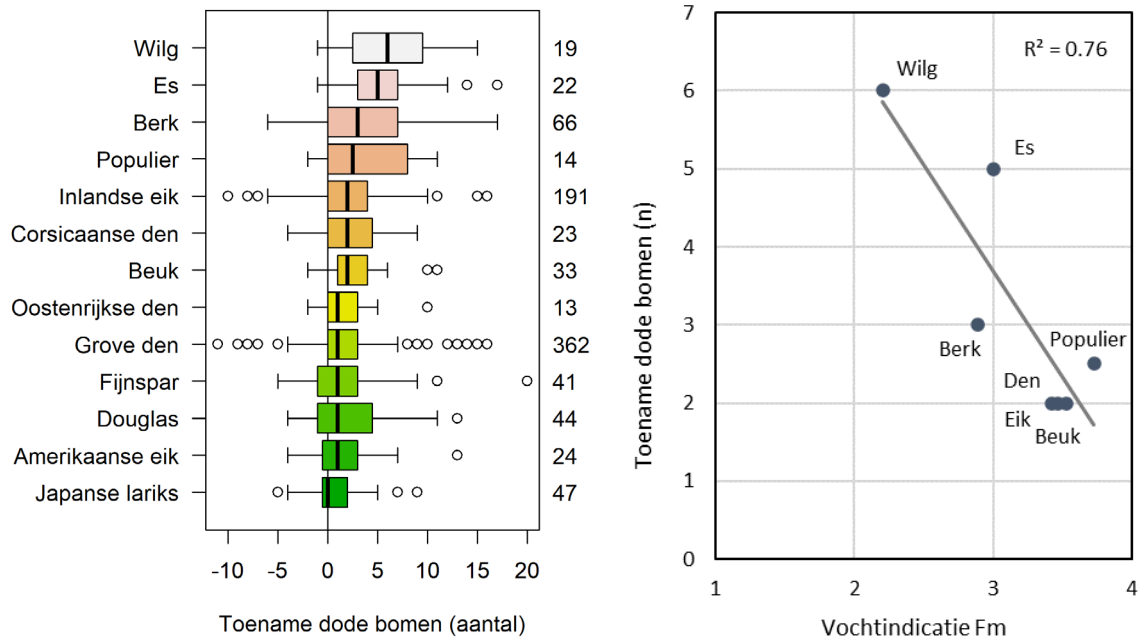
FIGUUR 10.23 VERDELING VAN HET AANTAL WAARGENOMEN DODE BOMEN PER PLOT (0.13 HA) VÓÓR EN NÁ DROOGTE VOOR ZOWEL GRONDWATERAFHANKELIJKE ALS ONAFHANKELIJKE NATUUR. DE PERIODE VOOR DROOGTE IS GEBASEERD OP DE NATIONALE BOSINVENTARISATIE 6 (2012-203), DE PERIODE NA DROOGTE IS GEBASEERD OP GEGEVENS VAN DE NATIONALE BOSINVENTARISATIE 7 (VANAF 2019 T/M EIND 2020). ALLEEN GEPAARDE WAARNEMINGEN ZIJN MEEGENOMEN (N = 1280). DE DIKKE VERTICALE LIJNEN GEVEN DE MEDIANEN WEER, DE DUNNE LIJNEN DE 95% PERCENTIELWAARDEN



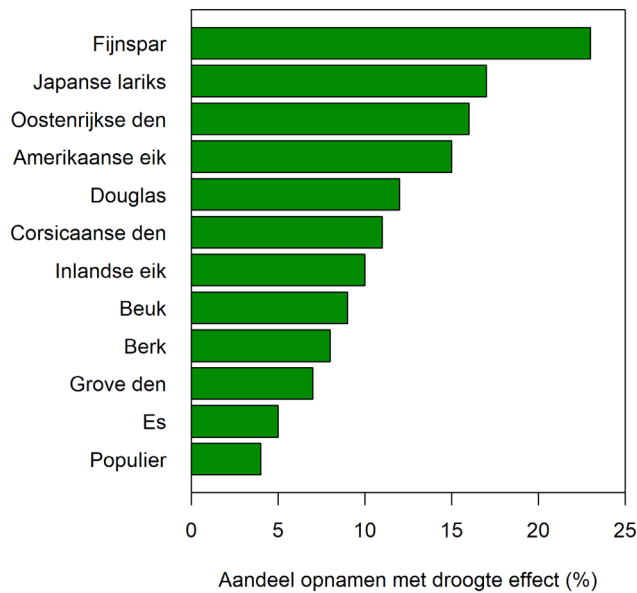
Uit de landelijke gegevens van de nationale bosinventarisatie blijkt dat het aantal dode bomen met name is toegenomen voor bossen waarbij de dominante boomsoort gebonden is aan natte standplaatscondities (Figuur 4.1). Zoals te zien is, doen zich ook situaties voor waarbij het aantal dode bomen is afgenomen. Overigens is de verandering in het aantal dode bomen niet noodzakelijkerwijs een (direct) gevolg van droogte. Ook andere (door droogte geïnitieerde) oorzaken, zoals essentaksterfte, storm, verandering in beheer, of zelfs vernatting, kunnen ten grondslag liggen aan deze verandering. Daarnaast kan niet uit de gegevens worden geëxtraheerd of de bomen die zijn gestorven behoren tot de dominante boomsoort van de betreffende plot, of dat het een andere soort betreft. Verder is het mogelijk dat door vernattingsmaatregelen op reeds natte standplaatsen de bossterfte is toegenomen. Duidelijke conclusies kunnen daardoor niet getrokken worden.

Aanvullend is in de NBI7 indicatief verandering in bosvitaliteit en een potentiële oorzaak daarvan genoteerd waaronder droogte (aanwezigheid natuurlijke verstoring droogte, gedefinieerd als 'meerdere afgestorven bomen na duidelijk aanwijsbare droogteperiode' (Daamen *e.a.*, 2019)). Daaruit komt een ander, tegengesteld, patroon naar voren (Figuur 4.2). Vooral in het geval de dominante boomsoort een naaldboom betreft, is een effect van droogte waargenomen. Zowel de verandering in het aantal dode bomen als de bosvitaliteit zijn gerelateerd aan standplaatscondities.

FIGUUR 10.24 BOXPLOTS VAN TOENAME VAN AANTAL DODE BOMEN PER PLOT (0.13 HA), PER BOOMSOORT (LINKS) EN DE RELATIE MET VOCHTINDICATIE (RECHTS). ALLEEN BOOMSOORTEN MET MEER DAN 10 OBSERVATIES IN DE NATIONALE BOSINVENTARISATIES 6 EN 7 ZIJN MEEGENOMEN IN DEZE ANALYSE. HET AANTAL OBSERVATIES IS WEERGEGEVEN IN DE GETALLEN RECHTS VAN HET LINKER FIGUUR. DE VOCHTINDICATIE GEEFT DE MEDIAAN RUNHAAR VOCHTINDICATIEWAARDE FM PER GENUS WEER. GEBASEERD OP ALLE PLOTS VAN DE NATIONALE BOSINVENTARISATIE (DUS OOK GRONDWATERAFHANKELIJKE LOCATIES)



FIGUUR 10.25 AANDEEL VAN ALLE NBI7 OPNAMEN WAAR EEN AFNAME VAN BOSVITALITEIT DOOR DROOGTE IS TOEGEKEND. HET AANDEEL IS BEREKEND OP BASIS VAN ALLE OPNAMEN IN NEDERLAND VANAF 2019 (DUS NIET ALLEEN DE HOGE ZANDGRONDEN)

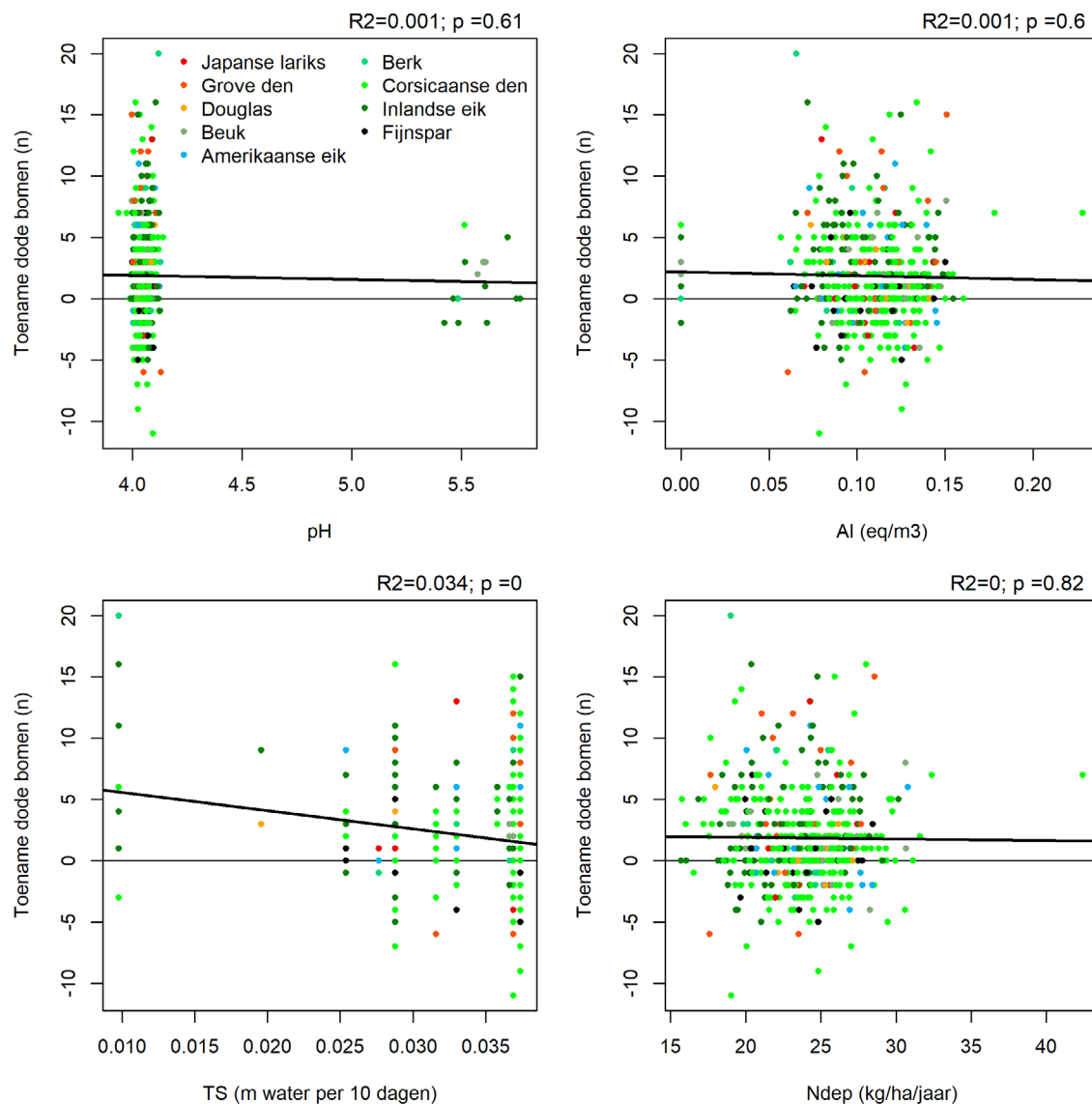


RESULTATEN: RELATIE TUSSEN STANDPLAATSCONDITIES TIJDENS DROOGTE EN TOENAME BOSSTERFTE

Nadat de standplaatscondities zijn afgeleid met behulp van de WWN, zijn deze gerelateerd aan de toename van het aantal dode bomen en de waargenomen effecten van droogte op bosvitaliteit. Met behulp van lineaire regressie is eerst voor alle soorten gezamenlijk de sterkte van de relatie bepaald (Figuur 10.26). Zo kan bepaald worden of er een generiek verband over alle soorten bestaat tussen abiotiek en de toename van het aantal dode bomen. De verandering van het aantal dode bomen is alleen significant gerelateerd aan transpiratiestress (dikke zwarte lijn

in *Figuur 10.26*). Weliswaar is dit verband negatief, wat aan zou geven dat een groter vochttekort tot minder dode bomen leidt. De verklaarde variantie is echter klein, en bij buiten beschouwing laten van de punten bij lage transpiratiestress ($TS < 0.015$ m H₂O/10 d) is het verband niet meer significant. Het gebrek aan verklaarde variantie (bijzonder lage R²) en significantie (hoge P-waarde) geeft aan dat er geen generiek soorten-overstijgend verband is. Daarnaast duidt de flinke variatie van het aantal dode bomen bij eenzelfde waarde van bijvoorbeeld zuurgraad of transpiratiestress op invloed van, of interacties met, andere variabelen.

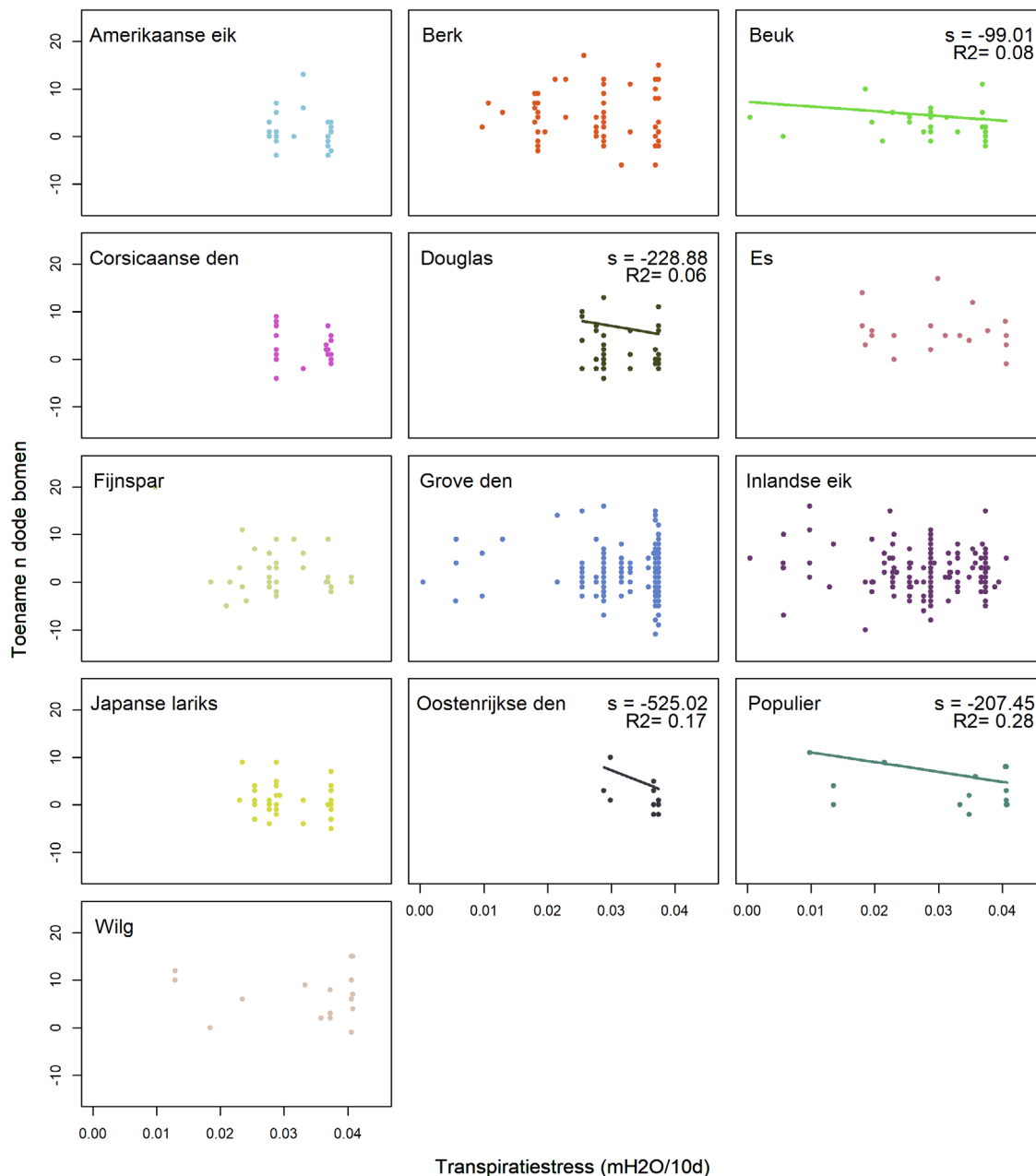
FIGUUR 10.26 RELATIES TUSSEN STANDPLAATSCONDIETIES EN TOENAME VAN HET AANTAL BOMEN (2019-2020 TOV 2012-2013) VOOR GRONDWATERONAFHANKELIJKE (GT ≥ VII) PLOTS IN NATUURGEBIEDEN IN DE NATIONALE BOSINVENTARISATIE. ALLEEN BOOMSORTEN WAARVAN DE DOMINANTE BOOMSOORT MEER DAN 10 KEER GEGISTREERD IS ZIJN MEEGEMOMEN



EFFECT TRANSPIRATIESTRESS OP AANTAL DODE BOMEN: UITSPLITTING PER SOORT

De uitkomst dat het aantal dode bomen toeneemt met afnemende transpiratiestress is tegen de verwachting in dat droogte tot een toename van bossterfte heeft geleid. Ook als we de gegevens uitsplitsen per soort, levert dit voor de meeste soorten hetzelfde beeld op: bij minder droogte is de toename van het aantal dode bomen groter (*Figuur 4.6*). Daarentegen is bij een aantal soorten wel flinke spreiding (fijnspar, grove den), die mogelijk verklaard kan worden door andere standplaatsfactoren zoals pH, Al, N-depositie. De volgende paragraaf gaat hier op in.

FIGUUR 10.27 RELATIE TUSSEN TRANSPIRATIESTRESS EN TOENAME AANTAL DODE BOMEN (NBI-7, 2019-2020), UITGESPLITST PER BOOMSORT. DE RESULTATEN HEBBEN BETREKKING OP GRONDWATERONAFHANKELIJKE ($GT \geq VII$) LOCATIES UIT DE NATIONALE BOSINVENTARISATIE IN NATUURGEBIEDEN. LINEAIRE REGRESSIELIJNEN ZIJN ALLEEN GETOOND INDIEN VOLDOENDE SIGNIFICANT ($P < 0.1$)



RESULTATEN: WELKE VARIABLEN VERKLAREN TOENAME BOSSTERFTE?

Om te bepalen welke standplaatsfactoren, en combinaties daarvan, de verandering in aantal dode bomen het best verklaren, is een regressieanalyse uitgevoerd per bostype (dominante boomsoort). Alleen tweede-orde interacties zijn hierin meegenomen. Met een stapsgewijze procedure zijn alleen (interacties tussen) variabelen meegenomen die leiden tot een significante verbetering van het regressiemodel volgens het AIC criterium (Akaike, 1973). pH en cumulatieve transpiratiestress zijn niet meegenomen als verklarende variabelen, gezien deze sterk gecorreleerd zijn met respectievelijk Aluminium en transpiratiestress. Voor het regressiemodel dat hier uit volgt is bepaald welke variabelen de belangrijkste bijdrage leveren aan variatie in verandering van het aantal dode bomen met behulp van dominantie-analyse (R package dominanceAnalysis; Azen en Budescu (2003)). Met dominantie-analyse kan reke-

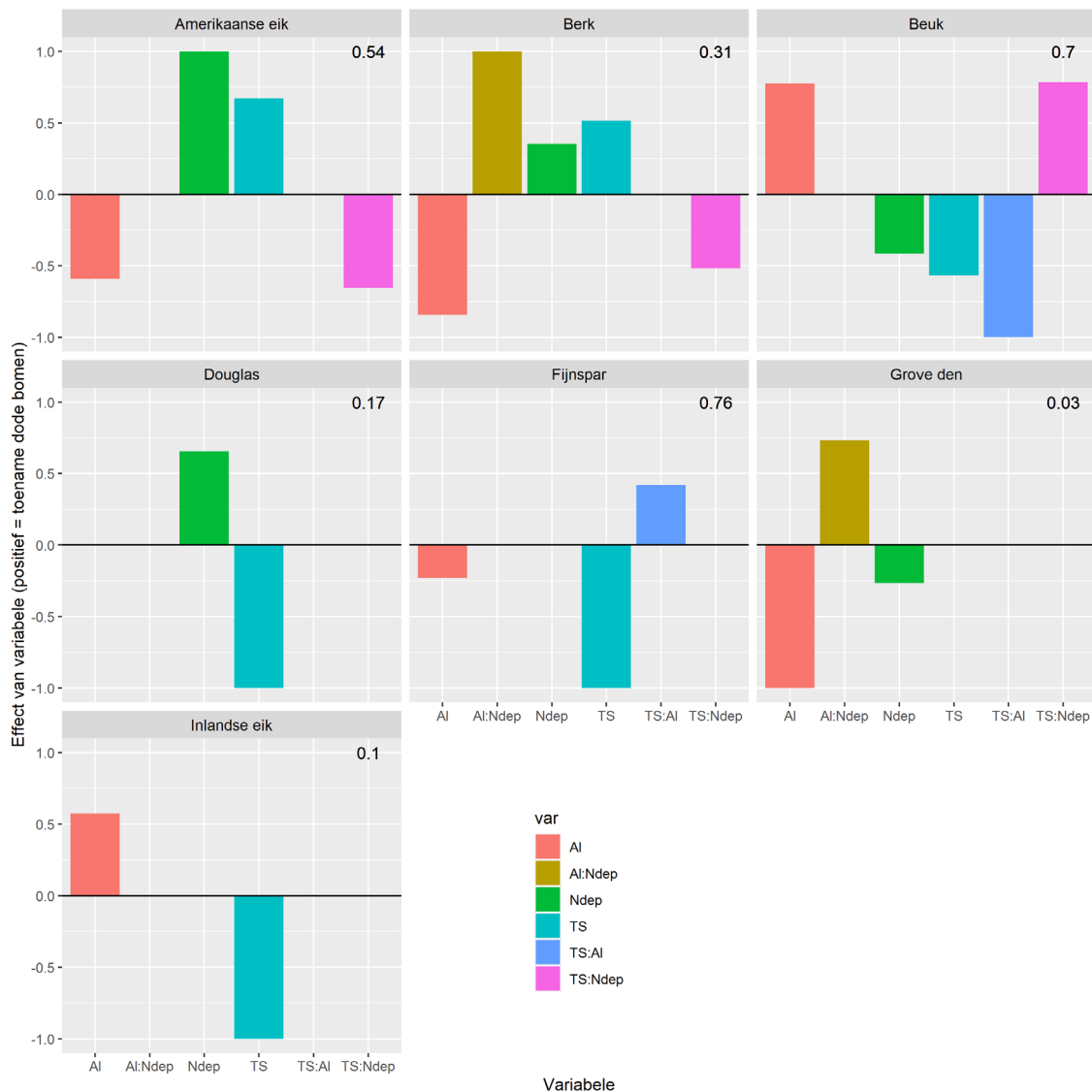
ning gehouden worden met correlaties tussen variabelen. Daarnaast zijn voordelen dat (1) de geschatte bijdrage onafhankelijk is van de set verklarende variabelen die wordt opgegeven en (2) het uitgangspunt niet een enkel regressiemodel is maar er meerdere waarschijnlijke modellen worden meegenomen. Alleen bostypen waarvan het aantal observaties (op grondwateronafhankelijke locaties, in natuurgebied) groter is dan 10 zijn meegenomen. Soorten als wilg en populier, waar een sterke toename in aantal dode bomen is opgetreden (Figuur 4.1), komen nauwelijks voor op grondwateronafhankelijke standplaatsen en zijn daardoor afgevallen.

De verandering van het aantal dode bomen kan voor een groot deel verklaard worden door transpiratiestress, aluminiumconcentratie en stikstofdepositie (als proxy voor pH). Vooral voor Fijnspar, Beuk en Amerikaanse eik wordt het aantal dode bomen verklaard door transpiratiestress, waar een hoge R^2 optreedt (Figuur 4.7). Voor bossen met Corsicaanse den en Japanse lariks kon daarentegen geen van deze standplaatsfactoren de verandering in het aantal dode bomen verklaren (en zijn resultaten weggelaten). De sturende factor achter de verandering in het aantal dode bomen verschilt per boomsoort.

Kijken we naar de factoren die bijdragen aan een toename van het aantal dode bomen, dan lijkt vooral stikstofdepositie daartoe te behoren (Amerikaanse eik, Berk, Douglas), al dan niet als combinatie effect met toename van aluminium (Berk, Grove Den) of transpiratiestress (Beuk). Ook de aluminiumconcentratie leidt tot een toename van aantal dode bomen bij Inlandse eik en Beuk. Hoge transpiratiestress leidt alleen bij Amerikaanse eik en Berk tot toename van aantal dode bomen, maar daar zijn stikstof-gerelateerde variabelen van groter belang.

Kijken we naar factoren die het grootste effect hebben op de verandering van het aantal dode bomen (dus ongeacht het een toe- of afname is), dan is in de meeste gevallen transpiratiestress de belangrijkste factor (Douglas, Fijnspar, Inlandse eik, en ook Beuk in combinatie met Al). Het aantal dode bomen neemt in die gevallen echter af met toenemende transpiratiestress, wat een opmerkelijk resultaat blijft. Ook de aluminiumconcentratie speelt vaak een voorname rol in de verandering van het aantal dode bomen, zoals bij Grove den, Inlandse eik, Berk en Beuk. Bij Inlandse eik en Beuk lijkt een verhoogde aluminiumconcentratie bij te dragen aan een toename van het aantal dode bomen, maar bij de andere soorten lijkt Aluminium juist te leiden tot een afname van het aantal dode bomen. Bij bossen met Amerikaanse eik is een toename van het aantal dode bomen voornamelijk gerelateerd aan een toename van transpiratiestress en stikstofdepositie. Ook bij Douglas, Grove den en Berk neemt het aantal dode bomen toe met verhoogde N-depositie. Bij Grove den en Berk komt dat vooral door een interactie met verhoogde aluminiumconcentratie.

FIGUUR 10.28 RELATIEVE BIJDRAGE VAN VARIABLEN AAN VARIATIE IN TOENAME VAN AANTAL DODE BOMEN (>2019 T.O.V. 2012-2013), UITGESPLITST PER DOMINANTE BOOMSORT. HET EFFECT IS BEPAALD MET DOMINANTIEANALYSE OP STAPSGEWIJZE (AIC-GEBASEERDE) LINEAIRE REGRESSIE. HOE GROTER DE BALK, HOE GROTER HET EFFECT. NEGATIEVE GETALLEN GEVEN EEN NEGATIEF VERBAND MET TOENAME AANTAL DODE BOMEN WEER. INTERACTIES TUSSEN VARIABLEN ZIJN WEERGEGEVEN MET EEN ':'. HET GETAL RECHTSBOVEN GEEFT DE VERKLAARDE VARIANTIE WEER (R^2)

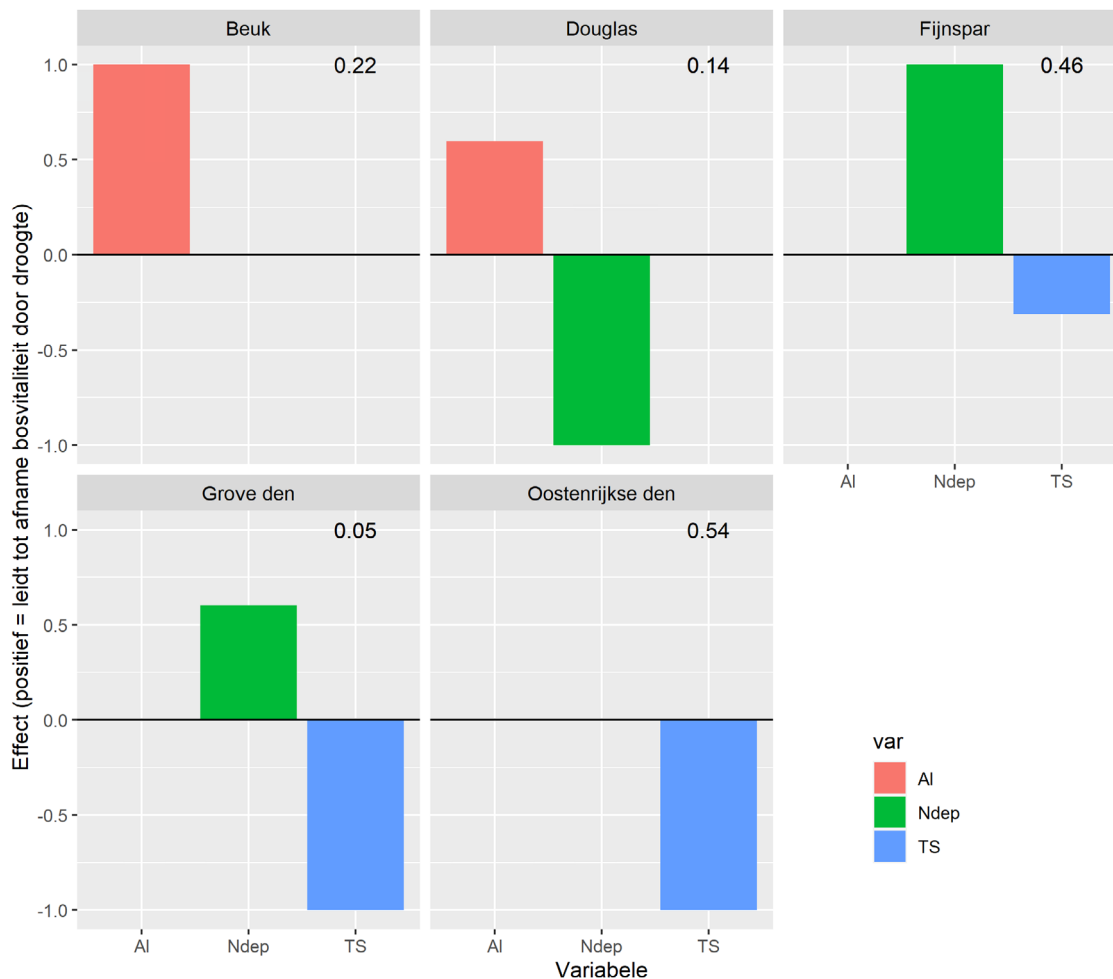


RESULTATEN: VERGELIJKING STANDPLAATSCONDITIES MET WAARGENOMEN DROOGTE-EFFECT

Behalve het aantal dode bomen is bij de laatste bosinventarisatie (NBI7) aangegeven of verminderde bosvitaliteit is opgetreden door droogte (ja/nee). Om te bepalen in hoeverre TS, Al, en N-depositie het geobserveerde droogte-effect kunnen verklaren, is logistische regressie uitgevoerd. Hierbij is dezelfde procedure gehanteerd als hierboven met de volgende aanpassingen. Ten eerste is een logit transformatie gebruikt om rekening te houden met de binaire aan/afwezigheid van droogte. Ten tweede zijn geen interacties meegenomen, omdat het aantal observaties daar te beperkt voor is. In plaats van de R^2 is de voor logistische modellen geschikte Nagelkerke pseudo- R^2 weergegeven. Een belangrijke kanttekening is dat het geobserveerde droogte-effect niet is vastgesteld in de voorgaande bosinventarisatie. Het is daardoor niet mogelijk te bepalen of bosvitaliteit is afgenomen door de droogte in 2018, of dat ook daarvoor al verminderde vitaliteit optrad.

In Figuur 4.8 is te zien dat lage bosvitaliteit in NBI7 vooral optreedt op locaties met hoge stikstofdepositie (Fijnspar en Grove den) of hoge aluminiumconcentraties (Beuk en Douglas); of dit duidt op causaliteit is op basis van deze beperkte dataset niet met zekerheid te zeggen. Opvallend is dat transpiratiestress geen rol speelt bij Beuk en Douglas. Bij de overige boomsoorten leidt hogere transpiratiestress zelfs tot minder gevallen waar afgenomen bosvitaliteit is waargenomen.

FIGUUR 10.29 RELATIEVE BIJDRAGE VAN STANDPLAATSFACTOREN AAN GEOBSERVEERDE VERMINDERDE BOSVITALITEIT DOOR DROOGTE (NBI7), UITGESPLITST PER DOMINANTE BOOMSOORT. HET EFFECT IS BEPAALD MET DOMINANTIE ANALYSE OP STAPSGEWIJZE (AIC-GEBASEERDE) LINEAIRE REGRESSIE. HOE GROTER DE BALK, HOE GROTER HET EFFECT. NEGATIEVE GETALLEN GEVEN EEN NEGATIEF VERBAND MET TOENAME AANTAL DODE BOMEN WEER. HET GETAL RECHTSBOVEN GEEFT DE VERKLAARDE VARIANTIE WEER (NAGELKERKE PSEUDO-R²)



V.IV DISCUSSIE

Alvorens in te gaan op de implicaties, is het belangrijk te vermelden dat de WWN simulaties niet gevalideerd zijn met metingen van abiotische condities in het veld, en dat de aantallen observaties per boomsoort in veel gevallen te beperkt zijn om gefundeerde uitspraken te doen over sturende factoren in bossterfte. Dit hoofdstuk heeft dat dan ook niet als doel, maar dient vooral ter verkenning van mogelijkheden met de WWN-3. De nadruk ligt hierbij op de simulatie van standplaatscondities.

De in dit hoofdstuk gepresenteerde resultaten lijken op het eerste gezicht weinig ondersteuning te bieden voor de hypothese dat transpiratiestress tijdens de droogte in 2018 sturend was voor afgenomen bosvitaliteit. Op het eerste gezicht lijkt dit aan te geven dat voor veel boomsoorten

oorten een watertekort geen directe rol speelde in geobserveerde afname van bosvitaliteit en toename van aantal dode bomen, en dat andere factoren van grote belang waren. Alleen voor Amerikaanse eik en Berk lijkt hogere transpiratiestress bij te dragen aan toename van het aantal dode bomen. In veel gevallen lijkt stikstof ook een rol te spelen, maar deze analyse biedt te weinig basis om hier concluderende uitspraken over te doen. Dat was niet het doel van deze exercitie, en zou ondersteuning van bijvoorbeeld metingen van zuurgraad, Al-concentratie en vochtgehalten benodigd zijn. Overigens is de verandering in het aantal dode bomen niet noodzakelijkerwijs een (direct) gevolg van droogte. Ook andere (door droogte geïnitieerde) oorzaken, zoals essentaksterfte, storm, verandering in beheer, of zelfs vernatting, kunnen ten grondslag liggen aan deze verandering. Daarnaast kan niet uit de gegevens worden geëxtraheerd of de bomen die zijn gestorven behoren tot de dominante boomsoort van de betreffende plot, of dat het een andere soort betreft.

Verder is er vaak een negatief verband tussen transpiratiestress en toename van het aantal dode bomen en bosvitaliteit. Dat betekent dat bomen op natte en vochtige standplaatsen meer last hebben gehad van het droge jaar 2018 dan de bomen op droge standplaatsen. Dit is een belangrijk resultaat, het zou kunnen aangeven dat bomen op droge standplaatsen blijkbaar al zodanig zijn aangepast dat ze tegen een stootje kunnen. Op de natte en vochtige standplaatsen staan exemplaren van boomsoorten die niet in een goed wortelstelsel hebben geïnvesteerd. Observaties omtrent verminderde bosvitaliteit door droogte ontbreken helaas voor de Ausgangssituatie vóór de droogte. We kijken nu dus niet naar een verandering in droogte-effecten als gevolg van droogte. Ook hebben we daardoor niet gekeken naar het verband tussen de afwijking in 2018 van standplaatsfactoren en de toename van het aantal dode bomen, c.q. de afname van de bodemvitaliteit. Het kan zo zijn dat plots die in 2018 meer transpiratiestress hadden dat in de voorgaande 30 jaar ook hadden, en ook gemiddeld meer dode bomen bevatten die mogelijk al beter aan droogte waren aangepast. Daarnaast heeft eerder onderzoek naar de relatie bosvitaliteit en standplaatsfactoren (in termen van bodemvochtconcentraties) geen duidelijke relatie aan kunnen tonen (Leeters et al. 2007). Zo concluderen Leeters et al. (2007) dat bosvitaliteit een reflectie is van vele omgevingsfactoren en dat het niet goed mogelijk is om, gegeven het grillige temporele verloop in de vitaliteit, hier een harde conclusie aan te verbinden.

De uitkomsten van dit onderzoek zijn deels contra-intuïtief, en onze oorspronkelijke hypothese (droogte leidt tot meer transpiratiestress en hogere aluminiumconcentraties, en verhoogt daarmee de mortaliteit en leidt tot afname van vitaliteit) kan met deze berekeningen niet worden ondersteund. Mogelijk is het zo dat locaties die in 2018 hoge transpiratiestress en Al-concentraties hadden, dat relatief – ten opzichte van andere locaties – in voorgaande jaren ook hadden (bijvoorbeeld in het droge jaar 2013). Gevoelige exemplaren zijn toen reeds al bezweken en uit de plots verdwenen. Een effect van de droogte in 2018 op vegetatie is alleen mogelijk als er nog schade aan te richten is. Dit beeld komt overeen met bevindingen in een recente landelijke studie door Van Ek *e.a.* (2021), waar geen duidelijke effecten van de droogte in 2018 op vegetatie aangetoond konden worden. In deze studie werd droogte gekwantificeerd met de laagste grondwaterstanden (LG3) in 2018 en effect op vegetatie als verandering in indicatiewaarden. De auteurs noemen dat het maximale neerslagtekort in Nederland de afgelopen vijftig jaar al is toegenomen, en waardoor effecten van droogte al in het verleden hebben plaatsgevonden en nu niet meer te constateren zijn.

Verdere kanttekeningen die de interpretatie in perspectief plaatsen zijn:

1. Deze studie is een eerste verkenning met een beperkte dataset. Conclusies zijn dan ook indicatief en zouden deels kunnen berusten op niet-causale correlaties.
2. Door de selectie op grondwateronafhankelijke standplaatsen is het bereik van transpiratiewaarden beperkt en is het aantal observaties beperkt. Voor boomsoorten van natte standplaatsen is het droogte-effect groter, zo laat de nationale bosinventarisatie zien. Deze boomsoorten zijn in deze demonstratie met focus op grondwateronafhankelijke standplaatsen niet meegenomen. Dat had wel gekund met de WWN maar is voor deze demonstratiefunctie niet uitgevoerd.
3. De aluminiumconcentratie betreft de jaargemiddelde waarde en niet een hogere zomerconcentratie in het jaar 2018. Deze zijn echter sterk met elkaar gecorreleerd.
4. Kansrijkdom vegetatie wordt in de WWN als functie van klimaat berekend en historische ontwikkeling speelt geen rol. We kunnen dus niet bepalen hoe vegetatie herstelt/zich ontwikkeld na een extreme gebeurtenis. Daar is een dynamische versie van WWN voor nodig.

V.V CONCLUSIE

Het ruimtelijk beeld van de gesimuleerde standplaatscondities is plausibel. Dit geeft aan dat WWN-3 geschikt zou kunnen zijn om effecten van droogte op standplaatscondities te kunnen simuleren. Om dit hard te kunnen maken, is een vergelijking met geobserveerde standplaatscondities essentieel. Dergelijke gegevens worden niet structureel verzameld, zijn niet/slecht beschikbaar en zeer beperkt. Dit gebrek aan gegevens verhindert de validatie van - en de verdere ontwikkeling van modellen als de WWN. Om de gesimuleerde standplaatscondities te valideren, is daarom als alternatief gebruik gemaakt van observaties van bosvitaliteit. Hierbij dient te worden aangetekend dat de relatie tussen gemeten standplaatsfactoren en bosvitaliteit ook niet eenvoudig en eenduidig is (Leeters *e.a.*, (2007)). In deze validatie stond de hypothese dat bosvitaliteit zou afnemen bij toenemende transpiratiestress centraal. De resultaten van de WWN geven aanleiding voor het verwerpen van deze hypothese, en weerspiegelen dat de natuur complexer in elkaar steekt. Meer onderzoek is nodig om nieuw geformuleerde hypothesen te testen. Daarentegen geeft het complexe verband tussen gesimuleerde standplaatscondities en geobserveerde bosvitaliteit geen aanleiding om de plausibiliteit van WWN resultaten en toepasbaarheid voor extreme jaren te verwerpen.

V.VI MEERWAARDE

Met deze verkennende analyse hebben we gedemonstreerd dat de WWN kan worden gebruikt om, naast het bepalen van klimaatgemiddelde standplaatsfactoren, ook inzicht in klimatologische extremen te krijgen. Effecten van een droog jaar in combinatie met langdurige verzuuring op standplaatscondities kunnen met de WWN op procesmatige wijze worden gekwantificeerd en inzichtelijk worden gemaakt. De gesimuleerde veranderingen van standplaatscondities in 2018 ten opzichte van langjarige gemiddelde condities zijn plausibel. Het verband tussen verandering in standplaatscondities en bosvitaliteit beperkt en complex. De oorzaak daarvan is daarentegen niet per definitie een foutieve simulatie van standplaatscondities door de WWN; zoals beschreven ligt dit ook vooral bij de combinatie van validatiegegevens, ecohydrologische processen, en een benodigde bijstelling van de oorspronkelijke hypothese dat de droogte van 2018 een groot effect heeft gehad op vegetatie.

In de huidige vorm, waarbij wordt aangenomen dat vegetatie in evenwicht is met het heersende klimaat, leent de WWN zich echter niet om te bepalen in hoeverre vegetatie uit evenwicht wordt gebracht door extremen, en of/in hoeverre herstel kan plaatsvinden of dat veranderingen reeds kritische waarden (kantelpunten) overschreden hebben waarna herstel prak-

tisch onmogelijk is (Scheffer *e.a.*, 2001). Dit is een belangrijk onderwerp dat veel aandacht krijgt, maar waar nog weinig over bekend is in de praktijk. Om dergelijke antwoorden te beantwoorden is het nodig om de interacties tussen bodem, water, en vegetatie dynamisch te modelleren, en de vegetatieontwikkeling door de tijd te volgen. In een voorganger van de WWN, het model PROBE-3, is een dergelijk successiemodel voor duinen ontwikkeld. Hierin is de vegetatiemodule van de WWN succesvol gekoppeld aan de modellen CENTURY en SWAP. Met de nodige inzet kan ook VSD+ onderdeel gemaakt worden van deze modellentrein, om zo de WWN breder toepasbaar te maken.

BIJLAGE VI

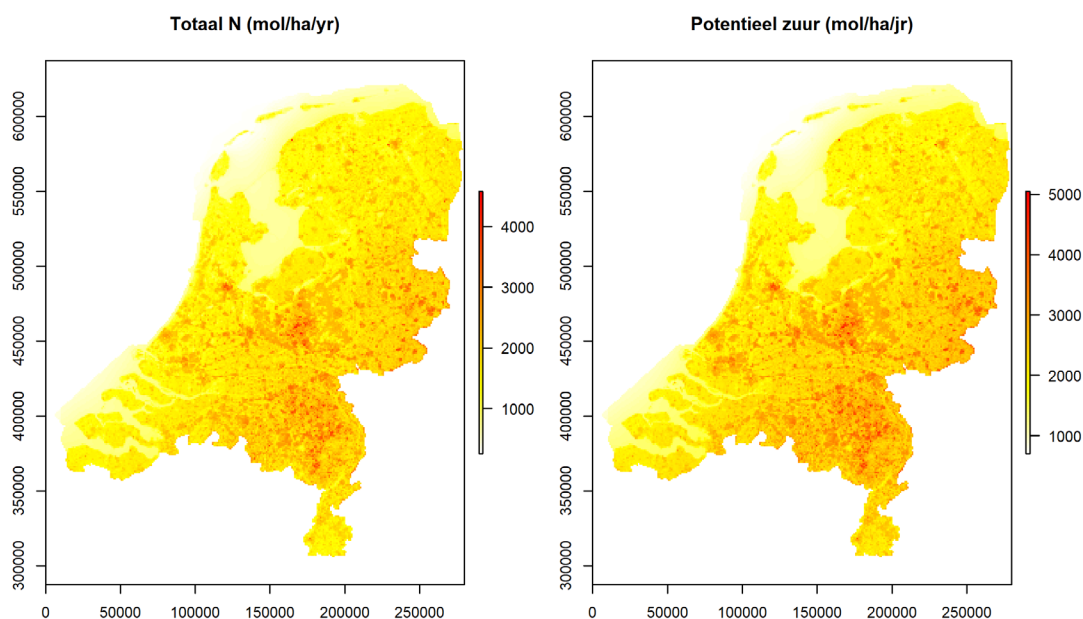
VERZURENDE DEPOSITIE: SO_x EN NO_x

In de WWN wordt aangenomen dat de verhouding tussen verzurende N-depositie en SO_x ruimtelijk niet varieert, en dat deze ratio in de toekomst niet verandert. Doordat de bronnen voor verzurende depositie verschillen en ruimtelijk niet altijd op dezelfde plek liggen, zou dit niet per definitie het geval hoeven te zijn. In deze bijlage wordt nagegaan in hoeverre deze aanname gerechtvaardigd is. Verzurende depositie bestaat uit zowel SO_x , NO_x , NH_3 en andere bronnen.

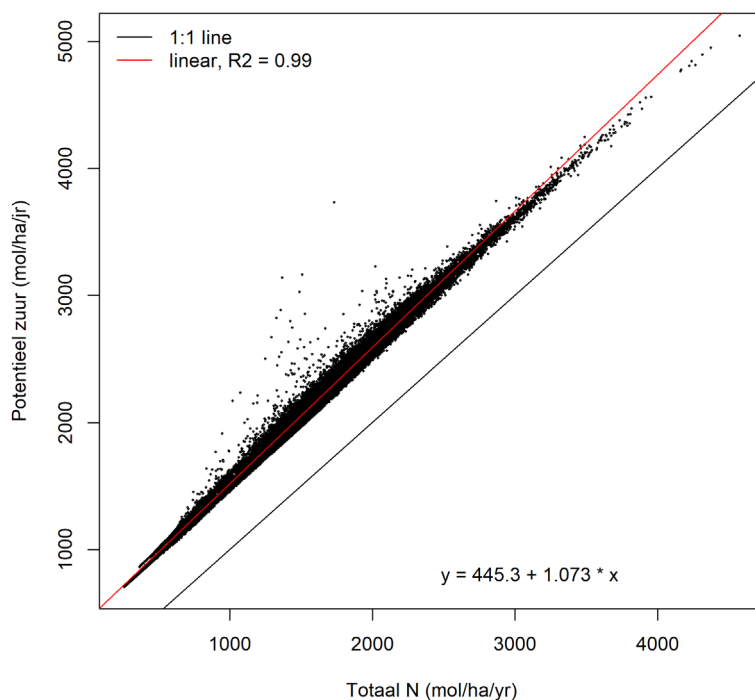
De totale N-depositie ($NO_x + NH_3$) is verantwoordelijk voor ongeveer 75% van de totale verzurende depositie, SO_x voor 14%, en overige stoffen voor zo'n 12%. SO_x en NO_x zijn afkomstig van verschillende emissiebronnen (CBS, 2019). Zo'n 85% van de NH_3 -emissie wordt veroorzaakt door landbouw, en is met name afkomstig van mestproductie (Schollaardt, 2019). NO_x wordt daarentegen voornamelijk uitgestoten bij verbrandingsprocessen, en wordt veroorzaakt door wegverkeer, industrie, binnenvaart en landbouw. SO_x is voornamelijk afkomstig uit industrie, raffinaderijen, zeescheepvaart, en de energiesector.

Om te bepalen of er een ruimtelijke correlatie is tussen N-depositie en SO_x , zijn de totale N-depositie en zuurdepositie van 2018 met elkaar vergeleken zijn op basis van gegevens van het RIVM (Hoogerbrugge *e.a.*, 2020). Zowel visueel als op basis van een lineaire regressie kan worden geconcludeerd dat er een zeer sterk verband is tussen totale N-depositie en zuurdepositie (zie Figuur 10.30 en Figuur 10.31). Dit is niet verwonderlijk; SO_x - en NH_3 depositie is als gevolg van co-depositie in de vorm van $(NH_3)_2SO_4$ -aerosolen zeer sterk gecorreleerd. Uit deze analyse blijkt dat het gerechtvaardigd de verhouding Ntotaal : verzuring constant te houden.

FIGUUR 10.30 KAARTEN VAN TOTALE N-DEPOSITIE ($NH_3 + NO_x$; LINKS) EN POTENTIELE ZUURDEPOSITIE (RECHTS). GEGEVENS ONTLEEND VAN DE GROOTSCHALIGE DEPOSITIEKAARTEN HET RIVM VOOR HET JAAR 2018 (HOGERBRUGGE E.A., 2020)



FIGUUR 10.31 LINEAIRE REGRESSIE VAN TOTALE N-DEPOSITIE VERSUS POTENTIËLE ZUURDEPOSITIE. GEGEVENS ONTLEEND VAN DE GROOTSCHALIGE DEPOSITIEKAARTEN HET RIVM VOOR HET JAAR 2018 (HOGERBRUGGE E.A., 2020)



Op basis van gemiddelde deposities over Nederland op basis van RIVM berekeningen 1990-2017 is te concluderen dat SO_x goed gecorreleerd is met totaal N en in dezelfde richting verandert. Voor de toekomst nemen we als uitgangspunt dat dit zo blijft.

BIJLAGE VII

AANPASSEN KNIKPUNENTABEL

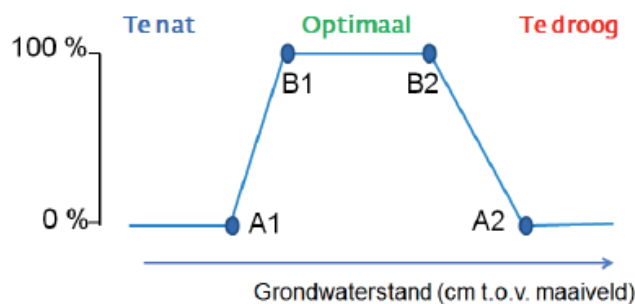
VII.I CONTEXT

Naast effectvoorspelling van hoe veranderingen in waterhuishouding en klimaat doorwerken op vegetatie, is één van de mogelijkheden in de WWN om met behulp van het deelprogramma WATERNOOD te bepalen of de huidige waterhuishouding voldoet aan vegetatiedoelen. De waterhuishouding wordt hierbij gekarakteriseerd met drie variabelen (Witte *e.a.*, 2018b):

1. GVG: De gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (cm- maaiveld)
2. GLG: De gemiddeld laagste grondwaterstand (cm-maaiveld)
3. DS: Droogtestress: gemiddeld aantal dagen per jaar dat de zuigspanning in de bodem een waarde van 12000 cm overschrijdt (d).

De doelrealisatie (uitgedrukt als percentage) van een doeltype (vegetatie) wordt voor alle drie variabelen bepaald aan de hand van trapeziumvormige functies (Figuur 10.32). Door de doelrealisaties van alle drie variabelen te vermenigvuldigen kan de totale doelrealisatie berekend worden. De trapeziumvormige functie wordt beschreven met zogeheten knikpunten. Deze knikpunten zijn voor plantengemeenschappen, natuurdoeltypen en Natura 2000 habitattypen door Runhaar en Hennekens (2015) opgesteld op basis van literatuur, datasets, en bij afwezigheid of onvolledigheid van metingen, op expertkennis. De resulterende knikpuntentabel is in de WWN terug te vinden in de knikpuntentabel (...\\WWN\System\Tables\KnikpuntenWaterlood.csv).

FIGUUR 10.32 VOORBEELD VAN EEN TRAPEZIUMVORMIGE DOELREALISATIEFUNCTIE VOOR GRONDWATERSTAND (BV GVG). TUSSEN DE KNIKPUNTEN B1 EN B2 IS DE GVG OPTIMAAL EN DE DOELREALISATIE 100%, TUSSEN KNIKPUNTEN A1 EN B1, OF B2 EN A2, IS DE DOELREALISATIE TUSSEN 0 EN 100%. BIJ GRONDWATERSTANDEN KLEINER DAN A1 OF GROTER DAN A2 IS DE DOELREALISATIE IN HET VOORBEELD 0%. FIGUUR OVERGENOMEN EN Aangepast uit Witte *e.a.* (2018b)



De huidige knikpuntentabel is op een aantal punten aan actualisatie toe:

- In 2017 is een revisie van De Vegetatie van Nederland (rVvN) gepubliceerd, mede om N2000-habitattypen beter te kunnen onderscheiden. De meeste typen zijn niet veranderd, maar een aantal wel, inclusief de nummering. Bovendien zijn er plantengemeenschappen gesplitst en toegevoegd. Door afwijkende nummering en aangepaste begrenzing van associaties kunnen misinterpretaties ontstaan. In de WWN is daarom knikpuntentabel toegevoegd.
- In de WWN is de SBB-typologie van vegetatietypen, een aanvulling op de typologie van VvN, nog niet goed opgenomen. Dit betekent dat vegetatiekarteringen die gebruik maken van de SBB-typologie nog niet in de WWN kunnen worden ingelezen.

- Ook in de oorspronkelijke VVN typologie uit 1995 ontbreken knikpunten, met name van rompgemeenschappen.

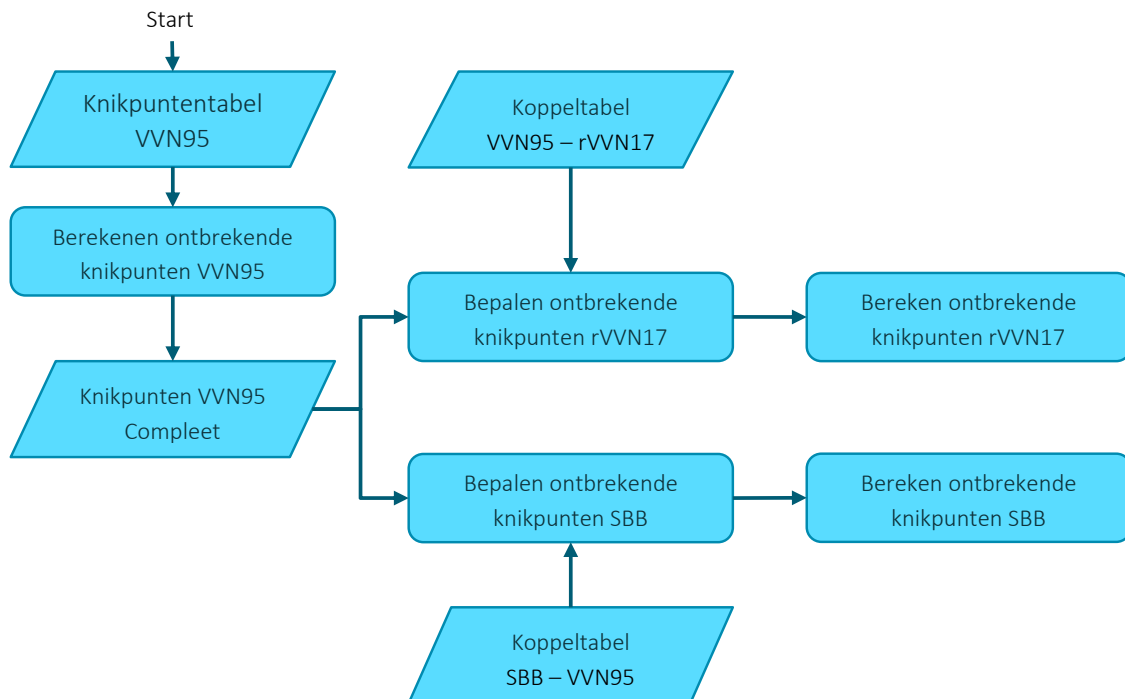
Om het gebruiksgemak van WWN te vergroten en er voor de zorgen dat de meest actuele vegetatietypologie wordt gehanteerd, wordt de knikpuntentabel uitgebreid gereviseerd. Daarnaast een procedure nodig om verschillende vegetatietypologieën naar elkaar te vertalen. Dit rapport doet verslag van de gebruikte methode en verantwoording van belangrijke keuzes. De ontwikkelde methode is algemeen toepasbaar en kan gebruikt worden voor vertaling van (toekomstige) andere vegetatietypologieën.

VII.II METHODE

ALGEMENE WERKWIJZE

De totstandkoming van de knikpunten in Waterlood voor de plantengemeenschappen volgens de indeling van de Vegetatie van Nederland (VVN) is beschreven in Runhaar en Hennekens (2015). Voor een deel van de in Waterlood gedefinieerde VVN syntaxa ontbreken knikpunten. Als eerst zijn voor de deze ontbrekende VVN syntaxa knikpunten berekend (Figuur 10.33). Het betreffen hier vooral rompgemeenschappen. Met een conversietabel (geleverd door WEnR, 2020) tussen de vorige VVN indeling (VVN95) en de gereviseerde VVN indeling (rVVN, 2017) is het grootste deel van de rVVN syntaxa een knikpunt bekend met behulp van de nieuwe aangevulde knikpuntentabel. Ontbrekende knikpunten zijn berekend op basis van vegetatie-opnamen waaraan voor beide indelingen het meest waarschijnlijke syntaxon is toegekend. Voor het bepalen van knikpunten voor syntaxa volgens de Staatsbosbeheer indeling is dezelfde benadering gehanteerd. In de volgende secties worden de ondernomen stappen in meer detail toegelicht.

FIGUUR 10.33 ALGEMENE WERKWIJZE AANVULLEN KNIKPUNTEN EN CONVERSIE TUSSEN VERSCHILLENDE INDELINGEN. WERKZAAMHEDEN ZIJN WEERGEGEVEN MET □, DATABRONNEN MET ◇. VVN95, RVVN17 EN SBB REFEREREN RESPECTIEVELIJK NAAR DE INDELING VAN PLANTENGEMEENSCHAPPEN VOLGENS DE VEGETATIE VAN NEDERLAND, DE IN 2017 GEREVISEERDE VERSIE DAARVAN, EN DE STAATSBOSBEHEER CATALOGUS



BEREKENEN VAN ONTBREKENDE VVN KNIKPUNTEN

De Vegetatie van Nederland indeling van 1995 (VVN) kent 642 syntaxa, verdeeld over (sub) associaties, rompgemeenschappen, en derivaatgemeenschappen. Van 239 van deze eenheden ontbreken knikpunten. Ongeveer de helft van deze ontbrekende knikpunten is voor Rompgemeenschappen; de resterende helft wordt voornamelijk ingenomen door aquatische milieus en syntaxa op subassociatieniveau.

Alhoewel de Waterwijzer Natuur zich toespitst op terrestrische natuur, en men zich kan afvragen of knikpunten zinvol te definiëren zijn voor permanent aquatische milieus, zijn deze voor de volledigheid ook voor de betreffende aquatische syntaxa berekend. Derivaatgemeenschappen, die doorgaans enkel kensoorten en differentiërende soorten van een hoger syntaxonomisch niveau bevatten, zijn buiten beschouwing gelaten wegens gebrekkige indicatiewaarde.

BEREKENING ONTBREKENDE SYNTAXA

Om ontbrekende knikpunten te berekenen, zijn gegevens gebruikt van 578,345 vegetatieopnamen uit de landelijke vegetatie databank. Door WENR is (met dank aan Stephan Hennekens) met behulp van het programma ASSOCIA een plantengemeenschap aan de vegetatieopnamen toegekend in zowel de VVN1995 als VVN2017 classificatie. Hierbij is elke vegetatieopname aan minimaal 1 en tot maximaal 5 plantengemeenschappen toegekend. De onzekerheid van de toegekende plantengemeenschappen is gekwantificeerd met behulp van een gecombineerde index, op basis van de berekende normalized likelihood, de 'weirdness' en de 'incompleteness'. De normalized likelihood geeft aan hoe waarschijnlijk het is dat een opname tot een bepaalde gemeenschap behoort. De incompleteness geeft aan hoe incompleet een opname is ten opzichte van de aangewezen gemeenschap; de weirdness geeft aan in hoeverre er soorten in de opname voorkomen die niet behoren tot de toegekende plantengemeenschap.

Deze tabel met vegetatie-opnamen is als volgt gebruikt. Eerst is bepaald in welke opnamen een bepaald syntaxon zonder knikpunt voorkomt. Met deze selectie van opnamen is vastgesteld met welke syntaxa mét knikpunten dit syntaxon het meest overeenkomt (kleinste waarde voor Combined Index), en hoe vaak dat het geval is (zie de kolom 'n' in Tabel 10.3 met voorbeeld voor de Rompgemeenschap van Pijpestrootje (40RG02) uit de klasse der berkenbroekbossen).

Alleen de zes syntaxa mét knikpunten die het meest lijken op het syntaxon waarvan knikpunten ontbreken zijn geselecteerd, gezien vaak een grote hoeveelheid syntaxa met kleine aantallen verscheen, waarvan het effect op berekende knikpunten klein zal zijn. Bovendien is de kans groter dat het hier om een toevallige toewijzing gaat en de onbetrouwbaarheid van het knikpunt daarmee groter is. Voor 90% van de gevallen waren tenminste 80 opnamen beschikbaar waarbij het betreffende syntaxon als meest waarschijnlijk was gedefinieerd. Doorgaans waren er echter meer dan 900 vegetatieopnamen beschikbaar.

De waarden voor knikpunten van de ontbrekende VVN syntaxa (\bar{K}) zijn berekend op basis van een gewogen gemiddelde van knikpunten K_i van syntaxa i waarvan wél knikpunten voorhanden zijn:

$$\text{Verg. 10.3: } \bar{K} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

De weging is uitgevoerd op basis van het aantal keer dat een syntaxon als meest waarschijnlijk gedefinieerd was als $w_i = n_i / \sum n$ (zie Tabel 10.3).

TABEL 10.3

VOORBEELD VAN TOEKENNING NIEUWE KNIKPUNTEN AAN ROMPGEMEENSCHAP VAN PIJPESTROOTJE (40RG02). N IS HET AANTAL OPNAMEN WAARIN 40RG02 OVEREENKOMT MET HET BETREFFENDE SYNTAXON WAAR KNIKPUNTEN VAN BESTAAN. HET RELATIEF GEWICHT IS WEERGEGEVEN IN KOLOM 'W'. GRONDWATERSTANDEN VAN KNIKPUNTEN (GVG EN GLG) ZIJN IN CM TEN OPZICHT VAN MAAIVELD (POSITIEF IS BENEDEN MAAIVELD)

Syntaxon mét knikpunt	Omschrijving	n	w	GVG				GLG			
				A1	B1	A2	B2	A1	B1	A2	B2
40AA02A	'Zompzegge-Berkenbroek: subass. met Melkeppe'	1206	0.35	-10	-5	15	30	-999	-999	40	60
42AA01D	'Berken-Eikenbos: subass. met Pijpestrootje'	577	0.17	20	32	58	70	70	90	999	999
11RG02	'Rompgemeenschap van Pijpestrootje'	523	0.15	-5	15	999	999	0	0	0	0
40AA02A	'Zompzegge-Berkenbroek: subass. met Melkeppe'	511	0.15	-10	-5	15	30	-999	-999	40	60
10RG04	'Rompgemeenschap van Pijpestrootje en Veenmos'	339	0.10	-40	-25	5	20	0	0	0	0
40AA02B	'Zompzegge-Berkenbroek: typische subass.'	271	0.08	-5	5	22	30	-999	-999	40	60
40RG02	Rompgemeenschap van Pijpestrootje			-7	3	23	37	-999	-999	28	42

Voor sommige knikpunten is een oneindig lage (999 m) of hoge (-999 m) grondwaterstand gedefinieerd. Voor droogtestress komt de waarden 999 overeen met oneindig veel dagen droogtestress (i.e. droogtetolerant). Indien voor meer dan een door de gebruiker ingestelde fractie f van de (gewogen) VVN vegetatietypen een oneindig (on)diepe grondwaterstand van toepassing was voor een betreffend knikpunt, werd aan het betreffende knikpunt de waarde -999 m danwel 999 m toegekend. In dit onderzoek is een fractie $f = 0.5$ gehanteerd. In de gevallen dat de som van gewichten van knikpunten met waarde -999 of 999 minder dan fractie f was, is wél een knikpunt berekend, op basis van knikpunten zónder de waarde -999 en 999. In die gevallen zijn alle knikpunten berekend exclusief de syntaxa die afvielen door oneindig (on)diepe grondwaterstanden omdat bleek dat ook de andere knikpunten zonder oneindig (on)diepe grondwaterstanden van de syntaxa die afvielen doorgaans sterk afwaken van de overige knikpunten (knikpunten binnen een syntaxon zijn met elkaar gecorreleerd). Bij de berekening is rekening gehouden met verandering in gewichten door het buiten beschouwing laten van syntaxa met waarde -999 of 999.

Sommige syntaxa zijn ongevoelig voor een variabele. In die gevallen zijn alle knikpunten van de betreffende variabele gelijk gesteld aan 0. Om hier rekening mee te houden, is dezelfde procedure gehanteerd als voor de gevallen met knikpunten met oneindig (on)diepe grondwaterstanden zoals hierboven beschreven: indien meer dan 50% van de gelijkende syntaxa ongevoelig is voor de betreffende variabele, wordt de waarde 0 aan alle knikpunten toegekend. Voor alle berekende knikpunten is nagegaan of geldt dat $A_1 \leq B_1 \leq B_2 \leq A_2$. Steekproefsgewijs is bepaald of de nieuwe berekende knikpunten overeenkomen met verwachting op basis van ecologie van gemeenschappen (en dit bleek het geval nadat alle hierboven genoemde handelingen waren uitgevoerd).

REKENVOORBEELD

Om bovenstaande methodiek te verduidelijken, is deze toegepast op in een rekenvoorbeeld voor een willekeurig VVN syntaxon waarvoor knikpunten niet gedefinieerd waren (40RG02 Rompgemeenschap van Pijpestrootje uit de klasse der berkenbroekbossen). Het rekenvoorbeeld is te vinden in Tabel 10.3. Voor 5703 vegetatie-opnamen was deze rompgemeenschap toegewezen als meest waarschijnlijke syntaxon. In Tabel 10.3 zijn de zes syntaxa te zien die het best overeen komen met deze rompgemeenschap, met daarbij het bijbehorende aantal keer dat dit in de dataset voorkwam (n) en de berekende gewichten (w).

De knikpunten voor GVG zijn daarbij berekend volgens . Voor knikpunten GVG A2 en GVG B2 van syntaxon 11RG02 zien we dat deze een oneindig diepe grondwaterstand tolereert (grondwaterstand 999 cm beneden maaiveld). De relatieve bijdrage van dit syntaxon is echter slechts 15% ($w = 0.15$). Dit is kleiner dan $f = 0.5$, en wordt daarom buiten beschouwing gelaten in de berekeningen. Dit is anders voor knikpunt GLG A1 en B1; de bijdrage van de syntaxa met GLG = -999 is namelijk 58% (som van gewichten w is 0.58). Voor deze knikpunten is daarom de waarde -999 toegekend.

VII.III BEREKENEN RVVN EN SBB KNIKPUNTEN

rVVN

Voor de transformatie van VVN naar rVVN codes is een conversietabel opgesteld door WENR (Stephan Hennekens). Met behulp van deze conversietabel kan een groot deel van de VVN knikpunten direct worden vertaald naar rVVN knikpunten. Doordat er nieuwe plantengemeenschappen zijn ontstaan bij de revisie, is deze transformatie echter incompleet. In totaal ontbraken knikpunten voor 205 rVVN syntaxa, waarbij de knikpunten van eerder ontbrekende VVN codes in de knikpuntentabel al aangevuld zijn.

Om deze te bepalen is dezelfde rekenmethodiek zoals beschreven in sectie 0 toegepast. Het enige verschil is dat hierbij gebruik is gemaakt van toegewezen VVN en rVVN syntaxa voor vegetatie-opnames. De aantallen waarbij combinaties van de VVN en rVVN syntaxa voorkomen zijn gebruikt als n in Tabel 10.3, ook met een maximum van 6. Voor 12 syntaxa in de rVVN indeling konden geen knikpunten berekend worden, omdat deze niet zijn toegewezen als meest waarschijnlijke syntaxon in de set van 578,345 vegetatie-opnamen. De syntaxa met ontbrekende knikpunten zijn dus óf heel zeldzaam óf omvatten simpelweg (nog) geen opname (in de geleverde dataset).

STAATSBOSBEHEER SYSTEMATIEK

Net als voor de gereviseerde Vegetatie van Nederland, is voor de Staatsbosbeheer indeling (SBB) (Schipper, 2002) een conversietabel beschikbaar. Voor de syntaxa in deze tabel is een directe overzetting van knikpunten mogelijk. 192 SBB syntaxa zijn niet gekoppeld aan een VVN syntaxon met behulp van een dataset met 17907 vegetatieopnamen waaraan een SBB en VVN code is toegekend. Voor deze syntaxa zijn nieuwe knikpunten berekend volgens de procedure zoals beschreven in de paragraaf 'Berekenen van ontbrekende VVN knikpunten'. Voor 50 SBB syntaxa kon geen knikpunt worden toegewezen door het ontbreken ervan in de dataset met vegetatieopnamen. Hiervan zijn 11 syntaxa subassociaties, en zouden eventueel gebaseerd kunnen worden op knikpunten op associatieniveau. Door het beperktere aantal vegetatieopnamen in vergelijking tot de vertaling van rVVN naar VVN, is ook de zekerheid van de SBB knikpunten kleiner; gemiddeld (mediaan) zijn er 5 opnamen per SBB syntaxon.

TABEL 10.4

rVVN SYNTAXA WAARVOOR GEEN KNIKPUNTEN GEDEFINIËRD KONDEN WORDEN MET DE HUIDIGE SYSTEMATIEK

Syntaxon	Wetenschappelijke Naam	Nederlandse Naam
R18AA03	<i>Aulacomnio androgyni-Polypodietum vulgaris</i>	Associatie van Gewone eikvaren en Gewoon knopjesmos
R19AA05	<i>Polygalo vulgaris-Nardetum</i>	Associatie van Hondsviooltje en Gewoon struisgras
R31BA02	<i>Papaveretum argemones</i>	Associatie van Ruige klaproos
R36AA04	<i>Rubetum taxandriae</i>	Associatie van Smeulende kambaam
R38AA01	<i>Hippophao-Salicetum arenariae</i>	Associatie van Duindoorn en Kruiwilg
R38AB01	<i>Hippophao-Ligustretum vulgaris</i>	Associatie van Duindoorn en Liguster
R40BA01	<i>Salicetum capreae</i>	Boswilg-associatie
R40BB01	<i>Senecioni ovati-Rubetum iuvenis</i>	Associatie van Schaduwkruiskruid en Tere woudbraam
R40RG01	<i>RG Salix repens-[Berberidion vulgaris/Polygalo-Koelerion]</i>	RG Wilde liguster [Liguster-verbond]
R45AA01	<i>Cynoglossa-Quercetum roboris</i>	Hondstong-Eikenbos
R45AA03	<i>Betulo-Quercetum roboris</i>	Berken-Eikenbos
R46AB02	<i>Primulo elatioris-Carpinetum</i>	Sleutelbloem-Eikenhaagbeukenbos