

Invloed van stikstofdepositie op organische stof en voedingsstoffen

De bodem van een bos bepaalt in belangrijke mate hoe een bos functioneert. Het is het substraat waar de bomen in wortelen voor verankering, het levert vocht en voedingsstoffen aan bomen en planten, en het is de omgeving waarin veel bodemorganismen leven die een onmisbare rol spelen in de voedingsstoffenlevering aan de bomen. Bosbodems veranderen van nature in de tijd, bijvoorbeeld door vertering van het moeder materiaal en toename van organische stof. Er is aanvoer van nutriënten vanuit depositie, en nutriënten spoelen uit met het neerslagoverschot. Recente metingen laten zien dat de voorraden aan koolstof en nutriënten in bosbodems sterk zijn veranderd ten opzichte van 1990. De meeste veranderingen zijn niet gunstig voor het bos.

tekst Anjo de Jong & Wim de Vries (Wageningen University & Research), **foto's** Pieter Dijk

> De omstandigheden waarin de processen in bosbodems plaatsvinden zijn sterk door de mens gewijzigd. Door atmosferische depositie van stikstof (N)- en zwavel (S)-verbindingen is in Nederlandse bossen zowel vermesting door stikstof als bodemverzuring versterkt opgetreden. De piek van de zwavelbelasting lag in Nederland in het midden van de jaren zestig van de vorige eeuw en is daarna afgenomen. Voor stikstof lag de piek in het midden van de jaren tachtig. De vraag is of de afnemende S- en in mindere mate N-depositie op bosgronden, zoals dat de afgelopen decennia het geval is geweest, tot een meer gebalanceerde nutriëntenhuishouding van bossen heeft geleid. Om dit te onderzoeken zijn de koolstof- en nutriëntenvoorraad bepaald in bodems van 127 bossen waarvoor dit eerder in 1990 is gedaan. De locaties liggen op zandgronden verspreid over Nederland (figuur 1) en betreffen de boomsoorten Corsicaanse den, douglasspar, fijnspar, grove den, Japanse lariks, beuk en zomereik. De opstanden werden in 1990 regulier beheerd met dunningen. Op 20 procent van de locaties heeft in



Bodemmonster in een beukenbos (links) en in een grove dennenbos.



de afgelopen 33 jaar verjonging plaatsgevonden door (scherm)kap of sterfte. Op 30 procent van de locaties is momenteel een natuurbostype van het SNL aangewezen.

Bemonsteringen

In 1990 is de chemische samenstelling van de bosbodems op 150 locaties onderzocht door monsters te nemen van de strooisellagen en de minerale bovengrond (0 tot 30 centimeter). Van die monsters zijn gehalten gemeten en is het gewicht bepaald om voorraden te bepalen van koolstof (C), stikstof (N) en fosfor (P). Een belangrijk aspect van bodems is de mate waarin ze positief geladen elementen kunnen vasthouden (de kationenuitwisselingscapaciteit) en vooral ook welke elementen dat zijn (de bezetting ervan aan het uitwisselcomplex). Deze uitwisselbare gehalten en bijbehorende voorraden aan kalium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), ijzer (Fe) en aluminium (Al) in de minerale bovengrond zijn eveneens gemeten. Daarnaast zijn gehalten aan aluminium- en ijzeroxiden gemeten die de bodem bufferen in het sterk zure traject, evenals de zuurgraad (pH-KCl).

In 2023 zijn 136 locaties die in 1990 zijn onderzocht opnieuw bemonsterd. Daarin zijn de analyses wederom verricht. Negen locaties zijn bij de bepaling van de verschillen buiten beschouwing gelaten, omdat het jonge bossen op kalkrijkere voormalige landbouwgronden, vernette kwelsituaties of veengronden betreffen met sterk afwijkende nutriëntenvoorraden. Daarmee is de analyse van veranderingen over de laatste 33 jaar met 127 locaties uitgevoerd. De voorraden van koolstof, stikstof, fosfor, calcium, kalium en magnesium in 1990 en 2023 en het verschil daartussen staan in tabel 1.

De metingen geven aan dat de bodemvermesting (aanrijking van stikstof) op zandgronden in de laatste decennia sterk is voortschreden, ondanks de sterk verminderde N-depositie, maar dat de bodemverzuring in termen van afname in basenvoorraden (Ca, K en Mg) niet verder is opgelopen, al zijn deze basen wel verplaatst van de bovengrond naar de strooisellaag. De voortgaande verzuring is met name gebufferd door aluminium.

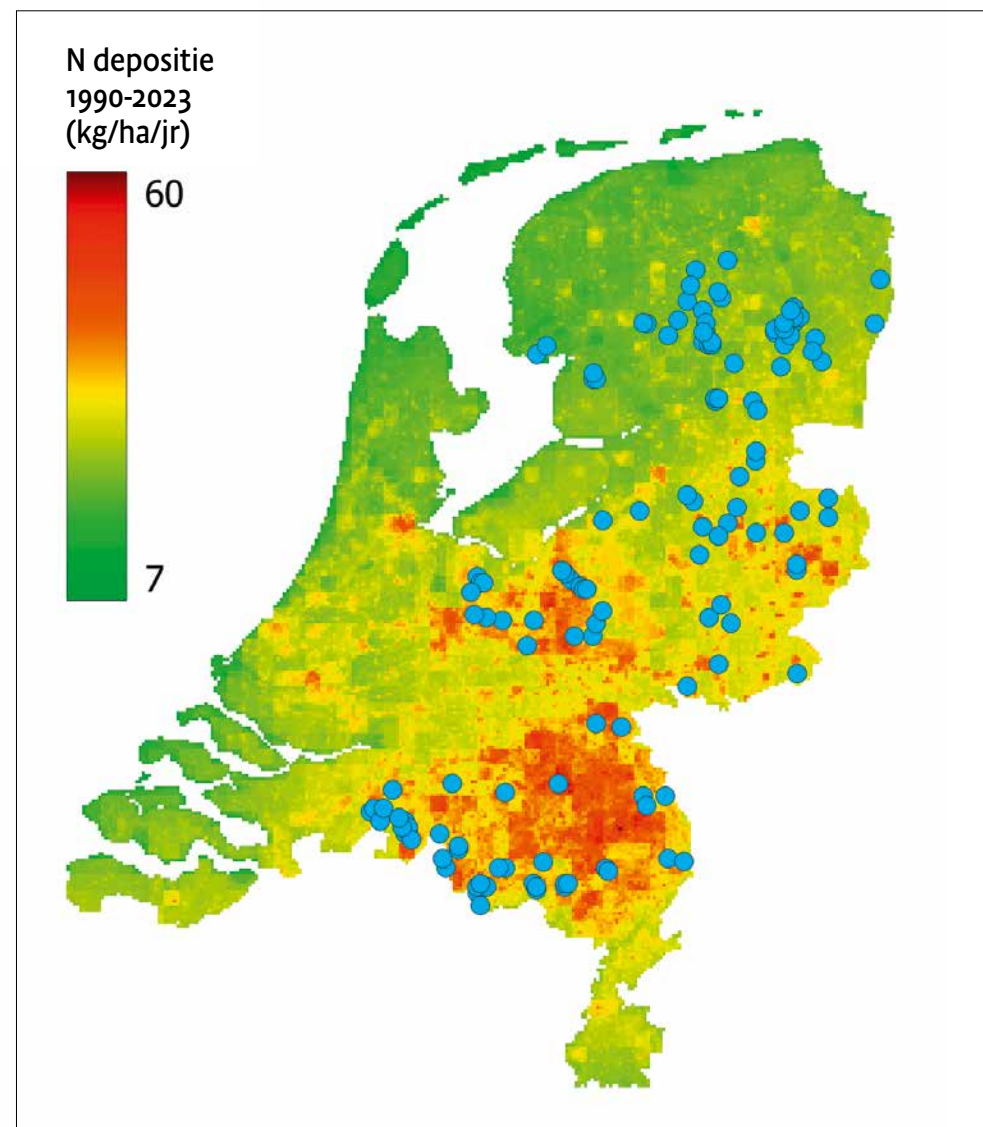
Aanzienlijke toename koolstof en stikstof

De koolstofvoorraden in de strooisellaag en de bovengrond zijn gemiddeld met 14 ton/ha toegenomen (tabel 1). Dat betekent een toename van 0,4 ton/ha/jr, waarvan 95 procent is toegenomen in de strooisellaag. De toename van koolstof in de strooisellaag betekent dat de bosbodem een belangrijke sink van CO₂ is geweest. De toename is gunstig voor het vasthouden van voedingsstoffen en water, en voor het bodemleven. De totale stikstofvoorraden in de strooisellaag en bovengrond zijn in de afgelopen 33 jaar toegenomen met 1311 kg/ha (tabel 1) waarvan ruim de helft in de strooisellaag en iets minder dan de helft in de bovengrond. Naar verhouding was de toename van stikstof groter dan van koolstof. De C/N-verhouding in het strooisel was in 1990 circa 26 en in 2023 circa 24 en de C/N-verhouding in de geaccumuleerde voorraad lag rond de 10 (tabel 1). De organische stof kent nu dus een hoger gehalte aan stikstof dan in 1990.

De toename van 1311 kg N/ha over de periode 1990-2023 betekent een gemiddelde jaarlijkse toename van bijna 40 kg/ha/jr. Aangezien er door uitspoeling en netto

Tabel 1. Voorraden van koolstof, stikstof, fosfor, calcium, kalium en magnesium in 1990, 2023 en het verschil daartussen.

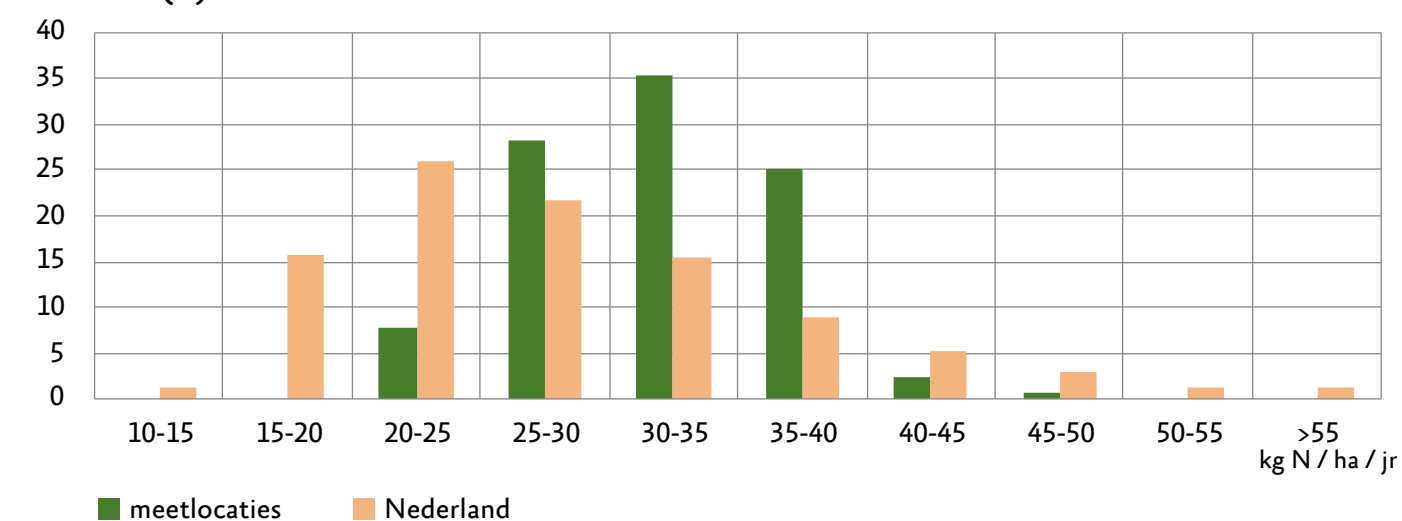
Element	Eenheid	Strooisellaag			Bovengrond			Totaal		
		1990	2023	verschil	1990	2023	verschil	1990	2023	verschil
Koolstof	(ton/ha)	38	51	13	89	90	1	127	141	14
Stikstof	(kg/ha)	1440	2143	703	3314	3921	607	4754	6064	1310
Fosfor	(kg/ha)	54	65	11	474	431	-43	528	496	-32
Calcium	(kg/ha)	200	244	44	144	110	-34	344	354	10
Kalium	(kg/ha)	79	67	-12	72	64	-8	151	131	-20
Magnesium	(kg/ha)	43	65	23	21	27	6	65	92	27



Figuur 1. Ruimtelijke variatie in modelmatig geschatte depositieniveaus in Nederland, gemiddeld over 1990-2023, met de ligging van de meetlocaties (blauwe bolletjes).

De geschatte hoge stikstofdepositie sluit aan bij studies die een circa 50 tot 100 procent invang van stikstof door bossen aangeven in vergelijking met korte vegetaties. De gemiddeld hogere depositie in bossen komt deels naar voren als wordt gekeken naar de depositie op de meetlocaties ten opzichte van die voor heel Nederland (figuur 2). Als wordt ingezoomd op de depositiekaarten, dan blijkt echter dat de depositieniveaus volgens die kaarten in bossen maar licht hoger zijn dan de korte vegetaties in de omgeving.

Aandeel (%)



Figuur 2. Verdeling van het oppervlak van Nederland en van de meetlocaties over gemiddelde depositieniveaus van 1990-2023.

De hogere voorraden en gehalte aan N in de bodem – die al relatief hoog waren gezien de groeiplaats – zijn in het algemeen ongunstig voor het bodemleven en planten die aan schralere bodems gebonden zijn. Hoewel meer stikstof aanvankelijk gunstig kan zijn voor de groei van bomen kan een teveel ongunstig uitpakken. Het kan bomen bijvoorbeeld kwetsbaar maken voor droogte en vorst, doordat er weinig wordt geïnvesteerd in de ondergrondse fijne wortelmasse en mycorrhiza. Deze bomen zijn daardoor kwetsbaarder voor aantastingen door ziekten en plagen.

opname in biomassa naar schatting 10 kg/ha/jr van de toevoer niet heeft kunnen accumuleren in de bodem, schatten we dat de gemiddelde totale N-depositie over de periode 1990-2023 rond de 50 kg/ha/jr zal zijn geweest. De N-depositie op bossen is daarmee aanzienlijk hoger dan de modelmatig geschatte gemiddelde depositie in Nederland, die voor de periode 1990-2023 gemiddeld rond de 28 kg/ha/jr ligt. Maar deze ligt in enkele bosrijke provincies duidelijk hoger voor die periode: 35 kg/ha/jr in Noord-Brabant en 32 kg/ha/jr in Gelderland en Utrecht (figuur 1).

Voorraden fosfor zijn klein en nemen af
Fosfor is een belangrijk element voor de groei van bomen, vooral als er veel stikstof beschikbaar is en fosfor limiterend wordt voor groei. De totale fosforvoorraden in de strooisellaag en bovengrond zijn met gemiddeld 32 kg P/ha afgenomen (tabel 1). De gemiddelde voorraad is vrij klein, maar wordt nog wat opgetrokken door eikenopstanden op voormalige landbouwgronden. In de bovengrond nam de voorraad af met gemiddeld 43 kg/ha. De P-gehalten van de strooisellaag zijn afgenomen, maar doordat de massa van strooisel

toenam, nam de P-voorraad toch toe met 11 kg P/ha. De beschikbaarheid van fosfor voor de groei van bomen is hierdoor waarschijnlijk afgenomen.

Wisselend beeld bij calcium, kalium en magnesium

In de strooisellaag zijn zowel de Ca- als Mg-voorraad toegenomen met circa 44 en 23 kg/ha, maar die van K is met 12 kg/ha afgenomen. De gehalten van Ca en K in de strooisellaag zijn afgenomen. Dit is evenals bij P in het algemeen ongunstig voor de kwaliteit ervan voor het bodemleven.

De Mg-gehalten zijn wel iets toegenomen. Wat opvalt is dat uitwisselbaar Ca in de bovengrond is afgenomen (gemiddeld met 34 kg/ha) en ook de K-voorraad is met gemiddeld 9 kg/ha afgenomen, ondanks dat de zuurdepositie is gedaald. De afname van K is nadelig aangezien dit element van belang is voor droogtetolerantie. K wordt slecht vastgehouden in de (verzurende) bodem, en het bos zal voor een groot deel voor K afhankelijk zijn van de actuele verwerking van de mineralen van de bodem en depositie van K. De voorraad Mg aan het uitwisselingscomplex van de bovengrond is gemiddeld licht toegenomen (gemiddeld met 6 kg/ha). De bezetting van het uitwisselcomplex met uitwisselbare basen (Ca, K, Mg) was in 1990 slechts 8 procent en is verder gedaald tot 6 procent, terwijl een bezetting van 20 procent of meer gewenst is. Dit wijst op een lichte verdere verzuring van de bovengrond. Bij de afgenomen zuurdepositie lijkt de balans tussen afvoer door opname en uitspoeling van basen ten opzichte van de aanvoer door verwerking in combinatie met depositie van basen dus te leiden tot een kleine toename van de Ca- en Mg-voorraad in de strooisellaag. De toename van basen in organisch materiaal kan aan de ene kant als positief gezien worden, aangezien deze elementen daarbij behouden zijn voor het ecosysteem. Aan de andere kant zijn deze voorraden niet eenvoudig door bomen op te nemen, en is er een goed functionerend bodemleven nodig om opname te bevorderen.

Doorgaande verzuring maar pH gelijk

De zuurgraad van de bovengrond is in de afgelopen 33 jaar gemiddeld vrijwel gelijk gebleven, waarbij de pH (KCl) gemiddeld 3,5 bedraagt.

Aluminium, dat bij hoge gehalten met name schadelijk is voor fijne boomwortels die zorgen voor de opname van water en voedingsstoffen, heeft een belangrijke rol gespeeld in het bufferen van de zure depositie. De voorraad ervan in de strooisellaag is gemiddeld met 102 kg/ha afgenomen en ook de voorraad Al-oxiden (oxalaat-extraheerbaar) in de bovengrond is duidelijk afgenomen, namelijk van 4165 naar 3978 kg/ha, ofwel een afname van 187 kg/ha. Op verschillende locaties is de voorraad ervan klein aan het worden, waardoor daar de bufferende werking van Al op langere termijn zal staken en de pH verder kan dalen. Een belangrijk deel van de Al die door de zuurlast in oplossing is gekomen, is gaan binden aan het uitwisselingscomplex van de bovengrond. De Al-bezetting daarvan is toegenomen van 62 naar 79 procent. De afname in de Al-voorraad kan met name worden verklaard door de zwaveldepositie. Deze heeft een grotere verzurende rol gespeeld dan N, aangezien N vooral in de bodem is geaccumuleerd en minder dan zwavel is uitgespoeld. De verzuring door stilstof wordt namelijk ongedaan gemaakt als nitraat wordt opgenomen door de plant of vastgelegd in de bodem.

Samenvattend

Samenvattend is de conclusie dat er veel stikstof in de bodems is geaccumuleerd. De grote stikstoftoename leidt tot vermesting van de bodems, die voor veel organismen ongunstig is. Er is eveneens veel koolstof geaccumuleerd, wat op zich gunstig is voor de bodemkwaliteit (onder andere het vochtvasthoudend vermogen van grond) en ook in verband met de bijbehorende CO₂-vastlegging. Omdat de toename van stikstof groter is, is de C/N-verhouding in het strooisel afgenomen. De

toename van koolstof in de strooisellaag gaat samen met enige accumulatie van P, Ca en Mg, maar de gehalten van deze nutriënten in de strooisel zijn gedaald, wat doorgaans ongunstig is. De P-voorraad is klein en neemt af. De zuurgraad van de bodem is niet veranderd, doordat vooral Al de verzurende neerslag heeft gebufferd. Er is wel een verzurend effect doordat Al in oplossing komt en Ca en K in de bovengrond afnemen. Zwaveldepositie is naar inschatting voor twee derde en stikstof voor een derde de oorzaak van de verzuring.

Mogelijkheden voor bosbeheer

Beheerders hebben maar beperkt mogelijkheden om bovengenoemde processen te keren. Belangrijk is dat de depositie van N en S verder afnemen. Terughoudendheid met oogst van takhout (directe afvoer van nutriënten) en vlaktegewijze kap (veroorzaakt grotere uitspoeling) is in de eerste plaats van belang. In het bos kan lokaal met maatwerk gekeken worden of het toedienen van bufferende stoffen en nutriënten nuttig is. Deze hebben echter toch hun beperkingen: ze zijn duur, de werking lijkt langzaam of nog onzeker (steenmeel), ze werken eenzijdig of werken kort (kali, lage dosis kalk). Kalk heeft bij een hogere dosis nadelige effecten via mineralisatie van het strooisel. Specifiek voor K zal wellicht alleen een langzaam werkend middel zoals steenmeel soelaas kunnen bieden. Voor de langere termijn kan op sommige plaatsen (met een niet te arme bodem en een lage wilddruk) gestuurd worden in de boomsoortensamenstelling.

anjo.dejong@wur.nl,
wim.devries@wur.nl