

A network diagram consisting of various-sized light blue circles connected by thin white lines, set against a solid blue background. The circles are of different diameters and are scattered across the page, with some larger circles acting as central nodes.

KWR 2022.015 | Augustus 2022

**Effecten van de COVID-19
lockdowns en droogte op de
stikstofhuishouding van droge
heide**

Rapport

Effecten van de COVID-19 lockdowns en droogte op de stikstofhuishouding van de Groote Heide

KWR 2022.015 | Augustus 2022

Opdrachtnummer

403437

Projectmanager

dr. E. Dorland

Opdrachtgevers

Provincie Noord-Brabant & Brabant Water

Auteurs

drs. C.J.S. Aggenbach

m.m.v. M. Lemmens en E. Sanz Mali

Kwaliteitsborger

dr. J.J.M. Geurts i.o.v. Dr.ir. R.P. Bartholomeus

Verzonden naar

Brabant Water, Provincie Noord-Brabant

Keywords

droge heide, stikstofdepositie, nitraatuitspoeling, COVID-19 lockdown, droogte, biomonitoring, mossen

Dit rapport is openbaar en kan worden verstrekt aan derden.

Werkwijzen, rekenmodellen, technieken, ontwerpen van proefinstallaties, prototypen en door KWR gedane voorstellen en ideeën alsmede instrumenten, waaronder software, die in het onderzoeksresultaat zijn opgenomen, zijn en blijven het eigendom van KWR. Ook alle rechten die voortvloeien uit intellectuele- en industriële eigendom, alsmede de auteursrechten, blijven bij KWR berusten en derhalve eigendom van KWR.

Jaar van publicatie
2022

Meer informatie
Drs. C.J.S. Aggenbach
T +31 6 22379320
E camiel.aggenbach@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

The logo for KWR (Kwaliteitswater Rijswijk) features the letters 'KWR' in a bold, blue, sans-serif font. The 'K' and 'W' are connected at the top, and the 'R' is slightly separated.

Augustus 2022 ©

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

Samenvatting

Aanleiding voor dit onderzoek was de COVID-19 crisis en de bijhorende lockdowns met een sterk effect op menselijke activiteiten en dus ook op de atmosferische uitstoot van stikstof. Deze unieke situatie bood de kans om de korte termijneffecten van een plotselinge vermindering van stikstofdepositie te traceren op accumulatie van stikstof in ecosystemen. De verwachting was dat de lockdowns vooral een klein verlagend effect zouden hebben op de stikstofdepositie door de afname van verkeer. Een tweede aanleiding is de droogte in 2018 en 2019, waarbij het effect van deze droge zomers op mobilisatie van stikstof in heidebodems en uitspoeling naar het grondwater kon worden bepaald. Beide jaren en ook 2020 hadden extreem droge zomers, waarbij sterke uitdroging optrad van de heide met mogelijk sterke mobilisatie van stikstof in de heidebodem tot gevolg. Om de effecten van de lockdowns en droogte op de stikstofhuishouding van droge heide beter in beeld te brengen is in opdracht van Brabant Water en Provincie Noord-Brabant onderzoek uitgevoerd in het natuurgebied de Grootte Heide.

In dit onderzoek worden de volgende vragen beantwoord:

1. Is het effect van de COVID-19 lockdowns te zien aan de stikstofgehalten in mossen, porievocht en ondiep grondwater?
2. Is er invloed van droogte op de mobilisatie van stikstof in de bodem en op de stikstofconcentraties in het porievocht en het ondiepe grondwater?

Voor beantwoording van de onderzoeksvragen zijn chemische metingen verricht aan de stikstofconcentraties van het porievocht in de bodem (3x) en het bovenste grondwater (5x) en aan stikstofgehalten en stikstofisotoop verhoudingen in mosbiomassa (1x 2020 en 1x 2021). De geëvalueerde metingen bestrijken in totaal een periode van maart 2019 tot en met december 2021.

Effect van COVID-19 lockdowns

- Er is een zwak effect zichtbaar van de COVID-19 lockdowns op de stikstofconcentratie in mossen. Twee locaties vertoonde tijdens de lockdown binnen 1 jaar tijd een geringe daling. De duidelijkste afname was te zien op de locatie die het dichtst bij de druk bereden snelweg A2 ligt. Dit patroon stemt overeen met het effect van de COVID-19 lockdowns op het verloop van de verkeersintensiteit en het verwachte effect daarvan op de stikstofdepositie.
- De verhouding van stikstofisotopen ($\delta^{15}\text{N}$) vertoonde op drie locaties een zeer geringe toename. Deze verandering stemde niet overeen met de verwachte invloed van een afname van de verkeersintensiteit, namelijk juist een afname van $\delta^{15}\text{N}$. De toename van $\delta^{15}\text{N}$ kan samenhangen met verschillen in droogte en neerslag tussen de jaren die kunnen doorwerken op de verhoudingen tussen gereduceerd stikstof en geoxideerd stikstof in de depositie en dan ook de opname daarvan door mossen.
- Het was niet mogelijk om effecten van verminderde stikstofdepositie door de lockdowns te traceren in het verloop van stikstofconcentraties in het porievocht van de bodem en bovenste grondwater.

Invloed van droogteperiodes

- Dit onderzoek geeft sterke aanwijzingen dat droogteperiodes leiden tot mobilisatie van stikstof in de bodem van droge heiden en bevestigt daarmee bevindingen van eerder onderzoek.
- Deze effecten treden het sterkst op in oude heide, terwijl in recent geplagde heide (ca. 15 jaar geleden) mobilisatie van stikstof in de bodem alleen zeer lokaal optreedt. De effecten van stikstofmobilisatie in oude heidebodems uit zich vermoedelijk ook in periodes met verhoogde stikstofuitspoeling naar het grondwater. Hier dragen vooral uitspoeling van nitraat en in mindere mate stikstof in opgeloste organische stof bij aan de belasting van het grondwater.
- Onder geplagde heidebodems zijn de stikstofconcentraties van het bovenste grondwater na een periode van 13-15 jaar altijd zeer laag als gevolg van sterke immobilisatie van stikstofaanvoer in het jonge heide ecosysteem. Soms treedt wel mobilisatie van stikstof in de bodem op door droogte, maar dat werkt blijkbaar niet door in verhoogde nitraatconcentraties in het bovenste grondwater.
- Mobilisatie van stikstof door droogte in heide bodems kan leiden tot een grote stikstofbelasting op het grondwater die hoger is dan de stikstofdepositie. Implicatie hiervan kan zijn dat wanneer droogteperiodes door klimaatverandering vaker voorkomen, oude heiden kunnen omslaan van opslag van stikstofdepositie naar netto verlies van stikstof naar het grondwater.
- Aangezien de Grootte Heide in het intrekgebied ligt van een grondwaterwinning van Brabant Water, zijn periodes met verhoogde uitspoeling nadelig voor de kwaliteit van het drinkwater. Ook zal mobilisatie van stikstof leiden tot hoge nitraatgehalte van het ondiep grondwater dat toestroomt naar de vennen in de Grootte Heide.

Implicaties voor beheer van droge heide en waterwingebied

- Plaggen in combinatie met een hoge stikstofdepositie, leidt tot een soortenarme, jong heide-ecosysteem dat in de eerste decennia het overgrote deel van de stikstofdepositie immobiliseert, is daarmee een ongeschikte maatregel voor de instandhouding en herstel van droge heide.
- Plaggen zorgt tijdelijk (enkele decennia) voor verminderde uitspoeling van stikstof naar het grondwater. Op een langere termijn kan door bodemvorming en droogtegebeurtenissen een hogere stikstofuitspoeling optreden die periodiek de stikstofdepositie overschrijdt.
- De stikstofuitspoeling in oude droge heiden is hoger naar mate de stikstofdepositie hoger is. De meest effectieve maatregel om stikstofuitspoeling te beperken is het verminderen van de stikstofdepositie.

Aanbevelingen

- Het meten van stikstofgehalten over een periode van meerdere jaren in mos kan mogelijk snelle (lokale) trends van stikstofdepositie traceren. Dit is van belang voor een snelle evaluatie van de effecten van maatregelen die stikstofemissie reduceren. Ook kunnen de resultaten gebruikt worden de planning van interne herstelmaatregelen op een moment dat de stikstofdepositie voldoende is verlaagd.

- Het verbeteren van de berekening van stikstofbelasting op het ondiepe grondwater door een betere schatting van de evapotranspiratie met een onverzadigde zone model. Dit geeft meer inzicht op de effecten van heidebeheer op de uitspoeling van stikstof.
- Onderzoek de gecombineerde ecosysteemeffecten van droogte en stikstofmobilisatie op heiden.
- Kijk of in zure bossen ook mobilisatie van stikstof optreedt door droogte en wat de gevolgen daarvan zijn voor de nitraatconcentraties in het grondwater.
- Aangezien mossen in heiden een belangrijke rol spelen in de primaire productie en humusvorming kan onderzoek naar nutriënten en andere macro-elementen in mos meer inzicht geven in het biochemisch functioneren van heide-ecosystemen.

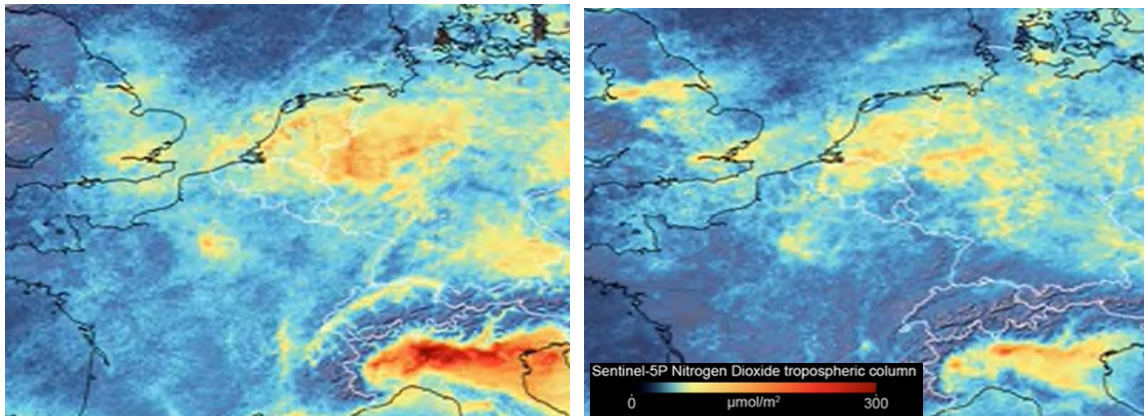
Inhoud

Rapport	1
Samenvatting	2
Inhoud	5
1 Inleiding	6
2 Aanpak	9
2.1 Onderzoeksgebied	9
2.2 Meetlocaties	10
2.3 Metingen in ondiepe grondwater en porievocht	12
2.4 Berekening stikstofuitspoeling	14
2.5 Chemische metingen mossen	15
3 Resultaten	17
3.1 Stikstofconcentraties in porievocht en bovenste grondwater	17
3.2 Stikstofuitspoeling naar het bovenste grondwater	21
3.3 Stikstofgehalte en isotoopsignatuur in mosbiomassa	21
3.4 Relatie tussen stikstofgehalte in mos en stikstofdepositie	22
3.5 Macronutriënten in mossen	23
4 Discussie	27
4.1 Invloed van COVID-19 lockdowns op stikstofgehalte en isotoopsignatuur in mossen	27
4.2 Invloed van droogte en COVID-19 lockdowns op stikstofconcentraties in het porievocht en grondwater	28
4.3 Stikstofbelasting van het grondwater	30
4.4 Nutriënten in mossen	31
5 Conclusies	33
6 Aanbevelingen	35
7 Literatuur	36

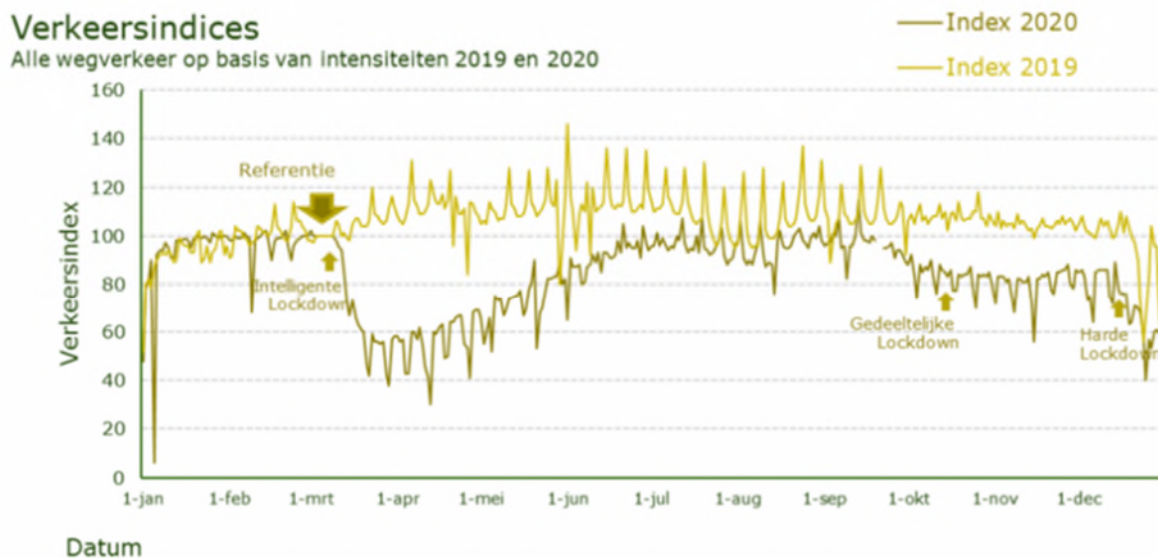
1 Inleiding

Dit rapport presenteert de resultaten van de invloed van de COVID-19 lockdown en droogte op de stikstofhuishouding en -uitspoeling in droge heiden van het natuurgebied de Grootte Heide in Noord-Brabant. Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van Brabant Water en de provincie Noord-Brabant. Er zijn twee aanleidingen voor dit onderzoek: 1) de COVID-19 crisis en de mogelijke effecten daarvan op stikstofdepositie en 2) de aanwijzing dat door extreme droogte veel geaccumuleerde stikstof in heidebodems vrij kan komen en uitspoelen naar het grondwater. De jaren 2018 en 2019 waren in het groeiseizoen extreem droog, wat de mogelijkheid biedt om de effecten op de stikstofhuishouding te onderzoeken.

De COVID-19 crisis en de bijhorende lockdowns hebben een sterk effect op menselijke activiteiten en dus ook op de atmosferische uitstoot van stikstof. De tijdelijke vermindering van de NO_y -concentratie in de lucht is zichtbaar op recente satellietbeelden (Figuur 1-1). Een hoge stikstofdepositie is sinds decennia één van de grootste milieuproblemen in Nederland en andere delen van Europa, wat eutrofiëring en verzuring veroorzaakt in een breed scala aan ecosystemen. Het probleem is moeilijk op te lossen vanwege de diffuse aard van de emissies en bronnen. Op dit moment is het effect van de COVID-19 lockdowns op vermindering van de N-depositie waarschijnlijk (tijdelijk) groter dan de vermindering als gevolg van overeengekomen maatregelen voor reductie van stikstofemissies. Omdat een lockdown vooral NO_y -emitterende activiteiten (verkeer, industrie) en veel minder NH_x -emitterende activiteiten (landbouw) beïnvloedt, zal de verhouding tussen geoxideerd en gereduceerd stikstof afnemen. Zo nam het verkeer in de eerste lockdown af met 50-65% en in heel 2020 met 20-30% (bron: CBS, NDW) (Figuur 1-2). In 2020 was de totale NO_x -emissie in Nederland 8 en 6% lager dan respectievelijk in 2018 en 2019. Voor de NO_x -emissie door verkeer was dat respectievelijk 22 en 15% (SBS 2022). Daarmee droeg de afname van de verkeersintensiteit in 2020 voor ca. 50 % bij aan de daling van de NO_x -depositie in 2018 en 2019. Daarnaast ging de maximumsnelheid op 16 maart 2020 overdag omlaag naar 100 km/u, al levert dit minder dan een procent reductie van stikstofneerslag op. Deze unieke situatie als gevolg van de COVID-19 crisis biedt de kans om de korte termijneffecten op ecosystemen van een plotselinge vermindering van stikstofdepositie te traceren.



Figuur 1-1: Satellietmetingen van de NO_2 concentraties in de troposfeer begin januari 2020 voor de Corona-crisis (links) en eind maart 2020 na start van de eerste lockdown (rechts). In de gebieden als de Po-vlakte en Nederland+Ruhr-gebied met hoge NO_2 concentratie treedt door verminderde emissies van NO_y een afname op. Bron: remote-sensing beelden van de Tropomi satelliet van ESA. (https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2020/03/Coronavirus_nitrogen_dioxide_emissions_drop_over_Italy).



Beeld: NDW

Figuur 1-2: Ontwikkeling van de verkeersintensiteit in Nederland in 2019 en 2020. De verkeersindex is voor week 10 van betreffende jaren op 100 gezet. De eerste lockdown, die startte in maart 2020, zorgde voor de sterkste verlaging van de verkeersintensiteit (Nieuwsbericht NWD 12-1-2021).

Het is lastig en kostbaar om de stikstofdepositie direct te meten en het modelleren ervan heeft veel onzekerheden. Het stikstofgehalte in mossen wordt in Europa vanaf de jaren '80 gebruikt als bio-indicator voor de monitoring van het ruimtelijke patroon van stikstofdepositie en veranderingen daarin. Verandering in stikstofdepositie door de COVID-19 lockdown kan mogelijk ook met de verandering van het stikstofgehalte in mossen worden gevolgd. Daarnaast zouden veranderingen in stikstofdepositie kunnen doorwerken in de stikstofconcentratie van het bodemvocht.

Er is nog een tweede aanleiding voor het onderzoek aan de stikstofhuishouding in de Groote Heide: namelijk het effect van de droge zomers van 2018 en 2019 op stikstofuitspoeling van heiden. Beide jaren hadden zeer droge zomers waarbij sterke uitdroging optrad van heiden met mogelijk sterke mobilisatie van stikstof in de heidebodem tot gevolg. Dit is een recent ontdekt fenomeen (Bobbink et al. 2019). Vooralsnog werd er van uitgegaan dat in heiden veel van de stikstofdepositie wordt vastgehouden door immobilisatie in micro-organismen en humus in de bodem. Droogteperioden kunnen dit proces echter verstoren waardoor na een droogteperiode de hoeveelheid stikstof in minerale vorm (nitraat en ammonium) sterk toeneemt, wat leidt tot een verhoogde uitspoeling van stikstof naar het grondwater. In dit onderzoek wordt daarom gekeken of het mobilisatie-effect ook in de droge heidevegetatie van de Groote Heide is opgetreden door stikstofconcentraties in het porievocht van de bodem en het bovenste grondwater te meten. De stikstofconcentraties van het bovenste grondwater waren reeds eerder (in maart 2019) onderzocht, maar dat kan vanwege de reistijd van het water in de onverzadigde zone nog te vroeg zijn geweest om een stikstofpiek als gevolg van de droge zomer van 2018 en 2019 in het grondwater te traceren. Daarom was herhaling van zulke metingen zinvol.

In dit onderzoek worden de volgende vragen beantwoord:

1. Is het effect van de COVID-19 lockdowns te zien aan de stikstofgehalten in mossen, porievocht en ondiep grondwater?
2. Is er invloed van droogte op de mobilisatie van stikstof in de bodem en op de stikstofconcentraties in het porievocht en het ondiepe grondwater?

Voor beantwoording van de onderzoeksvragen zijn chemische metingen verricht aan de stikstofconcentraties van het porievocht in de bodem en het bovenste grondwater en aan stikstofgehalten en stikstofisotoop verhoudingen in mosbiomassa. De geëvalueerde metingen bestrijken in totaal een periode van maart 2019 tot en met december 2021. Dit rapport gaat over de onderzoeksresultaten van de metingen in de Groote Heide. De metingen aan mossen in dit gebied zijn ook gebruikt in een grootschaliger onderzoek naar de gehalten van stikstof en ook diverse andere elementen in mossen. Daarbij zijn veel locaties in de kustduinen geanalyseerd. In dit onderzoek wordt tevens ingegaan op de effecten van de COVID-19 lockdowns op de stikstofconcentratie in mossen, waarbij de vraag wordt behandeld in hoeverre mossen als bioindicator voor stikstofdepositie te gebruiken zijn in de Nederlandse situatie. Tevens bespreekt dit rapport de patronen van diverse macro-elementen en zware metalen in mossen. Resultaten van dit onderzoek zijn gerapporteerd door Aggenbach & Geurts (2022).

2 Aanpak

2.1 Onderzoeksgebied

Het onderzoek is uitgevoerd in de Grootte Heide. Reden om in dit gebied metingen te verrichten, is dat hier de tijdelijke dip van NO_y -depositie a.g.v. de coronacrisis relatief sterk was door de nabije ligging van de (normaal) drukke snelwegen A2 en A67. Ook was het effect van lockdowns op de verkeersintensiteit op het hoofdwegennet in Noord-Brabant relatief hoog t.o.v. veel andere provincies in Nederland (Tabel 2-1). Bovendien is in dit gebied in 2018 en 2019 onderzoek uitgevoerd naar de invloed van stikstofdepositie op droge heide, waardoor de context (bodem, vegetatie, beheerhistorie) goed bekend is (Aggenbach et al. 2020). Tevens zijn in 2019 reeds metingen aan stikstof-uitspoeling naar het ondiepe grondwater in oude en geplagde heide uitgevoerd.

De reductie van stikstofdepositie door de COVID-19 lockdown kan op twee manieren worden gedetecteerd: verminderde uitspoeling naar (ondiep) grondwater en verminderde stikstof-accumulatie in mossen. Effecten van droogte op mogelijke mobilisatie van nitraat en ammonium kunnen gedetecteerd worden met het meten van het verloop van porievochtconcentraties van deze stoffen in de bodem.

Provincie	31 maart	30 juni	30 september	15 december
Drenthe	68	104	95	85
Flevoland	63	100	97	87
Friesland	66	97	97	84
Gelderland	61	97	91	81
Groningen	68	107	104	87
Limburg	56	96	92	82
Noord-Brabant	60	97	93	85
Noord-Holland	57	91	89	78
Overijssel	69	110	96	85
Utrecht	56	90	87	77
Zeeland	67	115	102	81
Zuid-Holland	66	98	93	88
NEDERLAND	61	97	92	82

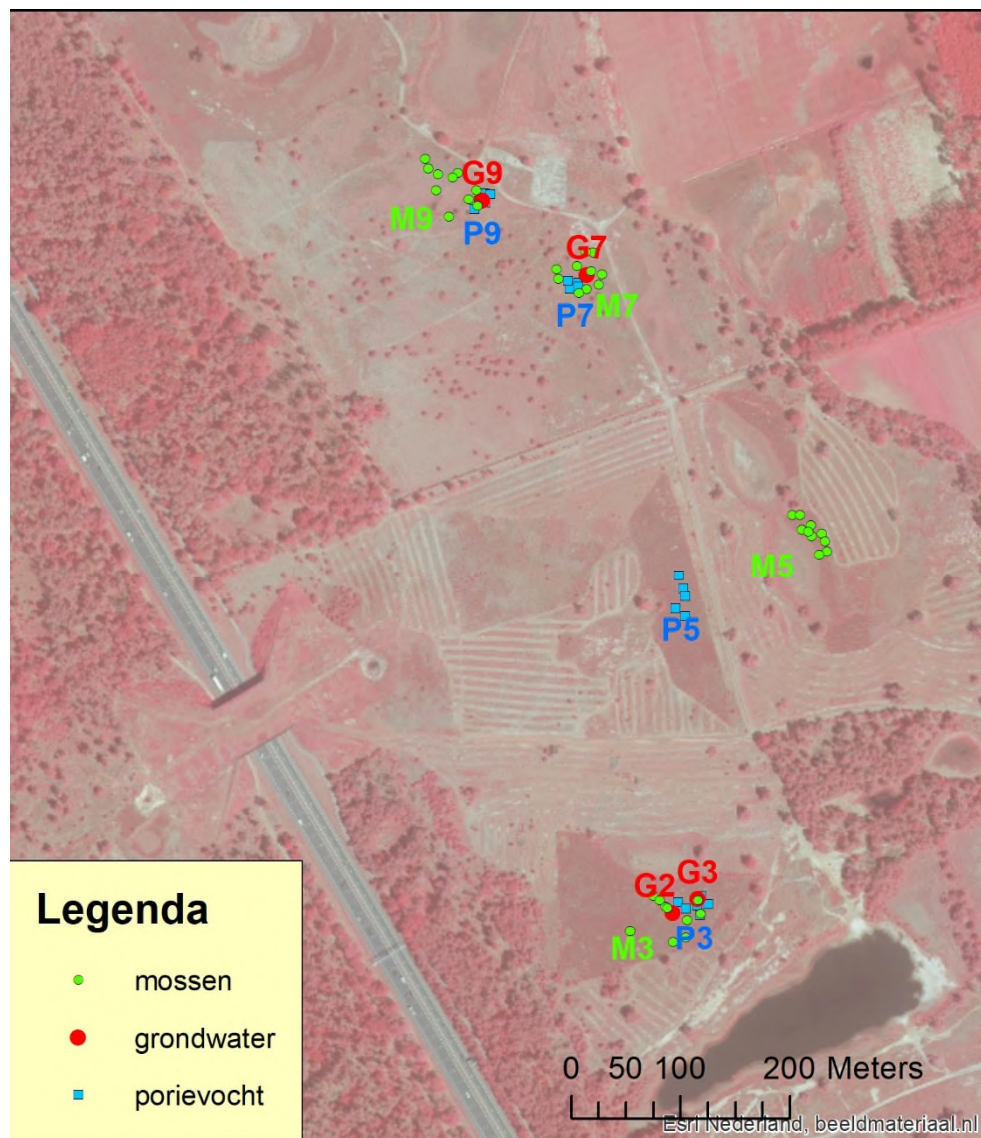
Beeld: NDW

Tabel 2-1: De index voor verkeersintensiteit voor het hoofdwegennet per provincie voor de laatste dinsdag van elk kwartaal van 2000. De index is voor week 10 van dat jaar op 100 gezet. De vermindering van de verkeersintensiteit was in Noord-Brabant sterk (Nieuwsbericht NWD 12-1-2021).

2.2 Meetlocaties

In Figuur 2-1 wordt de ligging van de meetlocaties weergegeven. In het gebied zijn vier grondwaterbuizen aanwezig met een filter van 70 cm in het bovenste grondwater. Dit betreft peilbuizen die in 2018 geplaatst zijn voor onderzoek van KWR (Aggenbach et al. 2020). In deze filterbuizen is grondwater bemonsterd om de uitspoeling van stikstof naar het grondwater te meten. Tabel 2-2 geeft de filterdiepte van deze buizen. Op vier locaties zijn 5 tot 6 porievocht samplers aangebracht op 60 cm diepte onder maaiveld voor het meten van de stikstofconcentraties in het porievocht van de bodem. Hiermee wordt de hoeveelheid nitraat, ammonium en stikstof in opgeloste organische stof gemeten. Per locatie is de exacte positie van de sampler verdeeld over plekken met hoge struikheide en plekken met alleen mosvegetatie. Deze verdeling over micro-elementen van de heterogene vegetatie is gedaan omdat uitspoeling van stikstof daarmee kan samenhangen. Drie van deze locaties bevinden hebben ook een grondwaterbuis voor bemonstering van het bovenste grondwater. Op vier locaties zijn mossen bemonsterd voor meting van het totaal stikstofgehalte als proxy voor de atmosferische stikstofdepositie. Voor elke locatie is op tien plekken mos verzameld voor een mengmonster. Drie van de vier moslocaties bevinden zich op een locatie met een grondwaterbuis en porievochtsamplers.

De locaties zijn verdeeld over geplagde delen (geplagd in najaar 2005/ voorjaar 2006) waar een droge heide is ontstaan (locaties 2, 3 en 5) en oude droge heide die niet geplagd is (locaties 7 en 9) (Figuur 2-1). De vegetatie heeft een hoge bedekking van struikheide en bij niet geplagde locaties heeft Pijpenstrootje deels een hoge bedekking. Tussen de Struikheide planten komen open plekken voor die gedomineerd worden door Grijs kronkelsteeltje op de geplagde locaties en Heideklauwtjesmos op niet geplagde locaties. Laatstgenoemde soort komt ook lokaal voor in de geplagde heide.



Figuur 2-1: Meetlocaties voor stikstofuitspoeling naar het bovenste grondwater (G.), porievochtmonsters voor stikstofuitspoeling uit de bodem (P..) en stikstof gehalte mossen (M..) in de Grote Heide. Geplagde locaties zijn G2, G3, P3, P5, M3 en M5; locaties in oude heide zijn G7, G9, P7, P9, M7 en M9. Voor de mosmonsters worden sublocaties aangegeven waarvan mengmonsters zijn gemaakt.

Tabel 2-2: Filterdiepte van de grondwaterbuizen voor bemonstering van het bovenste grondwater.

Locatie	beheer	bovenkant filter	onderkant filter
		cm -mv	cm -mv
G2	geplagd	352	422
G3	geplagd	243	313
G7	oud	198	268
G9	oud	247	317

2.3 Metingen in ondiepe grondwater en porievocht

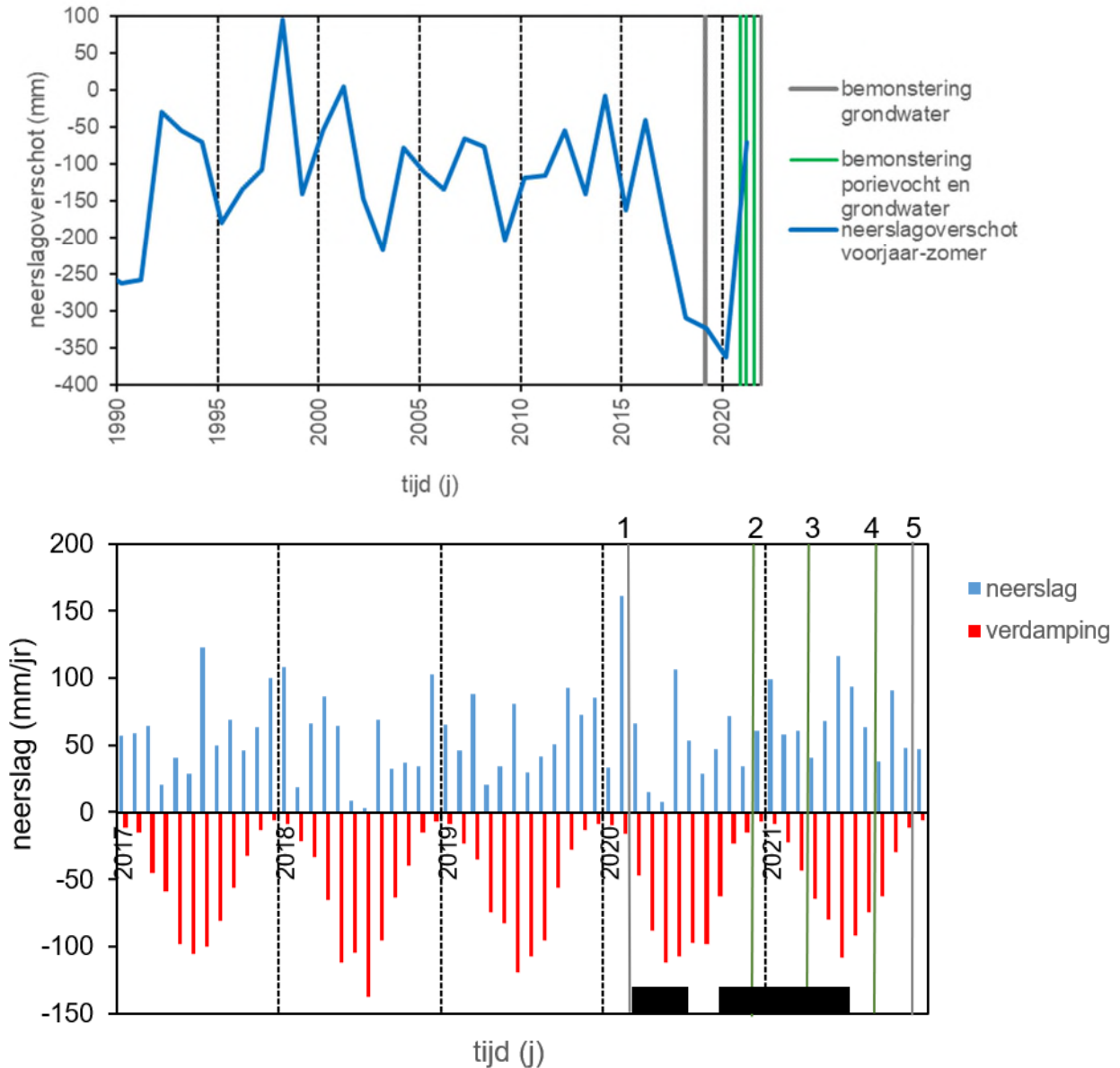
De grondwaterbuizen voor bemonstering van het bovenste grondwater zijn in april 2018 geïnstalleerd. Voor porievocht bemonstering waren in eerste instantie in juli 2020 macrorhizons geïnstalleerd. Omdat deze geen goed contact maakten met de harde bodem (en daardoor geen bodemvocht konden aantrekken) zijn ze op 11 augustus 2020 vervangen door ceramische cups die op 60 cm diepte zijn geïnstalleerd. Dit is onder de inspoelingslaag van humus en ijzer van de podzolbodem (B-laag) en zodoende geven metingen van stikstofconcentraties inzicht in de stikstofuitspoeling uit de bovenliggende bodemhorizonten (strooisel, Ah, E en B). In *Tabel 2-3* worden de monstermomenten weergegeven. De grondwaterbuizen zijn voor het BTO-onderzoek van KWR (Aggenbach et al. 2020) op 5 maart 2019 bemonsterd. Voor het huidige onderzoek was de planning om vanaf de zomer van 2020 gedurende 1 jaar met een frequentie van eens per 4 maanden de grondwaterbuizen en porievochtsamplers te bemonsteren. Door de sterke droogte in de zomer van 2020 was het pas mogelijk porievocht te bemonsteren op 2-3 december 2020. Helaas bleken toen drie van de vier grondwaterbuizen nog steeds droog te staan als gevolg van sterk gedaalde grondwaterstanden (door de droogte van 2018, 2019 en 2020). Ook gaven toen slechts 7 van 21 porievochtsamplers voldoende water voor chemische analyses. Het programma van bemonstering is toen aangepast.

In Figuur 2-2 worden de monstermomenten in relatie tot de COVID-19 lockdown en de meteorologische condities weergegeven. De lockdown bestond tijdens de onderzoeksperiode uit twee perioden met sterk beperkende maatregelen. Die betroffen de periode maart 2020 t/m juni 2020 en september 2020 t/m juni 2021. De monsterperiode startte in een periode van drie extreem droge jaren (2018, 2019, 2020) en eindigde in een relatief nat jaar (2021). Het eerste monstermoment (5 maart 2019) vond plaats na de droge zomer en winter van 2018. De tweede bemonstering vond plaats na een droog voorjaar, zomer en najaar in 2019. De derde tot en met vijfde bemonstering vond plaats in het relatief natte jaar 2021 (nat voorjaar, zomer en najaar).

In de grondwater- en porievochtmonsters zijn de $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$, NH_4^+ en DON-concentratie bepaald om de stikstof-uitspoeling te kwantificeren. DON betreft de stikstof die gebonden is in opgeloste organische stof. We gaan ervan uit dat de NO_2^- concentratie verwaarloosbaar laag is en stellen daarom de concentratie NO_3^- gelijk aan die van de meting van $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$. Op de meeste meetmomenten (december 2020 tot december 2021) is ook de chloride concentratie gemeten. Door deze te vergelijken met de concentratie in de neerslag (data RIVM) kan afgeleid worden in hoeverre indamping van de geïnfiltreerde neerslag optreedt. De chemische analyses zijn uitgevoerd door het CBLB van Wageningen University & Research.

Tabel 2-3: Monstermomenten voor grondwater en porievocht.

Datum	2019-03-05	2020-12-02	2021-03-24	2021-08-16	2021-12-15
Grondwater	J	J	J	J	J
Porievocht		J	J	J	



Figuur 2-2: COVID-19 lockdowns en meteorologische condities in relatie tot de monstermomenten van grondwater en porievocht Boven: het verloop van het neerslag-verdampingoverschot (neerslag minus potentiële Makkink verdamping) in de periode van 1 maart tot 1 september. Onder: het verloop van de maandelijkse neerslag en potentiële Makkink verdamping sommen. Periode van COVID-19 lockdowns: zwarte balk. Weergave van momenten van bemonstering: grijze verticale lijn = grondwater; groene verticale lijn = grondwater en porievocht. Meteodata zijn gemeten op meteostation Eindhoven (data KNMI).

2.4 Berekening stikstofuitspoeling

De uitspoeling van stikstof naar het grondwater (in kg N/ha/jr) wordt berekend uit de gemeten stikstofconcentratie van het grondwater (mg/l) vermenigvuldigd met de grondwateraanvulling (mm/jr). De stikstof-concentratie wordt berekend uit de som van de concentraties van nitraat, ammonium en DOC. Voor de grondwateraanvulling wordt een empirische bepaalde relatie tussen neerslag en grondwateraanvulling gebruikt, die is afgeleid uit veldonderzoek in kustduinsystemen (Stuyfzand 2016). De jaarlijkse aanvulling (R_N , mm/jr) is berekend als:

$$R_N = p \ln(P) - c \quad \text{Vergelijking 1}$$

Waarbij P de jaarlijkse neerslag is in open veld (mm/jr), p en c vegetatie specifieke constanten zijn (respectievelijk 720 en 4370 voor heidevegetatie; Stuyfzand 2016). Voor neerslag zijn de dagsommen gebruikt van meteostation Eindhoven (data KNMI). De grondwateraanvulling is bepaald voor de periode waarop het bemonsterde grondwater is geïnfiltreerd. Dit is gedaan omdat de grondwateraanvulling door tijd variabel is. De periode van infiltratie van de vijf monsternamen bestrijken de jaren 2017 tot en met 2021. Daar had het jaar 2018 de laagste aanvulling en 2021 de hoogste (Tabel 2-4). De aanvullingen in 2019 en 2020 waren ook laag. Voor het moment van monsternamen is berekend hoeveel water aanwezig is tussen de onderkant van de filter en het bodemoppervlak. Daarbij is de hoeveelheid water in de verzadigde zone (uitgaande van een porositeit van 0.3) en de hoeveelheid capillair water in de onverzadigde zone (uitgaande van een gemiddeld watergehalte van 8 % drooggewicht en een bulkdichtheid van de bodem van 1.6 kg/dm³). Voor de onderkant van de filter is bepaald wanneer het grondwater is geïnfiltreerd grondwater (t_0). Over de periode t_0 tot t_0+1 jaar is vervolgens de aanvulling berekend uit de dagsommen van de neerslag en Vergelijking 1. Opgemerkt wordt dat deze benadering van grondwateraanvulling een grove benadering is en geen rekening houdt met hoe de weercondities exact hebben doorgewerkt op de verdamping.

Tabel 2-4: Jaarlijkse neerslag en grondwateraanvulling onder droge heide op basis van de neerslaggegevens van meteostation Eindhoven (data KNMI).

jaar	neerslag	grondwateraanvulling
	mm/jr	mm/jr
2016	837	475
2017	720	367
2018	630	271
2019	708	354
2020	684	330
2021	822	462

2.5 Chemische metingen mossen

Mossen zijn bemonsterd op twee momenten: 1 juli 2020 en 23 juli 2021. In Figuur 2-3 worden de monstertmomenten in relatie tot de COVID-19 lockdowns en meteorologische condities weergegeven.

De eerste bemonstering (1 juli 2020) vond plaats ca. drie maanden na start van de eerste lockdown en na een droog voorjaar en ook droge zomers in 2018 en 2019. De tweede bemonstering (23 juli 2021) viel samen met het einde van de tweede lockdown en volgende op een relatief nat voorjaar. Vooraf aan de tweede bemonstering was er een totale lockdown duur van ca. 13 maanden. Door de variatie van het weer trad in het voorjaar voorafgaand aan het eerste monstertmoment veel langer droogtestress op dan bij het tweede moment.

Het stikstofgehalte van verschillende veel diverse voorkomende pleurocarpe mossoorten is een betrouwbare 'proxy' voor totale N-depositie. Op twee momenten (interval 1 jaar) is Heideklauwtjesmos (*Hypnum jutlandicum*) bemonsterd op de vier locaties van ca. 50x50 m (één meer dan gepland). Hierbij is de monstermethode van het internationale ICP Vegetation programma gevolgd (Harmsen et al. 2014, WGE 2014). Op elke locatie zijn 10 subsites bemonsterd voor een mengmonster. Van de mossen zijn conform de ICP-methode de groene en bijna groene delen geselecteerd die in afgelopen 2-3 jaar zijn geproduceerd (2-3j monster). Daarnaast is een apart monster samengesteld van de mostoppen (5-10 mm) die de recente groei van ca. 1 jaar representeren (1j monster). Dit laatste type monster is geanalyseerd omdat de effecten van de COVID-19 lockdown mogelijk sneller doorwerken in de jonge delen van het mos. Merk op dat het 2-3j monster overlapt met het 1j monster.

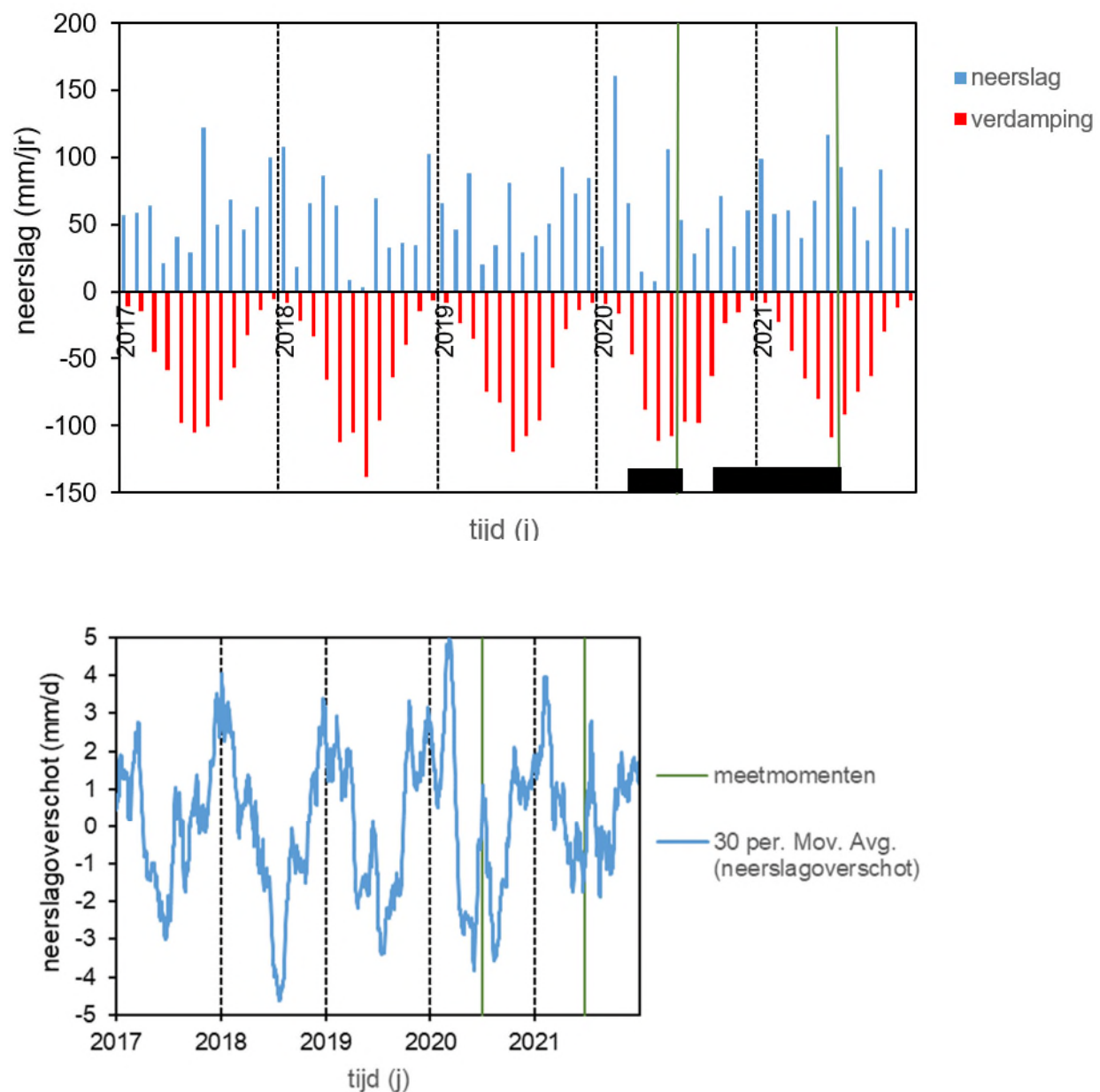
Na drogen op 40°C gedurende 48 uur en malen met een kogelmaler zijn de volgende chemische analyses uitgevoerd:

- N en C met Elemental Analyser;
- macro-elementen Ca, K, Mg, Na, P, Si en zware metalen As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Sb, Ti, V, Zn met ICP-OES (ARCOS) na destructie met HNO₃ en H₂O₂;
- analyse stabiele N isotopen met IRMS.

De analyses zijn uitgevoerd door het laboratorium van de Radboud Universiteit.

Naast het totaal stikstof-gehalte is ook de verhouding van de stabiele isotoop ¹⁵N met ¹⁴N gemeten. De verhouding (R) van ¹⁵N:¹⁴N in mossen wordt sterk bepaald door de isotoopverhouding van de emissiebronnen voor stikstof. De isotoopverhouding wordt doorgaans uitgedrukt als de afwijking van een vaste referentie (Wenen) voor de isotoopverhouding in de atmosfeer met δ¹⁵N (in promille). In het algemeen leidt een hoger aandeel van NH_x emissies in de N-depositie door agrarische activiteiten tot een lagere δ¹⁵N met negatieve waarde. Een hoger aandeel van NO_y leidt juist tot een hogere δ¹⁵N.

Dit onderzoek richt zich vooral op de patronen in stikstofgehalte en δ¹⁵N in de mosmonsters. Als een interessante bijvangst van dit onderzoek wordt ook gekeken naar gehalten van andere macronutriënten (fosfor en kalium) en ratio's daarvan met stikstof. De analyses van de zware metalen en andere macro-elementen dan N, P en K worden niet in dit rapport behandeld, maar wel besproken in een ander rapport samen met metingen aan mossen in de kustduinen en buitenlandse referentiegebieden met een lage stikstofdepositie (Aggenbach & Geurts 2022).



Figuur 2-3: COVID-19 lockdowns en meteorologische condities in relatie tot de monstertmomenten van mossen. Boven: het verloop van de maandelijkse neerslag en potentiële Makkink verdampingsommen in de periode van 1 maart tot 1 september. Onder: het 30 daags voortschrijdend gemiddelde van het neerslag overschot (verschil neerslag - potentiële verdamping). Periode van COVID-19 lockdowns: zwarte balk. De groene verticale lijn geven de momenten van bemonstering weer. Meteodata zijn gemeten op meteostation Eindhoven (data KNMI).

3 Resultaten

3.1 Stikstofconcentraties in porievocht en bovenste grondwater

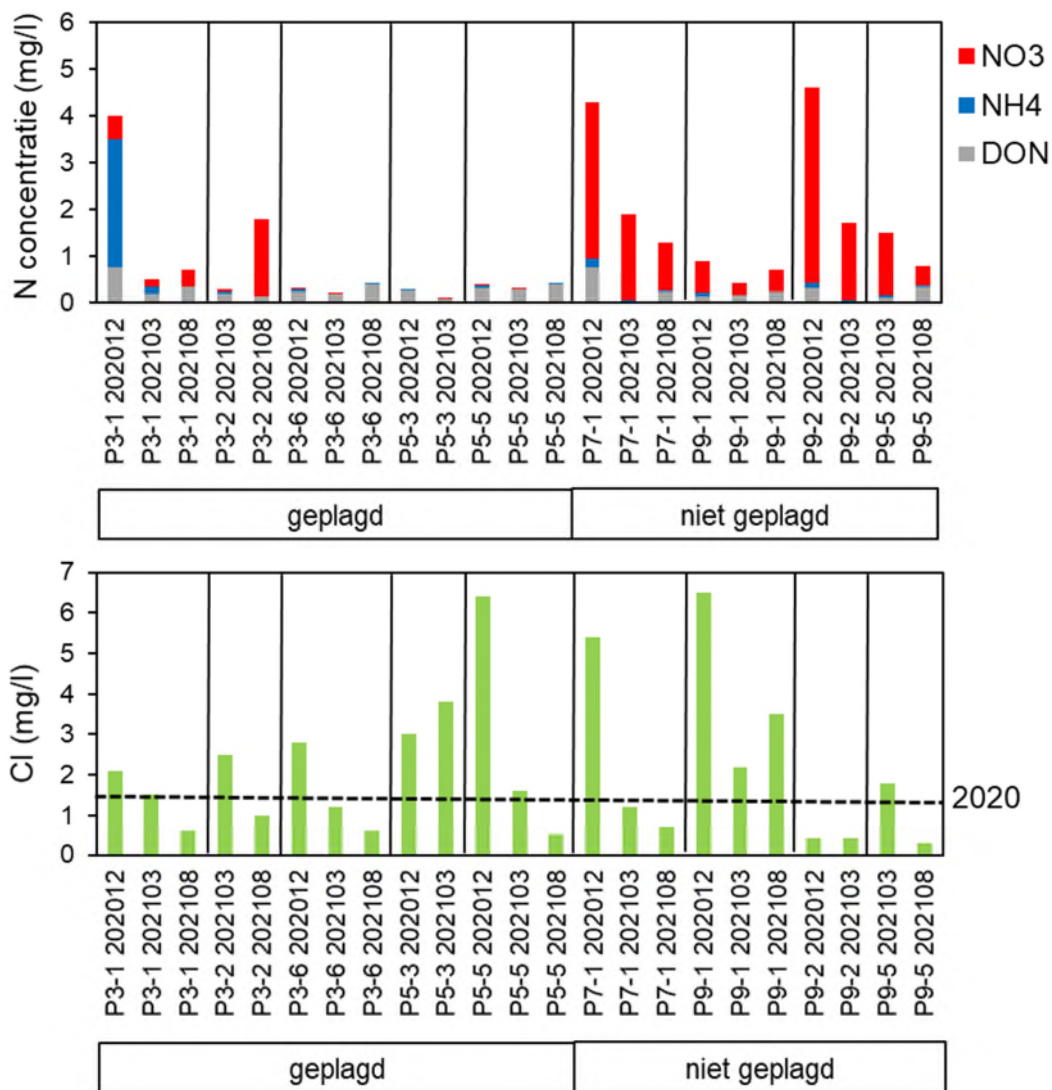
In Figuur 3-1 (boven) worden de stikstofconcentraties in het porievocht op 60 cm diepte en het bovenste grondwater weergegeven. De totale stikstofconcentratie in het porievocht van de geplagde locaties is meestal laag en vaak is DON dan de dominante stikstoffractie. Locatie P3-1 en P3-2 hebben op bepaalde momenten een veel hogere stikstofconcentratie. Locatie P3-1 komt dat door een hoge ammoniumconcentratie (NH_4^+) en op locatie P3-2 door een hoge nitraatconcentratie (NO_3^-). In tegenstelling tot deze twee locaties vertonen de andere locaties geen opvallende fluctuaties. Bij niet geplagde locaties worden vaak hogere nitraatconcentraties en daardoor ook hogere totaal stikstofconcentraties gemeten dan op de geplagde locaties. Hier is nitraat de dominante stikstoffractie. De concentraties van NH_4^+ en DON zijn laag. Twee monsters van niet geplagde locaties hebben in december 2020 een hoge NO_3^- concentratie en in een ander monster minder hoog. Vanaf december 2020 en maart 2021 treedt bij drie van de vier niet geplagde meetlocaties een sterke toename op. Het patroon van stikstofconcentraties vertoont geen samenhang met de positie van locaties of de vegetatiestructuur (onder hoge struikheide of mos).

In Figuur 3-1 (onder) worden de chloride concentraties in het porievocht weergegeven. Hierin is tevens de gemiddelde concentratie weergegeven in de neerslag voor 2020 (1.63 mg/l; meetstation Vredepeel, data LMRe, RIVM). Omdat chloride niet gebonden wordt aan de bodem kan uit de concentratie worden afgeleid in hoeverre de geïnfiltreerde neerslag is ingedampt. Te zien is dat de op zowel geplagde als niet geplagde locaties sterk verschillen waarbij op de meeste locaties de waarden in december 2020 het hoogst zijn. Op dat moment is de concentratie iets tot ca. 4 maal zo hoog als de gemiddelde concentratie van de neerslag in 2020. Hieruit kan worden afgeleid dat in december 2020 water is bemonsterd dat iets tot sterk is ingedampt. Op latere meetmomenten is de chloride concentratie deels hoger en deels lager dan de gemiddelde concentratie van de neerslag. De laagste porievochtconcentraties (ca. 0.5 mg/l) komen overeen met de laagste maandwaarde van de neerslag. In Figuur 3 1 (onder) en Figuur 3-2 is te zien dat de stikstof-totaal concentratie geen duidelijke relatie heeft met de chloride concentratie. Dat geldt ook voor de nitraat concentratie. Dit betekent dat indamping geen verklarende factor is voor de variatie in stikstofconcentraties in het porievocht.

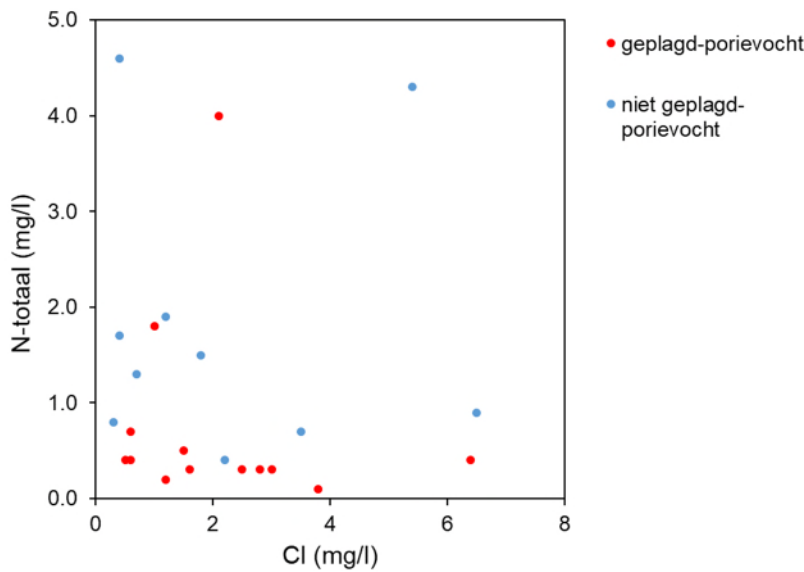
In het bovenste grondwater van twee geplagde locaties zijn de concentraties nitraat, ammonium zeer laag op alle monsternmomenten en vertonen ze geen trend. DON is op de locaties de belangrijkste stikstoffractie (Figuur 3-3 boven). In het grondwater van de niet geplagde locaties worden hogere nitraatconcentraties gemeten. De twee locaties vertonen daarbij een tegengestelde trend. Locatie G7 laat een sterke afname van de nitraatconcentratie zien in het grondwater, wat synchroon loopt met de trends van de porievocht concentraties op deze locatie. Op locatie G9 nam de nitraatconcentratie in het grondwater toe, terwijl hier een afname optrad in het porievocht. Opvallend is dat op locatie G9 de DON-concentratie afneemt.

Ook in het ondiepe grondwater is de chloride concentratie gemeten (Figuur 3 3 onder). Net als voor het porievocht, geldt dat de stikstof concentratie in het bovenste grondwater geen relatie heeft met de chloride concentratie en dat dus variatie in indamping van de geïnfiltreerde neerslag niet de variatie in stikstof concentratie kan verklaren. De concentraties liggen deels boven en deels rond gemiddelde jaarconcentraties van de neerslag. Die van de geplagde locatie G2 en G3 zijn gemiddeld hoger dan die van de niet geplagde locaties. Dit kan mogelijk duiden op sterkere indamping. Omdat de locaties G2 en G3 het dichtst bij de snelweg A2 liggen kan hier echter ook een hogere depositie van strooizout een rol spelen (zie Figuur 2-1). Door verkeer wordt het zout (in droge en natte vorm) verstoven.

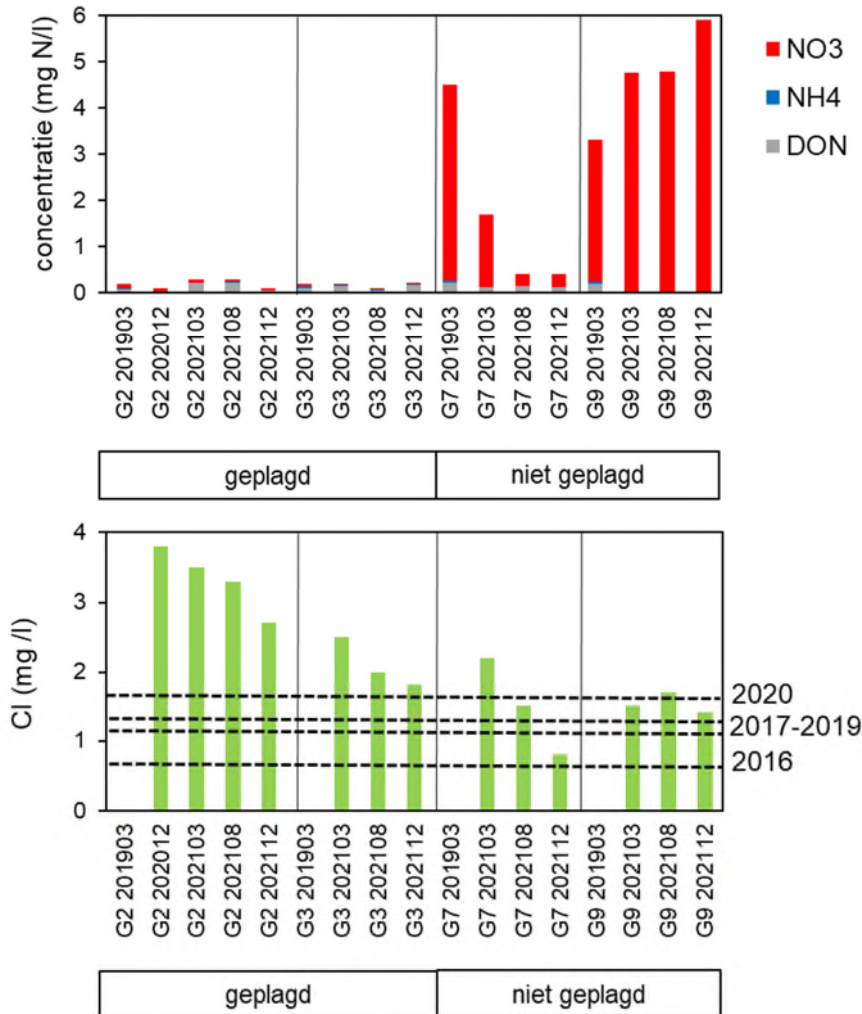
Samenvattend: in geplagde locaties zijn de stikstofconcentratie van het porievocht en bovenste grondwater doorgaans laag en spoelt stikstof vooral in de vorm van DON uit. Op niet geplagde locaties is de nitraatconcentratie zowel in het porievocht en grondwater relatief hoog. Hier spoelt stikstof vooral als het mobiele nitraat uit naar het grondwater. Trends in de tijd van de afzonderlijke meetlocaties zijn niet altijd eenduidig. Alleen voor het porievocht van de niet geplagde locaties is een eenduidig dalende trend van de nitraatconcentratie aanwezig.



Figuur 3-1: Concentraties in porievocht van nitraat (NO₃⁻), ammonium (NH₄⁺) en stikstof in opgeloste organische stof (DON) (boven) en van chloride (Cl) (onder). In de grafiek met de Cl-concentratie geeft de horizontale lijn de gemiddelde concentratie van het jaar 2020 weer van de neerslag van meetstation Vredepeel (data LMRe, RIVM). De labels onderaan de grafiek geven de locatie (P..) en het jaartal en maand van monstername.



Figuur 3-2: De relatie van de stikstof totaal concentratie met de chloride concentratie in porievocht.

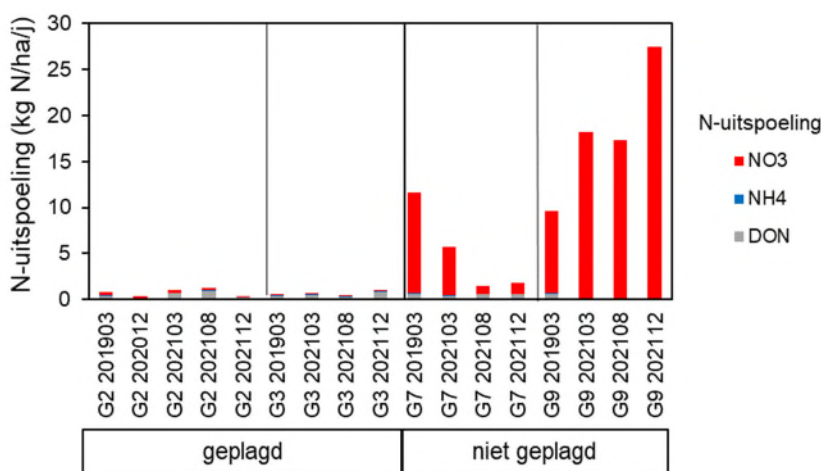


Figuur 3-3: Concentraties in het bovenste grondwater van nitraat (NO_3^-), ammonium (NH_4^+) en stikstof in opgeloste organische stof (DON) (boven) en van chloride (onder). In de grafiek met de Cl-concentratie geeft de horizontale lijn de gemiddelde concentratie van de jaren 2016 tot en met 2020 weer van de neerslag van meetstation Vredepeel (data LMRe, RIVM). De labels onderaan de grafiek geven de locatie (G..) en het jaartal en maand van monsternamen.

3.2 Stikstofuitspoeling naar het bovenste grondwater

De stikstofuitspoeling verschilt sterk voor niet en wel geplagde locaties. Bij geplagde locaties is deze zeer laag (0.3-1.3 kg N/ha/jr) en op niet geplagde locaties sterk variabel (2-28 kg N/ha/jr) en vaak veel hoger dan op geplagde locaties. Op de niet geplagde locaties draagt nitraat het meest bij aan de stikstofuitspoeling (Figuur 3-2).

Op geplagde locaties spoelt ca. 1 tot 7 % van de stikstofdepositie (OPS-model, data RIVM) uit en accumuleert dus het overgrote deel van de atmosferische stikstofaanvoer in het heide ecosysteem. De stikstofuitspoeling op niet geplagde locaties bedraagt ca. 36 tot 175 % van de stikstofdepositie.

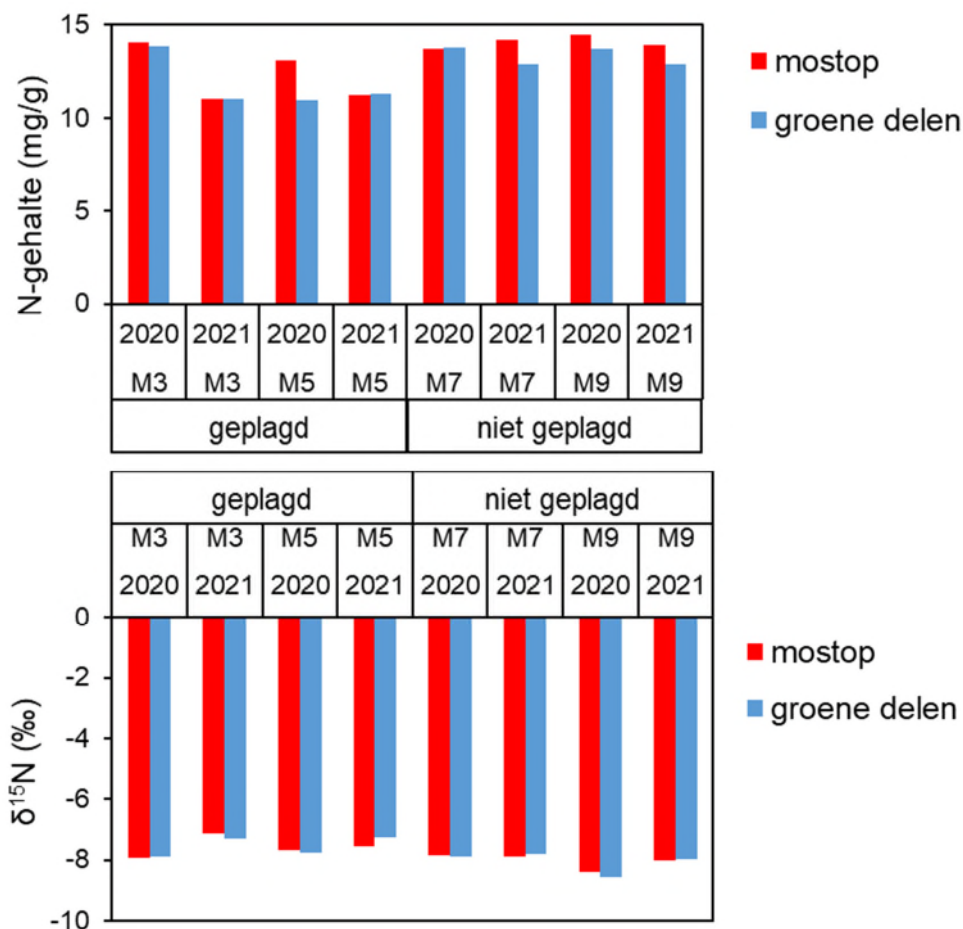


Figuur 3-4: Stikstofuitspoeling naar het bovenste grondwater met onderscheid voor nitraat (NO_3^-), ammonium (NH_4^{++}) en stikstof in opgeloste organische stof (DON). De labels onderaan de grafiek geven de locatie (G..) en het jaartal en maand van monsternamen. De percentages en jaartallen bovenin de grafiek geven de bijdragen van betreffende jaren aan dat het bemonsterde water is geïnfiltreerd.

3.3 Stikstofgehalte en isotoopsignatuur in mosbiomassa

Het stikstofgehalte in de groene delen van de mosbiomassa die de afgelopen 2-3 jaar is gevormd, bedraagt 10.9 tot 13.8 mg/g. Die van de mostoppen heeft een vergelijkbare range (11.0-14.4 mg/g). Het stikstofgehalte verschilt weinig tussen groene delen en de toppen. Mostoppen hebben deels een iets hoger gehalte. Locatie M3 vertoont een afname in zowel de groene delen als mostoppen en locatie M5 alleen voor de mostoppen. Voor de locaties M7 en M9 zijn de verschillen tussen de jaren gering.

De stikstof isotoopsignatuur, $\delta^{15}\text{N}$, is laag en duidt op een groot aandeel van NH_x in de stikstofdepositie. De waarden verschillen weinig tussen de locaties. $\delta^{15}\text{N}$ verschilt niet voor de mostoppen en groene delen. De locaties M2, M3 en M9 vertonen een geringe toename tussen 2020 en 2021 (waarde werd minder negatief).

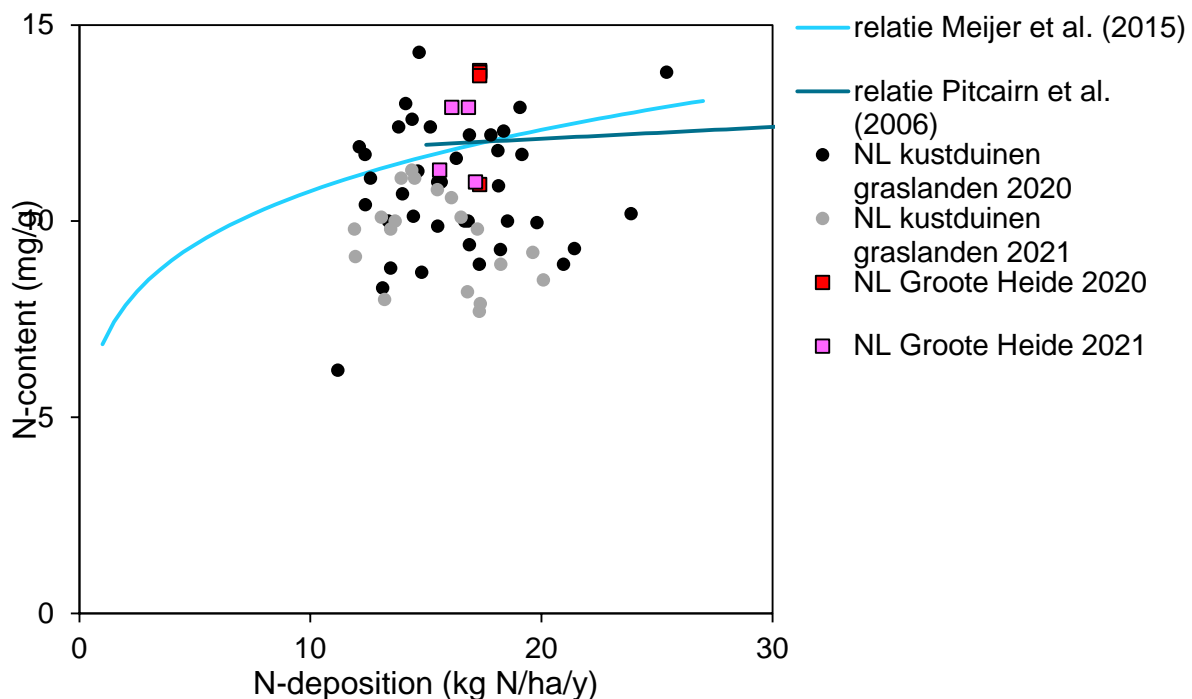


Figuur 3-5: Stikstof gehalte (N) en stikstof isotoop signatuur ($\delta^{15}N$) in de mosbiomassa in de mosmonsters van Groote Heide uit 2020 en 2021 met onderscheid voor de mostoppen (1j) en de groen tot bijna groene delen (2-3j).

3.4 Relatie tussen stikstofgehalte in mos en stikstofdepositie

Figuur 3-6 toont de relatie tussen de gemodelleerde bulk stikstofdepositie en de stikstofconcentratie in de mosmonsters (groene delen, 2-3 jaar oud) verzameld in Nederland in 2020 en 2021. Het betreft de mosmonsters uit de Groote Heide en uit graslanden in de kustduinen (van Zeeland t/m de Waddeneilanden). De gemodelleerde totale stikstofdepositie betreft die van het kalenderjaar voor het jaar van de monsternamen en is berekend met het nationale OPS-model (RIVM). De grafiek laat ook twee eerder vastgestelde regressievergelijkingen zien die zijn gebaseerd op metingen in korte vegetatie uit Finland, Niedersachsen, Frankrijk, Zwitserland en Oostenrijk (Meijer et al. 2015) en uit het Verenigd Koninkrijk (Pitcairn et al. 2006). Voor beide regressielijnen geldt dat in het hoge bereik van stikstofdepositie het aandeel van gereduceerde stikstof en droge depositie hoog is. Dit is vergelijkbaar met de Nederlandse situatie.

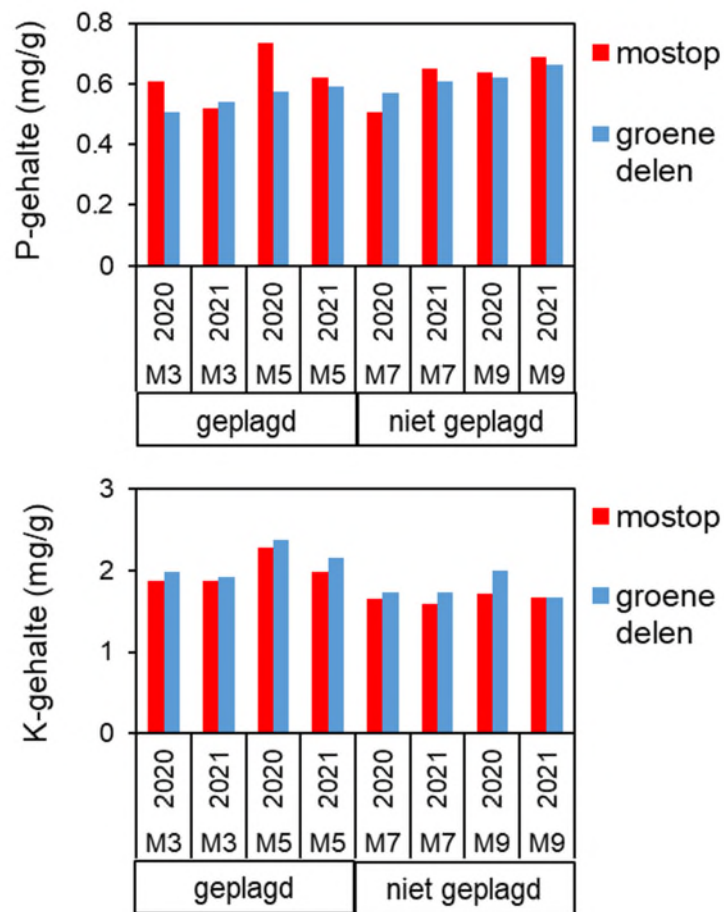
Te zien is dat het stikstofgehalte van de mosmonsters uit de Groote Heide in het hoge deel van het bereik zitten dat is gemeten in duingraslanden. Ze zitten beide rond de regressielijnen en volgen daarmee de eerder vastgestelde relaties tussen stikstofdepositie en stikstofgehalte in mossen voor korte vegetaties.



Figuur 3-6: De relatie tussen gemodelleerde stikstofdepositie en stikstofgehalte in groene mosbiomassa van 2-3 jaar oud van de in Nederland verzamelde mosmonsters uit de Groote Heide en de kustduinen (jaren 2020 en 2021). Regressielijn Meijer et al. (2015): korte vegetatie in Finland, Niedersachsen, Frankrijk, Zwitserland en Oostenrijk. Regressielijn Pitcairn et al. (2006): korte vegetatie in UK..

3.5 Macronutriënten in mossen

Naast stikstof zijn fosfor (P) en kalium (K) belangrijke macronutriënten voor mossen. In Figuur 3-7 worden de gehalten van deze nutriënten weergegeven. De gehalten van fosfor en kalium verschillen tussen locaties niet sterk. Wel is het kaliumgehalte van de mossen op geplagde locaties iets hoger dan op ongeplagde locaties. Het gemeten fosforgehalte in mossen is lager het kaliumgehalte is veel lager is dan gehalten gemeten in bovengrondse vaatplantbiomassa (data KWR). Bij fosfor hebben de toppen vaak een iets hoger gehalte dan de groene delen, terwijl bij kalium dit meestal andersom het geval is. Er zijn geen eenduidige veranderingen opgetreden tussen 2020 en 2021.

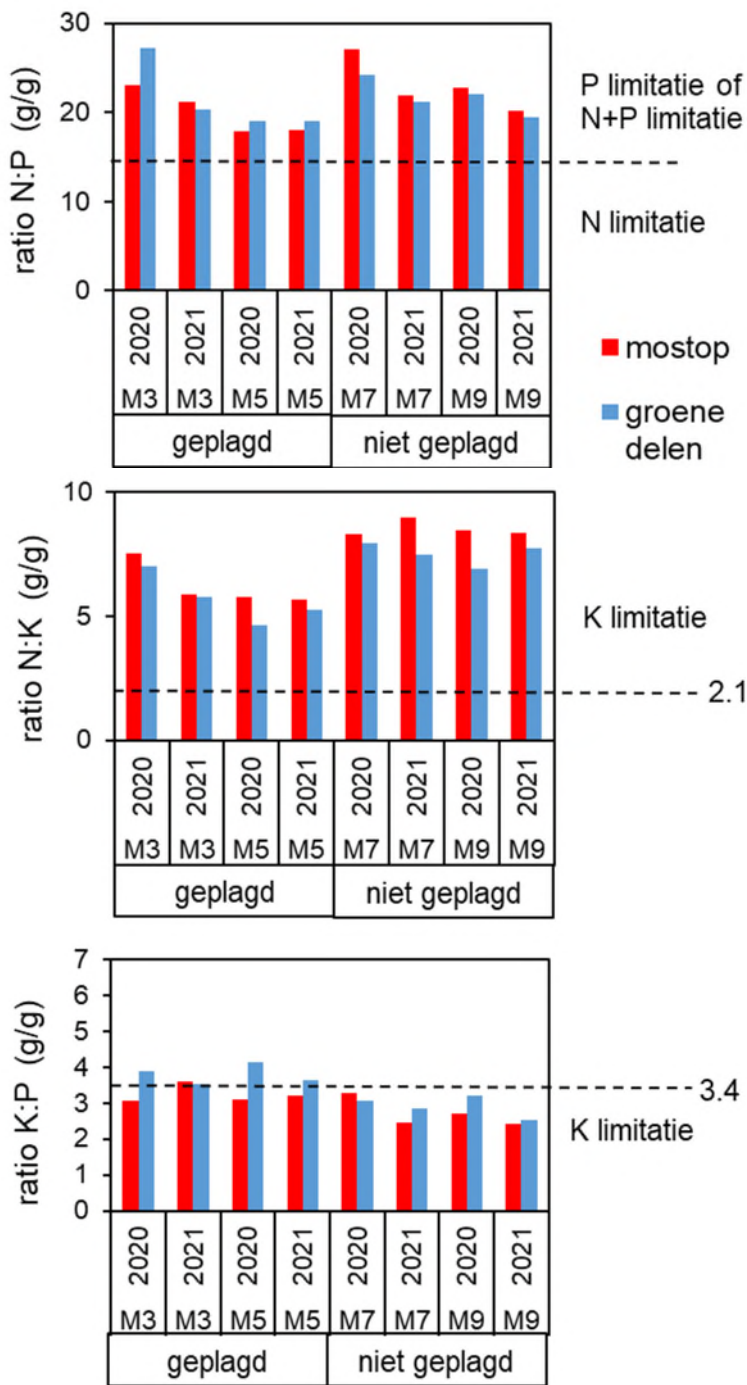


Figuur 3-7: Fosfor (P) en kalium (K) gehalten en ratio's van N:P, N:K en P:K in de mosmonsters van Groote Heide uit 2020 en 2021 met onderscheid voor de mostoppen (1j) en de groen tot bijna groene delen (2-3j).

Er is ook gekeken naar ratio's van N:P, N:K en P:K (Figuur 3-8). Voor de bovengrondse biomassa van vaatplanten geven deze ratio's een indicatie voor welk nutriënt limiterend is voor de productiviteit. Alhoewel we niet goed weten welke waarde in mossen duiden op nutriëntenlimitatie zijn in de grafieken de grenswaarden voor ratio's voor bovengrondse vaatplantbiomassa weergegeven die zijn vast gestel in onderzoek van Olde Venterink et al. (2003). Een N:P ratio van > 14.5 kan duiden op P-limitatie of colimitatie van P en N; een N:P ratio van < 14.5 op N-limitatie of colimitatie van P en N. Een N:K ratio van > 2.1 en een K:P ratio < 3.4 kunnen duiden op K-limitatie.

De N:P ratio's liggen alle in een hoge range van 18 tot 28 g/g. Bij alle locaties is de N:P ratio groter dan 14.5 wat in geval van vaatplanten zou duiden op P-limitatie of colimitatie van N en P. Op niet geplagde locaties is de N:P ratio van de mostoppen iets hoger dan de groen delen, terwijl er op geplagde locaties deze niet eenduidig verschilt. Tussen 2020 en 2021 neemt de ratio op drie locaties af, terwijl die van locatie M7 niet veranderd.

Voor de ratio N:K zitten alle waarden in het bereik van K-limitatie en zijn t.o.v. metingen in bovengrondse vaatplantbiomassa hoog (data KWR). De ratio P:K zitten altijd in het bereik voor K-limitatie op de niet geplagde locaties en deels op geplagde locaties. De K:P ratio's liggen ca. een factor 10 lager dan van metingen in bovengrondse vaatplantbiomassa (data KWR). De mostoppen vaak hebben een iets hogere N:K ratio dan de groene delen, terwijl de mostoppen juist een lagere K:P ratio hebben. Alleen op locatie M3 verandert de ratio N:K duidelijk tussen 2020 en 2021 (afname) als gevolg van een afname van het stikstofgehalte. De K:P ratio neemt iets af op beide niet geplagde locaties en vertoont geen duidelijk verandering bij beide geplagde locaties.



Figuur 3-8: Ratio's van N:P, N:K en P:K in de mosmonsters van Groote Heide uit 2020 en 2021 met onderscheid voor de mostoppen (1j) en de groen tot bijna groene delen (2-3j). De stippellijnen geven grenswaarden voor de nutriëntenlimitatie in vaatplanten op basis van Olde Venterink et al. (2003).

4 Discussie

4.1 Invloed van COVID-19 lockdowns op stikstofgehalte en isotopsignatuur in mossen

Door de COVID-19 lockdowns kan de atmosferische depositie van stikstof afnemen als gevolg van minder verkeer en industriële activiteit. Omdat een COVID-19 lockdown vooral NO_y -emitterende activiteiten (verkeer, industrie) en veel minder NH_x -emitterende activiteiten (landbouw) beïnvloedt, zal de verhouding tussen geoxideerd en gereduceerd stikstof afnemen. Zo nam het verkeer in de eerste lockdown af met 50-65% en in heel 2020 met 20-30% (bron: CBS, NDW). De afname van verkeersintensiteit droeg sterk bij (ca. 50%) aan de daling van de emissies van NO_y . Daarnaast ging de maximumsnelheid op 16 maart 2020 overdag omlaag naar 100 km/u, al levert dit minder dan een procent reductie van stikstofneerslag op, het geen verwaarloosbaar t.o.v. de reductie van NO_y -emissie door verminderd wegverkeer als gevolg van de lockdowns. Omdat NH_x uit de landbouw een lagere $\delta^{15}\text{N}$ heeft dan NO_y die bij verbranding vrijkomt, zou een afname van het verkeer zorgen voor een lagere NO_y -uitstoot en dus voor een verlaging de isotoopverhouding $^{15}\text{N}:^{14}\text{N}$ en daarmee voor een verlaging van $\delta^{15}\text{N}$.

Op het eerste meetmoment (1 juli 2020) van stikstof in mossen was er nog maar een geringe invloed van de eerste COVID-19 lockdown (ca. 3 maanden voorafgaand aan het meetmoment). De duur van deze lockdown periode is kort t.o.v. de periode waarin de bemonsterde mosbiomassa is gevormd. De bemonsterde groene delen betreffen de biomassa die de afgelopen 2-3 jaar is gevormd en de mostoppen betreffen de biomassa van ca. het laatste jaar. Aan het tweede meetmoment (23 juni 2021) ging een langere duur van COVID-19 lockdowns vooraf (13 maanden). Die duur overlapt aanzienlijk met de groeiperiode van de groene delen (ca. eenderde tot de helft) en grotendeels met die van de mostoppen. De analyseresultaten laten zien dat op twee van de vier locaties een afname van het stikstof gehalte is opgetreden en op de twee andere locaties geen duidelijke verandering plaatsvond. Opvallend is dat de locatie met de duidelijkste afname (M3) het dichtst bij de snelweg A2 ligt (Figuur 2-1), dus in een zone waarin de bijdrage van verkeer aan de stikstofdepositie groter kan zijn dan bij de andere verder weg gelegen locaties. Omdat in Noord-Brabant de afname van de verkeersintensiteit op het hoofdwegennet relatief sterk was t.o.v. veel andere provincies (Tabel 2-1; Nieuwsbericht NWD 12-1-2021), is aannemelijk dat de afname van verkeer op de A2 invloed kan hebben gehad de stikstofdepositie dichtbij deze snelweg. Het ruimtelijke patroon van de afname stemt daarbij overeen met de verwachting dat afname van verkeer door de lockdowns kon bijdragen aan reductie van stikstofdepositie.

Verskil in droogtestress voorafgaand aan de bemonstering kan ook een invloed hebben gehad op de stikstofconcentratie in mossen. Het voorjaar voorafgaand aan de bemonstering van 2020 was veel droger dan voor de bemonstering in 2021. Tijdens de bemonstering in 2020 was Heideklauwtjesmos ook minder groen en vaak ook witbleek gekleurd, terwijl in 2021 al het mos groener was. Het is onduidelijk in hoeverre droogtestress doorwerkt in de stikstofopname van mossen. Mogelijk is de opname geringer bij meer droogtestress. Wanneer dat het geval is, is de gemeten afname van stikstofconcentraties op twee locaties tegengesteld aan het effect van

droogte. De gemeten afname zou daardoor vrijwel zeker veroorzaakt kunnen zijn door een werkelijke afname van de stikstofdepositie. Wanneer de gemeten stikstofconcentratie in de mosmonsters en de gemodelleerde stikstofdepositie voor de Groote Heide (OPS-model) met elkaar worden vergeleken, blijkt dat deze goed passen bij eerder gevonden relaties voor mosmonsters uit korte vegetaties in Europa (Figuur 3-6). Dat betekent dat de metingen in de Groote Heide niet afwijken van eerder gevonden patronen en dat de sterke droogte (2018, 2019, 2020) voorafgaand aan de bemonstering niet tot verrassende stikstofconcentraties heeft geleid.

De verhouding van stikstofisotopen ($\delta^{15}\text{N}$) vertoonde op drie locaties een zeer geringe toename. Met een analyse van stikstofisotopen is gekeken naar verschuivingen in het aandeel gereduceerde en geoxideerde stikstof in de depositie, wat inzicht geeft in de mogelijke stikstofbronnen. Deze analyse toont aan dat gereduceerd stikstof (NH_x) in de depositie domineert. Een belangrijke bron voor NH_x -depositie is landbouwactiviteit. De iets minder negatieve $\delta^{15}\text{N}$ waarde van de mossen in 2021 duidt op een afname van depositie van gereduceerd stikstof (NH_y) en/of een toename van depositie van geoxideerd stikstof (NO_y) in de totale stikstofdepositie. Deze trend is tegen de verwachting in en wordt mogelijk niet veroorzaakt door de lockdowns, maar kan samenhangen met verschillen in droogte en neerslag tussen de jaren. Deze verschillen kunnen de verhoudingen tussen gereduceerd stikstof en geoxideerd stikstof in de depositie beïnvloeden en ook de opname daarvan door mossen. Dit kan het verschil in isotoopverhouding tussen beide meetjaren en het effect van de lockdowns dus onderschatten.

4.2 Invloed van droogte en COVID-19 lockdowns op stikstofconcentraties in het porievocht en grondwater

Droogte kan leiden tot mobilisatie van stikstof in heidebodems waarbij de porievocht concentraties in de bodem in een natte periode na de droogteperiode sterk kunnen oplopen. In twee heidegebieden (Strabrecht en Terlet) maten Bobbink et al. (2019) in het porievocht onder de wortelzone (40-45 cm onder maaiveld) na de zomerdroogten van 2018 en 2019 concentraties van ca. 4-21 mg N/l voor nitraat en 0.3 tot 4.2 mg N/L voor ammonium. In de Groote Heide zijn stikstofconcentraties in porievocht gemeten op 60 cm onder maaiveld. De eerste meting (december 2020) valt na de langdurig droge periode van het voorjaar tot de zomer van 2019. Dan worden de hoogste concentraties gemeten van de hele meetperiode: ammonium tot 2.7 mg N/l en voor nitraat 4.9 mg N/L. De hoogste ammonium concentraties liggen in het lage bereik van de range die Bobbink et al. (2019) opgeven en die van nitraat daaronder. De plekken waar in december hoge concentraties optreden, zijn daarna afgenomen, waarschijnlijk onder invloed van de nattere weerscondities in 2021. Omdat de stikstofconcentratie in het porievocht geen relatie heeft met de chloride concentratie kan worden afgeleid dat variatie in indamping van de geïnfilteerde neerslag niet de variatie in stikstofconcentratie kan verklaren. Dit duidt er op dat een ander proces dan indamping de stikstofconcentratie bepaald. Het gevonden patroon lijkt dus te bevestigen dat ook in de Groote Heide droogteperioden leiden tot mobilisatie van stikstof uit de bodem en dit ook onder de B-laag van de bodem uitspoelt. Eerder in de droge zomer van 2018 is geadsorbeerd ammonium in de bodemtoplaag gemeten (Aggenbach et al. 2020). De toen gemeten extraheerbare ammonium- en nitraatgehalten waren veel hoger (gemiddelde resp. 11.5 en 2.5 mg N/kg) dan

vergelijkbare metingen van een oude heide op de Veluwe in het veel minder droge jaar 2017 (Fujita et al. 2018; resp. 1.7 en 0.2 mgN/ kg). Uit de recent uitgevoerde metingen in de Grootte Heide blijkt dat stikstof vooral vrij komt in de vorm van nitraat en ammonium. DON concentraties zijn net na de droogte van 2020 op de locaties met hoge nitraat- en ammoniumconcentraties ook verhoogd. Dit is een aanwijzing dat verhoogde afbraak van organische stof een rol speelt in de mobilisatie van stikstof. Droogte leidt dus ook tot mobilisatie van organische stof en transport van organische stof draagt dan ook bij aan extra uitspoeling van stikstof.

De invloed van COVID-19 lockdowns op stikstofconcentraties in het porievocht is lastig te onderscheiden van het droogte effect. De eerste meting kon pas worden uitgevoerd in december 2020, toen de lockdown al 8 maanden had geduurd. Eerdere metingen waren niet mogelijk, omdat wegens een extreem droge bodem in de zomer van 2020 de keramische cups geen water gaven.

Onze metingen hebben zowel plaatsgevonden in ca. 15 jaar geleden geplagde bodems en niet geplagde, oude bodems. Alle meetlocaties met oude bodem hebben in december 2020 relatief hoge nitraatconcentraties en ook iets verhoogde ammoniumconcentraties in het porievocht. Bij de geplagde bodems is dat niet het geval en daar zijn ook locaties met lage concentraties. Blijkbaar treedt mobilisatie wel overal op in oude bodems en in recent geplagde bodems slechts plaatselijk. Dit patroon kan worden verklaard worden door twee oorzaken. In oude heidebodems is veel meer organische stof aanwezig. Daardoor kan daar gemakkelijker veel mineralisatie en desorptie van ammonium plaatsvinden. Metingen van de 0-5 cm toplaag in wel en niet geplagde droge heide in het onderzoeksgebied uit 2018 (Aggenbach et al. 2020) laten grote verschillen zien in organisch stofgehalte (resp. 15-40% en 4-8 % voor niet en wel geplagd) en geadsorbeerde ammonium (resp. 3-20 en ca. 1 mg N/kg voor niet en wel geplagd). Een tweede oorzaak is dat niet geplagde bodems een netto N-mineralisatie hebben, terwijl deze in geplagde bodems zeer gering is. Labincubaties in het zelfde onderzoek gaven een N-mineralisatie van 20-80 en 0 mg N/kg/38 d voor respectievelijk niet en wel geplagde bodems. Geplagde bodems accumuleren door de zeer lage netto N-mineralisatie daardoor een groot deel van de stikstofdepositie. Uit het onderzoek in de Grootte Heide blijkt dat ze ook variabel in de ruimte reageren met mobilisatie van stikstof na een droogteperiode. Deze ruimtelijke variatie vertoont geen samenhang met heterogeniteit van de vegetatie (structuur van hoge struikheiplanten met daartussen open plekken met mosvegetatie). Onduidelijk is wat de oorzaak is van de ruimtelijke variatie. Oude heidebodems lijken minder variabel in de reactie op droogte.

De vraag is in hoeverre stikstof die gemobiliseerd wordt door droogte het grondwater bereikt. De meetreeksen van de twee meetlocaties met geplagde heide geven constant lage concentraties van nitraat, ammonium en stikstof in opgelost organische stof (DON). Ook op latere meetmomenten, waarbij grondwater is bemonsterd dat in de droge jaren 2018, 2019 en 2020 is geïnfiltrerd, zijn lage concentraties gemeten. Uiteraard is het mogelijk dat wegens het kleine aantal meetlocaties (twee) sterke uitspoeling van stikstof naar het grondwater vanuit hotspots met sterke stikstofmobilisatie in de bodem niet is getraceerd. Onder geplagde heide bereikt stikstof het grondwater vooral door aanvoer van opgeloste organische stof (tot 0.8 mg N/l). In de oude heide worden in het grondwater vaak hogere stikstofconcentraties gemeten (1.5-6.0 mg N/l) dan in de geplagde heide. Nitraat draagt daar het meeste bij aan de hoge stikstofconcentraties en deze veranderen snel. Dat geeft aan dat uit oude heiden meer stikstof

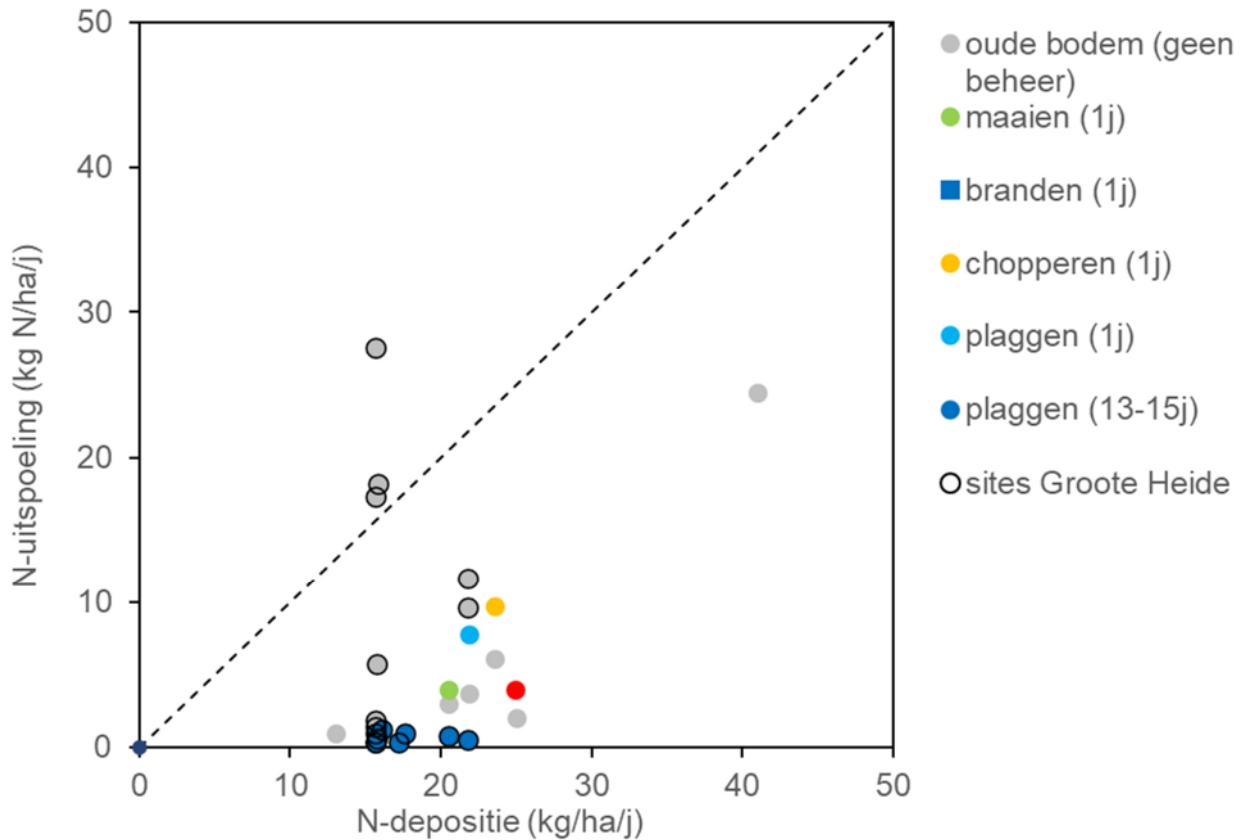
uitspoelt naar het grondwater dan uit geplagde heiden en dat gebeurtenissen zoals sterke mobilisatie in de bodem door kunnen werken in de nitraatconcentratie van het grondwater. Gedurende december 2020 tot december 2021 neemt op één meetpunt de nitraatconcentratie sterk af en op een ander meetpunt sterk toe. Bij de meetreeks met een afname verschuift het infiltratiemoment (grof bepaald op basis van waterbalansberekening) van ca. 2018 (zeer droog jaar) naar 2021 (nat jaar). Bij de meetreeks met een toename verschuift het moment van infiltratie van 2017 (relatief nat) naar 2021 (nat jaar). Verschillen in reistijd van de bodem naar het bovenste grondwater kunnen mogelijk een verklaring vormen voor de tegengestelde trends.

4.3 Stikstofbelasting van het grondwater

De metingen van stikstofconcentraties in het bovenste grondwater zijn in combinatie met waterbalansberekeningen vertaald naar de hoeveelheid (flux) stikstof die naar het grondwater uitspoelt. Bij geplagde locaties is deze zeer laag (0.3-1.3 kg N/ha/jr) en op niet geplagde locaties sterk variabel (2-28 kg N/ha/jr) en vaak veel hoger dan op geplagde locaties. De gemodelleerde jaarlijkse stikstofdepositie op basis van het OPS model bedroeg voor de meetlocaties voor de jaren 2017 tot en met 2020 respectievelijk 20.3, 21.8, 17.3 en 15.6 kg N/ha/jr. In de geplagde heide wordt dus het overgrote deel van de stikstofdepositie in het ecosysteem geaccumuleerd. Voor de oude heide is de uitspoeling en daarmee de accumulatie van stikstofdepositie variabel in de tijd, mogelijk beïnvloed door de eerder beschreven mobilisatiegebeurtenissen als gevolg van droogte. De hoogste waarde van de berekende stikstofuitspoeling (17 tot 27 kg N/ha/jr) komt wat betreft in orde grootte redelijk overeen met de gemodelleerde depositie. Waarden boven het gemodelleerde niveau worden veroorzaakt door mobilisatie van geaccumuleerde stikstofdepositie in de bodem.

In Figuur 4-1 wordt de stikstofuitspoeling naar het grondwater in de Groote Heide vergeleken met die van in andere droge heiden in Nederland en Duitsland. De stikstof uitspoeling is uitgezet tegen de stikstofdepositie. Er is onderscheid gemaakt in heiden met maatregelen (maaïen, branden, chopperen en plaggen) en heiden zonder maatregelen. Er is ook onderscheid gemaakt of de meting van stikstofuitspoeling kort (1 jaar) na de maatregel plaatsvond of later (13-15 jaar). Dat laatste was het geval bij plaggen in de Groote Heide. Uit de vergelijking valt op te maken dat op oude bodems zonder maatregelen de stikstof uitspoeling sterk variabel is en deels hoger is dan die van geplagde heiden. Een hoge uitspoeling treedt periodiek in oude heiden van de Groote Heide (mogelijk door mobilisatie na droogte) en oude heide met een zeer hoge stikstof depositie (41 kg/ha/j) zoals het geval was in Oldebroek (NL) in de jaren '90 van de vorige eeuw (Beier et al., 2009). In een oude droge heide op de Veluwe vonden Fujita et al. (2018) een zeer lage stikstofuitspoeling (1 kg/ha/j) bij een matig hoge depositie (13 kg/ha/j). Deze meting vond plaats in een periode met relatief veel neerslag en had daardoor geen invloed van een extreem droge periode vooraf aan de meting. In oude heiden zorgt een hogere stikstofdepositie dus voor een hogere stikstofuitspoeling. Op de Lüneburgerheide (DL) werd door Härdtle et al (2007) kort na plaggen (1 jaar) een hogere stikstof uitspoeling (7.8 kg/ha/j) dan in de Groote Heide 13 tot 15 jaar na het plaggen (0.3-1.2 kg/ha/j). Härdtle et al (2007) mat in de Lüneburgerheide ook in het eerste jaar na chopperen een verhoogde stikstofuitspoeling (9.7 kg/ha/j). Bij maaïen was dat niet het geval. Ingrepen de bodem zorgen blijkbaar voor een kortstondige mobilisatie van stikstof uit de resterende bodem, maar daarna neemt de uitspoeling sterk af door sterke immobilisatie in de bodem. De vergelijking van metingen maakt

ook duidelijk dat de uitspoeling van stikstof meestal geringer is dan de depositie. Alleen in Groote Heide treedt in de oude heiden periodiek een uitspoeling op die groter is dan de depositie.



Figuur 4-1: Vergelijking van de stikstofuitspoeling in de droge heiden van de Groote Heide (punten met een zwarte cirkel) met andere Nederlandse en Duitse gebieden met beheermaatregelen (maaien, branden, chopperen en plaggen) en zonder beheermaatregelen. De getallen bij de beheermaatregelen betreft het tijdstip (in jaren) van de meting van de stikstofuitspoeling na de maatregel. Data van andere gebieden zijn van Härdtle et al (2007), Beier et al. (2009) en Fujita et al. (2018). Bij punten onder de stippellijn treedt immobilisatie van de stikstofdepositie en boven deze lijn mobilisatie.

4.4 Nutriënten in mossen

Naast het stikstofgehalte zijn ook de gehalten van fosfor en kalium gemeten in dit onderzoek. Dit biedt de mogelijkheid om ook te kijken naar de patronen van deze macronutriënten en de ratio's van deze nutriënten. Tot op heden is er wel veel gemeten aan nutriëntengehalten in de bovengrondse biomassa van vaatplanten, maar veel minder in mossen. Dat geldt in hoge mate voor droge ecosystemen. Omdat we ook in twee opeenvolgende jaren hebben gemeten kunnen we ook kijken naar de dynamiek van nutriëntengehalten. Het volgende beeld komt naar voren. Het fosfor- en kalium gehalte in mos verschillen weinig tussen locaties met als belangrijkste verschil dat dat het kaliumgehalte van geplagde locaties iets hoger zijn dan die van niet geplagde locaties. Dit kan er op duiden dat op jonge bodems met weinig strooisel mossen een iets betere beschikbaarheid hebben van kalium als gevolg van opname uit de minerale bodem

door enige capillaire opstijging van bodemvocht. Verwerking van mineralen is in onbemeste vegetatie de belangrijkste bron van kalium voor de vegetatie. In vergelijking tot veel metingen in bovengrondse vaatplantbiomassa hebben de mossen in de Groote Heide een lagerfosfor gehalte en veel lager kaliumgehalte. Nutriënten ratio's wijken ook sterk af van de gehalten doorgaans in bovengrondse vaatplantbiomassa worden gemeten: de N:P zit in de hoge range, de N:K is hoger en de K:P ratio is veel lager dan die in bovengrondse vaatplantbiomassa. De N:P ratio's zijn hoog (ca. 18-18 g/g) en zouden in geval van metingen in vaatplanten duiden op P-limitatie of co-limitatie van N en P (Olde-Venterink et al. 2003). Dit verschilt van de stikstoflimitatie van de vaatplantvegetatie van droge heiden. Mede gezien de lage K-gehalte in het mos kan K-limitatie voor de moslaag een rol spelen. Mogelijkerwijs zijn de mossen die geen wortels hebben om nutriënten uit de bodem op te nemen niet gelimiteerd door stikstof, omdat ze een overmaat van stikstof uit de lucht ontvangen en voor de opname van fosfaat en kalium vooral afhankelijk zijn van een geringe aanvoer door atmosferische depositie. N:K ratio's zitten altijd in het bereik voor K-limitatie en op basis van K:P ratio's zijn locaties deels wel deels niet kalium gelimiteerd. Alhoewel we de metingen in de mossen niet kunnen vergelijken met lokale metingen in de vaatplantbiomassa, kan dit er op duiden dat de nutriëntenhuishouding van de moslaag sterk afwijkt van die van vaatplanten.

Het fosfor- en kaliumgehalte vertonen weinig veranderingen tussen 2020 en 2021. De N:K ratio neemt tussen 2020 en 2021 alleen duidelijk af op locatie M3 wat samenhangt met de afname van het stikstofgehalte. Dit is mogelijk een bijeffect van een vermindering van de lokale stikstofdepositie uit verkeer op de A2 (zie par. 4.1).

De geringe ruimtelijke verschillen in het fosfor- en kaliumgehalte in het bemonsterde mos geven geen aanwijzing dat het uitstrooien van steenmeel op december 2019 in een bosperceel enkele 100'en meters afstand aan de westzijde van de meetlocaties van invloed is geweest op de moschemie. De toediening heeft met een helikopter plaatsgevonden (schriftelijke mededeling Eric Geelen). Mogelijk heeft het verwaaien van steenmeelstof geleid tot een depositie van steenmeel, maar dat uit zich dus niet tot verschillen in stofgehalten op de meetlocaties. De gebruikte steenmeel soort (Soilfeed Silva van SIBELCO) wordt gebruikt voor geleidelijke verhoging van de bodem pH en beschikbaarheid van onder andere K, Mg, Mg en planten beschikbare silicaat. Ook bevat het ca. 500 mg/kg fosfor.

5 Conclusies

Is het effect van de COVID-19 lockdowns te zien aan de stikstofgehalten in mossen, porievocht en het ondiepe grondwater?

- Er is een zwak effect zichtbaar van de COVID-19 lockdowns op de stikstofconcentratie in mossen. Een deel van de locaties vertoonde tijdens de lockdown binnen 1 jaar tijd een geringe daling. De duidelijkste afname was te zien op de locatie die het dichtst bij de druk bereden snelweg A2 ligt. Dit patroon stemt overeen met de verwachting en monitoringdata dat het effect van de lockdown op stikstofdepositie vooral werd veroorzaakt door een afname van het verkeer.
- Het was niet mogelijk om effecten van verminderde stikstofdepositie door de lockdowns te traceren met de stikstofconcentraties in het porievocht van de bodem en bovenste grondwater.

Is er invloed van droogte op de mobilisatie van stikstof in de bodem en op de stikstofconcentraties in het porievocht en het ondiepe grondwater?

- Dit onderzoek geeft sterke aanwijzingen dat droogte leidt tot mobilisatie van stikstof in de bodem van droge heiden en bevestigt daarmee bevindingen van eerder onderzoek (Bobbink et al. 2019).
- Deze effecten lijken het sterkst op te treden in oude heide, terwijl in recent geplagde heide (ca. 15 jaar geleden) mobilisatie van stikstof in de bodem alleen zeer lokaal optreedt. De oude heide kan maar een deel van de hoge stikstofdepositie vasthouden, waardoor het bovenste grondwater hogere stikstofconcentraties heeft dan onder geplagde heide. De effecten van stikstofmobilisatie in oude heidebodems uit zich vermoedelijk ook in perioden met verhoogde stikstofuitspoeling naar het grondwater. Hier dragen vooral uitspoeling van nitraat en in mindere mate stikstof in opgeloste organische stof bij aan de belasting van het grondwater.
- Onder geplagde heidebodems zijn de stikstofconcentraties van het bovenste grondwater na een periode van 13-15 jaar altijd zeer laag als gevolg van sterke immobilisatie van stikstofaanvoer in het jonge heide ecosysteem. Soms treedt wel mobilisatie van stikstof in de bodem op door droogte, maar dat werkt blijkbaar niet door in verhoogde nitraatconcentraties in het bovenste grondwater. Uit onderzoek in Duitsland blijkt dat kort (1 jaar) na het plaggen wel een verhoogde stikstofuitspoeling optreden. Vermoedelijk is dit een effect van een korte periode met verhoogde mobilisatie
- Mobilisatie van stikstof door droogte in heide bodems kan leiden tot een verhoogde stikstofbelasting op het grondwater die hoger is dan de stikstofdepositie. Implicatie hiervan kan zijn dat wanneer droogteperioden door klimaatverandering vaker voorkomen, oude heiden kunnen omslaan van opslag van stikstofdepositie naar netto verlies van stikstof naar het grondwater. Daarmee kan op termijn de in het verleden accumuleerde stikstofdepositie het grondwater gaan belasten.
- Aangezien de Grote Heide in het intrekgebied ligt van een grondwaterwinning van Brabant Water, zijn perioden met verhoogde uitspoeling nadelig voor de kwaliteit van het drinkwater. Ook zal mobilisatie van stikstof leiden tot hoge nitraatgehalte van het ondiep grondwater dat toestroomt naar de vennen in de Grote Heide.

Implicaties voor beheer van droge heide en waterwingebied

- Plaggen in combinatie met een hoge stikstofdepositie die nog steeds in de Grootte Heide optreedt, leidt tot een jong heide-ecosysteem dat in de eerste decennia het overgrote deel van de stikstofdepositie immobiliseert. Dit levert ook een soortenarme heidebegroeiing waarvan de moslaag door Grijs kronkelsteeltje wordt gedomineerd (Aggenbach et al. 2020). Het plaggen terwijl de stikstofdepositie hoog blijft, is daarmee een ongeschikte maatregel voor de instandhouding en herstel van droge heide.
- Plaggen zorgt tijdelijk (enkele decennia) voor verminderde uitspoeling van stikstof naar het grondwater. Op een langere termijn zal het mogelijk leiden tot een ecosysteem dat in combinatie met droogtegebeurtenissen een hogere stikstofuitspoeling geeft dan de stikstofdepositie. Op een langere termijn levert plaggen van heide daarom niet een lagere stikstofbelasting van het grondwater op.
- De stikstofuitspoeling in oude droge heiden is hoger naar mate de stikstofdepositie hoger is. De meest effectieve maatregel om stikstofuitspoeling te beperken is het verminderen van de stikstofdepositie.

6 Aanbevelingen

We hebben de volgende aanbevelingen:

- Bij de monitoring van stikstofdepositie met mossen wordt doorgaans niet frequent gemeten. Dit is één van de weinige onderzoeken waarin dat wel gedaan is. Mogelijkerwijs reageerde het stikstofgehalte van mossen snel op veranderingen in lokale NO_y -depositie uit verkeer. Jaarlijkse monitoring over meerdere jaren meten zou meer zicht kunnen geven in de dynamiek van het stikstofgehalte in mos en mogelijk ook in (lokale) trends van stikstofdepositie op de korte termijn. Voor het beheer en beleid is zulke monitoring van belang om inzicht te krijgen in de effecten van maatregelen die stikstofemissie beperken en voor de timing van interne herstelmaatregelen die effectief zijn bij een voldoende lage stikstofdepositie.
- Berekening van de stikstofbelasting op het ondiepe grondwater die in dit rapport zijn gebruikt worden sterk bepaald door aannames over de grondwateraanvulling van droge heide vegetatie. Een betere schatting van de grondwateraanvulling is mogelijk wanneer de evapotranspiratie wordt gekwantificeerd een onverzadigde zone model en inputgegevens van het lokale bodemprofiel. Daarmee kan ook rekening worden gehouden met het mogelijke effect van plaggen op de evapotranspiratie. Zulke verbeterde berekeningen van de stikstofbelasting zijn belang voor inzicht in stoffluxen via toestroming van grondwater naar vennen in de Groote Heide en de stofbelasting van het ondiepe grondwater als grondstof voor drinkwater.
- Wanneer door droogte sterke mobilisatie van stikstof optreedt in heide-ecosystemen, kan naast droogtestress ook extra chemische stress impact hebben op het ecosysteem. Over het gecombineerde effect hiervan op de habitatkwaliteit is weinig bekend. Mede in het licht van klimaatverandering is onderzoek hiernaar zinvol en van belang voor kennis over de duurzaamheid en natuurherstel van heide-ecosystemen.
- Verhoogde uitspoeling van eerder geaccumuleerde stikstof onder oude heidebodems kan zorgen voor een verhoogde nitraatbelasting op het grondwater. Dit kan ook spelen in zure bossen waar de bodem sterke overeenkomsten vertoont met die van droge heiden (podzolen met een dikke strooisellaag). Oude heiden en bossen kunnen daarmee in droge jaren minder bescherming bieden tegen een hoge nitraatbelasting van het intrekgebied van grondwaterwinningen en grondwatergevoede ecosystemen. Aanbevolen wordt om ook te kijken naar uitspoeling van stikstof in bossen in relatie tot meteorologische fluctuaties en wat de gevolgen daarvan zijn voor de nitraatconcentratie van het grondwater.
- Dit onderzoek heeft naast het meten van stikstofgehalte ook meer inzicht in het fosfor- en kaliumgehalte in mossen. Aangezien mossen in heiden een belangrijke rol spelen in de primaire productie en humusvorming, kan onderzoek naar nutriënten en andere macro-elementen in mos meer inzicht geven in het biochemisch functioneren van heide-ecosystemen en het belang daarvan voor fauna.

7 Literatuur

Aggenbach, C.J.S., Y. Fujita, L. Jones, A. Kooijman & A. Nanu (2020). Effectiveness of measures to mitigate high nitrogen deposition in dry habitats: BTO 2020.024 KWR Water Research Institute/ Centre for Ecology and Hydrology/ University of Amsterdam, Nieuwegein.

Aggenbach, C.J.S. & J.J.M. Geurts (2022). Biomonitoring van atmosferische stikstofdepositie met mossen. KWR 2021.121, KWR Water Research Institute, Nieuwegein.

Beier C., Emmett B.A., Tietema A. et al. (2009). Carbon and nitrogen balances for six shrublands across Europe. *Global Biogeochemical Cycles*, 23.

Bobbink, R., R. Loeb, R.J. Bijlsma & B. van Delft. (2019). Doet extreme droogte stikstofbom in droge heide barsten? *Vakblad bos en natuurbeheer*, 160: 3-6.

Fujita, Y., B. Voortman & J.-P.M. Witte (2018). Effects of climate change and nitrogen deposition on groundwater. BTO 2018.081, KWR Water Research, Nieuwegein.

Härdtle W., Von Oheimb G., Niemeyer M., Niemeyer T., Assmann T., Meyer H. (2007). Nutrient leaching in dry heathland ecosystems: effects of atmospheric deposition and management. *Biogeochemistry*, 86, 201-215.

Harmens, H., E. Schnyder, L. Thoni, D. M. Cooper, G. Mills, S. Leblond, K. Mohr, J. Poikolainen, J. Santamaria, M. Skudnik, H. G. Zechmeister, A. J. Lindroos & A. Hanus-Ilmar (2014). Relationship between site-specific nitrogen concentrations in mosses and measured wet bulk atmospheric nitrogen deposition across Europe. *Environmental Pollution* 194:50-59.

Meyer, M., W. Schroder, S. Nickel, S. Leblond, A. J. Lindroos, K. Mohr, J. Poikolainen, J. M. Santamaria, M. Skudnik, L. Thoni, B. Beudert, H. Dieffenbach-Fries, H. Schulte-Bisping & H. G. Zechmeister (2015). Relevance of canopy drip for the accumulation of nitrogen in moss used as biomonitors for atmospheric nitrogen deposition in Europe. *Science of the Total Environment* 538:600-610.

Olde Venterink, H., Wassen, M. J., Verkroost, A. W. M., & De Ruiter, P. C. (2003). Species richness–productivity patterns differ between N-, P-, and K-limited wetlands. *Ecology*, 84(8), 2191-2199.

Pitcairn, C., D. Fowler, I. Leith, L. Sheppard, S. Tang, M. Sutton & D. Famulari (2006). Diagnostic indicators of elevated nitrogen deposition. *Environmental Pollution* 144:941-950.
Stuyfzand, P.J. (2016) evap heathland

WGE (2019). Heavy metals, nitrogen and pops in European mosses: 2020 survey. MONITORING MANUAL. International Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops.