A photograph of a forest with a white circle overlaid on it. The forest is lush with green trees and undergrowth. The white circle is centered in the upper half of the image.

Veranderingen van voorraden koolstof, stikstof, fosfor, kalium, calcium, magnesium, ijzer en aluminium in bosbodems tussen 1990 en 2023

J.J. de Jong, W. De Vries, P.G. Dijk en B.J.W. Lerink



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Veranderingen van voorraden koolstof, stikstof, fosfor, kalium, calcium, magnesium, ijzer en aluminium in bosbodems tussen 1990 en 2023

J.J. de Jong, W. De Vries, P.G. Dijk en B.J.W. Lerink

Dit rapport is uitgebracht in het kader van het project 'Vitale bosbodems'. Dit project is onderdeel van het Kennisprogramma Klimaatlim Bos- en Natuurbeheer en mogelijk gemaakt met financiering van het Ministerie van LNV. Het valt onder Beleidsondersteunend onderzoeksthema 'Verhoging vastlegging koolstof in bos en natuur' (projectnummer BO-43.10-005-008).

Wageningen Environmental Research
Wageningen, augustus 2024

Gereviewd door:
Gert Jan Reinds, teamleider van team Duurzaam Bodemgebruik

Akkoord voor publicatie:
Erik Arets, teamleider van team Sustainable Forest Ecosystems

Rapport 3362
ISSN 1566-7197

De Jong, J.J., W. De Vries, P.G. Dijk en B.J.W. Lerink, 2024. *Veranderingen van voorraden koolstof, stikstof, fosfor, kalium, calcium, magnesium, ijzer en aluminium in bosbodems tussen 1990 en 2023*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3362. 60 blz.; 33 fig.; 29 tab.; 38 ref.

In 1990 is een uitgebreide bemonstering van bosbodems uitgevoerd op 150 locaties waarbij bodemchemische eigenschappen zijn bepaald en voorraden van belangrijke elementen zijn berekend. In 2023 zijn 136 hiervan opnieuw bemonsterd en zijn dezelfde bepalingen en berekeningen van voorraden uitgevoerd. Vergelijking van beide bemonsteringen laat duidelijke ontwikkelingen zien. De gemiddelde voorraden stikstof en koolstof zijn duidelijk toegenomen. De basenbezetting van het uitwisselingscomplex is afgenomen. De zuurgraad is gemiddeld niet wezenlijk veranderd, wat vooral komt door buffering door het oplossen van aluminiumoxides, waarvan de voorraden zijn afgenomen en de bezetting aan het uitwisselingscomplex is toegenomen.

In 1990, an extensive sampling of forest soils was carried out at 150 locations, soil chemical properties were determined and stocks of important elements were calculated. In 2023, 136 of them were resampled and the same analyses and calculations of stocks were carried out. Comparison of both samples shows clear developments. The average stocks of nitrogen and carbon have clearly increased. The base saturation of the exchange complex has decreased. The pH of the soil has not changed significantly on average, which is mainly due to buffering by dissolution of aluminium oxides, stocks of which have decreased and the occupancy at the exchange complex has increased.

Trefwoorden: Bosbodem, stikstof, koolstof, depositie, basenbezetting, verzuring

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/669938> of op www.wur.nl/environmental-research (ga naar 'Wageningen Environmental Research' in de grijze balk onderaan). Wageningen Environmental Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

© 2024 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, www.wur.nl/environmental-research. Wageningen Environmental Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

- Overname, vereenvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, vereenvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, vereenvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Wageningen Environmental Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.



Wageningen Environmental Research werkt sinds 2003 met een ISO 9001 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem.

In 2006 heeft Wageningen Environmental Research een milieuzorgsysteem geïmplementeerd, gecertificeerd volgens de norm ISO 14001.

Wageningen Environmental Research geeft via ISO 26000 invulling aan haar maatschappelijke verantwoordelijkheid.

Inhoud

Verantwoording	5
Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	13
1.1 Achtergrond	13
1.2 Doelstelling, aanpak en inhoud van rapport	14
2 Methode	15
2.1 Locaties en bemonstering in 1990 en 2023	15
2.2 Laboratoriummethoden	17
2.3 Berekening van voorraden en verschillen	18
3 Resultaten en discussie	19
3.1 Dikte en massa van de strooisellaag	19
3.2 Koolstofvoorraden	21
3.3 Stikstofvoorraden	22
3.4 Fosforvoorraden	26
3.5 Basenvoorraden	28
3.6 Aluminium- en ijzervoorraden	32
3.7 Zuurgraad van de minerale bovengrond	36
4 Conclusies	38
Literatuur	40
Bijlage 1 Ligging van bemonsteringslocaties	42
Bijlage 2 Elementgehalten in strooisellaag en minerale bovengrond	43

Verantwoording

Rapport: 3362

Projectnummer: 5200047882

Wageningen Environmental Research (WENR) hecht grote waarde aan de kwaliteit van zijn eindproducten. Een review van de rapporten op wetenschappelijke kwaliteit door een referent maakt standaard onderdeel uit van ons kwaliteitsbeleid.

Akkoord referent die het rapport heeft beoordeeld,

functie: Teamleider team Duurzaam Bodemgebruik

naam: Gert Jan Reinds

datum: 14-6-2024

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Erik Arets

datum: 2-7-2024

Woord vooraf

Bossen vervullen belangrijke maatschappelijke functies. Ze bieden bijvoorbeeld mogelijkheden voor recreatie, ze leveren een aantrekkelijke omgeving, ze herbergen een diversiteit aan leven, ze leveren hout en schoon water, en leggen koolstof vast. De mate waarin ze deze functies vervullen, hangt voor een groot deel af van de eigenschappen van de bodem van het bos. Deze bodem wordt in de tijd door processen van het bos gevormd, bijvoorbeeld doordat organische stof met nutriënten aan de bodem wordt toegevoegd, nutriënten uitspoelen, of er juist bij komen door verwerking van mineralen en invang van depositie. Bosbodems veranderen dan ook langzaam maar zeker in de tijd, en dat geldt zeker voor de veelal relatief jonge bossen in Nederland, die vaak vanuit heidebebossing zijn ontstaan. De bosbodems worden echter ook sterk door de omgeving beïnvloed. Vooral verhoogde depositie van stikstof en zwavel heeft invloed op de chemische eigenschappen van bosbodems. Om die reden is er in 1990 een uitgebreide inventarisatie uitgevoerd om de chemische eigenschappen van bosbodems in beeld te brengen. Die bemonstering vormde de basis voor een herhaalde bemonstering die in 2023 is uitgevoerd, met als doel om te kijken in hoeverre voorraden van koolstof, stikstof en andere elementen in die periode van 33 jaar zijn veranderd. Voor de bemonstering is toestemming verkregen van de beseigenaren. We willen hen daarvoor hartelijk bedanken.

De auteurs

Samenvatting

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, maar is ook de omgeving waarin veel bodemorganismen leven. Bosbodems veranderen van nature in de tijd, bijvoorbeeld door verwerking van het moedermateriaal en ophoping van organische stof. Er is aanvoer van nutriënten vanuit depositie, en nutriënten spoelen uit bij neerslagoverschot, als ze onvoldoende door de bodem en de organismen worden vastgehouden.

De omstandigheden waarin deze processen plaatsvinden, zijn sterk door de mens gewijzigd. Door atmosferische depositie van stikstof- (N) en zwavel- (S)verbindingen is in Nederlandse bossen zowel vermesting door stikstofaccumulatie als bodemverzuring versterkt opgetreden. Bodemverzuring kwam daarbij tot uiting in een afname van (uitwisselbare) basenvoorraden en ook in aluminiumoxidevoorraden met bijbehorende pH-daling. 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 die voorligt, is of de afnemende S- en – in mindere mate – de N-depositie op bosgronden, zoals dat de afgelopen decennia het geval is geweest, ook tot een verbetering van de verzuring hebben geleid door een mogelijke toename in basenvoorraden en pH of dat het nog steeds is doorgegaan. Een vergelijkbare vraag ligt voor met betrekking tot de vermesting door stikstofaccumulatie. Hoe heeft zich dat ontwikkeld in de afgelopen decennia?

In 1990 is de chemische samenstelling van de bosbodems op 150 locaties onderzocht, waaronder de totaalgehalten en bijbehorende voorraden aan koolstof (C), stikstof (N) en fosfor (P) en de uitwisselbare gehalten en bijbehorende voorraden aan kalium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), ijzer (Fe) en aluminium (Al) in de strooisellaag en in de minerale bovengrond (0-30 cm). Daaruit bleek onder andere dat de bezetting van het uitwisselingscomplex met uitwisselbare basen in de meeste bodems veelal minder was dan 10%, terwijl de bezetting met aluminium boven de 60% lag. De bodems waren dan ook zuur met een pH-KCl van gemiddeld rond 3,5. In 2020-2021 is een vergelijkbaar uitgebreid onderzoek geweest naar de chemische samenstelling van meetpunten van de Nederlandse bosinventarisatie. Vergelijking van de resultaten daarvan met die van 1990 laten duidelijke verschillen zien. Maar omdat de locaties van beide bemonsteringen verschillen, is het lastig om nauwkeurig uitspaken te doen over de algehele verandering van de bosbodems ten opzichte van 1990. Daarom zijn in deze studie 136 locaties die in 1990 zijn onderzocht opnieuw bemonsterd in 2023 en zijn daarin de boven aangegeven analyses verricht. Voor de overige 14 locaties werd geen toestemming verkregen of was een locatie niet goed bereikbaar. Er zijn verder 9 locaties bij de bepaling van de verschillen buiten beschouwing gelaten, omdat ze kalkrijkere voormalige landbouwgronden of vernatte kwelsituaties of veengrond betreffen met een sterk afwijkende ontwikkeling. Daarmee is de analyse van veranderingen over de laatste 33 jaar met 127 locaties uitgevoerd. Op iedere locatie zijn monsters genomen strooisel en minerale bovengrond (0-30 cm diep). In de monsters zijn zowel in 1990 als in 2023 metingen gedaan van:

- (i) totaalgehalten van C, N en P in zowel strooisel- als minerale bovengrond en van K, Ca, Mg, Mn, Al en Fe in strooisel;
- (ii) ammoniumoxalaat extraheerbare gehalten van P, Al en Fe in de minerale bovengrond;
- (iii) uitwisselbare gehalten van Ca, Mg, K, Al en Fe in de minerale bovengrond.

Het doel hiervan was om te achterhalen of de hypothese klopt dat zowel de bodemvermesting als bodemverzuring is voortgeschreden in de laatste decennia, ondanks de sterk verminderde S- en N-depositie, omdat de relatief hoge zuur- en N-depositie gedurende de periode 1990-2023 nog altijd hoger zijn dan de opname en buffering ervan en of dit is gekoppeld aan koolstofaccumulatie en verlies aan aluminium. Vragen die daarbij spelen, zijn:

- In hoeverre is er sprake van vastlegging van koolstof in bosbodems en is daarbij sprake van accumulatie van strooisel?

- In hoeverre is de geaccumuleerde stikstofdepositie terug te vinden in strooisellaag en minerale bovengrond?
- Welke veranderingen zijn opgetreden in voorraden van fosfor, waarvan de depositie relatief constant is gebleven?
- In hoeverre is er sprake van herstel in uitwisselbare voorraden aan basen, te weten kalium, calcium en magnesium, door de afnemende verzuring als gevolg van de afgenomen stikstof- en zwavel depositie?
- In welke mate is de doorgaande verzuring gebufferd door langzaam beschikbare aluminiumoxide en snel beschikbare uitwisselbare aluminium?
- In welke mate is er sprake van een toename in pH als gevolg van de afnemende verzuring of neemt de pH nog steeds af?

De koolstofvoorraden in de strooisellaag en bovengrond zijn gemiddeld met 14 ton ha⁻¹ toegenomen van 127 naar 141 ton ha⁻¹, ofwel ca 0,4 ton ha⁻¹ jr⁻¹, waarvan het overgrote deel, te weten 13,4 ton ha⁻¹, is geaccumuleerd in de strooisellaag. De strooisellaag is gemiddeld in 33 jaar 0,6 cm dikker geworden, maar als locaties die door zwijnen en kap zijn verstoord niet mee worden genomen, is dit 0,9 cm. De toename van koolstof in de strooisellaag betekent dat de bosbodem een belangrijke sink van CO₂ is geweest.

De stikstofvoorraden in de strooisellaag bedragen in 2023 gemiddeld 2.143 kg ha⁻¹ en in de bovengrond gemiddeld 3.921 kg ha⁻¹. De totale stikstofvoorraden in de strooisellaag en bovengrond zijn in de afgelopen 33 jaar toegenomen met 1311 kg ha⁻¹, waarvan ruim de helft (704 kg ha⁻¹) in de strooisellaag en iets minder dan de helft (607 kg ha⁻¹) in de bovengrond. Dit betekent een gemiddelde jaarlijkse toename van bijna 40 kg ha⁻¹ jr⁻¹. Aangezien er door uitspoeling en netto-opname in biomassa grofweg 10 kg ha⁻¹ jr⁻¹ van de toevoer niet heeft kunnen accumuleren in de bodem, schatten we dat de totale N-depositie rond de 50 kg ha⁻¹ jr⁻¹ zal zijn geweest. De depositie van N in bossen is daarmee aanzienlijk hoger dan de gemiddelde depositie in Nederland, die voor de periode 1990-2023 gemiddeld rond de 30 kg ha⁻¹ jr⁻¹ ligt, wat klopt met studies die een ca. 50-100% hogere invang van depositie door bossen aangeven dan korte vegetaties.

De totale fosforvoorraden in de strooisellaag en bovengrond zijn afgenomen met ca. 33 kg P ha⁻¹ tot gemiddeld bijna 500 kg ha⁻¹, waarbij wordt aangetekend dat de onzekerheidsmarge rond de afname van P relatief groot is (relatief grote spreiding). Daarbij nam de voorraad in de strooisellaag toe met ca. 11 kg P ha⁻¹, terwijl in de bovengrond de voorraad afnam met ca 43 kg P ha⁻¹. De toename in de strooisellaag is toe te schrijven aan een toename van de totale massa ervan, aangezien de gehalten van P daalden. De afname van de P-voorraden zal voor het grootste deel komen omdat de opname van bomen en vervolgens vastlegging in biomassa hoger is dan de toevoer door depositie. Uitspoeling van P speelt slechts een kleine rol.

In de strooisellaag zijn zowel de Ca- als Mg-voorraad toegenomen met gemiddeld 44 kg ha⁻¹ voor Ca en 23 kg ha⁻¹ voor Mg. De totale K-voorraad in de strooisellaag is achteruitgegaan met circa 12 kg ha⁻¹ en dit geldt ook voor de uitwisselbare K-voorraad in de bovengrond (gemiddeld 9 kg ha⁻¹), ofwel een afname van 21 kg in zowel de strooisellaag als bovengrond (afname aan het uitwisselingscomplex), waarmee de gemiddelde voorraad op 131 kg ha⁻¹ komt. Bij de afgenomen zuurdepositie lijkt de balans tussen afvoer door opname en uitspoeling van basen ten opzichte van de aanvoer door vertering in combinatie met depositie van basen dus te leiden tot een kleine toename van de Ca- en Mg-voorraad in de strooisellaag. De accumulatie 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. Wat opvalt, is dat uitwisselbaar Ca in de bovengrond, die in 1990 al zeer laag was, nog verder is afgenomen (gemiddeld met 34 kg ha⁻¹), ondanks dat de zuurdepositie is afgenomen. De voorraad Mg aan het uitwisselingscomplex van de bovengrond is echter gemiddeld licht toegenomen (gemiddeld met 6 kg ha⁻¹).

De zuurgraad van de bovengrond is in de afgelopen 33 jaar gemiddeld vrijwel gelijk gebleven, waarbij de pH-KCl gemiddeld 3,5 bedraagt. Aluminium heeft een belangrijke rol gespeeld in het bufferen van de zure depositie. De voorraad ervan in de strooisellaag is gemiddeld met 102 kg ha⁻¹ afgenomen tot 208 kg ha⁻¹ en ook de oxalaat-extraheerbare Al-voorraad in de bovengrond is duidelijk afgenomen, namelijk van 4165 naar 3978 kg ha⁻¹, ofwel een afname van 187 kg ha⁻¹. Een belangrijk deel van de aluminium die door de zuurlast in oplossing is gekomen, is gaan binden aan het uitwisselingscomplex van de bovengrond. De afname in de

aluminiumvoorraad kan met name worden verklaard door de geaccumuleerde zwaveldepositie in de beschouwde periode.

Samenvattend zijn de belangrijkste resultaten van dit rapport dat de vermesting (stikstofaccumulatie) sterk is toegenomen, omdat de huidige stikstofdepositie op bossen (ca. 25-35 kg N ha⁻¹ jr⁻¹) nog altijd veel hoger ligt dan de netto-opname door bomen in bossen (gemiddeld ca. 5-10 kg N ha⁻¹ jr⁻¹), terwijl de verzuring maar heel langzaam is doorgedaan waarbij de pH en totale basenvoorraden vrijwel gelijk zijn gebleven. Meer specifiek is het volgende gevonden:

- De geaccumuleerde stikstofdepositie over de afgelopen 33 jaar is voor ca. 80% opgeslagen in de bodem, waarvan circa de helft in de strooisellaag en de helft in de minerale bovengrond. In totaal is naar schatting ca. 1300 kg ha⁻¹ geaccumuleerd. Daardoor speelt stikstof een belangrijke rol in de vermesting van de bodem.
- Er is ca. 14 ton ha⁻¹ koolstof geaccumuleerd. Koolstof is met name geaccumuleerd in de strooisellaag, met een gemiddelde C/N-verhouding (een belangrijke vermestingindicator) van ca. 11. Dit is een veel lagere C/N-verhouding dan normaal wordt aangetroffen in bossen en is het gevolg van de hoge N-depositie. De C/N-verhouding van de strooisellaag is daardoor met 2,4 afgenomen: van 26,4 in 1990 tot 23,8 in 2023. In de minerale bovengrond is nauwelijks koolstof geaccumuleerd, terwijl wel ca. 600 kg stikstof is bijgekomen, waardoor de C/N-ratio in de bovengrond gemiddeld met 4,1 is afgenomen: van 26,9 in 1990 tot 22,8 in 2023.
- De afgenomen zuurdepositie lijkt te hebben geleid tot een kleine toename van de Ca- en Mg-voorraad, met name in de strooisellaag en voor Mg ook aan het uitwisselingscomplex, maar de K-voorraad is verder afgenomen.
- Ondanks de afgenomen zuurdepositie is pH-KCl van de bovengrond in de afgelopen 33 jaar gemiddeld vrijwel gelijk gebleven, waarbij Al-buffering een belangrijke rol heeft gespeeld, hetgeen ook blijkt uit een afname in de voorraad ervan van bijna 300 kg ha⁻¹, wat overeenkomt met ca. 1000 molc ha⁻¹ jr⁻¹.
- De geschatte actuele zuurproductie is ca. 1500 molc ha⁻¹ jr⁻¹ uitgaand van Al-buffering uit oxiden van ca. 1000 molc ha⁻¹ jr⁻¹ en een vertering van basen en aluminium van ca. 500 molc ha⁻¹ jr⁻¹. Dit komt overeen met een vergelijkbare geschatte actuele zuurproductie en is voor ca. 2/3 het gevolg van de uitspoeling van zwavel en ca. 1/3 van de uitspoeling van stikstof. De hogere bijdrage van zwavel aan de verzuring, ondanks de veel lagere depositie dan stikstof, komt omdat zwavel in Nederlandse bossen nauwelijks wordt vastgelegd in tegenstelling tot stikstof, waarvan slechts ca. 10-15% uitspoelt.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

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, maar is ook de omgeving waarin veel bodemorganismen leven. Bosbodems veranderen van nature in de tijd, bijvoorbeeld doordat de mineralen van het moedermateriaal verteren en doordat er organische stof ophoopt. Vanuit vertering komen nutriënten vrij die worden opgenomen door de vegetatie en bodemleven, en accumuleren in organische stof. Er is ook aanvoer van nutriënten vanuit depositie en nutriënten spoelen uit met het neerslagoverschot, als ze onvoldoende door de bodem en de organismen worden vastgehouden. De omstandigheden waarin deze processen plaatsvinden, zijn sterk door de mens gewijzigd.

Door atmosferische depositie van stikstof- (N) en zwavel- (S)verbindingen is in Nederlandse bossen zowel vermesting (door accumulatie van stikstof) als bodemverzuring (door afname van (uitwisselbare) basenvoorraden en pH) 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. In die periode werd veel onderzoek gedaan naar bodemverzuring en de gevolgen ervan. Na 1990 is de depositie van zwavel en stikstof flink afgenomen (voor stikstof met name tussen 1990 en 2005).

Effecten van afnemende S- en in mindere mate N-depositie op bosgronden, zoals dat de afgelopen decennia het geval is geweest, hebben zeker niet tot verbetering van de vermesting geleid omdat de huidige stikstofdepositie op bossen (ca. 25-35 kg ha⁻¹ jr⁻¹) nog altijd veel hoger ligt dan de netto-opname in bossen (ca. 5-10 kg ha⁻¹ jr⁻¹). De te verwachten accumulatie van stikstof heeft naar verwachting ook geleid tot accumulatie van koolstof (C), omdat (i) een hogere stikstoftoevoer de bosgroei en daarmee de toevoer aan koolstof middels bladeren of naalden en takken verhoogt en (ii) de koolstofmineralisatie bij hogere stikstofgehalten veelal wordt vertraagd (bv. Janssens et al., 2010). Die koolstofaccumulatie is gunstig i.v.m. klimaatverandering en het vasthouden van vocht in de bodem. Daarnaast hebben de afnemende S- en N-depositie mogelijk zowel tot verbetering van verzuringsindicatoren als de pH en basenbezetting geleid. De basenbezetting is daarbij het percentage basische kationen (calcium (Ca), magnesium (Mg), kalium (K) en natrium (Na)) ten opzichte van de capaciteit waarmee de bodem positief geladen deeltjes kan vasthouden (kationuitwisselcapaciteit, CEC). De basenbezetting van bosgronden op zand ligt van nature rond de 15-20 procent. Al komt vooral in oplossing als gronden in het aluminium- buffertraject zitten en de basenverzadiging (som van Ca, Mg, K en Na als percentage van de CEC) lager is dan ca. 20-25% (De Vries, 1994). Door daling van sulfaat (SO₄)- en nitraat (NO₃)-concentraties daalt de Al-concentratie in het bodemvocht. Wel is dan nog steeds Al het belangrijkste bufferende element, zolang de zuurtoevoer hoger is dan de verweringsnelheid van zogenaamde primaire mineralen.

In 1990 is onderzoek gedaan naar onder andere koolstof, stikstof, basen en aluminiumvoorraden en van basenverzadiging en pH van 150 zandgronden onder bos. Uit het onderzoek in 1990 bleek dat o.a. dat de basenverzadiging voor zandgronden gemiddeld onder de 10 procent lag, maar de variatie was relatief groot en een deel van de gronden had waarden boven de 25% (De Vries en Leeters, 2001; Leeters en De Vries, 2001). In 2020-2021 is een bemonstering geweest van bosgronden op vaste (huidige) meetpunten van de nationale bosinventarisatie ten behoeve van toekomstige monitoring van bosgronden. Daarbij zijn de bodemchemische eigenschappen vergeleken met het onderzoek van 1990. Deze vergelijking laat duidelijke verschillen zien, maar die zijn voor een deel veroorzaakt doordat niet dezelfde punten zijn bemonsterd. Ze geven dus wel een indicatie van de veranderingen die de laatste 30 jaar hebben plaatsgevonden in de bosbodems, maar die verandering is niet eenduidig toe te schrijven aan accumulatie of verlies in de tijd. In 2023 is daarom de bodemchemische veldstudie van 1990 herhaald door een herbemonstering van de bovengenoemde 150 eikenopstanden op zand en leem op dezelfde locaties.

1.2 Doelstelling, aanpak en inhoud van rapport

Het doel van dit onderzoek is inzicht te krijgen in de veranderingen die zijn opgetreden in bosbodems op zandgronden in Nederland over de afgelopen 33 jaar. Dat is gedaan door de hoeveelheid koolstof en nutriënten (stikstof, fosfor, calcium, kalium, magnesium, mangaan en ijzer) en aluminium die is opgeslagen in de strooisellaag en in de minerale bovengrond (0-30 cm) in 1990 (De Vries and Leeters, 2001) te vergelijken met de huidige hoeveelheden op basis van een herbemonstering van 136 opstanden in 2023. Meer specifiek is het doel om te achterhalen of de hypothese klopt dat zowel de bodemvermesting als bodemverzuring is voortgeschreden in de laatste decennia, ondanks de sterk verminderde de S- en N-depositie. Een ander doel is om na te gaan of de N-depositie nog altijd hoger is dan de opname en buffering ervan en of dit leidt tot koolstofaccumulatie en verlies aan aluminiumoxides in de bodem. Vragen die daarbij spelen, zijn:

- In hoeverre is er sprake van vastlegging van koolstof in bosbodems en is daarbij sprake van accumulatie van strooisel?
- In hoeverre is de geaccumuleerde stikstofdepositie terug te vinden in de strooisellaag en minerale bovengrond?
- Welke veranderingen zijn opgetreden in voorraden van fosfor, waarvan de depositie relatief constant is gebleven?
- In hoeverre is er sprake van herstel in uitwisselbare voorraden aan basen, te weten kalium, calcium en magnesium, door de afnemende verzuring als gevolg van de afgenomen stikstof- en zwaveldepositie?
- In welke mate is de doorgaande verzuring gebufferd door langzaam beschikbare aluminiumoxidevoorraden en snel beschikbare uitwisselbare aluminiumvoorraden?
- In welke mate is er sprake van een toename in pH als gevolg van de afnemende verzuring?

In hoofdstuk 2 zijn de bemonsterings- en analysemethoden beschreven voor 2023 in vergelijking met 1990 en is aangegeven hoe elementvoorraden zijn berekend op basis van elementgehalten. In hoofdstuk 3 zijn de resultaten gegeven van elementvoorraden en strooisel en minerale bovengrond en de som van beide in 1990 en 2023 en het verschil erin. Dit betreffen (i) de voorraden aan strooisel en de totale hoeveelheden aan koolstof stikstof, fosfor, basen (kalium, calcium, magnesium), ijzer en aluminium in strooisel en (ii) de totaalvoorraden aan koolstof, stikstof en fosfor, de oxalaat-extraheerbare voorraden aan fosfor, ijzer en aluminium en de uitwisselbare voorraden aan kalium, calcium, magnesium, ijzer en aluminium in de minerale bovengrond. In zowel strooisellaag als minerale bovengrond gaat het om voorraden die relatief snel beschikbaar zijn. In hoofdstuk 4 worden conclusies uit het onderzoek getrokken.

2 Methode

2.1 Locaties en bemonstering in 1990 en 2023

In 1990 is er een set van 150 locaties geselecteerd, met daarin de belangrijkste boomsoorten op kalkarme zandgronden, verspreid over een variatie aan bodemtypen, grondwater- en depositieniveaus. Op iedere locatie zijn onder andere monsters genomen van de strooisellaag (ectorganische laag; L + F + H) en de minerale bovengrond (0-30 cm) waarin chemische analyses zijn uitgevoerd, waaronder totaalgehalten van C, N en P in strooisel en minerale bovengrond, totaalgehalten van K, Ca, Mg, M, Al en Fe in strooisel en meer beschikbare gehalten van P, K, Ca, Mg, M, Al en Fe in de minerale bovengrond.

Van de 150 locaties die in 1990 zijn bemonsterd zijn er 136 opnieuw bemonsterd in 2023 (**figuur b1**). Van de overige locaties was geen toestemming verkregen en een enkele keer was een locatie niet goed bereikbaar. Een groot deel van de locaties betreft bos met in 1990 hoofdboomsoort grove den (38 locaties, **tabel 1**), maar ook zomereik is met 28 locaties meer dan gemiddeld bemonsterd. Dat is in lijn met het gegeven dat deze soorten het meest voorkomen in de Nederlandse bossen (Schelhaas et al., 2022). De overige hoofdboomsoorten van 1990 zijn 13-15 keer bemonsterd. Van 75 locaties van het bodemtype volgens de Nederlandse bodemkaart een humuspodzol en 31 keer werd een vaaggrond bemonsterd. Andere bodemtypen zijn maar beperkt bemonsterd.

In 22 van de opstanden had tussen 1990 en 2023 een eindvelling plaatsgevonden, soms in de vorm van schermkap. In 10 van die vellingen betrof het fijnspar (op een totaal van 14 fijnsparopstanden van 1990). In 2 opstanden was de hoofdropstand in recente jaren gestorven. Het betrof een opstand van Douglasspar en van zomereik. In beide gevallen ging het om (ver)natte, kalkrijke, situaties. Op vier locaties was sprake van recente verstoring door zwijnen. Op enkele andere locaties was ook sprake van verstoring van de bodem in het verleden, maar daarbij was het niet duidelijk wat de oorzaak was. Wel werd hierdoor minerale grond door het strooisel vermengd.

Tabel 1 Verdeling van de locaties over boomsoorten en bodemtypen.

	Humuspodzol	vaaggrond	Moderpodzol	Enkeerd	zand, overig	leem	veen	Totaal
Corsicaanse den	9	4	0	0	0	0	0	13
Douglasspar	6	3	3	3	0	0	0	15
Fijnspar	11	2	0	0	1	0	0	14
Grove den	20	12	6	0	0	0	0	38
Japanse lariks	12	1	0	2	0	0	0	15
Beuk	6	3	2	1	1	0	0	13
Zomereik	11	6	2	2	5	1	1	28
Totaal	75	31	13	8	7	1	1	136

Bij enkele locaties was de bodem duidelijk afwijkend (zie ook **figuur b9**). In één geval gaat het om een veenbodem met een organischestofgehalte van 74%. In 8 gevallen ging het om kalkrijke zandbodems. Deze hadden in 1990 of in 2023 een basenverzadiging van meer dan 60%. Het betreft enkele locaties van relatief jong bos op voormalige zandgronden, die soms in 2023 al veel van de basenverzadiging hebben verloren in 2023. Maar in enkele gevallen gaat het ook om natte bossen met kwel, waarvan de basenverzadiging – waarschijnlijk door herstel van de hydrologie/kwel – juist is toegenomen. Omdat beide situaties niet erg representatief zijn voor de bossen op zandgronden, zijn deze 9 locaties bij de analyse van de verschillen tussen 1990 tot 2023 in dit hoofdstuk buiten beschouwing gelaten en is de analyse van veranderingen over de laatste 33 jaar met 127 locaties uitgevoerd. Deze 9 opstanden zijn wel weergegeven in de figuren, tenzij anders aangegeven.

De verdeling van de betreffende boomsoorten wijkt af van de verdeling in de Nederlandse bosinventarisatie (NBI) (**tabel 2**). Dit komt vooral doordat er bij de opzet van de steekproef voor is gekozen om per boomsoort voldoende locaties te bemonsteren. Het effect is dat boomsoorten die in het Nederlandse bos (volgens de NBI) relatief veel voorkomen (grove den, zomereik) een naar verhouding klein aandeel in de steekproef hebben, terwijl boomsoorten die relatief weinig voorkomen (Corsicaanse den, fijnspar, beuk) juist een groter aandeel hebben. Daar komt bij dat niet alle boomsoorten van de Nederlandse bossen op zandgronden zijn onderzocht. Zo ontbreken soorten als berk en Amerikaanse eik.

Tabel 2 Aantal meetlocaties en aandeel per boomsoort in de Nederlandse bosinventarisatie (NBI) op zandgronden en in dit rapport exclusief kalkrijke gronden en veen.

Boomsoort	NBI punten op zandgronden		Dit rapport, exclusief kalkrijke gronden en veen	
	Aantal punten	Aandeel	Aantal punten	Aandeel
CD	87	4%	12	9%
DG	166	8%	14	11%
FS	97	5%	14	11%
GD	974	48%	38	30%
JL	151	7%	14	11%
BU	109	5%	13	10%
EI	448	22%	22	17%

Bemonstering in 1990

Voor ieder monster zijn steeds 20 submonsters genomen in een grid van 5 m. De strooiselmonsters zijn genomen met een stalen cilinder van 14,8 cm diameter, waarbij de dikte van de L-, F- en H-laag zijn genoteerd. Monsters van L- en F-laag zijn samengevoegd. De monsters van de boven- en ondergrond zijn met een guts van 2,5 cm genomen.

Bemonstering in 2023

Op iedere locatie zijn 5 monsters van zowel de strooisellaag (LFH) en de bovengrond (0-30 cm) genomen: één op een centraal punt en vervolgens vier op 5 m afstand in de vier windrichtingen. De strooisellaag is bemonsterd door een scherp geslepen stalen cilinder met een doorsnede van 10 cm in de grond te slaan tot onder de strooisellaag. Het monster werd vervolgens in een goot gedeponereerd waarna het strooisel van de bovengrond werd gescheiden. De monsters van de bovengrond zijn afzonderlijk met een guts van 3,5 cm genomen (**figuur 1**) naast het gat van het strooiselmonster, omdat door het nemen van het strooiselmonster de bovengrond werd verstoord. Dit is in 1990 ook zo uitgevoerd.



Figuur 1 Monsters van bovengrond en strooisel.

De locaties van de bemonstering van 1990 zijn met behulp van de veldkaartjes van 1990 zo goed mogelijk teruggezocht. Op die kaartjes is met een pijl de locatie van de bemonstering weergegeven. De exacte coördinaten waren echter niet beschikbaar. Ieder bemonsteringspunt zal daarom niet op exact dezelfde locatie zijn uitgevoerd als in 1990, maar wel in hetzelfde deel van de opstand. Dit maakt dat vergelijking van de resultaten per punt met de nodige voorzichtigheid gedaan moet worden, omdat verschillen niet alleen door de tijd, maar ook door een afwijking in locatie kunnen komen.

2.2 Laboratoriummethoden

In de monsters van strooisel en minerale bovengrond zijn zowel in 1990 als in 2023 metingen gedaan van:

- (iv) totaalgehalten van C, N en P in zowel strooisel als minerale bovengrond en van K, Ca, Mg, Mn, Al en Fe in strooisel,
- (v) ammoniumoxalaat extraheerbare gehalten van P, Al en Fe in de minerale bovengrond,
- (vi) uitwisselbare gehalten van Ca, Mg, K, Al en Fe in de minerale bovengrond,

met methoden zoals hieronder aangegeven.

Lab-methoden in 1990

Totaalgehalten van C en N zijn bepaald met de methoden van Kurmies (Kurmies, 1949) en Kjehldahl (Hesse, 1971). Totaalgehalten van P, Ca, K, Mg, Mn en Al in strooisel en van P in de bovengrond zijn bepaald met ICP na oplossing van de grond in een mix van zwavel- en salpeterzuur. P, Al en Fe in de minerale bovengrond zijn bepaald met IPC na toevoeging van ammoniumoxalaat (meting na 4 uur, pH 3) (Schwertmann, 1964). De CEC en basenverzadiging zijn bepaald met IPC na toevoeging van 0,01 M zilverthioureum.

Lab-methoden in 2023

Monsters van de strooisellaag zijn gedroogd (70°C) tot ca. 1% vocht voor het bepalen van de droge massa. Vervolgens zijn ze colloïd gemalen. Chemische analyses van de strooisellaag zijn uitgevoerd op 70°C gedroogd materiaal na malen, terwijl de monsters van de bovengrond geanalyseerd zijn op luchtdroog materiaal (40°C). C- en N-gehalten zijn gemeten met een C/N-analyser [LECO] na droge verbranding volgens het Dumas-principe (Dumas, 1831).

Voor de totaalgehalten van Ca, K, Mg, Mn, Al en P in strooisel en P in de bovengrond is 200 mg fijngemalen bodemmateriaal opgelost met geconcentreerd salpeterzuur (HNO₃, 65%) en waterstofperoxide (H₂O₂ 30%), gevolgd door magnetrondestructie (Milestone microwave type mls 1200 mega of Ethos Easy). Na destructie is het destraat geanalyseerd op de ICP-OES.

Gehalten van P, Fe en Al in de bovengrond zijn daarnaast bepaald na ammoniumoxalaat-/oxaalzuurextractie met ICP-OES. Van de bovengrond is het organischestofgehalte bepaald door te gloeien bij 550°C (gloeiverlies) na drogen op 105°C.

Voor bepaling van de ongebufferde CEC en basenverzadiging is de grond (na drogen bij 40°C en 2 mm zeven) eerst verzadigd met 0,1 M bariumchloride-oplossing (). Alle uitwisselbare kationen zijn uit het adsorptiecomplex verdreven en zijn gemeten met ICP-OES in het 0,1 M-extract. De CEC is gemeten met ICP-OES, na uitwisseling van bariumchloride door magnesiumsulfaatoplossing. In enkele monsters bleek de gemeten hoeveelheid Al groter dan dat er aan het uitwisselingscomplex kan zitten. Blijkbaar was er tijdens de analyse extra Al vrijgekomen dat op andere wijze in de bodem beschikbaar is (mogelijk bv. zouten). Dit wordt bij de methode met bariumchloride soms ook waargenomen voor Ca bij kalkrijke bodems (Dohrmann, 2006). In veel van de bemonsterde locaties zijn ook zeer lage pH-waarden gemeten. In dergelijke zure bodems wordt Al opgelost uit mineralen, wat ook een verklaring kan zijn voor de hoge uitwisselbare gehalten. Wanneer de verzadiging van Ca, K, Mg, Fe, Na en Al samen hoger is dan 100%, is de waarde voor Al bijgesteld, zodat de totale verzadiging 100% werd. Dit betekent dat ervan is uitgegaan dat er bij zeer hoge Al-bezetting geen H⁺ aan het complex zit. De data van De Vries en Leeters (2001) wijzen hierop.

De pH KCl is bepaald na toevoeging van 1M KCl. Het mengsel is 1 uur geschud, waarna het ten minste 1 uur (max. 3 uur) bleef staan om te bezinken. De pH is vervolgens bepaald met een pH-34 Beckman.

Vergelijking laboratoriummethoden 1990 en 2023

De resultaten van de bemonstering van 2023 zijn vergeleken met de data van de bodembemonstering die in 1990 is uitgevoerd (De Vries en Leeters, 2001). In beide jaren zijn echter niet dezelfde laboratoriummethoden gebruikt. De methoden voor het bepalen van N (resp. Kjehldahl in 1990 en Dumas in 2023) geven beide een goed en vergelijkbaar resultaat voor het bepalen van N-gehalten (Etheridge et al., 1998; Wang et al., 1993). Kjehldahl meet echter geen nitraat, maar de meeste stikstof in bosbodem is organisch gebonden en slechts een fractie is in de vorm van nitraat aanwezig. Dit is voor bos op zandgrond in de orde grootte van tot 1-2 mg kg⁻¹ bodem (Van den Burg, 1999; Van Delft et al., 2023) tegenover gehalten van gemiddeld ca. 1 g kg⁻¹ voor totaal N (De Jong et al., 2023; deze rapportage). De afwijking is daarmee mogelijk 0,10-0,15%.

Voor het bepalen van de koolstofvoorraden en gehalten van de bepaling van 1990 met Kurmies (Kurmies, 1949) is een correctie nodig voor de bovengrond (zie De Jong et al., 2023). Het koolstofgehalte en voorraden van de bovengrond van de steekproef van 1990 zijn in deze studie geschat op basis van het organischestofgehalte dat in 1990 is bepaald in combinatie met het koolstofgehalte van de organische stof dat in de steekproef van 2023 is bepaald volgens $C_{1990} = OS_{1990} * C_{2023}/OS_{2023}$.

Voor CEC en basenverzadiging was in 1990 de methode met zilverthioureum gebruikt, terwijl in 2023 bariumchloride gevolgd door magnesiumsulfaat werd gebruikt. Beide methoden leidden tot vergelijkbare uitkomsten voor CEC (Nel et al., 2023) en vergelijking van de uitkomsten geeft daarmee een goede indicatie van de veranderingen in de bodem. Er zijn echter regelmatig verschillen in uitkomsten tussen methoden van bepalingen van CEC- en basenverzadiging wat, behalve door gebruik van de extractieoplossing, ook te maken heeft met de tijdsduur dat de extractieoplossing aan de bodem wordt toegevoegd (Gillman et al., 1982).

2.3 Berekening van voorraden en verschillen

De voorraden zijn berekend uit de gehalten keer de massa van de betreffende laag. Met het gemeten drooggewicht van de strooiselmonsters en het bemonsterde oppervlak – dat is berekend uit het aantal steken en het oppervlak van de cilinder waarmee is bemonsterd – is de massa van de strooisellaag berekend.

De massa van de minerale bovengrond is zoals door De Vries en Leeters (2001) bepaald op basis van de laagdikte en soortelijk gewicht (sw). Het soortelijk gewicht van de minerale grond is bepaald op basis van (Hoekstra en Poelman, 1982):

$$sw_i = 1000 / (0,646 + 0,025 OS\%_i) \text{ voor vochtige en droge zandgronden}$$

$$sw_i = 1000 / (0,601 + 0,030 OS\%_i) \text{ voor natte zandgronden}$$

Daarin is sw_i in g l⁻¹ en OS% als massapercentage, dat voor de laag van 0-30 cm op zandgronden direct is bepaald uit het gloeiverlies. Het resultaat van de functies van Hoekstra en Poelman (1982) komt vrij goed overeen met die van De Vos et al. (2005).

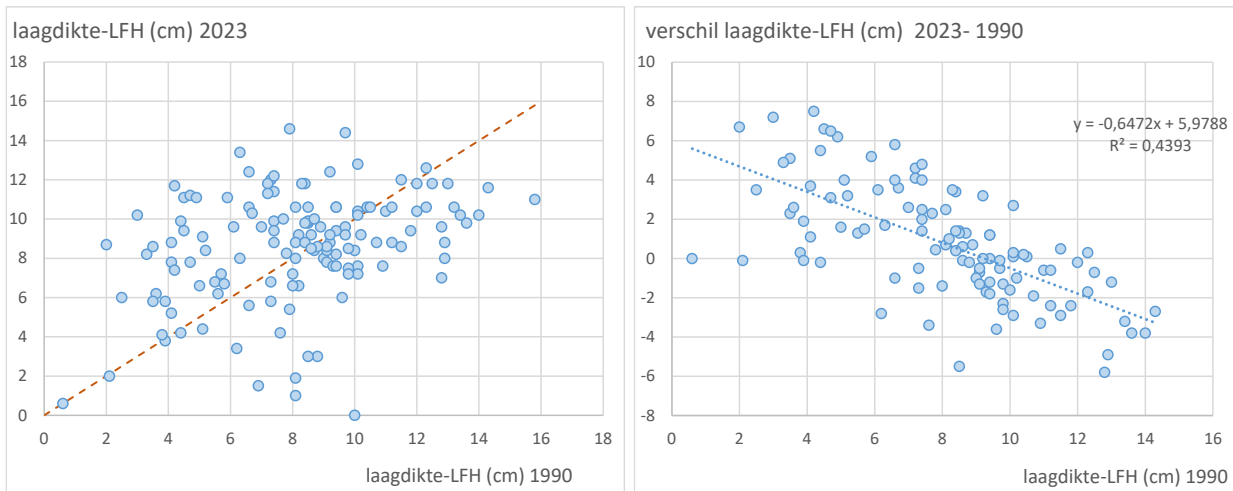
3 Resultaten en discussie

3.1 Dikte en massa van de strooisellaag

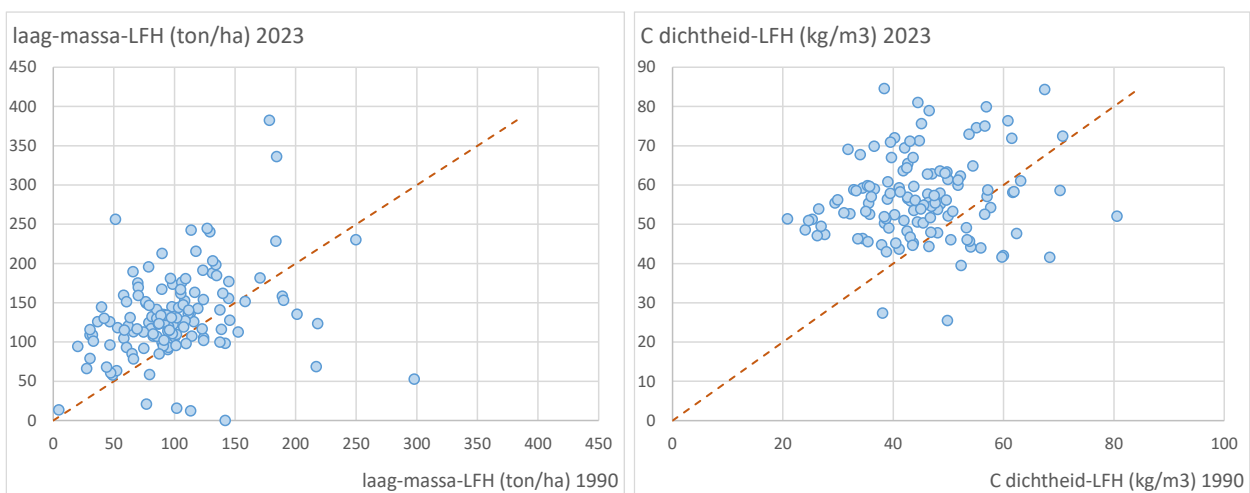
De gemiddelde dikte van de strooisellaag in 2023 is 8,9 cm, tegenover 8,3 cm in 1990 (**tabel 3**). Het verschil lijkt met 0,6 cm beperkt, maar is wel significant ($p < 0,05$). De massa van de strooisellaag is toegenomen van gemiddeld 99,4 ton ha⁻¹ in 1990 tot 137 ton ha⁻¹ in 2023. De spreiding in diktes en massa's van de strooisellaag en ook de verandering ervan ten opzichte van 1990 is groot (**figuur 2** en **figuur 3**). Voor een deel komt dat doordat de variatie in strooiseldiktes op een specifieke locatie ook groot kan zijn en niet volledig uitmiddelt bij de bemonstering. Dit betekent dat er ruis in de data zit. Dit is ook van belang voor de veranderingen van elementvoorraden.

Tabel 3 Laagdikte en massa van de strooisellaag (LFH), gemiddeld per boomsoort, en gemiddeld voor alle meetpunten voor 1990, 2023 en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

Boomsoort	LFH laag								
	Dikte (cm)			Massa (ton ha ⁻¹)			Soortelijk gewicht (kg m ⁻³)		
	1990	2023	verschil	1990	2023	verschil	1990	2023	verschil
Corsicaanse den	6,25 (0,69)	8,60 (0,65)	2,35 (0,88)	63,5 (8,38)	122 (7,62)	58,0 (9,68)	101 (6,27)	146 (8,86)	44,6 (9,53)
Douglasspar	7,26 (0,63)	8,94 (0,86)	1,68 (0,94)	83,3 (6,70)	123 (11,8)	39,6 (11,8)	118 (7,15)	140 (6,98)	21,4 (10,1)
Fijnspar	7,56 (0,49)	9,77 (0,67)	2,21 (0,70)	94,4 (5,89)	146 (11,3)	52,0 (11,3)	128 (7,86)	152 (8,55)	24,0 (8,66)
Grove den	8,68 (0,48)	9,10 (0,42)	0,420 (0,55)	109 (6,87)	147 (9,70)	38,1 (9,98)	128 (4,71)	168 (11,7)	40,9 (12,2)
Japane lariks	11,2 (0,50)	9,41 (0,68)	-1,76 (0,56)	97,9 (3,23)	121 (10,8)	23,6 (11,3)	89,6 (4,57)	126 (5,25)	36,3 (8,27)
Beuk	9,10 (0,93)	8,42 (0,58)	-0,677 (0,89)	121 (15,3)	152 (20,0)	31,3 (15,7)	131 (8,73)	178 (17,5)	46,9 (18,0)
Zomereik	7,58 (0,44)	8,09 (0,53)	0,514 (0,55)	105 (9,45)	130 (11,7)	25,9 (12,4)	136 (9,48)	159 (8,20)	22,4 (10,7)
Gemiddeld	8,30 (0,25)	8,90 (0,23)	0,602 (0,28)	99,4 (3,53)	137 (4,70)	37,3 (4,66)	122 (2,97)	156 (4,56)	34,0 (4,88)



Figuur 2 Dikte (links) van de strooisellaag in 2023 ten opzichte van 1990 (de rode stippellijn geeft aan waar 1990 en 2023 gelijk zouden zijn) en (rechts) verandering van de dikte van de strooisellaag tussen 1990 en 2023 ten opzichte van de dikte van de strooisellaag in 1990 (exclusief de locaties met eindvelling, sterfte en recente verstoring door zwijnen), waarbij de blauwe stippellijn de regressie is.



Figuur 3 Laagmassa (links) en soortelijk gewicht (rechts) van de strooisellaag in 2023 ten opzichte van 1990.

Vooral op locaties waar de dikte en massa relatief beperkt waren in 1990, bijvoorbeeld bij jongere bossen van Corsicaanse den, is de hoeveelheid strooisel sterk toegenomen, terwijl dat bij soorten als beuk en grove den, waarbij de strooiselmassa al groter was in 1990, gemiddeld veel minder het geval is (figuur 2, rechts). Daarnaast is de strooisellaag in een aantal gevallen geheel of vrijwel geheel verdwenen door bodembewerking na kap of door verstoring door zwijnen. Bij enkele locaties is de strooiselmassa juist toegenomen, doordat er verder in het verleden minerale grond door het strooisel is gemengd, mogelijk ook door zwijnen. Daar is de totale massa van het strooisel sterk toegenomen (figuur 3, punten met strooiselmassa van > 200 ton ha⁻¹ in 2023), maar het heeft niet geleid tot een grote toename van koolstofvoorraden in het strooisel op die plekken.

De gemiddelde toename van de massa van de strooisellaag bij een relatief veel beperktere toename van de dikte ervan duidt op een toename van het soortelijk drooggewicht. Deze was gemiddeld 156 kg m⁻³ in 2023, tegenover 122 kg m⁻³ in 1990. Deze toename is bij de meeste locaties waargenomen (**figuur 3**, rechts; bij enkele punten met een erg sterkte toename van dichtheid is sprake van vermenging met minerale grond). De toename van het soortelijk drooggewicht zou voor een deel kunnen komen door het gebruik van een kleinere cilinder bij monsternamen in 2023, waardoor het strooisel iets meer wordt ingedrukt. Maar het leek er bij monsternamen niet op dat de monsters substantieel blijvend ingedrukt werden. Daarnaast is er waarschijnlijk sprake van een reële toename doordat het aandeel verder verteerde en dus compactere humus in de strooisellaag (groter aandeel H-laag) toeneemt met de tijd (zie ook De Jong et al., 2023).

3.2 Koolstofvoorraden

De koolstofgehalten van de strooisellaag bedraagt gemiddeld 380 g kg⁻¹ (**tabel b1**), wat overeenkomt met een organische-stofgehalte van 68%. Dit verschilt niet significant van dat in 1990. Er is wel een verschil tussen de boomsoorten. Bij Corsicaanse den en zomereik is het koolstofgehalte in de strooisellaag duidelijk toegenomen, terwijl het bij Japanse lariks en beuk is afgenomen. Een afname kan duiden op meer vermenging met minerale grond.

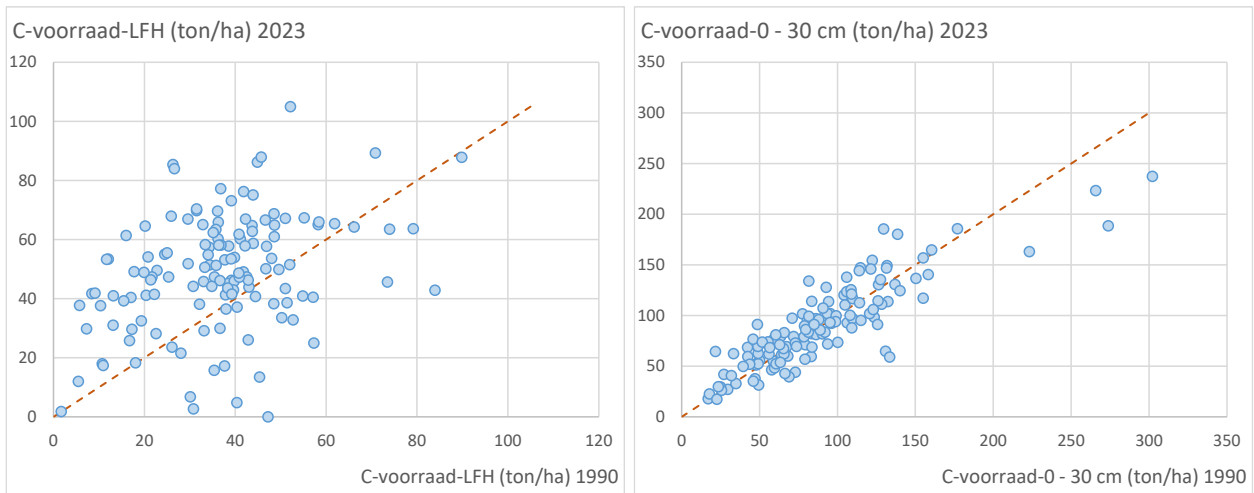
In de bovengrond is het koolstofgehalte in 2023 met 23,2 g kg⁻¹ niet wezenlijk anders dan dat in 1990 (**tabel b1**). Bij vier locaties is het C-gehalte in 2023 aanzienlijk lager dan in 1990. Deze bodems hadden in 1990 een C-gehalte van meer dan 60 mg kg⁻¹. In één situatie is de bodem bewerkt geweest, in één situatie is de bodem verstoord en is er puin in het bos gestort, één situatie betreft vochtig bos dat mogelijk verdroogd is geweest en één situatie betreft een bos met rabatten, wat tot een relatief grote variatie in bodemgesteldheid leidt. Als deze vier locaties buiten beschouwing gelaten worden, dan is het koolstofgehalte toegenomen van gemiddeld 20,8 mg kg⁻¹ in 1990 naar 21,9 in 2023 (+ 1,18 mg kg⁻¹).

De koolstofvoorraad in de strooisellaag is in 2023 gemiddeld 51,0 ton ha⁻¹, tegenover 37,6 ton ha⁻¹ in 1990 (**tabel 4**). Het verschil is significant ($p < 0,001$) en bedraagt gemiddeld 13,4 ton ha⁻¹, wat overeenkomt met een toename van 0,4 ton ha⁻¹ jr⁻¹. Deze toename is in verhouding veel groter dan de toename van de laagdikte ofwel het volume van de strooisellaag, en moet daarom voor het grootste deel worden toegeschreven aan een toename van de (koolstof)dichtheid ervan van 44,9 kg m⁻³ naar 56,6 kg m⁻³ (**tabel b2**).

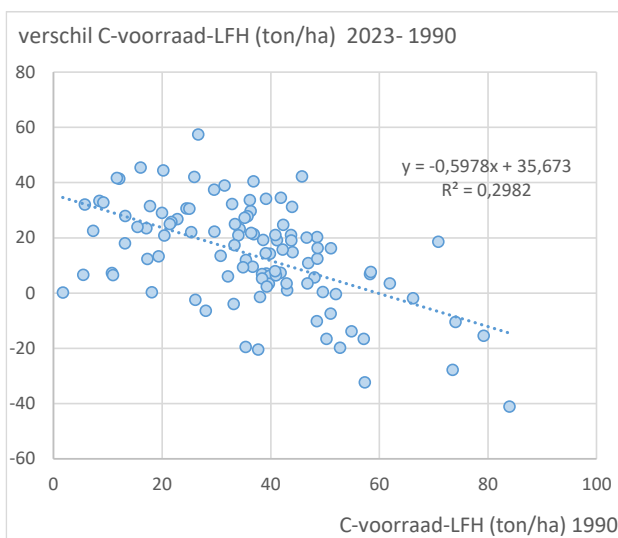
Tabel 4 Koolstofvoorraden voor de strooisellaag (LFH), de minerale bovengrond en totaal (LFH en bovengrond), gemiddeld per boomsoort en gemiddeld voor alle meetpunten voor 1990, 2023 en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

Boomsoort	Koolstofvoorraad (ton ha ⁻¹)								
	Strooisel (LFH) laag			Minerale bovengrond (0 - 30 cm)			Totaal		
	1990	2023	verschil	1990	2023	verschil	1990	2023	verschil
Corsicaanse den	23,1 (3,25)	51,0 (3,47)	27,9 (3,88)	67,7 (9,86)	73,4 (8,51)	5,74 (7,43)	90,7 (10,7)	124 (10,3)	33,7 (9,65)
Douglasspar	33,0 (3,05)	48,2 (5,24)	15,3 (5,35)	84,1 (9,37)	87,5 (8,58)	3,35 (3,30)	117 (11,6)	136 (10,4)	18,6 (6,52)
Fijnspar	37,4 (2,77)	57,5 (5,69)	20,0 (5,85)	100 (8,97)	96,6 (9,67)	-3,62 (6,93)	138 (9,78)	154 (10,8)	16,4 (9,37)
Grove den	41,8 (2,86)	54,1 (2,98)	12,2 (3,42)	74,5 (6,31)	74,2 (6,08)	-0,329 (3,00)	116 (6,71)	128 (6,69)	11,9 (3,87)
Japanse lariks	42,3 (1,30)	48,5 (4,27)	6,21 (4,71)	93,2 (7,16)	102 (9,64)	9,25 (5,57)	135 (7,46)	151 (9,22)	15,5 (6,26)
Beuk	44,3 (5,83)	47,6 (5,10)	3,22 (4,89)	93,0 (13,2)	91,3 (7,51)	-1,69 (6,62)	137 (14,0)	139 (9,88)	1,54 (7,54)
Zomereik	34,2 (3,10)	46,7 (3,71)	12,6 (3,83)	119 (15,6)	116 (11,4)	-3,06 (6,75)	153 (16,1)	163 (12,0)	9,50 (7,70)
Gemiddeld	37,6 (1,39)	51,0 (1,59)	13,4 (1,76)	89,4 (4,21)	90,2 (3,61)	0,731 (2,03)	127 (4,48)	141 (3,87)	14,1 (2,60)

De spreiding van de verandering van koolstofvoorraden is relatief groot (figuur 4), wat deels komt door lokale variatie in massa van de strooisellaag en door verstoringen (paragraaf 3.1). De toename van koolstofvoorraden is het grootst bij Corsicaanse den. Van die soort waren de koolstofvoorraden in de strooisellaag en de bovengrond in 1990 gemiddeld het laagst. Dit past in het beeld dat de grootste toename van koolstof heeft plaatsgevonden op locaties waar die voorraden in 1990 het kleinst waren (figuur 5). Dit is te verklaren doordat er bij bodems met een relatief grote koolstofvoorraad in de strooisellaag er – bij bijvoorbeeld een gelijk percentage mineralisatie per jaar – in absolute termen meer organische stof per jaar wordt gemineraliseerd.



Figuur 4 Koolstofvoorraden in de strooisellaag en minerale bovengrond in 1990 en 2023 (veenbodem niet weergegeven).



Figuur 5 Verandering van de koolstofvoorraad in de strooisellaag tussen 1990 en 2023 ten opzichte van de koolstofvoorraad in de strooisellaag in 1990 (exclusief de locaties met recente eindvelling, sterfte en verstoring door zwijnen).

In de minerale bovengrond is de koolstofvoorraad gemiddeld $90,2 \text{ ton ha}^{-1}$, wat niet significant verschilt met de gemiddelde koolstofvoorraden van $89,4 \text{ ton ha}^{-1}$ in 1990. Als de vier afwijkende locaties die hierboven (bij de C-gehalten) zijn aangegeven buiten beschouwing worden gelaten, dan is de koolstofvoorraad toegenomen van gemiddeld $83,6 \text{ ton}$ in 1990 naar $86,5 \text{ ton}$ in 2023 ($+2,8 \text{ ton per ha}$, ofwel $85 \text{ kg ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$). Voor de strooisellaag en de bovengrond totaal zijn de koolstofvoorraden met gemiddeld $14,1 \text{ ton ha}^{-1}$ toegenomen, wat overeenkomt met een toename van $437 \text{ kg ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$.

3.3 Stikstofvoorraden

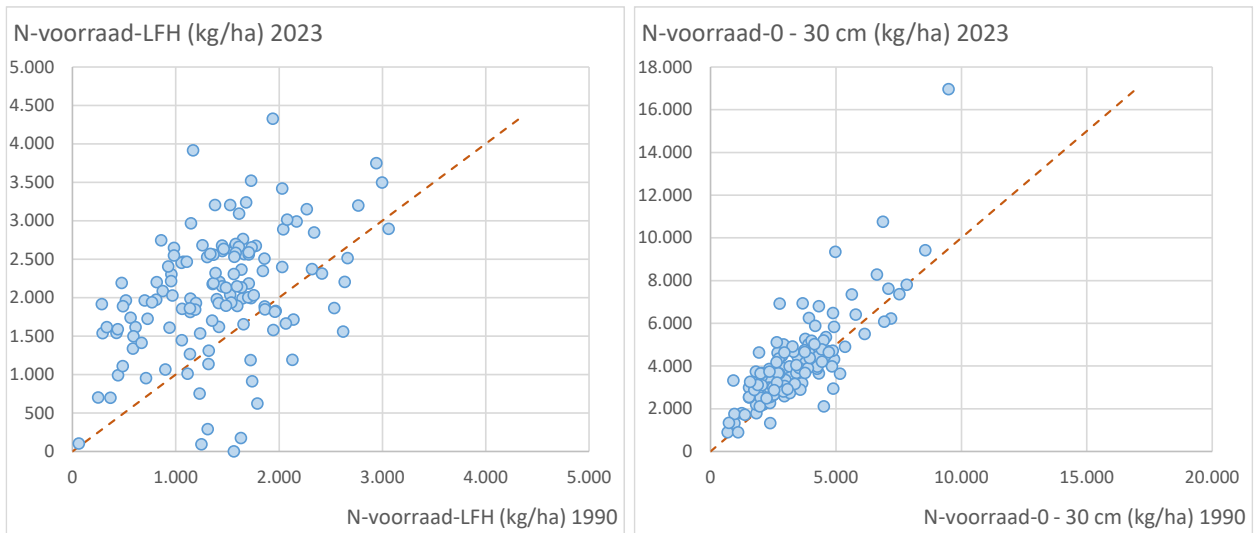
Het stikstofgehalte van de strooisellaag is van gemiddeld $14,5 \text{ g kg}^{-1}$ in 1990 toegenomen naar $15,9 \text{ g kg}^{-1}$ in 2023 (**tabel b3**). In de minerale bovengrond is het stikstofgehalte eveneens toegenomen, namelijk van $0,84 \text{ g kg}^{-1}$ in 1990 naar $1,0 \text{ g kg}^{-1}$ in 2023. Het verschil is voor zowel de strooisellaag als de bovengrond significant ($p < 0,001$).

De stikstofvoorraden in de strooisellaag zijn toegenomen van gemiddeld 1.440 kg ha⁻¹ in 1990 tot 2.143 kg ha⁻¹ in 2023, ofwel gemiddeld 704 kg per ha (**tabel 5**). Dit betekent een toename van 21,3 kg ha⁻¹ jr⁻¹. In de bovengrond is de stikstofvoorraad toegenomen van gemiddeld 3.314 kg ha⁻¹ in 1990 tot gemiddeld 3.921 kg ha⁻¹ in 2023, dus 607 kg per ha of 18,4 kg ha⁻¹ jr⁻¹. Het verschil tussen beide jaren is voor zowel de strooisellaag als de bovengrond significant ($p < 0,001$). De totale toename van stikstof in de strooisellaag en bovengrond bedraagt totaal 1.311 kg ha⁻¹, ofwel 39,7 kg ha⁻¹ jr⁻¹. De toename van de stikstofvoorraden is gemiddeld het grootst bij Corsicaanse den (1.737 kg ha⁻¹). Daarvan waren de voorraden van zowel de strooisellaag als de bovengrond echter ook het kleinst in 1990. De variatie in verandering van stikstofvoorraden is in de strooisellaag relatief groot (**figuur 6**), wat evenals bij koolstof deels komt door lokale variatie in massa van de strooisellaag en door verstoringen (par. 3.1).

Stikstofdepositie is de enige wezenlijk aanwijsbare bron voor de toename van stikstof in de bosbodems. Momenteel is de gemiddelde N-depositie voor Nederland ca. 1500 mol per ha per jaar, ofwel 21 kg per ha per jaar (CLO, 2023). Over de periode 1990-2023 was dat ongeveer 28 kg ha⁻¹ jr⁻¹, maar voor de bosrijke provincies was dat 35 kg ha⁻¹ jr⁻¹ voor Noord-Brabant, 32 kg ha⁻¹ jr⁻¹ voor Gelderland en Utrecht, 30 kg ha⁻¹ jr⁻¹ voor Overijssel en 26 kg ha⁻¹ jr⁻¹ voor Drenthe. Bos vangt echter meer depositie in dan wordt gemeten in korte vegetaties die het dominante landgebruik vormen voor berekeningen van deposities. De invang in bos is afhankelijk van boomsoort (naaldhout vangt meer in dan loofhout), boomhoogte, bladindex en kroondichtheid (De Schrijver et al., 2007) en kan 50-100% meer zijn, maar ook nog grotere verschillen zijn waargenomen (De Schrijver et al., 2007; De Schrijver et al., 2008; Knulst, 2004). 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. In 1990 bedroeg de depositie van stikstof in heel Nederland ca. 2700 mol ha⁻¹ jr⁻¹, ofwel 38 kg ha⁻¹ jr⁻¹. Maar dat kon op de bosrijke zandgronden wel het dubbele zijn, tot meer dan 6000 mol ha⁻¹ jr⁻¹ (De Vries en Leeters, 2001). Recente metingen in bossen (Vos, 2024) wijzen ook depositie die 1,5 maal hoger ligt dan de gemiddelde waarde van ca. 21 kg ha⁻¹ jr⁻¹.

Tabel 5 Stikstofvoorraden voor de strooisellaag (LFH), de minerale bovengrond en totaal (LFH-laag en bovengrond), gemiddeld per boomsoort en gemiddeld voor alle meetpunten voor 1990, 2023 en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

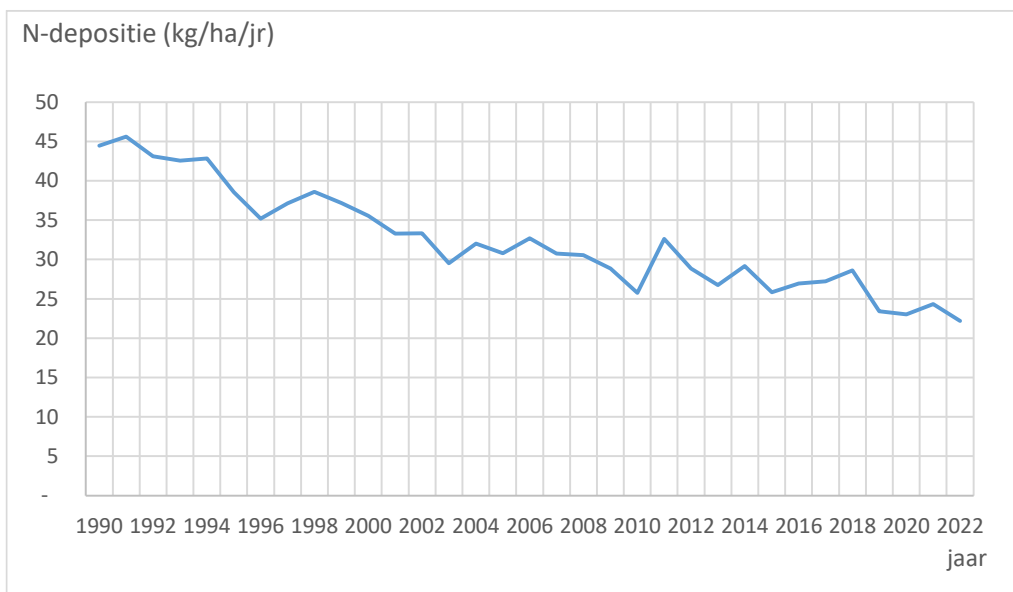
Boomsoort	Stikstofvoorraad (kg ha ⁻¹)								
	Strooisel (LFH) laag			Minerale bovengrond (0-30 cm)			Totaal		
	1990	2023	verschil	1990	2023	verschil	1990	2023	verschil
Corsicaanse den	781 (110)	1.870 (122)	1.088 (128)	2.397 (334)	3.045 (252)	648 (279)	3.178 (383)	4.915 (329)	1.737 (346)
Douglasspar	1.340 (110)	2.040 (212)	700 (203)	3.321 (262)	3.932 (226)	611 (236)	4.661 (317)	5.972 (335)	1.311 (339)
Fijnspar	1.404 (108)	2.275 (197)	871 (205)	3.523 (289)	3.833 (312)	310 (335)	4.927 (317)	6.108 (320)	1.181 (365)
Grove den	1.465 (97,2)	2.169 (121)	704 (123)	2.567 (170)	3.124 (194)	556 (139)	4.033 (180)	5.293 (220)	1.260 (176)
Japane lariks	1.683 (51,7)	2.110 (190)	426 (189)	3.329 (180)	4.157 (352)	828 (344)	5.012 (199)	6.267 (302)	1.254 (317)
Beuk	1.709 (196)	2.121 (206)	412 (177)	3.385 (343)	4.080 (172)	695 (216)	5.094 (326)	6.201 (250)	1.107 (274)
Zomereik	1.526 (134)	2.265 (170)	739 (171)	4.913 (433)	5.579 (420)	665 (212)	6.439 (441)	7.843 (420)	1.404 (237)
Gemiddeld	1.440 (50,8)	2.143 (64,2)	704 (65,0)	3.314 (133)	3.921 (135)	607 (86,5)	4.753 (144)	6.064 (145)	1.311 (101)



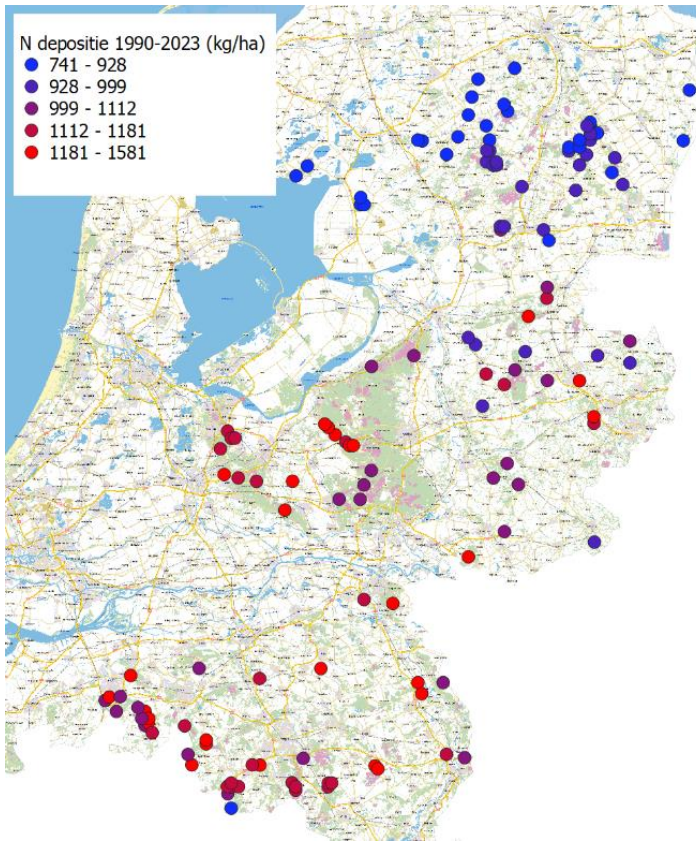
Figuur 6 Stikstofvoorraden in de strooisellaag en bovengrond (0-30 cm) in 1990 en 2023.

De Vries en Jansen (1994) berekenen voor de 150 bosopstanden die de basis vormen voor deze studie, een gemiddelde N-depositie van 58 kg per ha per jaar voor begin jaren 1990. Vos et al. (2024A) berekenden voor 2020-2021 voor steeds vijf opstanden (percelen) een N-depositie van gemiddeld 27 kg ha⁻¹ jr⁻¹ voor grove den, 30,8 kg ha⁻¹ jr⁻¹ voor beuk en 35,6 kg ha⁻¹ jr⁻¹ voor Douglasspar.

Voor de periode 1990-2022 is de N-depositie voor de 1x1 km- of 5x5 km-hokken geschat op basis van depositiegegevens van het RIVM. Gemiddeld bedroeg de depositie daarvan over die periode ca. 2310 mol ha⁻¹ jr⁻¹, ofwel, 32 kg ha⁻¹ jr⁻¹ voor die 1x1 km- of 5x5 km-hokken, afnemend van ca. 45 kg ha⁻¹ jr⁻¹ in 1990 naar circa 22 kg ha⁻¹ jr⁻¹ in 2023 (**figuur 7**). Daarbij moet bedacht worden dat deposities ook binnen de 1x1 km- of 5x5 km-hokken aanzienlijk kan variëren, omdat deze doorgaans een mix zijn van bos en open veld. Doorgaans zal de depositie van de bemonsterde punten hoger liggen dan het gemiddelde van een 1x1 km- of 5x5 km-hok, omdat hierin ook een deel depositie van open veld is meegewogen. Dit geldt wellicht vooral voor het noorden van het land, waar een belangrijk deel van de locaties in relatief kleine bosjes in agrarisch gebied ligt (**figuur 8**).



Figuur 7 Gemiddelde stikstofdepositie (kg ha⁻¹ jr⁻¹) van de 136 bemonsterde locaties op basis van de gemiddelde door RIVM aangegeven depositie in de 1x1 km- of 5x5 km-hokken waar die locaties in liggen.



Figuur 8 Berekende N-depositie (kg ha^{-1}) per bemonsteringslocatie over de periode 1990- 2023 op basis van de gemiddelde door RIVM aangegeven depositie in de 1x1 km- of 5x5 km-hokken waar die locaties in liggen.

Gelet op de deposities in bossen die Vries en Jansen (1994) aangeven voor 1990 en Vos et al. (2024A) voor 2020-2021, kan verwacht worden dat de daadwerkelijke depositie in de meetpunten ca. 35-40% hoger ligt dan die $32 \text{ kg ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$, ofwel ca. $43\text{-}50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$. Een deel van de stikstof die beschikbaar komt, wordt vastgelegd in de biomassa, vooral in stamhout. Vastlegging van stikstof in stamhout verschilt tussen groeiklassen en boomsoorten en varieert gemiddeld over een cyclus van aanplant tot kap van grofweg $4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ bij grove den (groeiklasse 6) tot $8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ bij beuk (groeiklasse 8) (op basis van De Jong et al., 2015; tabel 6). Ook in takken en wortels wordt N vastgelegd, maar dit komt gedurende een cyclus van groei en sterfte weer voor het grootste deel terug in de bodem.

Tabel 6 Indicatie van netto-opname van stikstof, vastgelegd in stammen (voorraad + oogst) en totaal (stammen, grove wortels, takken) bij een gegeven groei, gemiddeld over een omloop.

Boomsoort	Groei stamhout ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$)	Netto gemiddelde vastlegging N in stammen ($\text{kg ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$)	Netto gemiddelde vastlegging N in totaal ($\text{kg ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$)
berk	4	3,9	6,5
beuk	7	9,1	12,0
esdoorn	7	8,5	14,8
zomereik	7	11,9	16,7
Douglasspar	13	6	9,4
grove den	6	4,5	6,5

Er dient echter ook rekening gehouden te worden met uitspoeling. De Vries en Jansen (1994) berekenden een gemiddelde N-uitspoeling van 12 kg per ha per jaar begin jaren 1990. Recentere metingen in grondwater en bodemvocht (nog niet gepubliceerd) wijzen op een uitspoeling van enkele kg tot ca. 15-20 kg per ha per jaar, maar kan vooral na kap enige tijd hoger zijn. Gemiddeld wordt de uitspoeling tussen 5 en 10 kg per ha per jaar ingeschat. Die waarde wordt duidelijk beïnvloed door enkele locaties met afwijkend hoge waarden. De mediane waarde ligt aan de onderkant van die range.

De C/N-verhouding van de strooisellaag bedraagt in 2023 gemiddeld 23,9, tegenover 26,3 in 1990. In 1990 was de C/N-verhouding van de ondergrond 27,0, maar deze is afgenomen naar 22,8. Zowel voor de strooisellaag als de bovengrond zijn de verschillen significant ($p < 0,001$). De afname van de C/N-verhouding is van zowel de strooisellaag als de bovengrond het grootst bij grove den, namelijk respectievelijk 3,5 en 5,4.

De C/N-verhouding is in de strooisellaag met 2,4 afgenomen, van 26,4 naar 23,8 (**tabel b4**), terwijl deze in de bovengrond met 4 is afgenomen, van 27 naar 23 (beide significant met $p < 0,001$). De afname van de C/N-verhoudingen duidt op een relatief grotere toename van stikstof dan van koolstof. De gemiddelde afname van de C/N-verhoudingen is bij alle boomsoorten waargenomen, en ook op verreweg de meeste locaties (**figuur b3**). Bij vooral grove den en beuk is deze afname groter dan gemiddeld, zowel in strooisel als in de bovengrond, terwijl die bij vooral Douglasspar kleiner is.

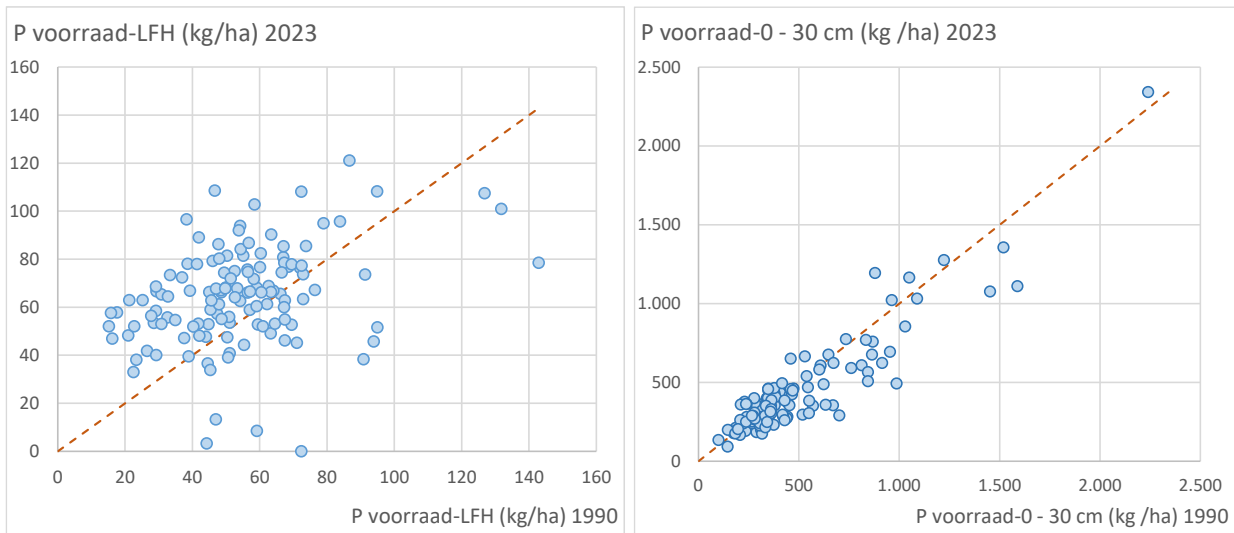
3.4 Fosforvoorraden

De gehalten van P in de strooisellaag zijn gemiddeld afgenomen van 553 mg kg⁻¹ in 1990 naar 484 mg kg⁻¹ in 2023 (**tabel b5**; $p < 0,001$). Door een gemiddelde toename van de massa van de strooisellaag is de hoeveelheid P in de strooisellaag desondanks toegenomen van gemiddeld 54 kg ha⁻¹ in 1990 naar 65 kg ha⁻¹ in 2023 (**tabel 7**), ofwel gemiddeld 0,32 kg ha⁻¹ jr⁻¹. De toename van de P-voorraad is bij de meeste locaties waargenomen, maar bij enkele locaties is een afname gemeten (**figuur 9**). Dit zijn in het algemeen locaties waarbij de voorraad in 1990 relatief hoog was (> 80 kg ha⁻¹) of waar kap of andere bodemverstoring heeft plaatsgevonden, waardoor de totale massa van de strooisellaag afnam.

Tabel 7 Fosforvoorraden voor de strooisellaag (LFH), de minerale bovengrond en totaal (LFH-laag en bovengrond), gemiddeld per boomsoort en gemiddeld voor alle meetpunten voor 1990, 2023 en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

Boomsoort	Fosforvoorraad (kg ha ⁻¹)								
	Strooisel (LFH) laag			Minerale bovengrond (0-30 cm)			Totaal		
	1990	2023	verschil	1990	2023	verschil	1990	2023	verschil
Corsicaanse den	31,7 (4,05)	55,8 (3,31)	24,1 (4,56)	325 (60,2)	291 (38,2)	-33,8 (28,0)	357 (61,6)	347 (39,4)	-9,71 (28,2)
Douglasspar	48,0 (3,18)	60,3 (5,39)	12,3 (6,45)	549 (77,9)	461 (69,6)	-87,4 (23,7)	597 (77,2)	522 (68,5)	-75,1 (23,9)
Fijnspaar	54,8 (3,84)	69,4 (5,12)	14,7 (5,84)	353 (48,3)	338 (35,5)	-14,7 (26,7)	408 (47,8)	408 (35,7)	0,0132 (27,8)
Grove den	56,0 (3,53)	64,7 (3,28)	8,71 (3,98)	375 (40,0)	349 (29,5)	-26,0 (19,4)	431 (40,2)	414 (29,3)	-17,3 (19,6)
Japane lariks	57,4 (2,08)	60,3 (5,43)	2,91 (5,81)	459 (73,9)	410 (73,2)	-48,8 (25,4)	516 (74,2)	470 (74,7)	-45,9 (25,6)
Beuk	63,8 (6,10)	68,3 (6,71)	4,47 (6,57)	524 (64,6)	455 (64,3)	-68,6 (50,2)	588 (61,4)	524 (62,6)	-64,1 (49,1)
Zomereik	58,5 (6,42)	69,6 (4,89)	11,1 (6,02)	738 (102)	689 (103)	-49,1 (37,7)	796 (103)	758 (103)	-38,0 (39,3)
Gemiddeld	54,1 (1,91)	64,6 (1,81)	10,6 (2,12)	474 (28,8)	431 (26,4)	-43,2 (11,4)	528 (28,9)	496 (26,5)	-32,6 (11,6)

De P-gehalten in de bovengrond zijn eveneens afgenomen, van 116 mg kg⁻¹ naar 108 mg kg⁻¹ (**tabel b5**). Dit heeft, in combinatie met een vrijwel gelijk gebleven massa van de bovengrond, geleid tot een gemiddelde afname van de P-voorraden in de bovengrond van gemiddeld 43 kg ha⁻¹, van 474 kg ha⁻¹ naar 431 kg ha⁻¹ ($p < 0,01$). Een deel van het verlies van deze voorraad zal ten goede zijn gekomen aan de voorraad in de strooisellaag (**tabel 7**). De gezamenlijke voorraden in strooisellaag en bovengrond namen gemiddeld met 32,6 kg ha⁻¹ af, ofwel met 1 kg ha⁻¹ jr⁻¹.

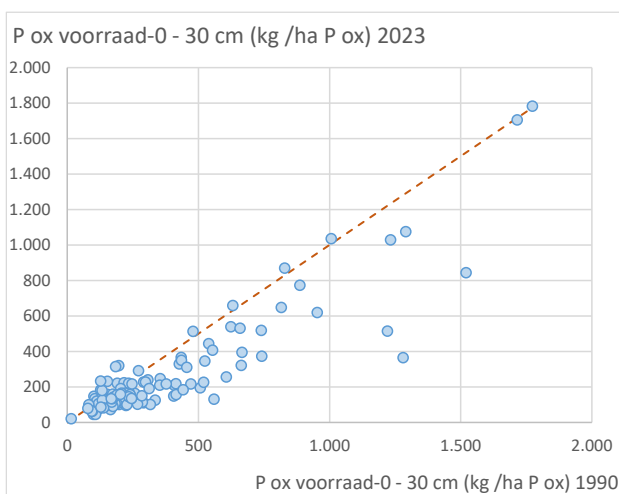


Figuur 9 Fosforvoorraden in de strooisellaag en bovengrond (0-30 cm) in 1990 en 2023.

Met een standaardfout van $11,6 \text{ kg ha}^{-1}$ is de onzekerheid rond deze afname relatief groot. Een deel van die afname zal terecht zijn gekomen in de biomassa. De vastlegging van P in de biomassa wordt geschat op $0,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ bij soorten als berk en grove den met een relatief lage bijgroei, tot ca. $1,0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ voor soorten met een hogere bijgroei en/of hogere P-gehalten in de biomassa.

De uitspoeling van P is in het algemeen erg klein ($<0,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$, zie o.a. Vos et al., 2024B). Ook de aanvoer vanuit depositie ($0,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ (De Vries et al., 2019) tot $0,5\text{-}1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ (Vos et al., 2024) en verwerking ($0,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$; De Vries et al., 2019) zijn relatief klein. De afname van de P-voorraden zijn daarmee niet volledig met een balansberekening te verklaren.

De P-voorraden in de bovengrond van gemiddeld 431 kg ha^{-1} zijn relatief klein ten opzichte van de voorraden die volgens Van den Burg en Schaap (1995) gewenst zijn voor een goede groei. Op basis van de gewenste P_2O_5 gehalten zouden de voorraden voor de meer eisende boomsoorten circa $750\text{-}1000 \text{ kg P ha}^{-1}$ moeten zijn en voor grove den ca. 350 kg P ha^{-1} . De oxalaat-extraheerbare voorraad is sterker afgenomen dan de totale P-voorraad in de bovengrond, namelijk met gemiddeld 85 kg ha^{-1} (**tabel 8**) en de afname is bij het grootste deel van de locaties waargenomen (**figuur 10**). Dit zou betekenen dat een deel van deze (op termijn) relatief goed opneembare voorraad P is vastgelegd in een minder goed opneembare inerte voorraad, naast dat deze deels is opgenomen door de vegetatie.



Figuur 10 P-oxalaat-extraheerbare voorraden in de strooisellaag en bovengrond (0-30 cm) in 1990 en 2023.

Tabel 8 Gemiddelde oxalaat-extraheerbare fosforvoorraden in de minerale bovengrond, gemiddeld per boomsoort en gemiddeld voor alle meetpunten voor 1990 en 2023, en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

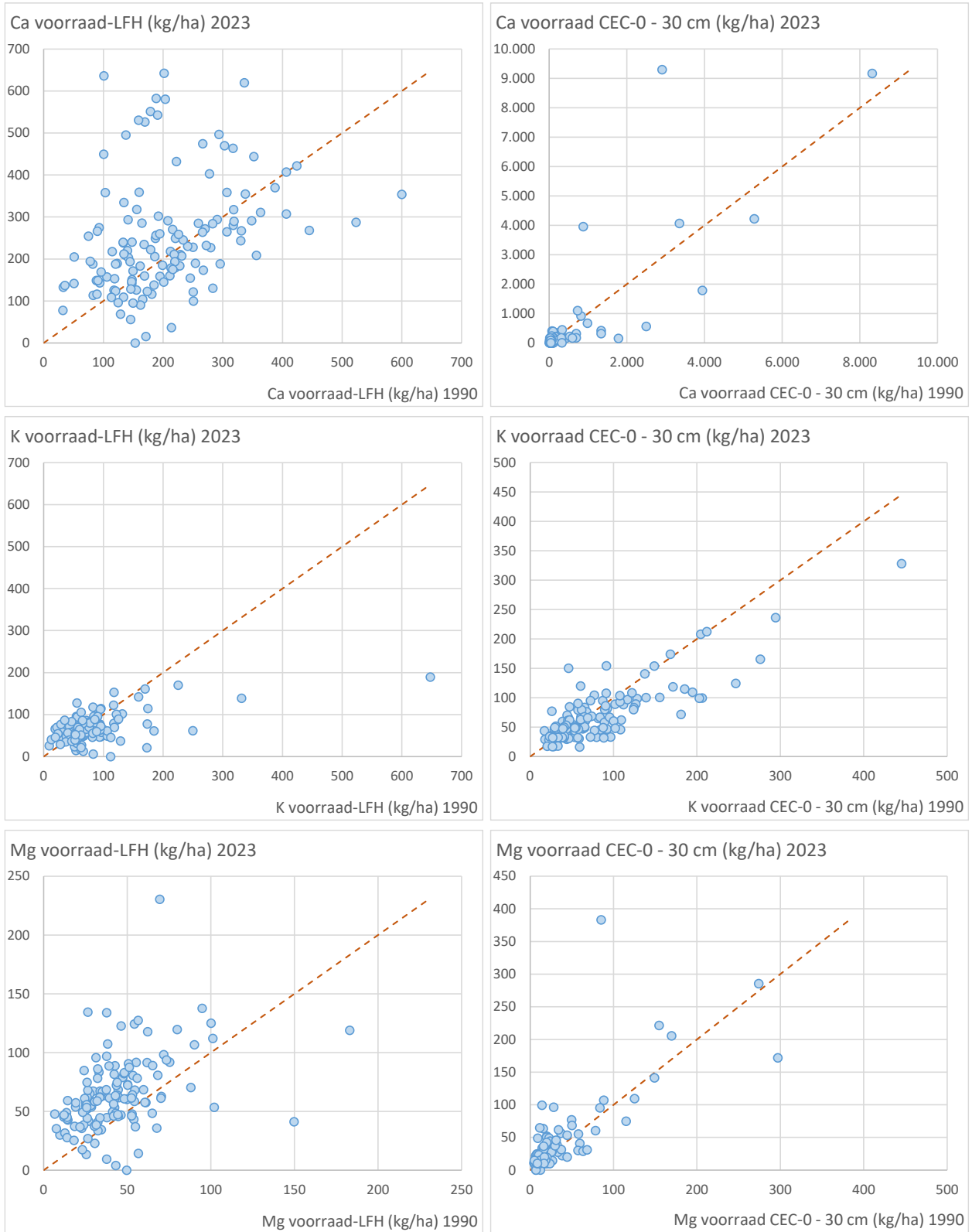
Boomsoort	Fosforvoorraad, oxalaat extraheerbaar (kg ha ⁻¹)		
	Minerale bovengrond		
	1990	2023	verschil
Corsicaanse den	196 (41,8)	129 (29,0)	-66,8 (17,9)
Douglasspar	378 (72,0)	263 (61,1)	-115 (21,0)
Fijnspar	226 (57,2)	176 (36,7)	-50,0 (25,2)
Grove den	238 (39,3)	176 (23,8)	-62,2 (21,5)
Japanse lariks	321 (71,3)	232 (66,1)	-88,8 (29,1)
Beuk	315 (47,3)	203 (26,3)	-112 (32,2)
Zomereik	501 (93,4)	381 (87,3)	-120 (36,5)
Gemiddeld	311 (25,7)	226 (21,0)	-85,2 (10,9)

3.5 Basenvoorraden

Basenvoorraden in de strooisellaag

Van de voorraden van basen (Ca, K, Mg,) in de strooisellaag zijn die van Ca met gemiddeld 244 kg ha⁻¹ in 2023 het grootst. De voorraden van K en Mg liggen gemiddeld rond 65 kg ha⁻¹ (tabel 9-tabel 11), en die van Mn gemiddeld rond 12,5 kg ha⁻¹. De voorraden in de strooisellaag zijn in het algemeen toegenomen. Voor Ca is de toename gemiddeld 44 kg ha⁻¹ en voor Mg 22,5 kg ha⁻¹. Bij Ca is de variatie vrij groot (soms grote toename, soms afname), terwijl bij magnesium veel meer een algemene toename te zien is (figuur 11). De voorraden K zijn echter afgenomen met gemiddeld 11,9 kg ha⁻¹ (alle significant, $p < 0,01$). Het idee dat met het toenemen van de massa van strooisel in bossen nutriënten worden vastgelegd (zie bijvoorbeeld Hommel et al., 2007) klopt voor Ca en Mg, maar dit geldt niet voor K. De Mn-voorraden zijn in de strooisellaag toegenomen van gemiddeld 11,0 kg ha⁻¹ in 1990 tot 12,5 kg ha⁻¹ in 2023 (Tabel b9), maar het verschil is niet significant.

De toegenomen voorraden Ca komen door de toegenomen massa van de strooisellaag, aangezien de gehalten ervan juist licht zijn afgenomen van 2,08 mg kg⁻¹ in 1990 naar 1,89 mg kg⁻¹ in 2023 (**tabel b6**, wel significant, $p < 0,05$), maar bij een klein deel van de locaties is er ook een duidelijke toename gemeten (**figuur b5**). De K-gehalten zijn afgenomen van 0,78 mg kg⁻¹ in 1990 naar 0,51 mg kg⁻¹ in 2023 (-32%; **tabel b7**, $p < 0,001$), wat de afname van de totale voorraden ervan verklaart. Daarbij moet bedacht worden dat K erg mobiel is in de bodem en gemakkelijk uit organisch materiaal spoelt. De afname van K-gehalten in de strooisellaag is bij het overgrote deel van de locaties waargenomen (**figuur b6**). De gehalten van Mg zijn van 0,43 naar 0,50 mg kg⁻¹ toegenomen (**tabel b8**, $p < 0,001$, **figuur b7**). Het gehalte van Mn is afgenomen van 120,6 mg kg⁻¹ naar 103,8 mg kg⁻¹.



Figuur 11 Voorraden Ca, K, Mg in de strooisellaag (links) en aan het uitwisselingscomplex (rechts) in 1990 en 2023.

Tabel 9 Voorraden Ca in de strooisellaag (LFH), aan het uitwisselingscomplex van de minerale bovengrond en totaal (beschikbare totaalvoorraden in het strooisel, de LFH-laag en uitwisselbare voorraden in de bovengrond), gemiddeld per boomsoort en gemiddeld voor alle meetpunten voor 1990 en 2023, en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

Boomsoort	Ca-voorraad (kg ha ⁻¹)								
	Strooisel (LFH) laag (totaal voorraad)			Minerale bovengrond (0-30 cm) (uitwisselbare voorraad)			Totaal (totaal LFH en uitwisselbaar)		
	1990	2023	verschil	1990	2023	verschil	1990	2023	verschil
Corsicaanse den	95,4 (15,0)	168 (14,2)	72,2 (18,9)	88,5 (29,9)	58,6 (10,2)	-29,9 (21,7)	184 (35,6)	226 (21,1)	42,4 (26,2)
Douglasspar	211 (34,2)	243 (34,2)	32,4 (41,5)	105 (20,3)	84,1 (14,5)	-20,8 (23,9)	316 (44,0)	327 (35,0)	11,6 (34,3)
Fijnspar	194 (16,2)	270 (49,0)	75,9 (54,7)	133 (46,3)	88,9 (17,3)	-43,8 (42,6)	326 (48,6)	359 (62,6)	32,2 (62,6)
Grove den	178 (12,1)	209 (18,4)	30,3 (17,6)	79,3 (9,07)	59,1 (8,19)	-20,2 (9,16)	258 (16,7)	268 (21,0)	10,1 (18,5)
Japanse lariks	247 (13,6)	272 (39,9)	25,8 (40,8)	79,7 (10,8)	96,2 (23,9)	16,5 (24,5)	326 (20,2)	369 (38,5)	42,4 (44,2)
Beuk	212 (25,8)	259 (35,5)	47,0 (23,7)	91,1 (20,6)	116 (26,3)	24,7 (28,6)	303 (36,3)	375 (49,0)	71,7 (40,1)
Zomereik	256 (20,3)	305 (29,3)	49,0 (33,6)	390 (85,4)	264 (50,0)	-127 (73,2)	647 (90,1)	569 (64,3)	-77,6 (60,5)
Gemiddeld	200 (8,22)	244 (11,9)	44,0 (12,0)	144 (19,0)	110 (11,8)	-33,6 (15,0)	344 (22,4)	355 (18,8)	10,4 (15,9)

Tabel 10 Voorraden K in de strooisellaag (LFH), aan het uitwisselingscomplex van de minerale bovengrond en totaal (beschikbare totaalvoorraden in het strooisel, de LFH-laag en uitwisselbare voorraden in de bovengrond), gemiddeld per boomsoort en gemiddeld voor alle meetpunten voor 1990 en 2023, en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

Boomsoort	K-voorraad (kg ha ⁻¹)								
	Strooisel (LFH) laag (totaal voorraad)			Minerale bovengrond (0-30 cm) (uitwisselbare voorraad)			Totaal (totaal LFH en uitwisselbaar)		
	1990	2023	verschil	1990	2023	verschil	1990	2023	verschil
Corsicaanse den	43,7 (6,31)	50,7 (3,36)	7,02 (7,07)	40,5 (3,60)	42,9 (4,97)	2,44 (4,58)	84,2 (7,96)	93,6 (6,79)	9,46 (8,01)
Douglasspar	68,7 (12,5)	58,5 (10,6)	-10,1 (7,29)	58,0 (12,0)	54,7 (12,1)	-3,30 (3,80)	127 (23,9)	113 (22,0)	-13,4 (8,82)
Fijnspar	63,1 (4,71)	61,7 (5,02)	-1,39 (5,42)	50,8 (5,01)	55,4 (5,18)	4,62 (4,27)	114 (6,72)	117 (8,83)	3,23 (7,60)
Grove den	76,9 (4,85)	66,0 (4,59)	-10,9 (5,48)	60,1 (4,35)	47,4 (3,48)	-12,8 (3,84)	137 (6,29)	113 (5,60)	-23,6 (6,55)
Japanse lariks	65,1 (3,84)	58,0 (4,14)	-7,01 (5,88)	42,6 (4,38)	60,7 (8,12)	18,1 (8,22)	108 (6,76)	119 (6,02)	11,1 (7,91)
Beuk	99,2 (12,6)	75,2 (8,77)	-24,0 (10,6)	99,0 (9,23)	69,8 (6,25)	-29,2 (9,75)	198 (17,8)	145 (11,4)	-53,2 (16,0)
Zomereik	116 (29,0)	88,1 (8,61)	-27,8 (23,8)	137 (11,5)	112 (8,55)	-24,8 (9,17)	253 (35,1)	200 (14,9)	-52,6 (24,5)
Gemiddeld	79,0 (5,84)	67,1 (2,76)	-11,9 (4,76)	72,4 (4,17)	63,6 (3,29)	-8,74 (2,76)	151 (8,57)	131 (5,17)	-20,6 (5,55)

Tabel 11 Voorraden Mg in de strooisellaag (LFH), aan het uitwisselingscomplex van de minerale bovengrond en totaal (beschikbare totaalvoorraden in het strooisel, de LFH-laag en uitwisselbare voorraden in de bovengrond), gemiddeld per boomsoort en gemiddeld voor alle meetpunten voor 1990 en 2023, en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

Boomsoort	Mg-voorraad (kg ha ⁻¹)								
	Strooisel (LFH) laag (totaal voorraad)			Minerale bovengrond (0–30 cm) (uitwisselbare voorraad)			Totaal (totaal LFH en uitwisselbaar)		
	1990	2023	verschil	1990	2023	verschil	1990	2023	verschil
Corsicaanse den	23,0 (3,89)	50,0 (4,82)	27,0 (4,88)	10,1 (1,21)	15,7 (1,67)	5,53 (1,79)	33,1 (4,50)	65,7 (5,95)	32,5 (5,77)
Douglasspar	40,8 (6,41)	59,4 (8,10)	18,6 (7,77)	18,9 (2,64)	22,6 (3,38)	3,76 (1,90)	59,7 (8,48)	82,0 (10,6)	22,3 (8,13)
Fijnspar	35,0 (2,70)	70,8 (7,04)	35,8 (7,60)	19,1 (3,14)	27,6 (3,98)	8,47 (3,22)	54,1 (3,72)	98,3 (9,77)	44,2 (9,68)
Grove den	39,6 (2,55)	57,1 (3,78)	17,6 (3,79)	13,6 (1,15)	15,5 (1,57)	1,98 (1,29)	53,1 (2,92)	72,7 (3,93)	19,5 (3,53)
Japane lariks	48,7 (2,86)	84,4 (13,1)	35,7 (11,6)	16,0 (1,40)	30,7 (4,05)	14,7 (3,95)	64,7 (3,57)	115 (13,7)	50,4 (11,8)
Beuk	48,9 (5,67)	63,8 (6,29)	14,9 (5,45)	21,8 (4,43)	31,1 (4,88)	9,25 (5,89)	70,7 (8,35)	94,9 (8,31)	24,2 (8,90)
Zomereik	58,4 (7,81)	76,9 (7,04)	18,6 (6,69)	48,1 (8,31)	51,4 (7,43)	3,30 (4,82)	107 (13,8)	128 (12,0)	21,9 (8,65)
Gemiddeld	42,9 (2,05)	65,3 (2,72)	22,5 (2,53)	21,5 (1,95)	27,1 (1,96)	5,60 (1,28)	64,4 (3,44)	92,5 (3,85)	28,1 (2,94)

Mn speelt een rol in de afbraak van lignine in organische stof (Berg en McClaugherty, 2003; Stendahl et al., 2017). Berg et al. (2015) vonden een negatieve relatie tussen het N-gehalte en het Mn-gehalte van naalden van grove den. Dit kan betekenen dat hoge N-beschikbaarheid, dat leidt tot hogere gehalten aan N in blad en naalden, op die manier bijdraagt aan een vertraagde afbraak van strooisel.

De accumulatie van Ca en Mg 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.

Basenvoorraden aan het uitwisselingscomplex in de bovengrond

De uitwisselcapaciteit (CEC) van de bovengrond is toegenomen van gemiddeld 36 naar 44 mmolc kg⁻¹, en bij de meeste locaties is deze toename te zien (**figuur b8**). De procentuele bezetting ervan met basische kationen is afgenomen van gemiddeld 8 naar 6% (**tabel b10**). De bezetting van Ca en K zijn met ongeveer een derde afgenomen van resp. 4,7% naar 3,1% en van 1,5% naar 1,1%, terwijl die van Mg licht is toegenomen van 1,2 naar 1,3% (**tabel b11**). De afname van de basenbezetting is vooral duidelijk bij locaties die een (nog) wat hogere bezetting hadden in 1990, en zeker bij enkele voormalige landbouwgronden (**figuur b9**). De voorraden Ca en K aan het uitwisselingscomplex zijn gemiddeld afgenomen. Voor Ca gaat het om een afname van 144 naar 110 kg ha⁻¹, ofwel 33,6 kg ha⁻¹ en ca. 1 kg ha⁻¹ jr⁻¹. Voor K gaat het om een afname van 72,4 naar 63,6 kg ha⁻¹, ofwel een afname van 8,7 kg ha⁻¹. De voorraad Mg aan het uitwisselingscomplex is echter licht toegenomen van gemiddeld 21,5 naar 27,1 kg ha⁻¹, ofwel +5,6 kg ha⁻¹. Voor alle drie van deze elementen geldt dat er een grote variatie is van verandering van bezetting van deze elementen aan het uitwisselingscomplex ten opzichte van 1990 (**figuur b10-figuur b12**). Voor Mn zijn geen gegevens beschikbaar van veranderingen van voorraden aan het uitwisselingscomplex.

De totale voorraden Ca in de strooisellaag en aan het uitwisselingscomplex zijn samen toegenomen van gemiddeld 344 naar 355 kg ha⁻¹ (+10,4 kg ha⁻¹, of 0,32 kg ha⁻¹ jr⁻¹; **tabel 9**) doordat de accumulatie in de strooisellaag groter is dan de afname aan het uitwisselingscomplex. Bij Mg is de toename van gemiddeld 64,4 naar 92,5 kg ha⁻¹ totaal 28,1 kg ha⁻¹ (0,85 kg ha⁻¹ jr⁻¹; **Tabel 11**), door zowel een toename in de

strooisellaag als aan het uitwisselingscomplex. Bij K is er echter een afname van de gezamenlijke voorraden van gemiddeld 151,4 naar 130,7 kg per ha, ofwel een afname van 20,6 kg ha⁻¹ (0,62 kg ha⁻¹ jr⁻¹; **tabel 10**). De gemiddelde toenames resp. afnames per jaar van voorraden in de strooisellaag en aan het uitwisselingscomplex samen zijn betrekkelijk klein in relatie tot de fluxen van deze basen. De aanvoer vanuit depositie wordt door Vos et al. (2024A) berekend op grofweg 11-13 kg ha⁻¹ jr⁻¹ voor Ca, 7-16 kg ha⁻¹ jr⁻¹ voor K en 3-5 kg ha⁻¹ jr⁻¹ voor Mg. De Vries et al. (2019) schatten het vrijkomen van deze elementen door verwerking van de bodem tot 1 m diep op 3,0-4,4 kg ha⁻¹ jr⁻¹ voor Ca, op 2,0-2,7 kg ha⁻¹ jr⁻¹ voor K en op 1,8-6,6 kg ha⁻¹ jr⁻¹ voor Mg. Vos et al. (2024B) berekenen een uitspoeling van ca. 3-7 kg ha⁻¹ jr⁻¹ voor Ca, 3-12 kg ha⁻¹ jr⁻¹ voor K en 1-5 kg ha⁻¹ jr⁻¹ voor Mg. Vastlegging van deze elementen in de biomassa ten slotte bedraagt ter indicatie 3-9 kg ha⁻¹ jr⁻¹ voor Ca, 2-6 kg ha⁻¹ jr⁻¹ voor K en 1-1,5 kg ha⁻¹ jr⁻¹ voor Mg (eigen berekeningen, vergelijkbaar met Vos et al., 2023). Balansberekeningen op basis van deze gegevens (**tabel 12**) laten zien dat er van deze elementen vooral negatieve balans voor K verwacht kan worden, terwijl voor Mg vaker een positieve balans wordt verwacht (zie ook De Vries et al., 2019).

Tabel 12 Indicatie van onderdelen van de nutriëntenbalans voor Ca, K en Mg (kg ha⁻¹ jr⁻¹).

Balans onderdeel	Inputs en outputs per element (kg ha ⁻¹ jr ⁻¹)					
	Ca		K		Mg	
	van	tot	van	tot	van	tot
Depositie	11,0	13,0	7,0	16,0	3,0	5,0
Verwerking	3,0	4,4	2,0	2,7	1,8	6,6
Uitspoeling	-7,0	-3,0	-12,0	-3,0	-5,0	-1,0
Vastlegging biomassa	-9,0	-3,0	-6,0	-2,0	-1,5	-1,0
Balans	-2,0	11,4	-9,0	13,7	-1,7	9,6

3.6 Aluminium- en ijzervoorraden

Voorraden aan Al en Fe zijn bepaald in de strooisellaag (totaalgehalten) en in de minerale bovengrond (uitwisselbare en oxalaat-extraheerbare gehalten), zoals aangegeven in **tabel 13** en **tabel 14** en hieronder besproken.

Voorraden aan Al en Fe in de strooisellaag

De voorraden Al in de strooisellaag zijn duidelijk afgenomen van 310 kg ha⁻¹ in 1990 naar 208 kg ha⁻¹ in 2023 (tabel 13; zie ook figuur 12). Wat opvalt, is dat de gehalten ervan in alle locaties zijn afgenomen (**figuur b13**), van gemiddeld 2,9 g kg⁻¹ in 1990 naar 1,5 g kg⁻¹ in 2023 (**tabel b12**). Al wordt via bladval nauwelijks aangevoerd naar de strooisellaag, maar zal vooral afkomstig zijn door vermenging met minerale grond. Bij beperkte nieuwe aanvoer kan de Al-voorraad afnemen door uitspoeling als gevolg van zure depositie. De afname van de Al-voorraad in de strooisellaag bedraagt gemiddeld 3,1 kg ha⁻¹ jr⁻¹. De afname is gemiddeld het grootst bij de locaties die in 1990 de grootste voorraden hadden (figuur b14). Dit is ook te zien in de verschillen tussen de boomsoorten. Bij Corsicaanse den, met in 1990 gemiddeld de laagste voorraden, is de voorraad Al niet significant afgenomen. De afname was het grootst bij zomereik en beuk, die in 1990 de grootste voorraden hadden.

De voorraden Fe zijn in de strooisellaag eveneens gemiddeld afgenomen, namelijk van 320 naar 313 kg ha⁻¹ (tabel 14), maar het verschil is niet significant ($p = 0,64$). Wel zijn de gehalten ervan in de strooisellaag duidelijk afgenomen ($p < 0,01$) en evenals bij aluminium is de afname het grootst bij de locaties met de hoogste gehalten in 1990 (figuur b14).

Oxalaat-extraheerbare voorraden Al en Fe in de bovengrond

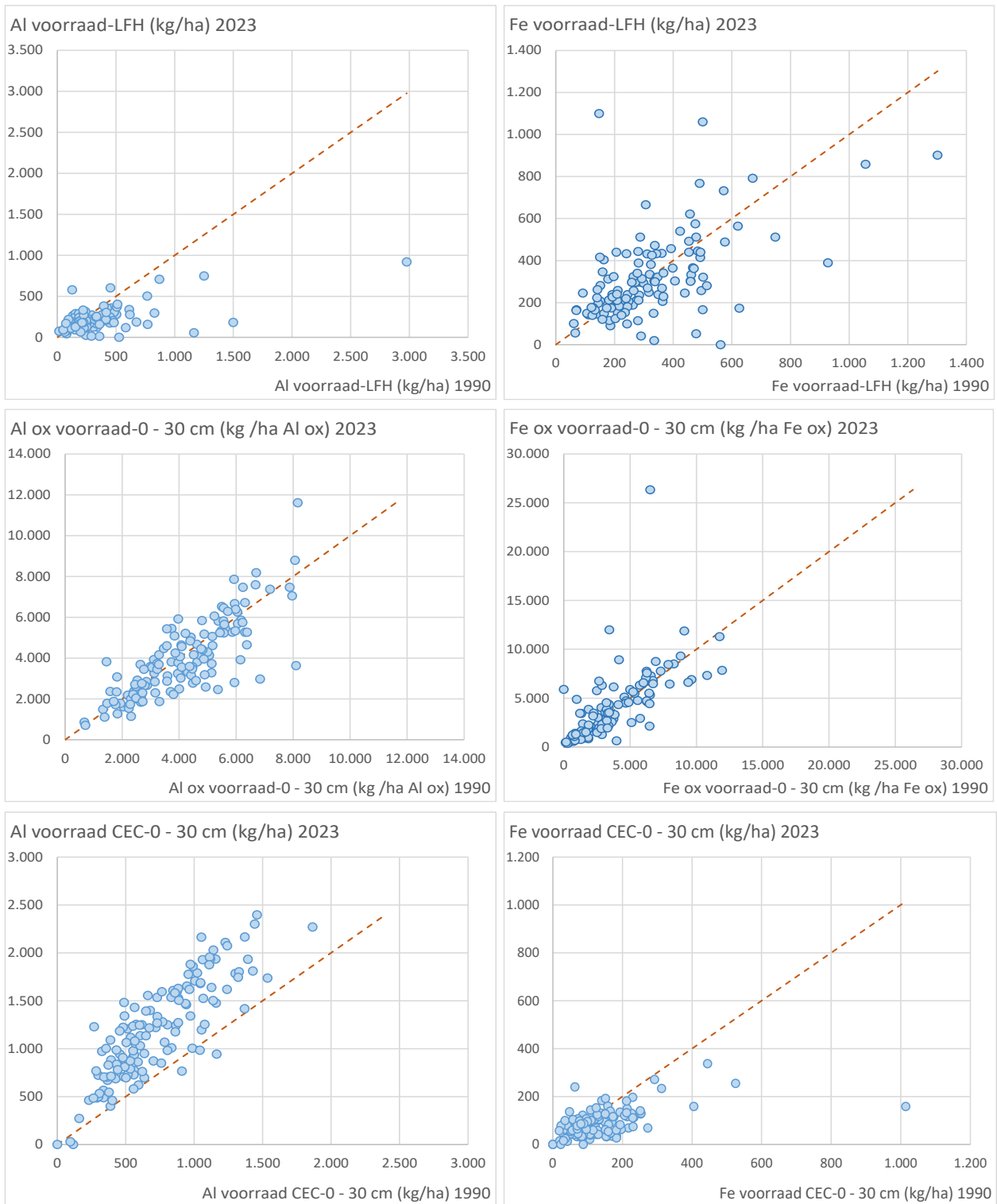
De oxalaat-extraheerbare fractie Al in de bovengrond nam gemiddeld met 187 kg ha⁻¹ af van 4.165 kg ha⁻¹ naar 3.978 kg ha⁻¹ (significant, met $p < 0,05$). Dit komt overeen met 5,67 kg ha⁻¹ jr⁻¹. De voorraad oxalaat-extraheerbaar Fe in de bovengrond is met 104 kg ha⁻¹ toegenomen van 3.317 naar 3.213 kg ha⁻¹. Gemiddeld is dat 3,15 kg ha⁻¹ jr⁻¹. Het verschil is echter niet significant ($p = 0,45$).

Tabel 13 Voorraden Al in de strooisellaag (LFH) en in de minerale bovengrond aan het uitwisselingscomplex en oxalaat-extraheerbaar, gemiddeld per boomsoort en gemiddeld voor alle meetpunten voor 1990 en 2023, en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

Boomsoort	Al-voorraad (kg ha ⁻¹)								
	Strooisel (LFH) laag (totaalvoorraad)			Minerale bovengrond (oxalaatextractie)			Minerale bovengrond (uitwisselingscomplex)		
	1990	2023	verschil	1990	2023	verschil	1990	2023	verschil
Corsic. Den	167 (35,5)	167 (16,8)	-0,540 (33,1)	3.528 (447)	2.934 (473)	-595 (202)	572 (72,3)	977 (129)	405 (96,0)
Douglasspar	264 (49,2)	199 (42,7)	-65,1 (21,0)	4.028 (512)	3.958 (483)	-70,4 (286)	751 (96,8)	1.228 (132)	477 (60,0)
Fijnspar	235 (24,7)	166 (15,8)	-68,2 (20,9)	4.104 (375)	4.239 (524)	135 (317)	876 (79,7)	1.329 (136)	452 (95,5)
Grove den	301 (21,7)	221 (19,0)	-80,4 (26,6)	4.002 (256)	3.868 (339)	-134 (182)	653 (43,8)	1.061 (70,5)	409 (41,8)
Japane lariks	233 (17,9)	176 (15,4)	-56,9 (22,4)	4.749 (388)	4.504 (387)	-245 (368)	923 (87,1)	1.480 (117)	557 (57,1)
Beuk	414 (54,3)	245 (30,4)	-170 (48,3)	4.868 (374)	4.538 (304)	-330 (295)	823 (106)	1.464 (87,6)	641 (47,6)
Zomereik	467 (133)	238 (46,6)	-229 (95,3)	4.134 (390)	3.920 (418)	-214 (178)	869 (85,5)	1.336 (109)	467 (50,8)
Gemiddeld	310 (26,5)	208 (11,8)	-102 (20,3)	4.165 (143)	3.978 (164)	-187 (94,2)	765 (30,1)	1.236 (42,4)	471 (23,5)

Tabel 14 Voorraden Fe in de strooisellaag (LFH), aan het uitwisselingscomplex en oxalaat-extraheerbaar in de minerale bovengrond, gemiddeld per boomsoort en gemiddeld voor alle meetpunten voor 1990 en 2023, en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

Boomsoort	Fe-voorraad (kg ha ⁻¹)								
	Strooisel (LFH) laag (totaalvoorraad)			Minerale bovengrond (oxalaatextractie)			Minerale bovengrond (uitwisselingscomplex)		
	1990	2023	verschil	1990	2023	verschil	1990	2023	verschil
Corsic. Den	220 (68,0)	245 (26,1)	25,1 (56,2)	2.408 (396)	2.235 (429)	-173 (240)	88,6 (13,1)	76,4 (12,0)	-12,2 (14,1)
Douglasspar	274 (29,4)	268 (37,4)	-6,26 (29,8)	3.933 (575)	3.700 (582)	-233 (338)	162 (19,0)	96,1 (11,5)	-65,6 (16,7)
Fijnspar	270 (33,4)	250 (26,9)	-19,6 (26,5)	1.816 (450)	1.996 (583)	179 (164)	122 (18,6)	65,8 (16,0)	-56,4 (12,3)
Grove den	348 (30,5)	355 (38,4)	6,67 (39,0)	3.358 (418)	3.434 (401)	76,0 (200)	103 (8,28)	78,1 (6,56)	-25,3 (7,06)
Japane lariks	266 (21,2)	250 (31,7)	-15,9 (29,6)	2.494 (665)	2.329 (516)	-165 (395)	104 (12,1)	80,7 (8,82)	-23,7 (9,38)
Beuk	418 (35,5)	403 (45,2)	-15,2 (45,7)	4.500 (880)	4.353 (742)	-147 (545)	145 (19,6)	96,6 (8,71)	-48,6 (21,0)
Zomereik	365 (55,8)	331 (52,0)	-33,5 (40,0)	3.529 (675)	4.318 (806)	789 (508)	183 (28,0)	114 (18,0)	-68,3 (17,4)
Gemiddeld	320 (16,6)	313 (17,1)	-7,61 (16,0)	3.213 (230)	3.317 (237)	104 (137)	129 (7,21)	87,0 (4,72)	-41,6 (5,31)



Figuur 12 Voorraden aluminium (links) en ijzer (rechts) in de LFH-lagen en minerale bovengrond (oxalaat-extraheerbaar en aan het uitwisselingscomplex) in 1990 en 2023. De uitbijter bij ijzer-oxalaatextractie met meer dan 25.000 kg ha⁻¹ in 2023 betreft een vernatte kwelsituatie. De uitbijter bij CEC bij ca. 1000 kg ha⁻¹ in 1990 betreft een veengrond.

Al en Fe aan het uitwisselingscomplex in de bovengrond

De hoeveelheid Al aan het uitwisselingscomplex in de bovengrond is toegenomen met gemiddeld 471 kg ha⁻¹, ofwel 14 kg ha⁻¹ jr⁻¹. Bij vrijwel alle locaties is een toename te zien (figuur 12). De hoeveelheid Fe aan het uitwisselingscomplex is juist afgenomen met gemiddeld 41,6 kg ha⁻¹, van 129 kg ha⁻¹ naar 87 kg ha⁻¹. Dit komt overeen met 1,26 kg ha⁻¹ jr⁻¹. Er is een redelijk verband tussen de oxalaat-extraheerbare voorraden en

de uitwisselbare voorraden van beide elementen (figuur b17). De bezetting met Al bedraagt gemiddeld 79%, tegenover 62% in 1990 (**tabel b14**). Voor Fe is de bezetting gedaald van 5,3 naar 3,2%.

De uitwisselbare fracties zijn voor het grootste deel onderdeel van de oxalaat-extraheerbare fracties. Dat betekent dat behalve dat de totale oxalaat-extraheerbare voorraden zijn afgenomen, er een deel daarvan daarnaast uitwisselbaar is geworden en niet meer in bijvoorbeeld als gebonden vorm (hydroxide of organisch) aanwezig is. De totale voorraad van de Al-oxiden in de oxalaat-extraheerbare voorraden is dus met gemiddeld ca. 658 kg ha⁻¹ afgenomen. Samen met de afname van de voorraden in de strooisellagen van gemiddeld 102 kg ha⁻¹ gaat het dus om 760 kg ha⁻¹, ofwel 23 kg ha⁻¹ jr⁻¹, terwijl dit voor de totale oxalaat-extraheerbare voorraden en strooiselvoorraden 289 kg ha⁻¹ is, ofwel 8,8 kg ha⁻¹ jr⁻¹.

Verklaring voor de veranderingen in Al-voorraden

Aluminium speelt een belangrijke rol in de buffering van zuur bij een pH < 4,5 (pH KCl ca. 3,5-4,0), waarbij onder een pH van circa 4,0 (pH KCl 3,0-3,5) Fe een steeds belangrijkere rol gaat spelen (Ulrich, 1986). Buffering van zuur is dus de belangrijkste oorzaak van de afname van Al in zowel de strooisellaag als in de oxalaat-extraheerbare fractie van Al in de bovengrond van samen 289 kg, waarbij tevens naar schatting gemiddeld 471 kg ha⁻¹ eerst is gebufferd door Al-oxiden en vervolgens vastgelegd aan het uitwisselingscomplex (klei en organische stof). De huidige depositie van zuur bedraagt gemiddeld voor Nederland 1880 molc ha⁻¹ jr⁻¹ in 2022, waarvan 1375 molc ha⁻¹ stikstof, maar bedroeg in 1990 circa 4400 molc ha⁻¹ jr⁻¹, waarvan 2880 molc ha⁻¹ stikstof (CBS et al., 2024; Clo, 2024). Gemiddeld over de hele periode ligt dit naar schatting (in ordegrootte) 2800 molc ha⁻¹ jr⁻¹ voor heel Nederland, aangezien het van 1990 tot 2010 redelijk lineair is afgenomen naar iets boven 2000 molc ha⁻¹ jr⁻¹ en daarna op dat niveau vrij vlak is gebleven.

Voor de bemonsterde bossen in dit onderzoek zal dit aanzienlijk (50% of meer) hoger zijn geweest, omdat bossen meer depositie invangen dan gemiddeld over alle landgebruikstypen in Nederland (zie ook par. 3.3). Leeters et al. (1994) berekenen voor 150 bosopstanden bijvoorbeeld een mediane zuurdepositie van 6500 molc ha⁻¹ jr⁻¹. De gemiddelde zuurdepositie voor de bosopstanden voor 1990-2023 zou daarmee rond 4500 molc ha⁻¹ jr⁻¹ kunnen liggen. Uitgaande van een gemiddelde stikstofdepositie van ca. 3500 molc ha⁻¹ jr⁻¹ (ca. 50 kg ha⁻¹ jr⁻¹; zie eerder), waarvan ruim 80% wordt vastgelegd in de bodem en niet meer dan 10-15% uitspoelt, is de actuele zuurproductie niet hoger dan ca. 1500 molc ha⁻¹ jr⁻¹. Die zuurproductie is dan voor ca. 2/3 het gevolg van de zwaveldepositie en ca. 1/3 van de stikstofdepositie. De hogere bijdrage van zwavel aan de verzuring, ondanks de veel lagere depositie dan stikstof, komt omdat zwavel in Nederlandse bossen nauwelijks wordt vastgelegd, in tegenstelling tot stikstof. Recentelijk gemeten gehalten van SO₄ en NO₃ in bodemvocht door Vos et al. (2024) en eigen metingen wijzen erop dat die gehalten en derhalve ook de uitspoeling ervan (in molc) en dus ook de verzurende werking ervan, in dezelfde ordegrootte liggen.

De afname van 289 kg ha⁻¹ Al in de oxalaat-extraheerbare voorraden en strooisel komt overeen met een zuurbuffering van 32 kmolc ha⁻¹, ofwel ca. 1 kmolc ha⁻¹ jr⁻¹. Recentelijk gemeten gehalten Al in bodemvocht (data Vos et al., 2024 en eigen data) in de rustperiode voor bomen (oktober-april, wanneer er de meeste uitspoeling is) bedraagt gemiddeld ca. 3-5 mg l⁻¹ op ca. 0,5 m diepte. Gecombineerd met een neerslagoverschot van 100-250 mm is de uitspoeling ca. 9 kg ha⁻¹ jr⁻¹, ofwel 1 kmolc ha⁻¹ jr⁻¹. In 1990 werden iets hogere (mediane) Al-concentraties gemeten van 6 mg l⁻¹ (Leeters et al., 1994).

Andere belangrijke buffering komt van verwerking van basische kationen, die geschat wordt op 250 molc ha⁻¹ jr⁻¹ (arm zand) tot 520 molc ha⁻¹ jr⁻¹ (rijk zand) (De Vries et al., 2019) voor de bodem tot 1 m diep en voor de bovengrond grofweg iets minder dan een derde daarvan, dus 75-150 molc ha⁻¹ jr⁻¹. De buffering van Al-silicaten is daar ongeveer weer het dubbele van is, dus 150-300 molc ha⁻¹ (op basis van De Vries et al., 1994B). Bij elkaar komt dit goed overeen met de geschatte actuele zuurproductie van ca. 1500 molc ha⁻¹ jr⁻¹. De Al-voorraad in de strooisellaag, maar ook van de oxalaat-extraheerbare voorraad, heeft dus een belangrijke rol gespeeld in de buffering van zure depositie. Daarbij dient bedacht te worden dat de zure neerslag niet volledig door de strooisellaag en bovengrond tot 30 cm wordt gebufferd. Ook de diepere bodem heeft te maken met verzurende neerslag. De buffering door Al kent echter grenzen (De Vries en Kros, 1991; De Vries et al., 1993; De Vries et al., 1994A). Tussen 1990 en 2023 is een belangrijk deel van de oxalaat-extraheerbare voorraad ervan aan het uitwisselingscomplex gaan zitten en is daarmee dicht bij uitputting van deze voorraad gekomen. De voorraad Al-silicaten is veel groter, maar deze bufferen maar een klein deel van dat van de oxalaat-extraheerbare voorraad.

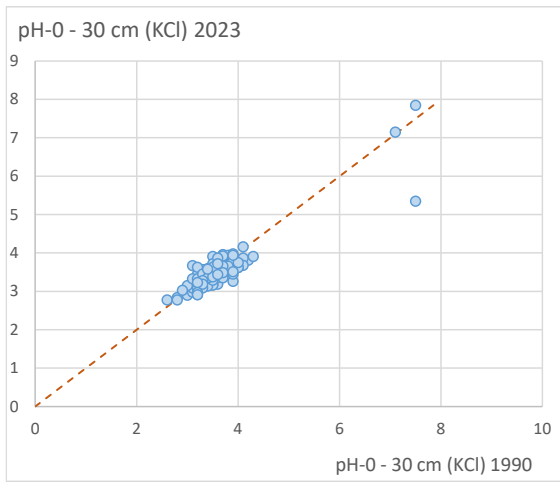
3.7 Zuurgraad van de minerale bovengrond

De zuurgraad (pH KCl) van de bodems was in 2023 gemiddeld 3,49 tegenover 3,53 in 1990 (**tabel 15**). Voor alle boomsoorten geldt dat de zuurgraad gemiddeld nauwelijks is veranderd (zie ook **figuur 13**). De zuurgraad was in 1990 betrekkelijk laag en is dat in 2023 nog steeds. Dit betekent echter niet dat de bodems niet verder zijn verzuurd. Zoals in paragraaf 3.7 is aangegeven, is de bezetting van het uitwisselingscomplex met aluminium toegenomen.

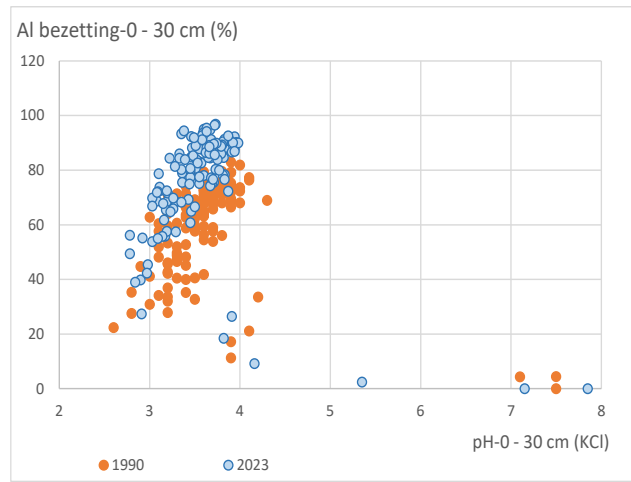
Tabel 15 Zuurgraad (pH KCl) van de bovengrond (0-30 cm), gemiddeld per boomsoort en gemiddeld voor alle meetpunten voor 1990 en 2023, en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

Boomsoort	Zuurgraad (pH KCl) van de minerale bovengrond		
	1990	2023	Vershil
Corsicaanse den	3,63 (0,093)	3,46 (0,097)	-0,17 (0,048)
Douglasspar	3,53 (0,068)	3,45 (0,074)	-0,083 (0,044)
Fijnspar	3,44 (0,070)	3,44 (0,071)	-0,008 (0,058)
Grove den	3,60 (0,048)	3,59 (0,047)	-0,01 (0,031)
Japanse lariks	3,47 (0,058)	3,45 (0,053)	-0,019 (0,048)
Beuk	3,57 (0,072)	3,60 (0,038)	0,028 (0,045)
Zomereik	3,42 (0,068)	3,37 (0,067)	-0,050 (0,042)
Gemiddeld	3,53 (0,025)	3,49 (0,025)	-0,038 (0,017)

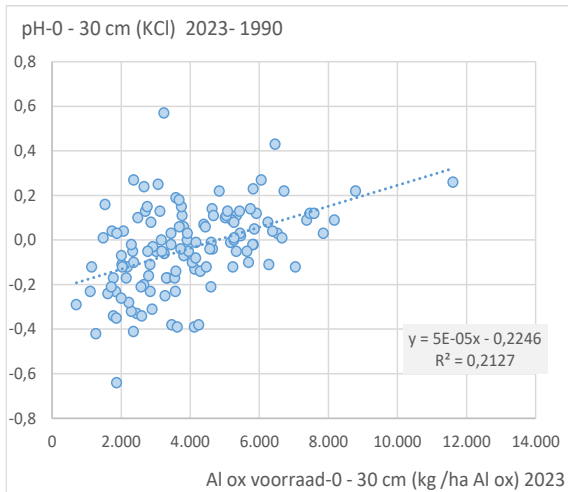
Aluminium speelt bij een pH > 4-4,5 maar een beperkte rol bij het uitwisselingscomplex. Onder een pH van 4 is echter het grootste deel van het uitwisselingscomplex bezet met Al, waarmee de buffering van zuur door Al zichtbaar wordt (figuur 14). De rol van Al in de buffering van zuur heeft echter beperkingen. Gemiddeld is de pH ten opzichte van 1990 sterker afgenomen bij bodems die kleinere oxalaat-extraheerbare voorraden Al hebben (Figuur 15) en ook is de zuurgraad gemiddeld lager bij bodems die kleinere oxalaat-extraheerbare voorraden Al hebben (figuur 16), al zijn beide verbanden relatief zwak. Desondanks lijkt het erop dat het deel van de bosbodems met een relatief lage voorraad oxalaat-extraheerbaar Al kwetsbaar is voor verdere daling van de pH. In laboratoriumexperimenten is ook aangetoond dat de snelheid waarmee Al vrijkomt, afneemt als Al-hydroxidevoorraden worden uitgeput, waardoor er meer zuur (H in oplossing) blijft, met als gevolg een hoger H-bezetting en lagere Al-bezetting (De Vries, 1994). Dat Al-oxalaat kan uitputten en dat dan de H-bezetting toeneemt en Al-bezetting afneemt, volgt ook uit modelberekeningen (De Vries and Kros, 1991; De Vries et al., 1993; De Vries, 1994).



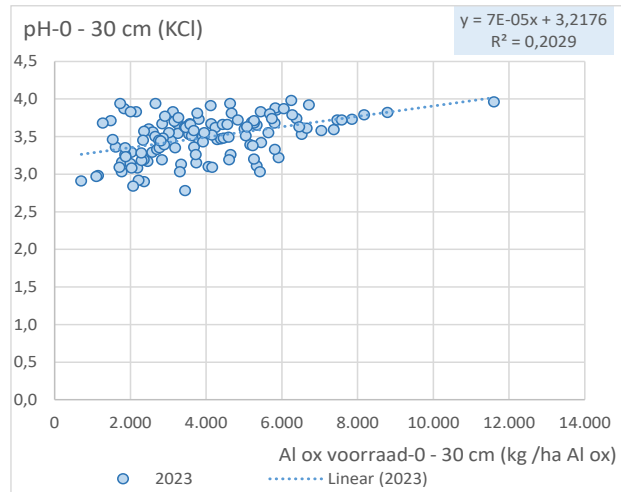
Figuur 13 Zuurgraad (pH KCl) van de minerale bovengrond in 2023 ten opzichte van 1990.



Figuur 14 Verband tussen pH (KCl) en het aandeel aluminiumbezetting aan het uitwisselingscomplex in 2023 ten opzichte van 1990.



Figuur 15 Verband tussen de verandering van de zuurgraad (pH) tussen 1990 en 2023 en de oxalaat-extraheerbare voorraad Al in de bovengrond in 2023.



Figuur 16 Verband tussen de zuurgraad (pH) en de oxalaat-extraheerbare voorraad Al in de bovengrond in 2023.

4 Conclusies

In 1990 zijn 150 locaties in bossen bemonsterd waarbij bodemchemische eigenschappen en elementvoorraden zijn bepaald. In 2023 zijn 136 van die locaties opnieuw bemonsterd. Beide bemonsteringen zijn met elkaar vergeleken. Daarbij zijn voor het bepalen van verschillen 8 kalkrijke locaties en een veenbodem buiten beschouwing gelaten. De bodems zijn duidelijk veranderd in de beschouwde periode. Voor een deel komt dit door gebruikelijke ontwikkelingen van een bosbodem als die ouder wordt, maar een belangrijk deel van de veranderingen is gerelateerd aan depositie van stikstof.

De koolstofvoorraden in de strooisellaag en bovengrond zijn gemiddeld met 14 ton ha⁻¹ toegenomen, van 127 naar 141 ton ha⁻¹, ofwel 0,4 ton ha⁻¹ jr⁻¹, waarvan het overgrote deel van 13,4 ton ha⁻¹ is geaccumuleerd in de strooisellaag. De toename van koolstof (in vooral de strooisellaag) betekent dat de bosbodem een belangrijke sink van CO₂ is. De vastlegging van koolstof in de biomassa in Nederlandse bossen wordt door Schelhaas et al. (2022) bijvoorbeeld geschat op 1,25 ton ha⁻¹ jr⁻¹.

De totale stikstofvoorraden in de strooisellaag en bovengrond zijn toegenomen met 1311 kg N ha⁻¹ waarvan ruim de helft (704 kg N ha⁻¹) in de strooisellaag en iets minder dan de helft (607 kg N ha⁻¹) in de bovengrond. Deling van de toename de totale stikstofvoorraad van 1311 kg ha⁻¹ over 33 jaar levert een gemiddelde jaarlijkse toename van bijna 40 kg N ha⁻¹ jr⁻¹, waarvan ruim 21 kg N ha⁻¹ jr⁻¹ in de strooisellaag en ruim 18 kg N ha⁻¹ jr⁻¹ in de bovengrond. Aangezien er ook stikstof uitspoelt en wordt vastgelegd in biomassa, zal de aanvoer groter zijn geweest, namelijk ongeveer 50 kg N ha⁻¹ jr⁻¹, ofwel 1650 kg N over een periode van 33 jaar. Daarvan is naar schatting 80% in de bodem vastgelegd, terwijl de resterende 20% is opgenomen en uitgespoeld (beide waarschijnlijk rond de 10%). De toename van N in de bodem is naar verhouding groter dan de toename van C, wat terug te zien is in een gemiddeld lagere C/N-verhouding in 2023 dan in 1990. Deze C/N-verhouding daalde in de strooisellaag van gemiddeld 26,2 naar 23,8, en in de bovengrond van gemiddeld 27,0 naar 22,8.

De totale fosforvoorraden in de strooisellaag en bovengrond zijn afgenomen met ca. 33 kg P ha⁻¹ tot gemiddeld bijna 500 kg ha⁻¹, waarbij de voorraad in de strooisellaag toenam met ca. 11 kg P ha⁻¹, terwijl in de bovengrond de voorraad afnam met ca. 43 kg P ha⁻¹. Het 95%-betrouwbaarheidsinterval van deze afname is echter vrij groot (\pm ca. 23 kg ha⁻¹) en maakt dat de onzekerheid groot is.

De voorraad uitwisselbaar Ca is afgenomen met gemiddeld 34 kg ha⁻¹ tot 110 kg ha⁻¹, ondanks dat de zuurdepositie is afgenomen. De voorraad Mg aan het uitwisselingscomplex is echter gemiddeld licht en is toegenomen met gemiddeld 6 kg ha⁻¹ tot 27 kg ha⁻¹). In de strooisellaag is echter zowel de Ca- als Mg-voorraad toegenomen, met gemiddeld 44 kg ha⁻¹ tot 244 kg ha⁻¹ voor Ca en 23 kg ha⁻¹ tot 65 kg ha⁻¹ voor Mg. Daardoor is de totale voorraad aan Ca en Mg in zowel de strooisellaag als bovengrond toegenomen met gemiddeld 10 kg ha⁻¹ voor Ca en 29 kg voor Mg. De Ca- en Mg-voorraden lijken dus iets toe te nemen bij afnemende zuurdepositie, in combinatie met input van depositie en verwerking van basen. De totale K-voorraad in de strooisellaag is achteruitgegaan met circa 12 kg ha⁻¹ en dit geldt ook voor de uitwisselbare K-voorraad in de bovengrond (gemiddeld 9 kg ha⁻¹), ofwel een afname van 21 kg in zowel de strooisellaag als bovengrond (afname aan het uitwisselingscomplex), waarmee de gemiddelde voorraad op 131 kg ha⁻¹ komt.

De zuurgraad van de bovengrond is in de afgelopen 33 jaar gemiddeld vrijwel gelijk gebleven en de pH-KCl bedraagt gemiddeld 3,5. Aluminium heeft een belangrijke rol gespeeld in het bufferen van de zure depositie. De voorraad ervan in de strooisellaag is gemiddeld met 102 kg ha⁻¹ afgenomen tot 208 kg ha⁻¹ en ook de oxalaat-extraheerbare voorraad is duidelijk afgenomen, namelijk van 4.165 naar 3.978 kg ha⁻¹, ofwel een afname van 187 kg ha⁻¹. Een belangrijk deel van de aluminium die door de zuurlast in oplossing is gekomen, is gaan binden aan het uitwisselingscomplex van de bovengrond. De afname in de aluminiumvoorraad kan met name worden verklaard door de zwaveldepositie in de beschouwde periode.

De uitkomsten van de vergelijking van de resultaten van deze studie met die van 1990 wijken op enkele punten af van die van De Jong et al. (2023). De Jong et al. (2023) berekenden verschillen tussen 1990 en 2020-2021 door middel van regressieanalyses (Generalised linear model) om te corrigeren voor verschillen in steekproefsamenstelling (bodemtype, boomsoort), terwijl in dit onderzoek dezelfde locaties opnieuw zijn bemonsterd. De lijn van de uitkomsten is dezelfde. Beide onderzoeken laten een duidelijke toename van koolstof en stikstof in de bodem zien. De verdeling van de onderzochte hoofdboomsoorten wijkt af van die bij de NBI. Als hiervoor wordt gecorrigeerd binnen de onderzochte soorten leidt dit niet tot grote verschillen. Een van de grotere verschillen die naar voren komt door correctie is een minder grote toename van de koolstofvoorraden (12,8 ton ha⁻¹ i.p.v. 14,1 ton ha⁻¹), vooral doordat Corsicaanse den minder zwaar meeweegt. Voor de verandering in stikstofvoorraden is er geen noemenswaardig verschil (+1304 kg ha⁻¹ i.p.v. +1311 kg ha⁻¹). De onderzochte boomsoorten omvatten ca. 80% van het bos op de zandgronden.

Literatuur

- Berg, B. and C. McClaugherty, 2003. Plant litter. Decomposition, humus formation, carbon sequestration. New York, Springer, 286 p.
- Berg, B. Erhagen, M.-B. Johansson, M. Nilsson, J. Stendahl, F. Trum and L. Vesterdal, 2015. Manganese in the litter fall-forest floor continuum of boreal and temperate pine and spruce forest ecosystems – a review, *Forest Ecology and Management*, 358, p. 248 – 260.
- CBS, PBL, RIVM, WUR, 2024. Verzurende depositie, 1990-2022 (indicator 0184, versie 20, 26 februari 2024) www.clo.nl. Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), Den Haag; PBL Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag; RIVM Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven; en Wageningen University & Research, Wageningen.
- Clo, 2024. <https://www.clo.nl/indicatoren/nl018920-stikstofdepositie-1990-2022>
- De Jong, A., S.P.J. van Delft en C.M.A. Hendriks, 2023. Koolstof en nutriënten in bosbodems. Resultaten bemonstering 2020-2021. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3265. 74 blz.; 30 fig.; 47 tab.; 37 ref.
- De Schrijver, A., G. Geudens, L. Augusto, J. Staelens, J. Mertens, K. Wuyts, L. Gielis en K. Verheyen, 2007. The effect of forest type on throughfall deposition and seepage flux: a review. *Oecologia*, 153, 663 – 674.
- De Schrijver, A., J. Staelens, K. Wuyts, G. Van Hoydonck, N. Janssen, J. Mertens, L. Gielis, G. Geudens, L. Augusto, K. Verheyen, 2008. Effect of vegetation type on throughfall deposition and seepage flux. In: *Environmental Pollution*, 153, 2, p. 295 – 303.
- De Vos, B., M. Van Meirvenne, P. Quataert, J. Deckers and B. Muys, 2005. Predictive Quality of Pedotransfer Functions for Estimating Bulk Density of Forest Soils. In: *Soil Science Society of America Journal*, p. 500 – 510.
- De Vries, W., 1994. Soil response to acid deposition at different regional scales. Field and laboratory data, critical loads and model predictions. Wageningen, the Netherlands, Agricultural University, Ph.D. Thesis, 487 p.
- De Vries, W. en P.C. Jansen, 1994. Effects of acid deposition on 150 forest stands in the Netherlands; 3. Input output budgets for sulphur, nitrogen, base cations and aluminium. Wageningen, DLO Winand Staring Centre. Report 69.3 60 pp.; 12 Figs; 21 Tables; 38 Refs; 1 Annex.
- De Vries, W., J.J.M. Van Grinsven, N. Van Breemen, E.E.J.M. Leeters and P.C. Jansen, 1995. Impacts of acid atmospheric deposition on concentrations and fluxes of solutes in Dutch forest soils. *Geoderma* 67, 17-43.
- De Vries, W. and J. Kros, 1991. Assessment of critical loads and the impact of deposition scenarios by steady state and dynamic soil acidification models. Wageningen, the Netherlands, DLO Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research, Report 36, 61 p.
- De Vries, W., J.C.H. Voogd and J. Kros, 1993. Effects of various deposition scenarios on the aluminium hydroxide content of Dutch forest soils. Wageningen, the Netherlands, DLO Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research, Report 68, 32 pp.
- De Vries, W., J. Kros and C. van der Salm, 1994A. Long-term impacts of various emission deposition scenarios on Dutch forest soils. *Water, Air and Soil Pollution* 75: 1-35.
- De Vries, W., J. Kros en J.C.H. Voogd, 1994B. Assessment of critical loads and their exceedance on Dutch forests using a multi-layer steady-state model. In: *Water, Air, and Soil Pollution*, 76, p. 407 – 448.
- De Vries, W. en E.E.J.M. Leeters, 2001. Chemical composition of the humus layer, mineral soil and soil solution of 150 forest stands in the Netherlands in 1990. Wageningen, Alterra, Green World Research. Alterra-Report 424.1. 114 p.
- De Vries, W., J.J. de Jong, J. Kros, J.H. Spijker, 2019. Het effect van houtoogst op nutriëntenbalansen in bossen op zandgronden. Onderbouwing van een adviessysteem. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 2923. 78 blz.; 17 fig.; 20 tab.; 51 ref.
- Dohrmann, R. and S. Kaufhold, 2009. Three New, Quick CEC Methods for Determining the Amounts of Exchangeable Calcium Cations in Calcareous Clays. In: *Clays and Clay Minerals*, 57, 3, p. 338- 352.
- Etheridge, R.D, G.M. Pesti and E.H Foster, 1998. A comparison of nitrogen values obtained utilizing the Kjeldahl nitrogen and Dumas combustion methodologies (Leco CNS 2000) on samples typical of an animal nutrition analytical laboratory. In: *Animal Feed Science and Technology*, 73, 1-2, p. 21-28.

-
- Gillman, G. P., J. O. Skjemstad and R. C. Bruce, 1982. A comparison of methods used in Queensland for determining cation exchange properties. Melbourne, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 18 p.
- Hesse, P.R., 1971. A textbook of soil chemical analysis. John Murray, Londen, 520 p.
- Hoekstra, C. en J.N.B. Poelman, 1982. Dichtheid van gronden gemeten aan de meest voorkomende bodemeenheden in Nederland. Wageningen, Stichting voor Bodem-kartering, Rapport nr. 1582, 47 p.
- Hommel, P., de Waal, R., de Muys, B., den Ouden, J., Spek, T., 2007. Terug naar het lindewoud: strooiselkwaliteit als basis voor ecologisch bosbeheer. Zeist, KNVV Uitgeverij, 72 p.
- Knulst, J.C., 2004. Ratio between throughfall and open-field bulk precipitation used for quality control in deposition monitoring. In: Atmospheric Environment, 38, p. 869 – 4878.
- Kurmies, B., 1949. Humusbestimmung nach dem Bichromatverfahren ohne Kaliumjodid. Z. Pflanzenern. Düng und Bodenkunde 44: 121-125.
- Leeters, E.E.J.M., J.G. Hartholt, W. de Vries and L.J.M. Boumans, 1994. Effects of acid deposition on 150 forest stands in the Netherlands; Assessment of the chemical compositions of foliage, soil, soil solution and groundwater on a national scale. Wageningen (The Netherlands), DLO Winand Staring Centre. Report 69.4, 156 p.
- Leeters, E.E.J.M. and W. de Vries, 2001. Chemical composition of the humus layer, mineral soil and soil solution of 200 forest stands in the Netherlands in 1995. Wageningen, Alterra, Green World Research. Alterra-rapport 424.2; 108 p.
- Nel, T., Y. Bruneel and E. Smolders, 2023. Comparison of five methods to determine the cation exchange capacity of soil. In: Journal of Plant Nutrition and Soil Science, p. 311 – 320.
- Schelhaas, M.J., S. Teeuwen, J. Oldenburger, G. Beerkens, G. Velema, J. Kremers, B. Lerink, M.J. Paulo, H. Schoonderwoerd, W. Daamen, F. Dolstra, M. Lusink, K. van Tongeren, T. Scholten, I. Pruijsten, F. Voncken, A.P.P.M. Clercx, 2022. Zevende Nederlandse Bosinventarisatie; Methoden en resultaten. Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, WOt-rapport 142. 127 p.
- Stendahl, J., B. Berg, and B.D. Lindahl, 2017. Manganese availability is negatively associated with carbon storage in northern coniferous forest humus layers. Scientific reports, 7, 15487.
- Ulrich, B., 1986. Natural and anthropogenic components of soil acidification. In: Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde Volume 149, 6, p. 702 – 717.
- Van Delft, B., A. de Jong, P. Dijk en P. Gerritsen, 2023. Bodem en Bos in Someren en Lieshout, Verkenning van de relatie tussen Bodem en bosvitaliteit in twee waterwingebieden. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3288. 94 p.
- Van den Burg, J., 1999. Bodemchemische eigenschappen en elementvoorraden van de bodem in Nederlandse bossen. Resultaten van het onderzoek door "De Dorschkamp" in de periode 1950-1991. Wageningen, Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek, IBN-rapport 434.
- Van den Burg, J., en W. Schaap, 1995. Richtlijnen voor mineralentoediening en bekalking als effectgerichte maatregelen in bossen. Wageningen, Rapport IKC Natuurbeheer 16, 63 p.
- Vos, M.A.E., J. den Ouden, M. Hoosbeek, M. Valtera, W. de Vries and F. Streck, 2023. The sustainability of timber and biomass harvest in perspective of forest nutrient uptake and nutrient stocks. In: Forest ecology and management, 530, 13 p.
- Vos, M.A.E., W. de Vries, J. den Ouden en F. Streck, 2024A. Canopy openness rather than tree species determine seasonal and annual atmospheric deposition into forests. In: M.A.E. Vos, 2024. Impacts of harvesting practices on nutrient balances of forests under high nitrogen deposition. PhD thesis, Wageningen University, 300 p.
- Vos, M.A.E., W. de Vries, J. de Vries, M. Hoosbeek, J. Medina en F. Streck, 2024B. Effects of forest management on dissolved nutrient concentrations, water fluxes and nutrient leaching. In: M.A.E. Vos, 2024. Impacts of harvesting practices on nutrient balances of forests under high nitrogen deposition. PhD thesis, Wageningen University, 300 p.
- Wang, D., Snyder, M., Michael, C., Bormann, H.F., 1993. Potential errors in measuring nitrogen content of soils low in nitrogen. Soil Sci. Soc. Am. J. 57, p. 1533 - 1536.

Bijlage 1 Ligging van bemonsteringslocaties



Figuur b1 Ligging van de bemonsteringslocaties.

Bijlage 2 Elementgehalten in strooisellaag en minerale bovengrond

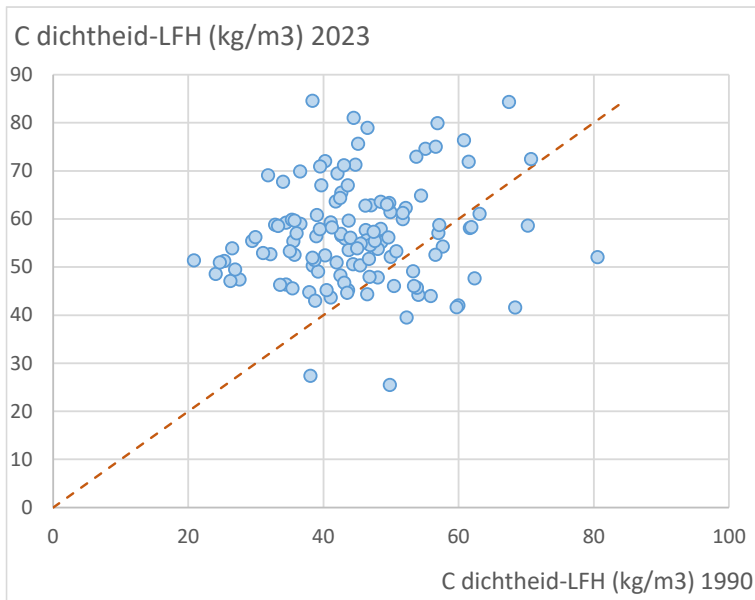
B2.1 Koolstofgehalten en dichtheden

Tabel b1 Gemiddelde koolstofgehalten in de strooisellaag (LFH) en de minerale bovengrond per boomsoort en voor alle meetpunten voor 1990 en 2023, en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

Boomsoort	Koolstofgehalten (g kg ⁻¹)					
	LFH			Minerale bovengrond (0 - 30 cm)		
	1990	2023	verschil	1990	2023	verschil
Corsicaanse den	362 (21,4)	419 (10,5)	57,1 (21,6)	16,2 (2,66)	18,0 (2,23)	1,80 (2,10)
Douglasspar	394 (19,5)	387 (17,2)	-6,94 (22,1)	20,7 (2,70)	21,9 (2,56)	1,17 (0,81)
Fijnspar	395 (13,1)	390 (20,3)	-4,92 (20,1)	25,6 (2,72)	24,8 (2,97)	-0,82 (2,10)
Grove den	382 (9,02)	384 (14,9)	1,62 (16,9)	18,1 (1,79)	18,5 (1,72)	0,38 (0,86)
Japanse lariks	434 (10,4)	396 (12,1)	-37,9 (14,1)	23,4 (2,17)	26,9 (3,09)	3,56 (1,93)
Beuk	364 (13,1)	328 (22,1)	-36,3 (24,6)	23,9 (4,28)	22,9 (2,21)	-0,95 (2,31)
Zomereik	326 (12,7)	362 (14,4)	36,4 (16,0)	33,7 (5,81)	31,7 (3,85)	-2,04 (2,72)
Gemiddeld	377 (5,67)	380 (6,69)	2,96 (7,84)	22,9 (1,40)	23,2 (1,12)	0,264 (0,70)

Tabel b2 Gemiddelde koolstofdichtheid in de strooisellaag (LFH) per boomsoort en voor alle meetpunten voor 1990 en 2023, en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

Boomsoort	Koolstofdichtheid (kg m ⁻³)		
	LFH		
	1990	2023	Verschil
Corsicaanse den	35,9 (2,23)	60,3 (2,57)	24,4 (2,27)
Douglasspar	45,5 (2,20)	53,0 (2,14)	7,46 (3,55)
Fijnspar	50,4 (3,21)	58,0 (2,79)	7,57 (4,64)
Grove den	47,8 (1,44)	59,4 (1,69)	11,6 (2,37)
Japanse lariks	38,8 (1,95)	49,9 (2,45)	11,1 (3,80)
Beuk	47,4 (3,02)	55,0 (2,91)	7,57 (3,85)
Zomereik	43,6 (2,70)	56,4 (2,63)	12,8 (3,31)
Gemiddeld	44,9 (0,94)	56,6 (0,94)	11,6 (1,31)



Figuur b2 Koolstofdichtheid van de strooisellaag in 1990 en 2023.

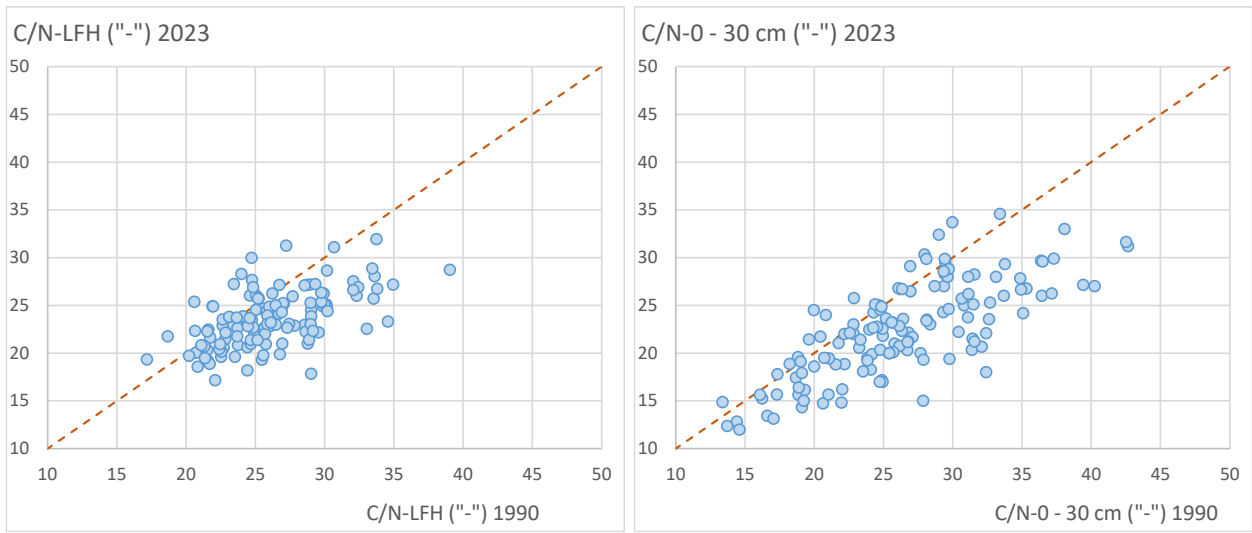
B2.2 Stikstofgehalten en C/N-verhoudingen

Tabel b3 Gemiddelde stikstofgehalten in de strooisellaag (LFH) en de minerale bovengrond gemiddeld per boomsoort en gemiddeld voor alle meetpunten voor 1990 en 2023, en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

Boomsoort	Stikstofgehalten (g kg ⁻¹)					
	LFH			Minerale bovengrond (0-30 cm)		
	1990	2023	Vershil	1990	2023	Vershil
Corsicaanse den	12,3 (0,68)	15,5 (0,47)	3,21 (0,75)	0,571 (0,091)	0,74 (0,068)	0,17 (0,078)
Douglasspar	16,1 (0,60)	16,5 (0,7)	0,429 (0,70)	0,81 (0,074)	0,97 (0,0650)	0,16 (0,056)
Fijnspar	14,8 (0,59)	15,7 (0,80)	0,885 (0,82)	0,90 (0,089)	0,97 (0,089)	0,074 (0,096)
Grove den	13,5 (0,31)	14,9 (0,69)	1,45 (0,62)	0,62 (0,048)	0,77 (0,056)	0,16 (0,038)
Japanse lariks	17,3 (0,45)	17,0 (0,56)	-0,243 (0,66)	0,83 (0,057)	1,09 (0,11)	0,26 (0,11)
Beuk	14,3 (0,49)	14,8 (0,93)	0,478 (0,86)	0,86 (0,11)	1,02 (0,053)	0,16 (0,069)
Zomereik	14,7 (0,60)	17,6 (0,81)	2,88 (0,73)	1,34 (0,15)	1,50 (0,14)	0,16 (0,069)
Gemiddeld	14,5 (0,22)	15,9 (0,31)	1,40 (0,30)	0,84 (0,042)	1,00 (0,042)	0,16 (0,025)

Tabel b4 Gemiddelde C/N-verhoudingen in de strooisellaag (LFH) en de minerale bovengrond gemiddeld per boomsoort en gemiddeld voor alle meetpunten voor 1990 en 2023, en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

Boomsoort	C/N-verhouding (-)					
	LFH			Minerale bovengrond (0-30 cm)		
	1990	2023	Vershil	1990	2023	Vershil
Corsicaanse den	29,8 (1,46)	27,2 (0,63)	-2,52 (1,40)	28,1 (1,45)	23,4 (1,38)	-4,70 (1,07)
Douglasspar	24,4 (0,68)	23,5 (0,45)	-0,929 (0,72)	24,9 (1,54)	22,2 (1,56)	-2,71 (0,74)
Fijnspar	26,9 (0,67)	25,0 (0,77)	-1,96 (0,83)	28,4 (1,18)	25,1 (1,36)	-3,22 (1,17)
Grove den	28,4 (0,52)	25,0 (0,31)	-3,46 (0,87)	28,4 (1,17)	23,0 (0,75)	-5,40 (0,98)
Japanse lariks	25,2 (0,59)	23,4 (0,46)	-1,87 (0,65)	27,8 (1,20)	24,5 (1,03)	-3,28 (0,98)
Beuk	25,5 (0,54)	22,2 (0,50)	-3,33 (0,71)	27,1 (1,68)	22,2 (1,21)	-4,87 (0,76)
Zomereik	22,2 (0,43)	20,9 (0,49)	-1,36 (0,55)	23,7 (1,48)	20,6 (0,97)	-3,16 (0,93)
Gemiddeld	26,2 (0,33)	23,8 (0,25)	-2,38 (0,35)	27,0 (0,56)	22,8 (0,43)	-4,2 (0,41)

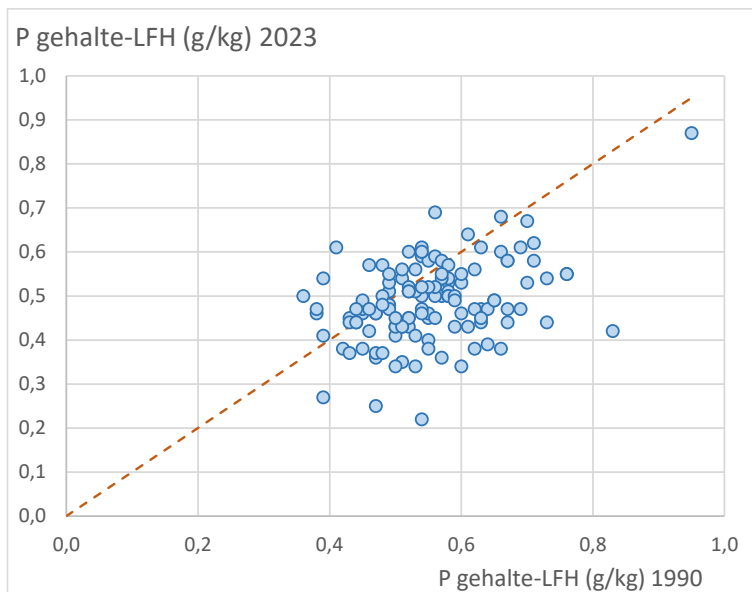


Figuur b3 C/N-verhoudingen in de strooisellaag en de minerale bovengrond in 1990 en 2023.

B2.3 Fosforgehalten

Tabel b5 Gemiddelde fosforgehalten voor de strooisellaag (LFH), de minerale bovengrond (totaal en oxalaat-extraheerbaar) gemiddeld per boomsoort en gemiddeld voor alle meetpunten voor 1990 en 2023, en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

Boomsoort	P-gehalten (mg kg ⁻¹)								
	LFH			Minerale bovengrond (oxalaatextractie)			Minerale bovengrond (totaal)		
	1990	2023	Vershil	1990	2023	Vershil	1990	2023	Vershil
Corsic. den	506 (21,1)	465 (18,6)	-40,8 (26,3)	46,5 (10,4)	31,7 (7,42)	-14,8 (4,36)	76,8 (15,1)	70,8 (9,92)	-5,93 (6,82)
Douglasspar	589 (24,6)	508 (24,0)	-81,4 (25,8)	90,4 (17,1)	63,4 (14,4)	-27,1 (5,03)	131 (18,4)	112 (16,2)	-19,3 (5,95)
Fijnspar	581 (20,2)	479 (17,6)	-102 (27,6)	55,7 (13,1)	44,0 (8,73)	-11,7 (5,97)	87,8 (11,0)	85,0 (8,78)	-2,79 (6,98)
Grove den	524 (15,2)	444 (17,6)	-80,5 (20,2)	55,7 (8,93)	42,9 (5,72)	-12,9 (4,70)	88,3 (9,28)	85,4 (7,36)	-2,89 (4,40)
Japane lariks	587 (14,6)	500 (12,4)	-87,1 (17,8)	77,4 (16,5)	58,4 (16,1)	-19,0 (6,76)	112 (17,0)	104 (17,7)	-7,57 (6,49)
Beuk	553 (25,6)	479 (30,5)	-73,8 (36,8)	77,1 (11,3)	50,0 (6,19)	-27,1 (7,36)	129 (15,9)	112 (14,6)	-17,0 (12,0)
Zomereik	565 (28,0)	546 (25,7)	-19,1 (23,8)	128 (23,7)	98,8 (23,5)	-28,9 (9,76)	190 (26,3)	179 (27,7)	-11,0 (10,9)
Gemiddeld	553 (8,58)	484 (8,96)	-68,7 (9,83)	75,7 (6,29)	56,3 (5,42)	-19,4 (2,64)	116 (7,21)	108 (6,86)	-8,33 (2,94)



Figuur b4 Fosforgehalten in de strooisellaag in 1990 en 2023.

B2.4 Basen- en mangaangehalten en basenbezetting aan het uitwisselingscomplex

Tabel b6 Gemiddelde calciumgehalten voor de strooisellaag (LFH) en de minerale bovengrond gemiddeld per boomsoort en gemiddeld voor alle meetpunten voor 1990 en 2023, en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

Boomsoort	Calciumgehalten					
	LFH (g kg ⁻¹)			Minerale bovengrond (0-30 cm) (mmol(+) kg ⁻¹)		
	1990	2023	Vershil	1990	2023	Vershil
Corsicaanse den	1,52 (0,15)	1,40 (0,11)	-0,11 (0,15)	1,04 (0,36)	0,75 (0,18)	-0,29 (0,26)
Douglasspar	2,53 (0,33)	2,06 (0,24)	-0,46 (0,31)	1,25 (0,23)	1,00 (0,18)	-0,25 (0,30)
Fijnspar	2,06 (0,12)	1,76 (0,25)	-0,30 (0,32)	1,59 (0,54)	1,21 (0,28)	-0,38 (0,49)
Grove den	1,75 (0,15)	1,51 (0,12)	-0,25 (0,14)	0,958 (0,12)	0,74 (0,13)	-0,22 (0,13)
Japane lariks	2,51 (0,11)	2,31 (0,31)	-0,20 (0,34)	0,985 (0,14)	1,36 (0,33)	0,37 (0,34)
Beuk	1,83 (0,19)	1,89 (0,29)	0,064 (0,15)	1,16 (0,31)	1,46 (0,35)	0,30 (0,41)
Zomereik	2,58 (0,12)	2,50 (0,26)	-0,086 (0,20)	5,25 (1,17)	3,55 (0,70)	-1,70 (0,94)
Gemiddeld	2,08 (0,075)	1,89 (0,089)	-0,20 (0,084)	1,83 (0,26)	1,45 (0,17)	-0,39 (0,20)

Tabel b7 Gemiddelde kaliumgehalten voor de strooisellaag (LFH) en de minerale bovengrond gemiddeld per boomsoort en gemiddeld voor alle meetpunten voor 1990 en 2023, en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

Boomsoort	Kaliumgehalten					
	LFH (g kg ⁻¹)			Minerale bovengrond (0-30 cm) (mmol(+) kg ⁻¹)		
	1990	2023	Vershil	1990	2023	Vershil
Corsicaanse den	0,67 (0,041)	0,43 (0,025)	-0,26 (0,043)	0,24 (0,023)	0,25 (0,026)	0,010 (0,027)
Douglasspar	0,89 (0,21)	0,49 (0,072)	-0,40 (0,15)	0,35 (0,0664)	0,34 (0,068)	-0,004 (0,023)
Fijnspar	0,67 (0,031)	0,43 (0,027)	-0,24 (0,032)	0,32 (0,026)	0,34 (0,034)	0,027 (0,028)
Grove den	0,72 (0,029)	0,46 (0,023)	-0,26 (0,034)	0,37 (0,028)	0,30 (0,023)	-0,068 (0,024)
Japane lariks	0,66 (0,028)	0,51 (0,036)	-0,15 (0,044)	0,27 (0,027)	0,40 (0,050)	0,135 (0,053)
Beuk	0,85 (0,063)	0,53 (0,043)	-0,32 (0,062)	0,63 (0,077)	0,44 (0,040)	-0,19 (0,079)
Zomereik	0,97 (0,13)	0,69 (0,053)	-0,28 (0,097)	0,93 (0,091)	0,75 (0,057)	-0,19 (0,072)
Gemiddeld	0,78 (0,035)	0,51 (0,017)	-0,27 (0,027)	0,46 (0,030)	0,41 (0,022)	-0,054 (0,020)

Tabel b8 Gemiddelde magnesiumgehalten voor de strooisellaag (LFH) en de minerale bovengrond gemiddeld per boomsoort en gemiddeld voor alle meetpunten voor 1990 en 2023, en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

Boomsoort	Magnesiumgehalten					
	LFH (g kg ⁻¹)			Minerale bovengrond (0-30 cm) (mmol(+) kg ⁻¹)		
	1990	2023	Vershil	1990	2023	Vershil
Corsicaanse den	0,35 (0,024)	0,41 (0,029)	0,058 (0,0366)	0,20 (0,025)	0,31 (0,031)	0,11 (0,033)
Douglasspar	0,490 (0,072)	0,48 (0,040)	-0,0079 (0,065)	0,37 (0,051)	0,46 (0,072)	0,083 (0,039)
Fijnspar	0,37 (0,016)	0,49 (0,041)	0,12 (0,038)	0,39 (0,060)	0,59 (0,087)	0,20 (0,070)
Grove den	0,37 (0,022)	0,40 (0,020)	0,026 (0,024)	0,27 (0,027)	0,33 (0,036)	0,055 (0,028)
Japanse lariks	0,496 (0,022)	0,72 (0,19)	0,23 (0,11)	0,33 (0,031)	0,66 (0,096)	0,34 (0,092)
Beuk	0,43 (0,035)	0,46 (0,036)	0,031 (0,025)	0,47 (0,12)	0,64 (0,10)	0,17 (0,14)
Zomereik	0,54 (0,027)	0,60 (0,040)	0,064 (0,026)	1,10 (0,207)	1,16 (0,18)	0,060 (0,12)
Gemiddeld	0,43 (0,014)	0,50 (0,020)	0,066 (0,018)	0,46 (0,047)	0,58 (0,046)	0,12 (0,030)

Tabel b9 Gemiddelde mangaangehalten en voorraden voor de strooisellaag (LFH) gemiddeld per boomsoort en gemiddeld voor alle meetpunten voor 1990 en 2023, en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

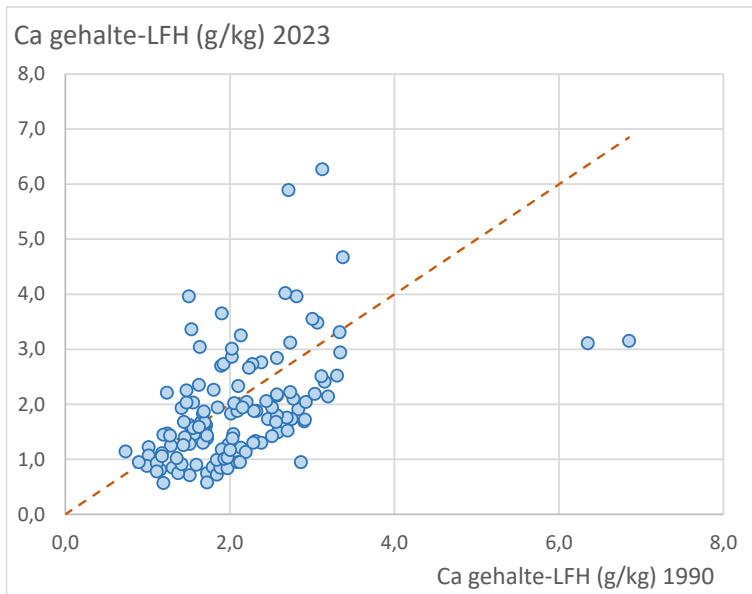
Boomsoort	Mangaan in LFH-lagen					
	Gehalte (mg kg ⁻¹)			Voorraad (kg ha ⁻¹)		
	1990	2023	Vershil	1990	2023	Vershil
Corsicaanse den	101 (13,6)	65,5 (10,3)	-35,4 (9,40)	5,92 (0,83)	7,93 (1,19)	2,01 (1,20)
Douglasspar	95,2 (10,7)	88,0 (17,7)	-7,20 (15,7)	7,32 (0,68)	10,1 (2,41)	2,82 (2,40)
Fijnspar	125 (36,0)	68,6 (13,7)	-56,7 (30,2)	12,2 (3,75)	10,6 (2,36)	-1,62 (2,80)
Grove den	106 (12,8)	84,5 (12,8)	-21,5 (15,8)	10,5 (0,87)	12,0 (1,86)	1,53 (1,81)
Japanse lariks	78,9 (11,4)	67,4 (21,0)	-11,5 (13,5)	7,78 (1,16)	6,06 (0,69)	-1,72 (1,20)
Beuk	130 (31,7)	183 (92,5)	52,9 (67,3)	13,5 (2,56)	18,9 (5,66)	5,39 (4,99)
Zomereik	191 (28,2)	166 (23,8)	-25,1 (21,3)	17,0 (2,25)	18,6 (2,97)	1,63 (1,73)
Gemiddeld	121 (8,72)	104 (11,9)	-16,9 (10,0)	11,0 (0,75)	12,5 (1,08)	1,43 (0,91)

Tabel b10 Gemiddelde kationenuitwisselingscapaciteit (CEC) en basenbezetting van de bovengrond gemiddeld per boomsoort en gemiddeld voor alle meetpunten voor 1990 en 2023, en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

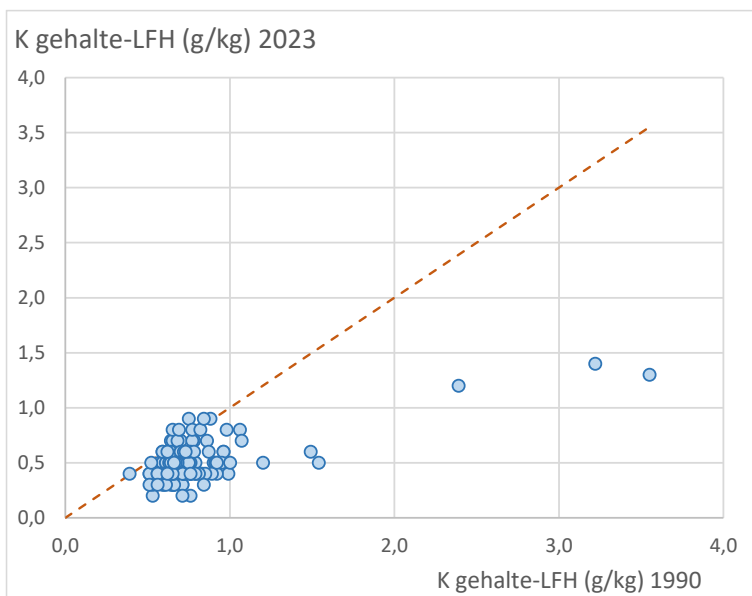
Boomsoort	Minerale bovengrond (0-30 cm)					
	CEC (mmolc kg ⁻¹)			Basenbezetting (%)		
	1990	2023	Vershil	1990	2023	Vershil
Corsicaanse den	25,8 (4,16)	34,3 (4,05)	8,50 (3,02)	6,17 (1,13)	4,57 (0,56)	-1,60 (1,19)
Douglasspar	31,5 (3,59)	43,0 (4,29)	11,5 (1,30)	7,30 (0,78)	5,14 (0,52)	-2,16 (0,63)
Fijnspar	40,0 (4,15)	46,4 (5,48)	6,36 (4,05)	7,73 (1,94)	5,10 (0,67)	-2,63 (1,64)
Grove den	28,1 (2,49)	35,8 (3,06)	7,68 (1,67)	6,51 (0,47)	4,31 (0,35)	-2,21 (0,44)
Japane lariks	38,9 (3,84)	51,6 (5,01)	12,6 (2,86)	5,02 (0,68)	5,50 (1,03)	0,481 (0,84)
Beuk	37,4 (6,88)	45,6 (3,67)	8,23 (3,91)	6,66 (0,54)	6,55 (1,09)	-0,117 (0,85)
Zomereik	50,1 (5,18)	54,1 (4,97)	4,00 (2,69)	14,5 (1,99)	10,3 (1,02)	-4,19 (1,60)
Gemiddeld	35,5 (1,72)	43,5 (1,75)	8,00 (1,02)	7,94 (0,53)	5,91 (0,33)	-2,03 (0,41)

Tabel b11 Gemiddelde bezetting van Ca, K en Mg aan het uitwisselingscomplex van de bovengrond (0-30 cm) gemiddeld per boomsoort en gemiddeld voor alle meetpunten voor 1990 en 2023 en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

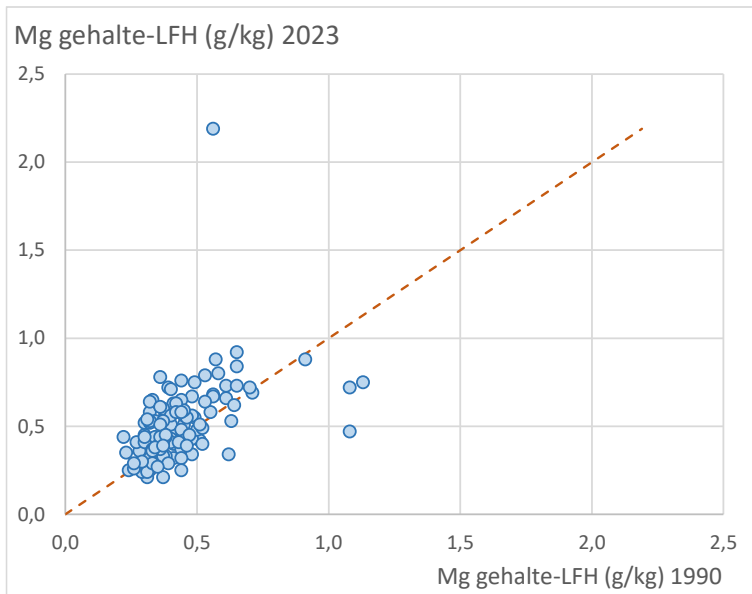
Boomsoort	Kationenbezetting aan het uitwisselingscomplex van de minerale bovengrond (0-30 cm) (%)								
	Ca			K			Mg		
	1990	2023	Vershil	1990	2023	Vershil	1990	2023	Vershil
Corsicaanse den	3,70 (1,14)	1,98 (0,25)	-1,72 (0,97)	1,17 (0,19)	0,991 (0,20)	-0,182 (0,19)	0,862 (0,099)	1,24 (0,35)	0,36 (0,31)
Douglasspar	4,04 (0,54)	2,57 (0,44)	-1,47 (0,57)	1,20 (0,17)	0,82 (0,13)	-0,375 (0,090)	1,22 (0,10)	1,07 (0,11)	-0,15 (0,11)
Fijnspar	4,82 (1,58)	2,57 (0,47)	-2,25 (1,40)	1,04 (0,25)	0,88 (0,11)	-0,156 (0,21)	1,10 (0,17)	1,32 (0,20)	0,22 (0,16)
Grove den	3,47 (0,34)	2,07 (0,25)	-1,40 (0,38)	1,49 (0,12)	0,91 (0,065)	-0,581 (0,10)	1,04 (0,075)	0,97 (0,11)	-0,069 (0,11)
Japane lariks	2,75 (0,43)	2,76 (0,72)	0,0067 (0,62)	0,823 (0,14)	0,89 (0,14)	0,0704 (0,12)	0,920 (0,11)	1,35 (0,19)	0,43 (0,17)
Beuk	2,93 (0,39)	3,32 (0,69)	0,387 (0,60)	1,94 (0,19)	1,05 (0,13)	-0,893 (0,13)	1,22 (0,10)	1,51 (0,25)	0,29 (0,20)
Zomereik	9,74 (1,80)	6,17 (0,83)	-3,58 (1,50)	2,22 (0,27)	1,64 (0,19)	-0,580 (0,19)	1,96 (0,19)	1,98 (0,18)	0,021 (0,14)
Gemiddeld	4,65 (0,44)	3,09 (0,24)	-1,57 (0,36)	1,48 (0,083)	1,05 (0,056)	-0,433 (0,060)	1,21 (0,058)	1,32 (0,074)	0,10 (0,062)



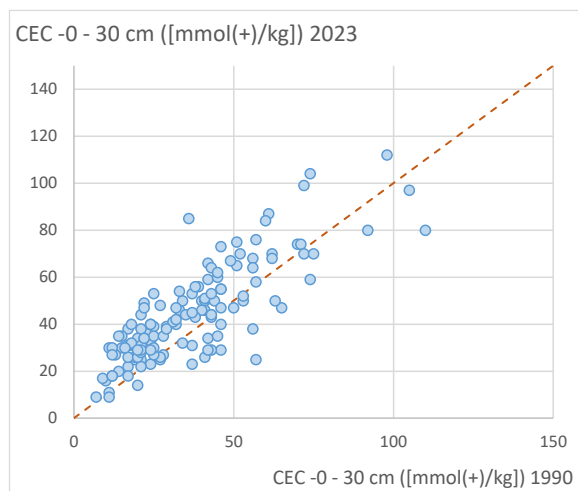
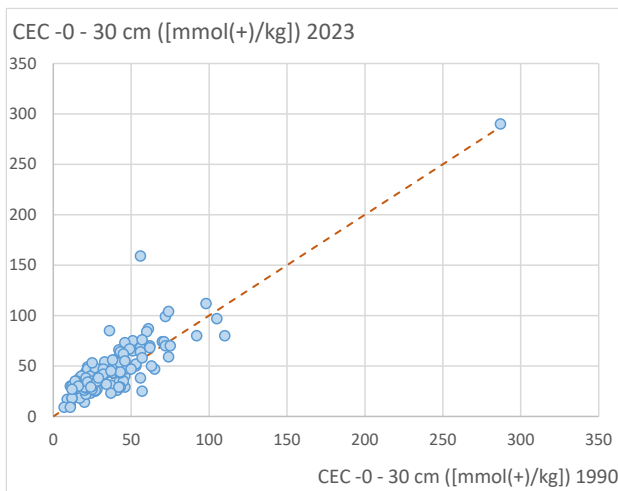
Figuur b5 Ca-gehalten in de strooisellaag in 1990 en 2023.



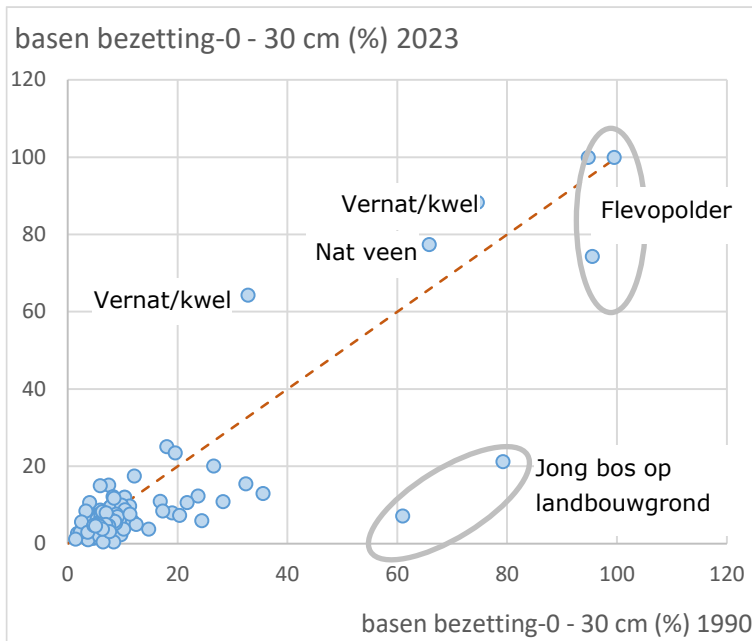
Figuur b6 K-gehalten in de strooisellaag in 1990 en 2023.



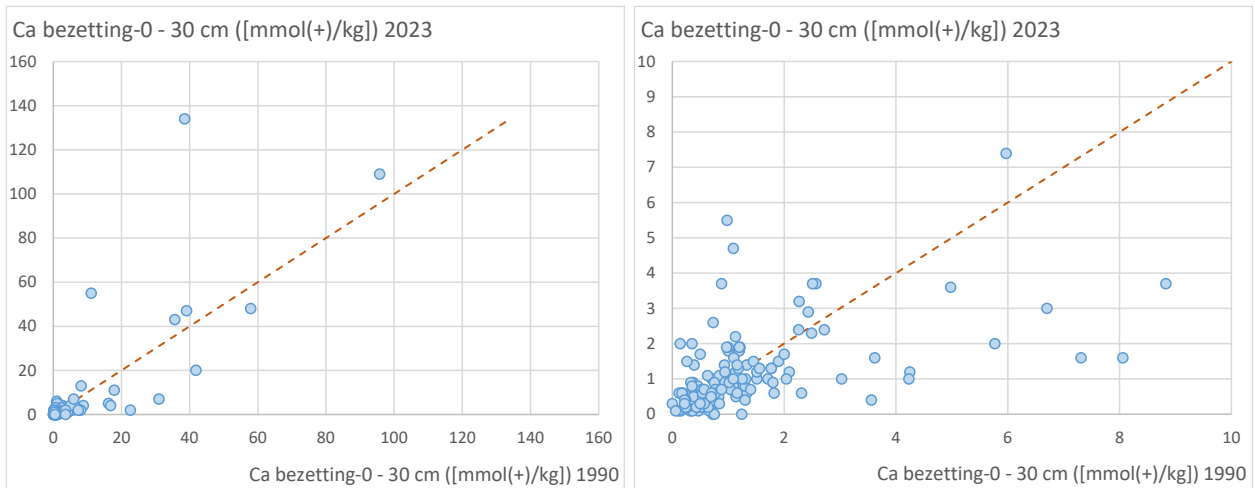
Figuur b7 Mg-gehalten in de strooisellaag in 1990 en 2023.



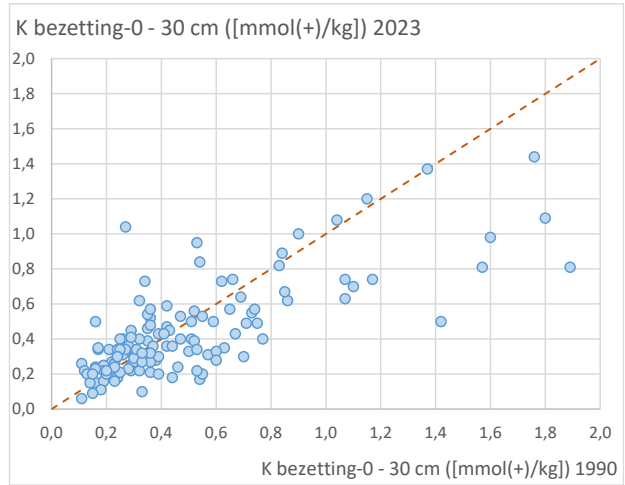
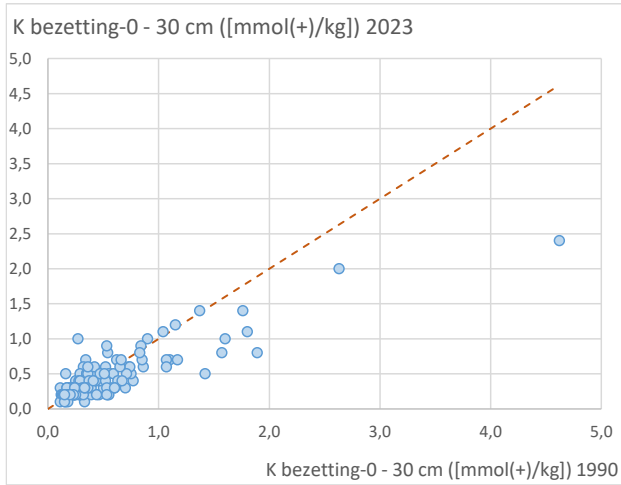
Figuur b8 Kationenuitwisselingscapaciteit (CEC) in de minerale bovengrond in 1990 en 2023. De locatie met een relatief sterke toename van ruim 50 mmol kg^{-1} naar ruim 150 mmol kg^{-1} betreft een vernatte kwelsituatie. Links alle locaties, rechts tot 120 mmol kg^{-1} .



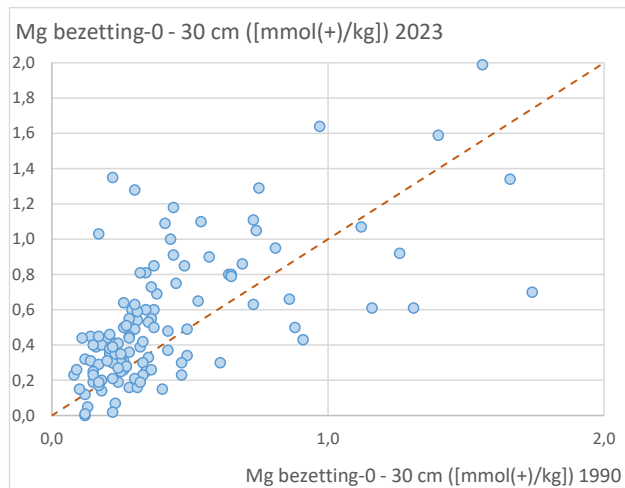
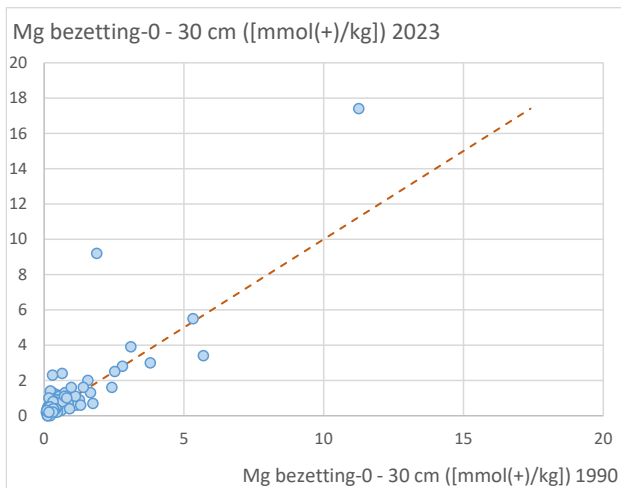
Figuur b9 Basenbezetting in de minerale bovengrond in 1990 en 2023.



Figuur b10 Calciumbezetting aan het uitwisselingscomplex in de minerale bovengrond in 1990 en 2023. Links de volledige data, rechts ingezoomd met alleen de data tot 10 mmol(+) kg⁻¹. De uitbijter met ruim 135 mmol(+) Ca kg⁻¹ in 2023 tegenover bijna 40 mmol(+) Ca kg⁻¹ in 1990 betreft een vernatte kwelsituatie.



Figuur b11 Kaliumbezetting aan het uitwisselingscomplex in de minerale bovengrond in 1990 en 2023. Links de volledige data, rechts ingezoomd met alleen de data tot 2 mmol(+) kg⁻¹. De uitbijter met 2,4 mmol(+) K kg⁻¹ in 2023 tegenover ruim 4,6 mmol(+) K kg⁻¹ in 1990 betreft een veengrond.



Figuur b12 Magnesiumbezetting aan het uitwisselingscomplex in de minerale bovengrond in 1990 en 2023. Links de volledige data, rechts ingezoomd met alleen de data tot 2 mmol(+) kg⁻¹. De uitbijter met ruim 9 mmol(+) Mg kg⁻¹ in 2023 tegenover bijna 2 mmol(+) Mg kg⁻¹ in 1990 betreft een vernalte kwelsituatie. De uitbijter met ruim 17 mmol(+) Mg kg⁻¹ in 2023 tegenover ruim 11 mmol(+) Mg kg⁻¹ in 1990 betreft een veengrond.

B2.5 Aluminium- en ijzergehalten

Tabel b12 Gemiddelde aluminiumgehalten voor de strooisellaag (LFH) en de minerale bovengrond gemiddeld per boomsoort en gemiddeld voor alle meetpunten voor 1990 en 2023, en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

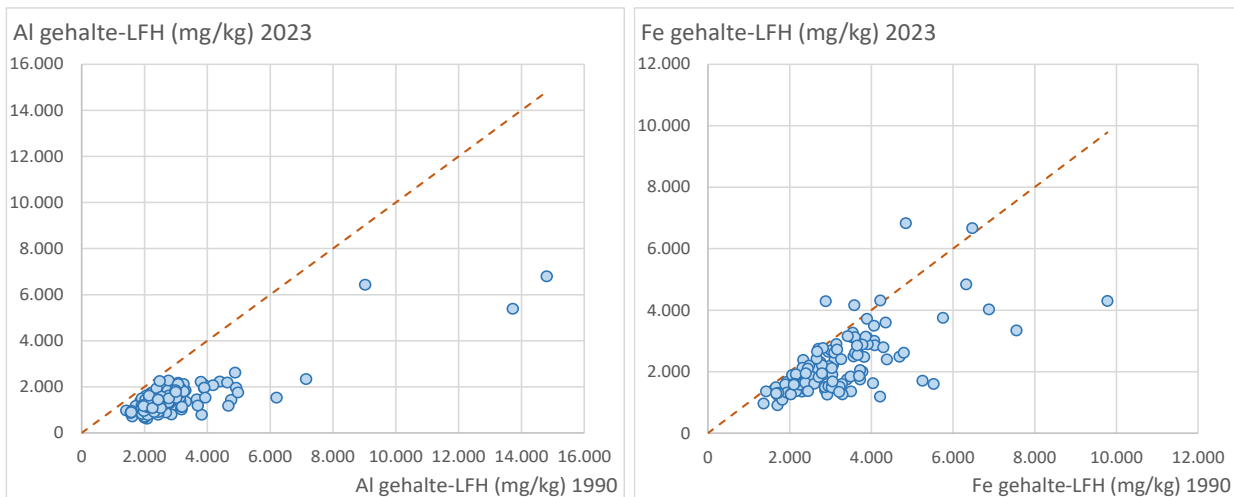
Boomsoort	Al-gehalten								
	LFH (mg kg ⁻¹)			Minerale bovengrond (oxalaatextractie) (mg kg ⁻¹)			Minerale bovengrond (uitwisselingscomplex) (mmol (+) kg ⁻¹)		
	1990	2023	Vershil	1990	2023	Vershil	1990	2023	Vershil
Corsic. den	2.490 (226)	1.391 (127)	-1.099 (158)	831 (112)	712 (116)	-119 (55,7)	15,0 (2,13)	26,5 (3,69)	11,5 (2,82)
Douglasspar	3.391 (803)	1.586 (302)	-1.805 (512)	985 (138)	983 (127)	-2,07 (73,7)	20,2 (2,88)	33,9 (3,94)	13,7 (1,75)
Fijnspar	2.456 (187)	1.163 (108)	-1.293 (123)	1.039 (103)	1.081 (144)	41,8 (92,4)	24,6 (2,66)	37,8 (4,56)	13,2 (3,22)
Grove den	2.795 (122)	1.478 (63,0)	-1.317 (124)	952 (67,2)	956 (91,4)	4,70 (47,4)	17,4 (1,36)	29,2 (2,24)	11,8 (1,32)
Japanse lariks	2.355 (144)	1.431 (83,2)	-924 (127)	1.178 (101)	1.164 (107)	-14,0 (91,3)	25,5 (2,66)	42,7 (3,84)	17,2 (1,84)
Beuk	3.537 (326)	1.705 (132)	-1.832 (305)	1.209 (108)	1.132 (85,1)	-76,9 (75,8)	23,2 (3,84)	40,6 (2,90)	17,4 (1,65)
Zomereik	3.769 (648)	1.792 (348)	-1.977 (359)	1.067 (99,8)	1.023 (107)	-43,9 (43,5)	25,3 (2,52)	39,0 (3,29)	13,7 (1,58)
Gemiddeld	2.991 (158)	1.520 (75,8)	-1.471 (102)	1.025 (38,0)	1.002 (43,7)	-22,5 (24,6)	21,1 (0,948)	34,8 (1,33)	13,6 (0,74)

Tabel b13 Gemiddelde ijzergehalten voor de strooisellaag (LFH) en de minerale bovengrond, gemiddeld per boomsoort en gemiddeld voor alle meetpunten voor 1990 en 2023, en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

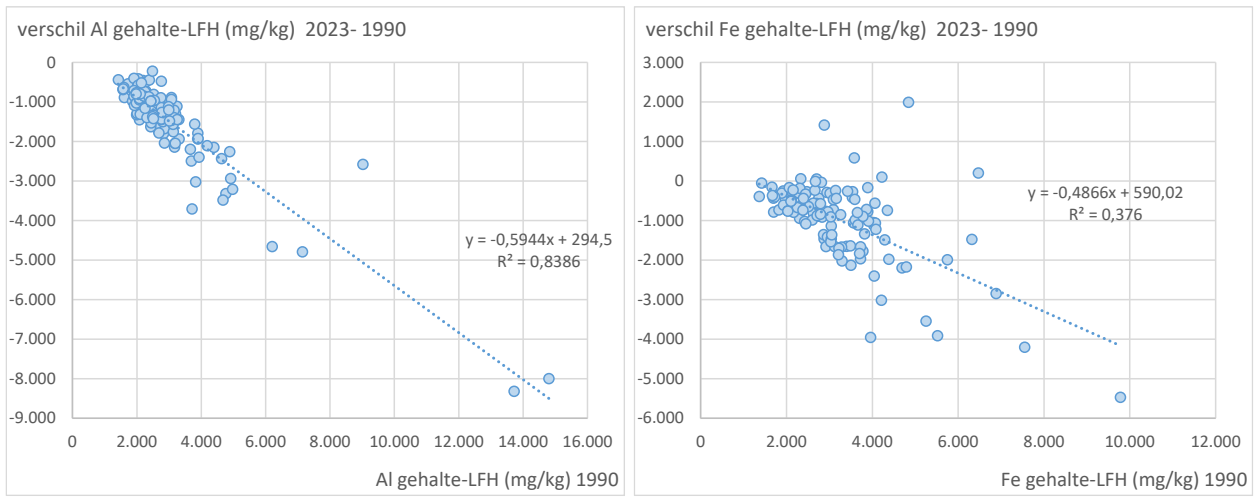
Boomsoort	Fe-gehalten								
	LFH (mg kg ⁻¹)			Minerale bovengrond (oxalaatextractie) (mg kg ⁻¹)			Minerale bovengrond (uitwisselingscomplex) (mmol (+) kg ⁻¹)		
	1990	2023	Vershil	1990	2023	Vershil	1990	2023	Vershil
Corsic. Den	3.121 (469)	2.031 (191)	-1.090 (324)	565 (97,9)	538 (103)	-26,5 (58,6)	1,12 (0,17)	0,983 (0,15)	-0,133 (0,20)
Douglasspar	3.531 (511)	2.159 (205)	-1.373 (340)	932 (131)	891 (136)	-41,7 (85,7)	2,06 (0,24)	1,24 (0,14)	-0,817 (0,22)
Fijnspar	2.773 (230)	1.719 (150)	-1.054 (204)	447 (107)	497 (146)	50,4 (46,7)	1,62 (0,24)	0,871 (0,21)	-0,746 (0,17)
Grove den	3.186 (161)	2.280 (131)	-906 (151)	791 (102)	841 (102)	49,4 (48,9)	1,31 (0,11)	1,02 (0,088)	-0,294 (0,094)
Japanse lariks	2.704 (188)	1.979 (137)	-725 (127)	593 (154)	583 (124)	-9,95 (94,4)	1,37 (0,15)	1,09 (0,11)	-0,274 (0,13)
Beuk	3.763 (286)	2.841 (266)	-922 (230)	1.112 (229)	1.075 (185)	-37,0 (135)	1,96 (0,31)	1,28 (0,12)	-0,676 (0,33)
Zomereik	3.323 (284)	2.548 (343)	-776 (257)	897 (170)	1.109 (208)	212 (129)	2,54 (0,38)	1,56 (0,23)	-0,980 (0,25)
Gemiddeld	3.202 (109)	2.252 (87,4)	-950 (86,7)	777 (56,8)	822 (59,8)	45,1 (34,1)	1,70 (0,099)	1,15 (0,062)	-0,54 (0,0761)

Tabel b14 Gemiddelde bezetting van Al en Fe aan het uitwisselingscomplex van de bovengrond (%) gemiddeld per boomsoort en gemiddeld voor alle meetpunten voor 1990 en 2023, en het verschil tussen beide momenten. Tussen haakjes is de standaardfout (se) aangegeven.

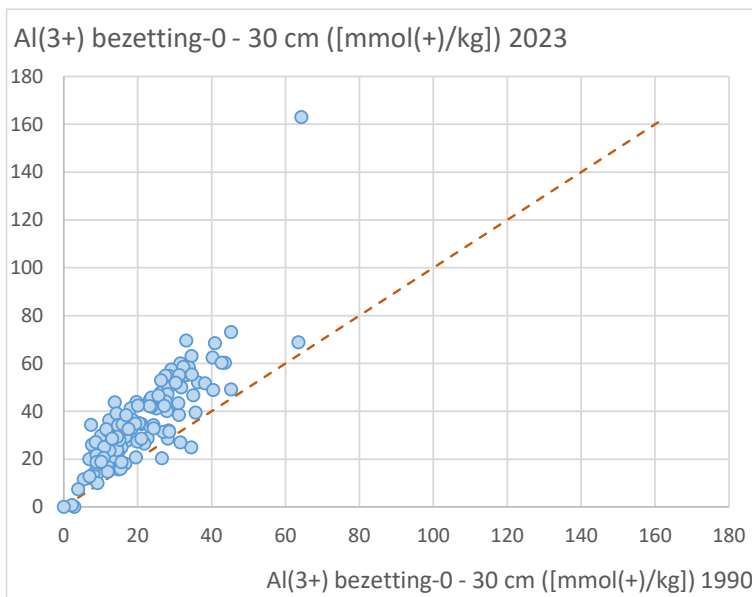
Boomsoort	Minerale bovengrond (0-30 cm)					
	Al			Fe		
	1990	2023	Vershil	1990	2023	Vershil
Corsicaanse den	61,5 (4,52)	75,2 (5,26)	13,7 (3,35)	4,73 (0,503)	3,82 (1,07)	-0,911 (0,918)
Douglasspar	62,9 (4,01)	76,6 (4,35)	13,7 (2,60)	7,14 (0,945)	3,37 (0,498)	-3,77 (0,668)
Fijnspar	62,1 (2,92)	80,5 (3,43)	18,3 (3,13)	4,19 (0,537)	2,19 (0,602)	-2,01 (0,329)
Grove den	64,4 (1,76)	81,0 (1,72)	16,6 (1,66)	5,25 (0,403)	3,42 (0,314)	-1,83 (0,326)
Japane lariks	65,0 (2,26)	81,9 (2,75)	16,9 (3,37)	4,16 (0,781)	2,67 (0,489)	-1,48 (0,451)
Beuk	64,5 (2,83)	84,7 (2,32)	20,2 (2,80)	5,60 (0,541)	3,09 (0,402)	-2,51 (0,542)
Zomereik	54,2 (3,74)	71,7 (3,42)	17,5 (2,46)	5,54 (0,810)	3,45 (0,542)	-2,09 (0,567)
Gemiddeld	62,0 (1,17)	78,8 (1,20)	16,7 (0,965)	5,26 (0,253)	3,21 (0,199)	-2,05 (0,203)



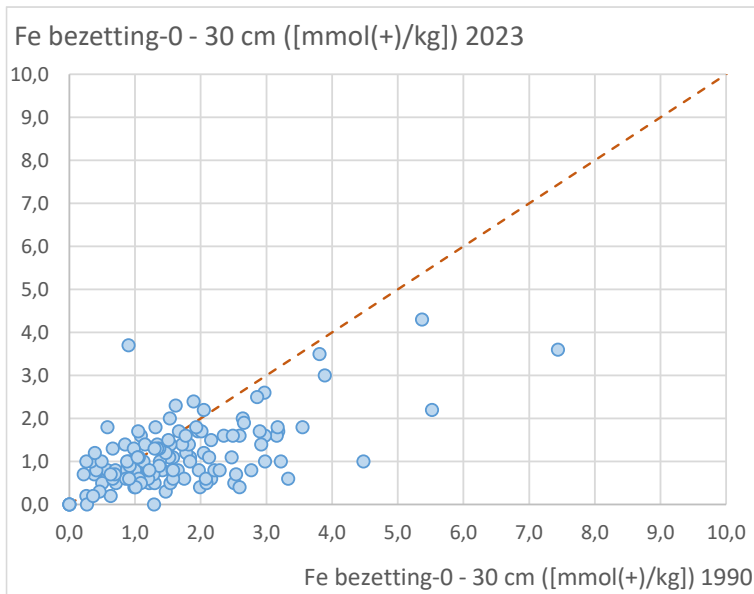
Figuur b13 Al- en FE-gehalten in de strooisellaag in 1990 en 2023.



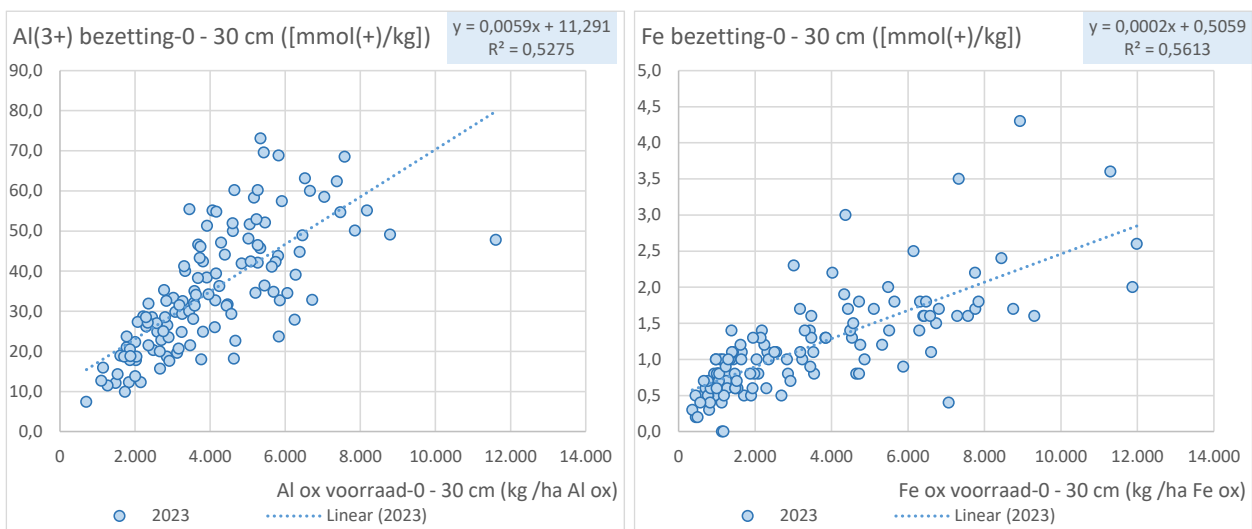
Figuur b14 Verandering van Al- en Fe-gehalten in de strooisellaag (links resp. rechts) in relatie tot de gehalten ervan in 1990.



Figuur b15 Al-bezetting van het uitwisselingscomplex van de bovengrond in 1990 en 2023.



Figuur b16 Fe-bezetting van het uitwisselingscomplex van de bovengrond in 1990 en 2023.



Figuur b17 Verband tussen de Al- resp. Fe-bezetting aan het uitwisselingscomplex en de Al- resp. Fe-oxalaat-extraheerbare voorraad van de bovengrond in 2023 (exclusief kalkrijke bodems en veengrond).



Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AA Wageningen
T 0317 48 07 00
wur.nl/environmental-research

Wageningen Environmental Research
Rapport 3362
ISSN 1566-7197



De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.700 medewerkers (7.000 fte), 2.500 PhD- en EngD-kandidaten, 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AB Wageningen
T 0317 48 07 00
wur.nl/environmental-research

Rapport 3362
ISSN 1566-7197

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.700 medewerkers (7.000 fte), 2.500 PhD- en EngD-kandidaten, 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

