

Figuur 1. De nutriëntenbalans wordt bepaald door de nutriëntenaanvoer via atmosferische depositie en verwerking en afvoer van nutriënten door houtoogst en uitspoeling. De pijlen geven de onderliggende verbanden aan: de groene staan voor de aanvoer en de rode voor de afvoer van nutriënten. Houtoogst verlaagt de atmosferische depositie (-) en verhoogt de uitspoeling (+). Positieve terugkoppelingen tussen bodem en bos bestaan uit opname van nutriënten door bomen en afgifte van nutriënten uit het strooisel. De terugkoppeling tussen verwerking en uitspoeling is onzeker (+/-).

Effecten van beheermaatregelen op aanvoer en afvoer van nutriënten in bossen

Een evenwichtige nutriëntenbalans is een voorwaarde voor duurzaam bosbeheer op arme bodems, zodat bestaande bodemvoorraden van voedingstoffen niet afnemen. Onze studie laat zien dat de atmosferische depositie (invang van nutriënten) hoger is dan verwacht, vooral voor de basische kationen, en dat de uitspoeling van nutriënten is laag onder gesloten en gedunde bossen. Schermkap en eindkap verminderen de depositie en verhogen de uitspoeling aanzienlijk waardoor de nutriëntenvoorraden van bijvoorbeeld basische kationen afnemen. Duurzaam bosbeheer wordt bevorderd door het in stand houden van voldoende kroonbedekking bij verjongingskap en het vermijden van eindkap.

tekst Marleen Vos, Frank Sterck, Jan den Ouden, Marcel Hoosbeek & Wim de Vries (Wageningen UR)

> De nutriëntenbalans bestaat uit de aanvoer van nutriënten (atmosferische depositie op bomen en de bosbodem, en verwerking van mineralen in de bodem) en de afvoer van nutriënten (uitspoeling in de bodem en afvoer van de nutriënten met het geoogste hout) (figuur 1). Bij een duurzame oogst is het nutriëntenverlies door houtoogst en uitspoeling niet groter dan de nutriëntentoevoer door depositie en verwerking. Bestaande bodemvoorraden nemen dan niet af. Om meer informatie te krijgen over de nutriëntenbalans van bossen op arme zandgronden is in 2019 een groot bosexperiment opgezet (forestexperiment.com), waarover Sterck et al. al in 2022 in *Vakblad #184* publiceerde. In dit bosexperiment zijn de afgelopen jaren de

effecten van verschillende beheermaatregelen op de aan- en afvoer van verschillende nutriënten intensief gemeten. Deze studie laat zien waarom de balans van de meeste schaarse voedingselementen, waaronder basekationen (calcium, kalium en magnesium) en fosfor, neutraal of positief zijn in gedunde opstanden, maar negatief worden in open systemen zoals na scherm- en kaalkap. Dit onderzoek ondersteunt daarmee het idee dat duurzaam bosbeheer veel baat heeft bij het in stand houden van voldoende kroonbedekking bij verjongingskap en bij het vermijden van kaalkap bij de eindoogst.

Praktijkproeven op arme zandgrond

Het doel van het bosexperiment was om de effecten van beheeringrepen op de aan- en afvoer van nutriënten te kwantificeren, om op basis daarvan wetenschap onderbouwde richtlijnen te kunnen opstellen voor een duurzaam beheer van bossen op arme en verzuurde zandgronden.



Figuur 2. De metingen van de biomassa van de bomen om de nutriëntenafvoer na de houtoogst te bepalen bestonden uit het wegen van de hele boom, enkel de stam, de takken met naalden en de takken zonder naalden (bovenste rij van links naar rechts), en het wegen van de bast, het spinhout en het kernhout voor zeven schijven per boomstam (linksonder) en het bepalen van het gewicht per volume (middenonder) waardoor het gewicht per onderdeel berekend kon worden. Door handmatig de naalden van de takken te verwijderen kon tot slot het drooggewicht van de takken en de naalden afzonderlijk berekend worden (rechtsonder).

Als beheeringrepen varieerden we in oogstintensiteit (geen oogst, hoogdunning, schermkap en kaalkap), oogstmethode (afvoer van stamhout of gehele bomen met takken en toppen) en grondbeveiliging (al dan niet klepelen ofwel verhakselen van de oogstresten). Het bosexperiment werd uitgevoerd in vijftien plots, ieder van 1 hectare, gelijk verdeeld over drie dominante boomsoorten: beuk (*Fagus sylvatica*), douglas (*Pseudotsuga menziesii*) en grove den (*Pinus sylvestris*). De vijftien proefvlakken met gelijkjarige bosmonoculturen liggen op goed doorlatende, arme en zure zandgronden en zijn verdeeld over vijf gebieden in Gelderland en Noord-Brabant. Alle gebieden zijn door de jaren heen blootgesteld aan een hoge stikstofdepositie en liggen buiten het bereik van grondwater. Voorafgaand aan het experiment is in 2018 de oorspronkelijke situatie vastgelegd. Daarvoor is de staande houtvoorraad en nutriëntenvoorraden in de bodem gemeten. De beheermaatregelen voor het experiment zijn vervolgens uitgevoerd in februari-maart 2019. De oogstintensiteiten waren controle (geen oogst), hoogdunning (oogst van 15 tot 20 procent van de staande voorraad), schermkap (oogst van 76-83 procent van de staande voorraad) en kaalkap (100 procent oogst). Verder is onderscheid gemaakt tussen het oogsten van hele bomen inclusief tak- en top hout en het oogsten van alleen de stam (tak- en top hout bleef in het bos). Tot slot is er in maart-april 2019 op de helft van de scherm- en de kaalkapvlakken geklepeld, waarbij de oogstresten (tak- en top hout) in kleinere stukken zijn gebroken om de natuurlijke verjonging te faciliteren.

De metingen waren gericht op de afvoer van nutriënten bij de verschillende oogstintensiteiten direct na de oogst in 2019 (figuur 2) en op de atmosferische depositie en de uitspoeling van de nutriënten in het tweede jaar na de oogst in de periode april 2020-april 2021 (figuur 3). De verwerking is op basis van de bodemeigenschappen ingeschat. De data van de depositie, de afvoer door houtoogst en de uitspoeling zijn samen met de verwerkingsschattingen verwerkt in een nutriëntenbalans voor het tweede jaar na de houtoogst. De nutriëntenbalans is opgesteld voor zes macronutriënten: stikstof (N), zwavel (S), fosfor (P), calcium (Ca), magnesium (Mg) en kalium (K) en voor vier micronutriënten: mangaan (Mn), ijzer (Fe), koper (Cu) en zink (Zn). Het opstellen van de nutriëntenbalans zo kort na de houtoogst draagt bij aan de ontwikkeling van wetenschappelijk onderbouwde richtlijnen voor een duurzame houtoogst in de Nederlandse bossen.

Effect bosstructuur op atmosferische nutriëntendepositie

De oogstintensiteit beïnvloedde de bosstructuur en de openheid van het kronendak, en daarmee de atmosferische depositie. De totale jaarlijkse depositie van nutriënten nam toe bij alle boomsoorten naarmate het kronendak dichter was, dus met afname van de oogstintensiteit. Dit was het gevolg van een hogere interceptie van droge deeltjes uit de atmosfeer (droge depositie), doordat er meer boomkronen zijn om die op te vangen. De boomhoogte was een andere belangrijke factor: de hoogste depositie van NH_4 (ammoniak) en

S (zure depositie) en van K, Ca en Mg (basen) is waargenomen in de relatief hoge douglasopstanden, en de laagste in de relatief lage opstanden van grove den.

De depositie in de bosopstanden overtrof de landelijke modelschattingen. De NH_4 - en S-depositie overtroffen de schattingen met circa 50 procent en de depositie van Ca, Mg en K viel ruim tweemaal hoger dan de landelijke schattingen uit. Verder was de verhouding van de zure depositie ten opzichte van de depositie van de basen het laagst in gedunde opstanden. Dunning kan dus bijdragen aan een tragere bodemverzuring, vooral in vergelijking met meer open bosssystemen en na eindkap.

In het algemeen laten de resultaten zien dat de verandering van de bosstructuur door de oogstintensiteit veel grotere effecten had op de depositie



Figuur 3. De depositie is maandelijks bepaald aan de hand van de nutriëntconcentraties in de gevallen regen. Het regenwater werd opgevangen in trechters en liep door een kolom met een ionenwisselaar. De trechters waren voorzien van gaas om vogeluitwerpselen te voorkomen (bovenste rij). De uitspoeling is gemeten door elke maand de nutriëntconcentraties in het bodemvocht te bepalen. Het bodemvocht werd verzameld met behulp van macrorhizons die in een schuine positie in de bosgrond waren geplaatst. Aan de macrorhizon was een spuit gekoppeld, waarmee het systeem onder spanning gezet werd (vacuümeffect) en het bodemvocht opgezogen kon worden (onderste rij).

van nutriënten dan verwacht, en ook dat kleine subtiele effecten afhankelijk zijn van de dominante boomsoort.

Effect beheermaatregelen op nutriëntenafoer

Van de opstanden van beuk, douglas en grove den is de totale biomassa van de bomen bepaald, waarbij onderscheid is gemaakt tussen de biomassa van het spinhout, het kernhout, de bast, de takken en de naalden. De bemonstering vond plaats in de winter waardoor het blad van de beuken niet is meegenomen. Naast de totale biomassa zijn ook de jaarlijkse groei van de bomen en de nutriëntconcentraties in het hout bepaald om de jaarlijkse opname van nutriënten door de bomen te berekenen.

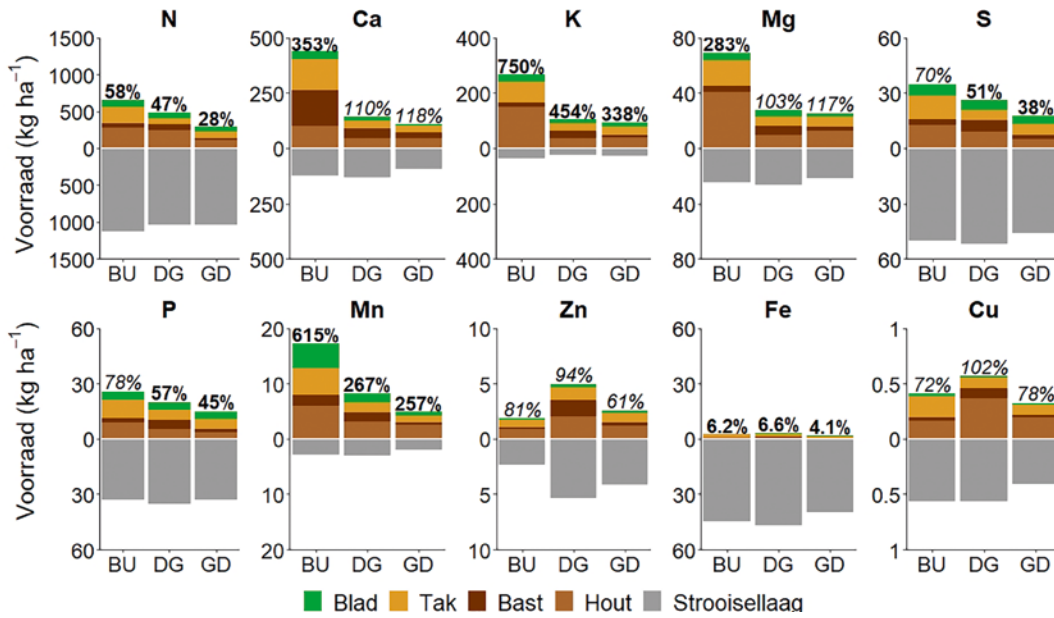
De opstanden van beuk, douglas en grove den verschilden onderling sterk in zowel de bovengrondse biomassa als de nutriëntenvoorraden. De meeste biomassa was aanwezig in de niet-ge oogste opstanden van douglas, terwijl de nutriëntconcentraties het hoogst waren in die van de beuk. De beukenopstanden hadden daardoor de grootste bovengrondse nutriëntenvoorraden, opnamepercentages en nutriëntenv verliezen na oogst, gevolgd door grove den. Over het algemeen

overtroffen de nutriëntenvoorraden in de bodem, met name in de strooisellaag, de nutriëntenvoorraden in het bovengrondse deel van het bos. Dit was echter niet het geval voor K, Ca, Mg en Mn, wat wijst op mogelijke nutriëntentekorten wanneer de volledige bovengrondse biomassa wordt geogst (figuur 4).

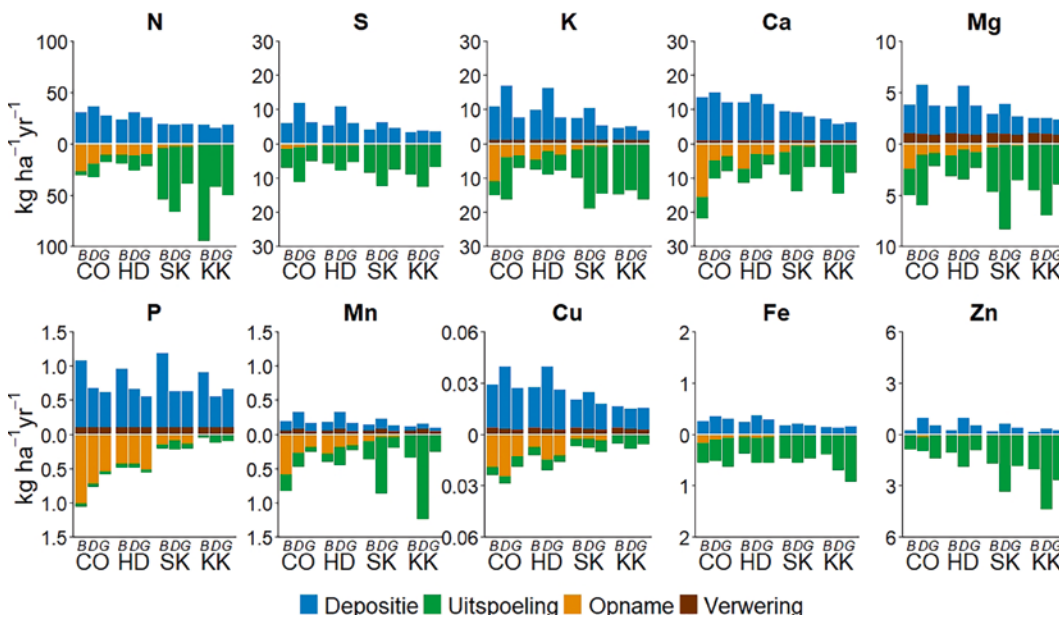
Het oogsten van de hele boom met takken en toppen verhoogde de afvoer van nutriënten uit het bos met 66 tot 100 procent in vergelijking met een reguliere oogst van het stamhout. Het verwijderen van de bast (schors) in het bos verminderde daarentegen de afvoer van nutriënten met 23 tot 41 procent ten opzichte van een reguliere oogst. Gezien de verschillen in nutriëntenvoorraden, opnamepercentages en afvoer van nutriënten uit het bos wordt aanbevolen om voor alle boomsoorten de oogst van tak- en tophout te vermijden en, afhankelijk van de boomsoort en bodem, niet al het stamhout te oogsten. Het ontchorsen van stammen in het bos kan verder bijdragen aan het behoud van nutriënten.

Effect beheermaatregelen op uitspoeling nutriënten

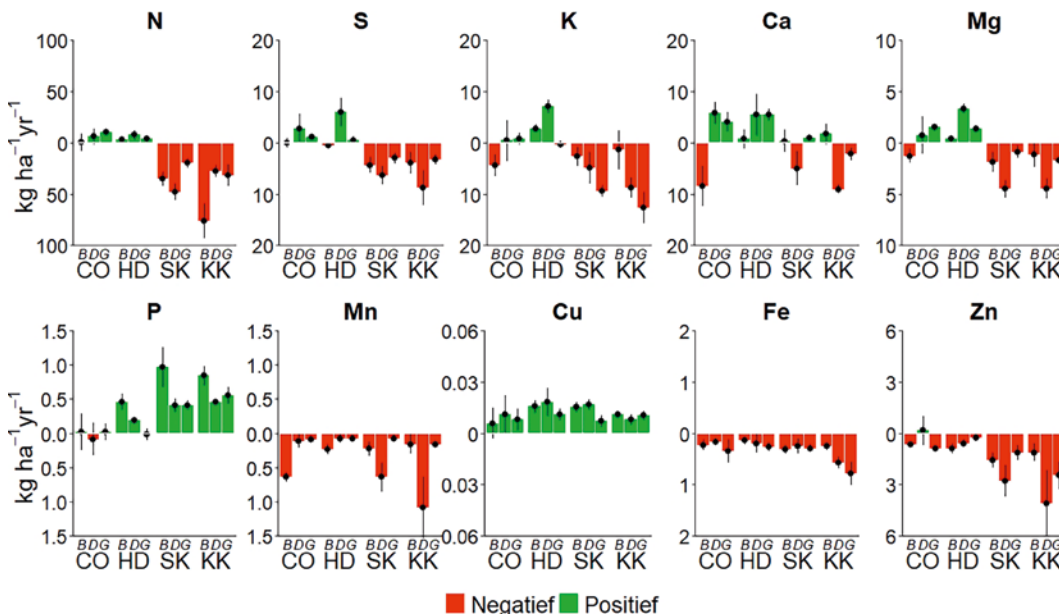
In de niet-ge oogste controlebossen was het jaarlijkse verlies van nutriënten door uitspoeling het



Figuur 4. Concentraties van nutriënten in het bovengrondse deel van het bos (blad, tak, bast en hout) en in de bodem (strooisellaag plus rest van de bodem). De percentages geven de hoeveelheid nutriënten in het bovengrondse deel aan ten opzichte van de nutriëntenvoorraden in de bodem. Voor de meerderheid van de nutriënten geldt dat de bodem (met name de strooisellaag) er voldoende van heeft om het gehele bos opnieuw te laten groeien (percentages < 100 procent). Voor Ca, K, Mg en Mn is de nutriëntenvoorraad in het bovengrondse deel van het bos over het algemeen groter dan in de bodem.



Figuur 5. De nutriëntenbalansen in het tweede jaar na de houtoogst met daarin de atmosferische depositie en chemische verwerking van de bodem als nutriëntenaanvoerfluxen en de opname van nutriënten door het bos en uitspoeling als nutriëntenaanvoerfluxen. Van elk nutriënt wordt eerst de balans gegeven van de controleplot van beuk, douglas en grove den (CO), en daarna de balansen van de hoogdunning (HD), de schermkap (SK) en de kaalkap (KK) voor dezelfde drie boomsoorten (BDG).



Figuur 6. De balansen van de macro- en micronutriënten in het tweede jaar na houtoogst, waarbij de nutriëntenaanvoer (depositie en verwerking) is verminderd met de nutriëntenaanvoer (opname door bomen en de uitspoeling). Een negatieve balans betekent dat de afvoer groter is dan de aanvoer waardoor de bodemvoorraad van die nutriënt afneemt. Positieve balansen zorgen voor een toename van de bodemvoorraad en geven aan dat het bos duurzaam functioneert.

grootst bij douglas en minder bij beuk en grove den. De huidige verzuring in de controlebossen bleek met name te worden veroorzaakt door uitspoeling van zowel nitraat (NO_3) als sulfaat (SO_4), terwijl stikstof ook nog in de bodem accumuleert. Kaalkap, en in mindere mate schermkap, leidden tot verhoogde nutriëntenconcentraties (met name N) in het bodemvocht. Dit wijst op een snelle mobilisatie van de aanzienlijke stikstofvoorraden, die waarschijnlijk werd veroorzaakt door een snelle mineralisatie. Deze mobilisatie resulteerde in versnelde verliezen van nitraat (NO_3), basische kationen (Mg, Ca, K) en aluminium (Al), en leidt daardoor tot een versnelde bodemverzuring na kaalkap en schermkap. Dunningen gaven geringe effecten op de nutriëntenuitspoeling en resulteerden niet in een versnelde bodemverzuring. De verschillende oogstmethoden (reguliere oogst van de stam versus oogst van de stam met tak- en top hout) hadden slechts een minimaal effect op de uitspoeling in het tweede jaar na de houtoogst. Enkel de concentraties van mobiele elementen zoals K waren licht verhoogd na het achterlaten van het tak- en top hout in het bos. Klepelen hadden geen duidelijk effect op de nutriëntenuitspoeling. Deze resultaten benadrukken het belang van de bosstructuur, beïnvloed door de oogstintensiteit, en in mindere mate de boomsoorten bij nutriëntenverliezen via uitspoeling. Ze geven ook aan dat de effecten van bodemverzuring door zwavel- en vooral stikstofdepositie sterker zijn in intensief geoogste bossen (na kaalkap en schermkap) dan in gedunde en controleopstanden.

Effect beheermaatregelen op nutriëntenbalansen

Figuur 5 geeft de nutriëntenbalans van de bosbodem weer, zoals die is bepaald op basis van de gemeten jaarlijkse nutriëntenaanvoer (depositie en verwerking) minus de nutriëntenafoer (opname door bomen en uitspoeling) bij de verschillen-

de oogstintensiteiten (in kg/ha/jaar per nutriënt). De geschatte bodemverwerking is voor de meeste nutriënten verwaarloosbaar ten opzichte van de depositie. De nutriëntenbalansen voor de verzurende elementen N en S en de schaarse nutriënten zoals basekationen zijn sterk negatief bij scherm- en kaalkap, en neutraal of positief bij hoogdunning en controle (figuur 6).

Opmerkelijk zijn de positieve balansen van K, Ca en Mg bij de controleplots en de hoogdunning. Deze zijn het gevolg van een hoge depositie, hoger dan verwacht op basis van de landelijke schattingen, en een relatief lage uitspoeling. De relatief lage uitspoeling komt doordat stikstof nog nauwelijks uitspoelt onder intact bos. Als de mineralisatie van de hoge voorraad stikstof in de bosbodem toeneemt, zal dit ook gepaard gaan met een hogere uitspoeling van basische kationen. Bij schermkap en kaalkap is echter sprake van een enorme mobilisatie van opgeslagen stikstof en ook van zwavel met een bijbehorende hoge verzuring. Wat verder opvalt, zijn de negatieve balansen voor Mn, Fe en Zn voor alle oogstintensiteiten: de gevolgen van de afname van de Mn-voorraad zijn vooralsnog onzeker, de afname van Fe is waarschijnlijk het gevolg van voortschrijdende verzuring en de afname van Zn heeft mogelijk te maken met lokale vervuiling bij enkele plots. Ondanks dergelijke onzekerheden laten deze resultaten zien dat het in stand houden van een min of meer gesloten kronendak bijdraagt aan veerkrachtige bossen op arme, verzuurde bodems en dat vlaktegewijze eindkap het best vermeden kan worden.

Conclusies & aanbevelingen voor de praktijk

Op basis van dit onderzoek kunnen we concluderen dat in bosopstanden zonder recente hoogdunning (gesloten controlebos) of na recente

hoogdunning: (i) de depositie van stikstof (N) en zwavel (S) gemiddeld ongeveer anderhalf keer zo hoog is en die van calcium (Ca), magnesium (Mg) en kalium (K) ruim tweemaal zo hoog dan gemiddeld voor Nederland en (ii) dat de uitspoeling van stikstof (nitraat) vergelijkbaar is aan die van zwavel (sulfaat) door de hoge stikstofaccumulatie in de bodem, waardoor stikstof en zwavel een vergelijkbare bijdrage hebben in de huidige bodemverzuring. Zwavel heeft dus nog steeds een belangrijke rol in de huidige bodemverzuring. Door de stikstofaccumulatie is de uitspoeling van basen (Ca, Mg en K) relatief laag, waardoor de toevoer van de basen door depositie veelal hoger is dan de som van de opname en de uitspoeling. Verder kunnen we concluderen dat na kaalkap, en in mindere mate na schermkap, er sprake is (i) van een afname van de depositie door een lagere interceptie van de droge depositie en (ii) van een sterk verhoogde uitspoeling van de opgeslagen stikstof in de vorm van nitraat, gekoppeld aan een sterke verzuring met een nettoverlies van Ca, Mg en K, die met het nitraat uitspoelen. Ook de Mn- en Zn-uitspoeling, waarvan bekend is dat de oplosbaarheid toeneemt als de pH afneemt (hogere zuurgraad), neemt sterk toe. Uit het onderzoek is een viertal aanbevelingen voor de praktijk te trekken: (1) vanwege de hoge extra afvoer van nutriënten zou de oogst van tak- en top hout achterwege gelaten moeten worden, (2) laat, indien mogelijk, de schors van geoogste bomen achter om nutriënten in het bos te behouden, (3) vermijd schermkap en kaalkap. Beide zorgen voor een sterke toename van de uitspoeling en een afname van de depositie, en daarmee tot negatieve balansen voor schaarse nutriënten, en (4) houdt het kronendak zoveel mogelijk gesloten om uitspoeling te voorkomen en depositie van basische kationen te bevorderen.<

marleen.vos@wur.nl



foto Hans van den Bos

Meer weten?

De promotie van Marleen Vos (WUR) vond plaats op woensdag 15 mei.

Het proefschrift is te vinden op: edepot.wur.nl/650894.

Voor verdere vragen kun je terecht bij Marleen Vos (marleen.vos@wur.nl) of Frank Sterck (frank.sterk@wur.nl).

Meer informatie over het bosexperiment: forexperiment.com.

(Her)lees het artikel Duurzaam en klimaatbestendig bosbeheer in de 21ste eeuw van F. Sterck et al. in *Vakblad #184* pagina 4, 2022: edepot.wur.nl/568495