

STEENMEEL ALS VEELBELOVENDE REVITALISATIEMAATREGEL VOOR VERZUURDE BOSSEN

5 JUNI 2026 door Robrecht Van Der Bauwhede, Leon van den Berg, Wim Buysse, Joke Plas, Nele Schillebeeks, Jordi Troonbeeckx, Iris Serbest, Anjo de Jong, Thomas Rombouts, Erik Verbruggen, Matteo Campioli, Annemie Elsen, Ellen Desie, Karen Vancampenhout, Erik Smolders, Bart Muys



SAMENVATTING

Bodemverzuring blijft één van de grote uitdagingen voor Europese bossen. Decennia aan stikstof- en zwaveluitstoot hebben geleid tot verzuring van de bodem, een verlies aan essentiële basische kationen zoals calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}) en kalium (K^+) en een verminderde vitaliteit van bomen en lagere diversiteit in de kruidlaag. Conventionele oplossingen zoals bekalking kunnen de pH van de bodem snel verhogen, maar gaan vaak gepaard met ongewenste neveneffecten, zoals koolstofverlies en verstoring van de kruidlaag. Steenmeel, gemalen vulkanisch of metamorf gesteente, wordt steeds vaker beschouwd als een duurzaam alternatief voor bekalking. Dit syntheseartikel biedt een overzicht van de oorzaken van de verzuring en de effectiviteit van steenmeel als herstelmaatregel voor de bodembuffering, de boomgroei, en de diversiteit van de kruidlaag. Tot slot wordt ook een advies voor het bosbeheer met steenmeel gegeven.

Bodemverzuring, of de door de mens versnelde verarming van bosbodems

In grote delen van Nederland en Vlaanderen werden tijdens de laatste ijstijd door de wind grote pakketten zand afgezet (Beerten et al., 2014). Deze zandbodems werden oorspronkelijk ontgonnen volgens het *slash-and-burn* (hakken en branden) systeem en vanaf de middeleeuwen beheerd met de traditionele plaggenbeheermethode. Door het verwijderen van strooisel en plaggen, in eerste instantie uit bossen, en daarna uit de heide, namen de organische koolstof (C), fosfor (P) en basische kationen: calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}) en kalium (K^+) in dit zandlandschap sterk af (von Oheimb et al., 2008). Na omstreeks 1900 werden de heidelandschappen herbebost met voornamelijk grove en Corsicaanse dennen en tot de jaren 1980 beheerd via kaalslagsystemen. Later werden ook opnieuw eiken aangeplant. Deze bebossing slaagde erin om het gehalte organische stof van de zandbodems in de toplaag van de bodem op peil te brengen en zo ook de waterhuishouding te herstellen. Maar deze bebossing slaagde er niet in om de bodem te ontzuren. Integendeel, dennen en eiken produceren traag afbreekbaar strooisel dat bij de afbraak organische zuren produceert. Daardoor ontstond ook een dikke zure strooisellaag waarin nutriënten als het ware opgesloten zitten. Boven op de historische verzuring komt de verzuring als gevolg van de antropogene depositie van stikstofoxiden (NO_x), ammoniak (NH_3) en zwaveloxiden (SO_x). Recent onderzoek in Nederland laat zien dat deze verzuring, ondanks de afname in zwavel- en stikstofdepositie sinds de jaren 90 van vorige eeuw nog steeds doorgaat, met koolstof- en stikstofaccumulatie in de strooisellaag als gevolg (de Jong et al., 2024). Met name in zandige bodems speelt deze verzuring parten (De Schrijver et al., 2006). Zandbodems hebben namelijk een kleinere kationuitwisselingscapaciteit dan leem of kleibodems. Hierdoor worden er minder basische kationen (Ca^{2+} , Mg^{2+} en K^+) gebonden aan zand dan aan klei en daardoor bezitten zandbodems een lagere capaciteit om verzurende inputs te neutraliseren.

Naarmate de pH van een bodem (zie ook de box verderop in dit artikel) daalt wordt die verzuring door bodemchemische processen gebufferd. Eens die buffer is uitgewerkt zakt de pH verder en treedt een volgend buffermechanisme in werking. Voor de meeste bossen zijn de twee eerste buffermechanismes in de laatste eeuw uitgeput: oplossen van carbonaten ($8,6 > \text{pH-H}_2\text{O} > 6,2$) en verwerking van silicaten (vooral $\text{pH} > 5$). Nog beperkt werkzaam zijn de uitwisselingsreacties van kationen (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) met de zure waterstofionen/protonen (H^+) op de negatief geladen oppervlakken in de bodem (vooral tussen $\text{pH-H}_2\text{O}$ 5 en 4,2). De uitgewisselde basische kationen spoelen vervolgens uit de bodems weg. De zandbodems bevatten wel nog K-veldspaten (silicaten), maar deze specifieke mineralen lossen te traag op om de bodem pH te bufferen (Mol et al., 2003).

Maar veel bodems bevinden zich nu in het aluminium bufferbereik, daar lossen aluminiumoxyhydroxiden ($\text{pH-H}_2\text{O} < 4,2$) en ijzeroxyhydroxiden ($\text{pH-H}_2\text{O} < 3,8$) op (Chadwick and Chorover, 2001). Het gehalte opgeloste aluminium in het bodemvocht kan zo toenemen tot toxische concentraties voor biota (Muys, 1990; van den Berg et al., 2005). Ondanks een daling van de atmosferische zuurlast, lost de verzuringsproblematiek zichzelf niet op. Integendeel, deze zet zich voort, met pH-

H₂O waarden die de laatste 22 jaar daalden van 4,5 tot 3,2 in Natura2000 gebieden in Nederland (Skidmore et al., 2024).

Box: De pH van een bodem

De pH is de meest gebruikte uitdrukking voor de zuurtegraad van een waterige oplossing, gemeten met een pH-elektrode. De pH van een neutrale oplossing is gelijk aan 7. Zure oplossingen hebben een pH lager dan 7, basische oplossingen hebben een pH hoger dan 7.

De zuurtegraad is namelijk de concentratie van H⁺ ionen van een waterige oplossing. De pH van een neutrale oplossing is 7, dan zijn de concentraties van zure ionen (H⁺) en basische ionen (OH⁻) beide gelijk aan 10⁻⁷ mol H⁺/L. Aangezien de pH de negatieve 10-delige logaritme is van de molaire concentratie van (H⁺) ionen in mol/L, $pH = -\log_{10}(H^+)$ of $H^+ = 10^{-pH}$, hebben zure oplossingen een pH lager dan 7, en basische oplossingen een pH hoger dan 7. Voorbeeld: is de pH = 5, dan is (H⁺) = 10⁻⁵ mol H⁺/L = 0.00001 mol H⁺/L is een hogere concentratie en dus zuurder dan pH = 8, dan (H⁺) = 10⁻⁸ mol H⁺/L = 0.00000001 mol H⁺/L.

De pH van een bodem kan op verschillende manieren gemeten worden aangezien een aanzienlijk deel van de H⁺ ionen gebonden zijn aan het negatief geladen bodemcomplex. Het bodemstaal kan gemengd worden met gedemineraliseerd water, dan spreken we van pH-H₂O. Dit is een maat voor de **actieve zuurtegraad** in het bodemwater, maar de pH-H₂O is sterk afhankelijk van het seizoen en recente weercondities. Voor een beter te veralgemenen pH meting kan het bodemstaal ook gemengd worden in een zoutoplossing om de **potentiële bodemzuurtegraad** te bepalen, zoals een oplossing van 0.01 mol/L calciumchloride (CaCl₂) of 1 mol/L kaliumchloride (KCl), dan spreken we van de pH-CaCl₂ en de pH-KCl. Het calcium (Ca²⁺) en kalium (K⁺) verdrijven de aanwezige H⁺ ionen van het negatief geladen bodemcomplex zodat deze vrijkomen in de bodemoplossing en gemeten kunnen worden met de pH-elektrode. Hierdoor stijgt de hoeveelheid H⁺ in oplossing en daalt dus de gemeten pH-waarde. De pH-CaCl₂ geeft dus de potentiële zuurtegraad van een bodem weer, aangezien meer H⁺- ionen nu in oplossing zijn. In zure bosbodems is de pH-CaCl₂ doorgaans ongeveer een halve tot één eenheid lager dan de pH-H₂O. In de resultaten van dit artikel wordt gebruik gemaakt van de pH-CaCl₂.

DE VERZURING VAN DE BOSBODEMS BLOKKEERT ECOSYSTEEMPROCESSEN

De gevolgen zijn divers en treden op alle niveaus van het ecosysteem op. Dikke strooiselpakketten bemoeilijken natuurlijke verjonging. Door de lage bodem pH en het toxische aluminium in het bodemvocht verdwijnen regenwormen (Schelfhout et al., 2017) en daalt ook de groei, vitaliteit en klimaatbestendigheid van bomen (Högberg et al., 2006; Huang et al., 2015). Symptomen die zichtbaar zijn betreffen de toename van bladverlies en bladverkleuring bij bomen (Sioen et al., 2023). In de bladeren van niet-vitale eikenbomen wordt dan ook een overmaat aan stikstof en tekorten aan basische kationen gemeten, indicaties voor hun verminderde vitaliteit (Lucassen et al., 2014; Rozas and Sampedro, 2013). Het aandeel fijne wortels van bomen neemt af in verzuurde bodems wat naast vertraagde groei voor een toegenomen gevoeligheid

voor insectenvraat, ziektes en droogte zorgt. De vertraagde microbiële activiteit van bacteriën en schimmels en het verdwijnen van bodemleven heeft als gevolg dat stikstof in de vorm van ammonium (NH_4^+) kan ophopen tot een niveau dat schimmels negatief beïnvloedt (Termorshuizen and Ket, 1991). Ook hogerop in de voedselketen worden negatieve effecten gerapporteerd. Het gebrek aan calcium leidt tot kalktekorten bij vogels, wat te zien is aan lager broedsucces, dunnere eierschalen en onderontwikkelde botten bij mezen (Graveland et al., 1994; Nijssen et al., 2023). Veel van de inheemse boomsoorten op zandgronden groeien niet meer optimaal bij een bodem pH- CaCl_2 lager dan 3,5.

BODEMVERZURING HERSTELT ZICH NIET VANZELF: WANNEER WELKE MAATREGEL NEMEN?

Veel bossen werden in het verleden gedraineerd, waardoor basische kationen via grondwater de wortelzone niet langer kunnen bereiken. Het herstellen van de lokale hydrologie kan dit probleem verhelpen door een geleidelijke verhoging van het grondwaterpeil (Van der Burg et al., 2014). De nadruk ligt op “geleidelijk”, anders sterven de boom(wortels) af.

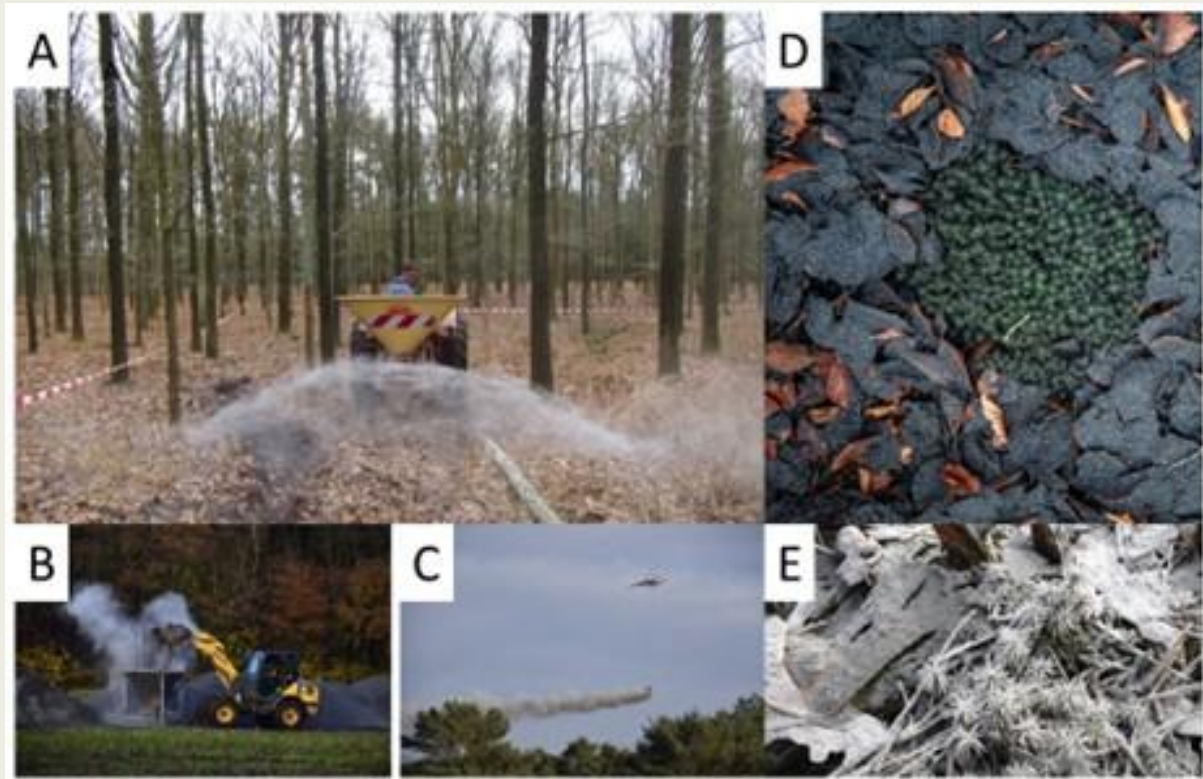
Het aanplanten, bevorderen of behouden van een voldoende groot aandeel rijkstrooiselsoorten zoals linde, kers, esdoorn, es, vogelkers, ratelpopulier en grauwe abeel buffert de bodem doordat hun strooisel rijker is aan basische kationen en sneller afbreekt dan het strooisel van dennen of eiken (Desie et al., 2023, 2021, 2020a, 2020b). Het rijkstrooiseffect is het grootst op leemhoudende en dus iets rijkere zandgronden, terwijl op de sterkst verzuurde zandgronden het effect beperkt blijft. Daarom is voor de succesvolle vestiging van rijkstrooiselsoorten en het verhogen van de vitaliteit van bomen op sterk verzuurde, basenarme bodems de toepassing van een alkalische bufferstof vaak noodzakelijk om de pH en basenverzadiging te verhogen.

Wat zijn alkalische bufferstoffen zoals steenmeel?

Steenmeel (synoniem gesteentemeel; Eng. rock dust RD, rock flour; Fr. farine de roche; Dui. Steinmehl, Gesteinsmehl) is een verzamelnaam voor fijn gemalen vulkanische of metamorfe gesteenten zoals basalt, fonoliet of foidiet. Ze bevatten een hele resem aan mineralen die langzaam verweren, waardoor het zuur (H^+) geleidelijk verbruikt wordt en basische kationen (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) geleidelijk vrijkomen. Steenmeel wordt al meer dan 100 jaar gebruikt in de biologische landbouw, wordt al meer dan 10 jaar gebruikt voor natuurherstel op zure zandbodems en wordt recent intensief onderzocht omwille van het vermogen om CO_2 vast te leggen.

Steenmeel heeft verschillende voordelen ten opzichte van conventionele bekalking met calciëet (CaCO_3) of dolomiet kalk ($\text{Ca}_x\text{Mg}_{1-x}\text{CO}_3$). Ten eerste zorgt de langzame verwerking voor een geleidelijke pH-stijging, wat plotselinge schommelingen voorkomt die schadelijk kunnen zijn voor bodemleven en planten. Ten tweede stimuleert steenmeel de afbraak van organisch materiaal niet zoals bij bekalking, waardoor er geen bodemkoolstof wordt verloren. Tot slot levert steenmeel niet alleen calcium en magnesium, maar ook andere belangrijke nutriënten zoals kalium, fosfor, silicium en sporenelementen, wat het een multinutriëntenbron maakt.

Steenmeel wordt daarom zowel experimenteel en als een revitalisatiemaatregel toegepast op sterk verzuurde bossen in Nederland en Vlaanderen (Figuur 1). Maar het werd ook al onderzocht in Oostenrijk, Duitsland, Tsjechië, Canada en het Verenigd Koninkrijk.



Figuur 1: (A) Het uitstrooien van steenmeel van de types Soilfeed en Eifelgold in zomereikenbossen tijdens de eerste experimenten in Nederland in 2016 (foto: Maaïke Weijters), en (B, C) als een praktische “no-regret” revitalisatiemaatregel wordt momenteel foidiet-steenmeel (type: Soilfeed) verspreid over duizenden hectaren stikstofbelaste zandige bosbodems in Nederland (foto: Bosgroep Zuid-Nederland). (D, E) Zo ziet 10 ton/ha Soilfeed en Biolit-steenmeel eruit onmiddellijk na de toepassing (foto: Bosgroep Zuid-Nederland & eigen foto).

LABORATORIUMTESTS TONEN DE GROTE VARIATIE IN VERWERINGSSNELHEDEN VAN STEENMELEN

Er bestaan heel wat verschillende steenmelen waarvan de zuurbindende werking en met name de verwerkingssnelheid nog niet duidelijk waren (Van Diggelen et al., 2019). Daarom hebben we vijf commercieel beschikbare typen steenmeel (Tabel 1) in het laboratorium onderzocht: twee typen basalt: *Eifelgold* en *Actimin*, fonoliet *Vulkamin*, foidiet *Soilfeed* en trachy-andesiet *Biolit* (Figuur 2).

De zuurbindende waarde is de hoeveelheid zuur die een bufferstof kan neutraliseren per kilo uitgedrukt in mmol H⁺/kg.

De zuurbindende waarden van steenmelen zijn aanzienlijk lager dan die van calcië kalk (CaCO₃), namelijk 10–50% van de zuurbindende waarde van kalk (20 000 mmol H⁺/kg). De bestudeerde steenmeeldosissen zijn daarom 2-5 keer hoger dan een

equivalente bekalkingsdosis. Bovendien verloopt het oplossen bij steenmeel een factor 100 tot 1000 keer trager dan van kalk en in twee fasen: een snelle initiële fase (dagen) wordt gevolgd door een langzame, langdurige fase (jaren tot decennia) (Van Der Bauwhede et al., 2024a).



Figuur 2: Foto's van de gekarakteriseerde en toegepaste commerciële steenmeelproducten, het steenmeeltype, het specifiek oppervlak per gram (m²/g), de merknaam, en de codering gebruikt in deze tekst RD1 tot RD5 (Rock Dust 1 tot 5).

De zuurbindende waarde en verwerkingssnelheid van steenmelen zijn sterk pH-afhankelijk. Zo gaat het verweren van basalt (RD1 & RD3, zie Figuur 2) 100 keer sneller bij een lokale pH-daling van 4,5 naar 3,5. Dit maakt steenmeel effectiever in sterk verzuurde bodems (bodem pH < 3,5) en voorkomt ook excessieve pH-stijgingen bij het gebruik van basalt, gezien basalt verwaarloosbaar traag verweert boven pH 4,5.

Ook het bodemtype speelt een grote rol. Zo lieten zandbodems, die een lagere zuurbuftercapaciteit hebben, snellere en hogere pH-stijgingen opmeten dan lemige bodems na toepassen van steenmeel. In een proef met vier bodemtypes met steenmeel ingemengd aan een dosis van 12 ton/ha steeg de pH in zure zandgronden (pH-CaCl₂ 3,1) binnen twee jaar met 0,5–1,0 eenheden (naar pH-CaCl₂ 3,6–4,1). Dit is een maximalisatie van de te bereiken pH, aangezien het steenmeel werd ingemengd met de bodems terwijl in het beheer veelal voor een oppervlakkige toediening wordt gekozen waarbij het steenmeel oppervlakkig wordt uitgestrooid. Deze oppervlakkige toediening vertraagt de oplossingsreactie en dus de pH-stijging aanzienlijk (Van Der Bauwhede et al., 2024a, 2025b). In de praktijk speelt dus ook de manier van toediening een rol. Oppervlakkig toegediend reageert het steenmeel immers met regenwater (gemiddelde pH 5,1). Basalt dat oppervlakkig werd uitgestrooid verweert dus initieel meer dan 1000-10000 keer trager dan als het in de plantput in een zure bodem (pH 3.1) wordt toegediend. Steenmeel in een plantput toedienen is operationeel wel complexer, het steenmeel moet homogeen met de minerale bodem worden gemengd. Een praktisch compromis is om steenmeel oppervlakkig toe te dienen in combinatie met een lage dosis kalk.

Tabel 1: Belangrijkste karakteristieken en significante reacties (zie ook de verderop in dit artikel) van bodemeigenschappen, bomen en de kruidlaag op de vijf onderzochte steenmeeltypes (EN: Rock Dust of RD).

Naam		RD1 <i>Eifelgold</i> Lava	RD2 <i>Vulkamin</i> Gesteinsmehl	RD3 <i>Actimin</i> BT	RD4 <i>Soilfeed</i> Silva	RD5 <i>Biolit</i> Fein plus
Bedrijf		RPBL	Hauri	Solid'or	Sibelco	HWK
Gesteente		Basalt	Fonoliet	Basalt	Foidiet	Trachy-andesite
Oorsprong		DE Eifel	DE Bötzingen	DE Eifel	NO Oslo rift	AT Kitzbühel
Transport afstand naar Antwerpen	km	250	550	250	200 (weg) 600 (schip)	900
Eigenschappen						
Zuurbindende waarde (totaal)z	mmol _e /kg	10400	8300	7800	7300	4300
Zuurbindende waarde (eerste jaren)	mmol _e /kg	3400	5300	1000	3100	1700
Levensduur pH 5	jaren	5-20	40-80 dagen	25-100	60dagen-1	0.5-2
Ca _{beschikbaar}	mmol _e /kg	290	5250	110	2030	640
Mg _{beschikbaar}	mmol _e /kg	70	1050	210	45	370
K _{beschikbaar}	mmol _e /kg	360	65	15	110	20
P _{beschikbaar}	mmol _e /kg	5	5	0	0	1
Plantkuil						
Aangeraden dosis	kg/kuil	1,5	0,7	1,5	1	1,5
Finale pH in kuil	1.5 kg/kuil	5	7	5	6	6
Bladnutriënten		Mg, (K), (P)	Ca, Mg	Ca, Mg	Ca, (K)	Ca, Mg
Bomen						
Aangeraden dosis	ton/ha	15	5	20	12	20
Radiale groei		↗	=	?	↗	↗
Bladnutriënten verhoogd		(Ca), Mg	Ca, Mg, P	?	Ca, (P)	Ca, Mg
Kruidlaag						
Diversiteit		↗ + 3 mos soorten	↗ + 3 soorten	?	Geen verstoring	↗ Lange termijn +13 soorten

Effecten van steenmeel op het bos

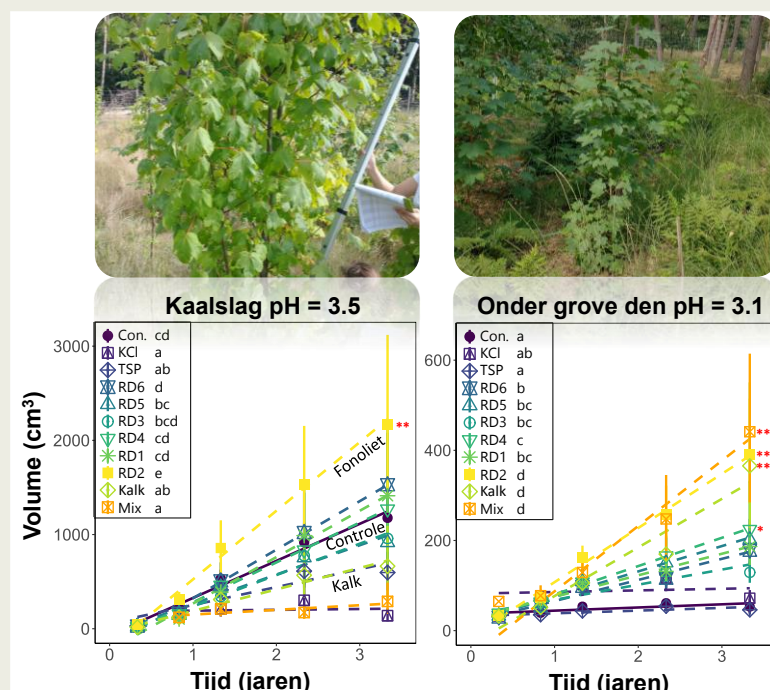
DE GROEI EN DE OVERLEVING VAN AANPLANT NEMEN TOE MET STEENMEEL IN DE PLANTKUIL

In veldproeven bekeken we welke eigenschappen van steenmeel de groei van jonge boompjes beïnvloeden. Er werden 960 éénjarige gewone esdoorns (*Acer pseudoplatanus* L.) aangeplant op twee locaties in de Kempen (NL). De eerste locatie was een zanderige kaalslag, dit perceel was een kaalkap van een 40-jarige fijnspar bestand dat daarvoor akkerbouw was (bodem pH-CaCl₂ = 3,5). De tweede locatie was op een zuurder perceel onder het kronendak van grove den (*Pinus sylvestris* L.) dat daarvoor heide was (bodem pH-CaCl₂ = 3,1). De behandelingen bestonden uit zes steenmeel- en vier referentiebehandelingen (TSP tripelsuperfosfaat, Ca_xMg_{1-x}CO₃ dolomiet, KCl kaliumchloride en een combinatie daarvan "Mix"). De

behandelingen werden zowel oppervlakkig uitgestrooid (3 ton dolomiet/ha en 10 ton steenmeel/ha) als toegevoegd aan de plantkuilen (0,4 kg dolomiet/kuil en 1,5 kg steenmeel/kuil). De groei van de jonge boompjes werd gedurende drie jaar gevolgd (Figuur 3). Het boomvolume werd berekend met behulp van de gemeten hoogtes en diameters. Tegelijk werd in het laboratorium een versnelde verwerking gesimuleerd door de verschillende producten gemengd met bodems uit de veldproef 8 weken in een suspensie te houden. Door die combinatie van veldproef en laboratoriumproef kon de variatie tussen types steenmeel op relatief korte termijn worden bepaald

De grootste toename van het boomvolume ten opzichte van de controle werd bereikt met RD2 fonoliet. Op de kaalkap nam het boom dat het volume toe met een factor 2, onder scherm met een factor 8. Op de zanderige kaalslag was de toename in boomvolume bij toepassing van steenmeel zelfs groter dan bij de referentiebehandelingen met het conventionele dolomiet en minerale bemesting. Op de kaalslag was de pH niet kritisch laag en was de groeitoename toe te schrijven aan de waterretentiecapaciteit van het steenmeel, die superieur was voor het zeoliethoudend steenmeel fonoliet RD2 (*Vulkamin*).

Onder de grove dennen leidden alle behandelingen tot een betere groei dan in de controleplots. Dit bleek het best gerelateerd aan de zuurbindende waarde en het vrijkomen van basische kationen uit het steenmeel, afgeleid uit een suspensietest met bodem + steenmeel in een laboratorium. Het toedienen van een geschikt type steenmeel in een correcte dosis is dus een effectieve maatregel om zure bosbodems te herstellen (Van Der Bauwhede et al., 2025b).



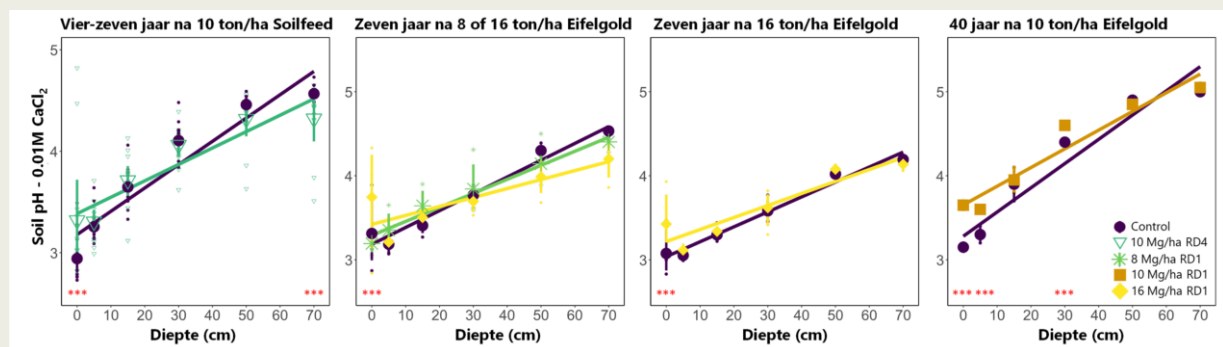
Figuur 3: De evolutie van het volume van jonge boompjes gedurende drie jaar na de toedieningen in de plantkuil, nl. 400 g dolomiet/kuil of 1,5 kilo steenmeel/kuil. Zie het verschil in bereik tussen de twee assen, de kaalslag had grotere esdoorns en onder scherm kleinere door de lagere lichtbeschikbaarheid. De controle is weergegeven als een blauwe volle lijn. Als de lettercodes naast de behandelingen in de legende geen

letters gemeenschappelijk hebben met de controle zijn ze significant verschillend van de controle. Fonoliet Vulkamin (RD2) verbeterde de groei op de kaalslag waar de esdoorns droogtestress ondervonden. Alle steenmelen verbeterden de groei van de esdoorns in de zuurste locatie onder grove den. De steenmelen zijn RD1: Eifelgold, RD2: Vulkamin, RD3: Actimin, RD4: Soilfeed, RD5: Biolit, RD6: Sandilit. De minerale meststoffen en kalk zijn KCl: Kaliumchloride, TSP: Triple Superfosfaat, Kalk: Dologran en Mix: hun menging.

STEENMEELADDITIE ONTZUURT LANGZAAM DE BOVENSTE MINERALE HORIZONT EN ZWENGELT ZO DUURZAAM DE NUTRIËNTENCYCLUS AAN

De oppervlakkige steenmeeltoediening wordt recent ingezet als herstelstrategie van H9190 (*Oude eikenbossen*) waar een $\text{pH-CaCl}_2 < 3,0$ leidt tot de degradatie van de vitaliteit en diversiteit van het ecosysteem (Hommel et al., 2020; Van Calster et al., 2019). Maar ook voor beuk en grove den is de nutriëntenbalans in zandbodems sterk beïnvloedt door verzuring met als gevolg een verlaagde vitaliteit (Vos et al., 2024, 2023).

Een combinatie van de gemeten pH-stijgingen in alle verzamelde velddata (voor oppervlakkige dosissen van 10 ton/ha) laat zien dat steenmeel trager werkt dan dolomiet bekalking, met een piek van +0,2-0,3 pH-eenheden in de minerale bodem (0-10 cm) ongeveer 40 jaar na de applicatie (Figuur 4). De basische kationen uit het steenmeel blijven ook lang in het ecosysteem, met verhoogde pH en basenverzadiging tot wel 40 jaar na de toediening (Van Der Bauwhede et al., 2025a, 2024b).



Figuur 4: pH profielen over de diepte op arme zandbodems na steenmeeltoediening in functie van de verstreken tijd (panelen) sinds de applicaties (8 tot 16 ton/ha). De 40 jaar oude applicatie van Eifelgold (rechterpaneel) toont dat de pH stijging duurzaam is en dat het lang duurt alvorens de pH ook maar stijgt in de bodem op 20-40 cm diep.

In het Mastbos en het NP de Hoge Veluwe werd in 2016 experimenteel 10 ton/ha *Eifelgold* of *Soilfeed* toegediend (Vogels et al., 2020). Sindsdien wordt de bodemchemie en -biologie er opgevolgd. Na drie jaar nam het aantal regenwormen duidelijk toe net zoals dat in de historische proeven in Oostenrijk en Duitsland het geval was (Hartmann et al., 2024; Meyer and Steinberger, 1993; Vogels et al., 2020). Bij de micro-arthropoden nam het aandeel omnivoren af, terwijl fungivoren juist frequenter werden, met name de grazende fungivoren. Deze specifieke groep is van groot belang, omdat zij de schimmelactiviteit reflecteren, een verhoogde

schimmelactiviteit wijst op een versnelde nutriëntenkringloop (Bloem et al., 2022; de Vries et al., 2019).

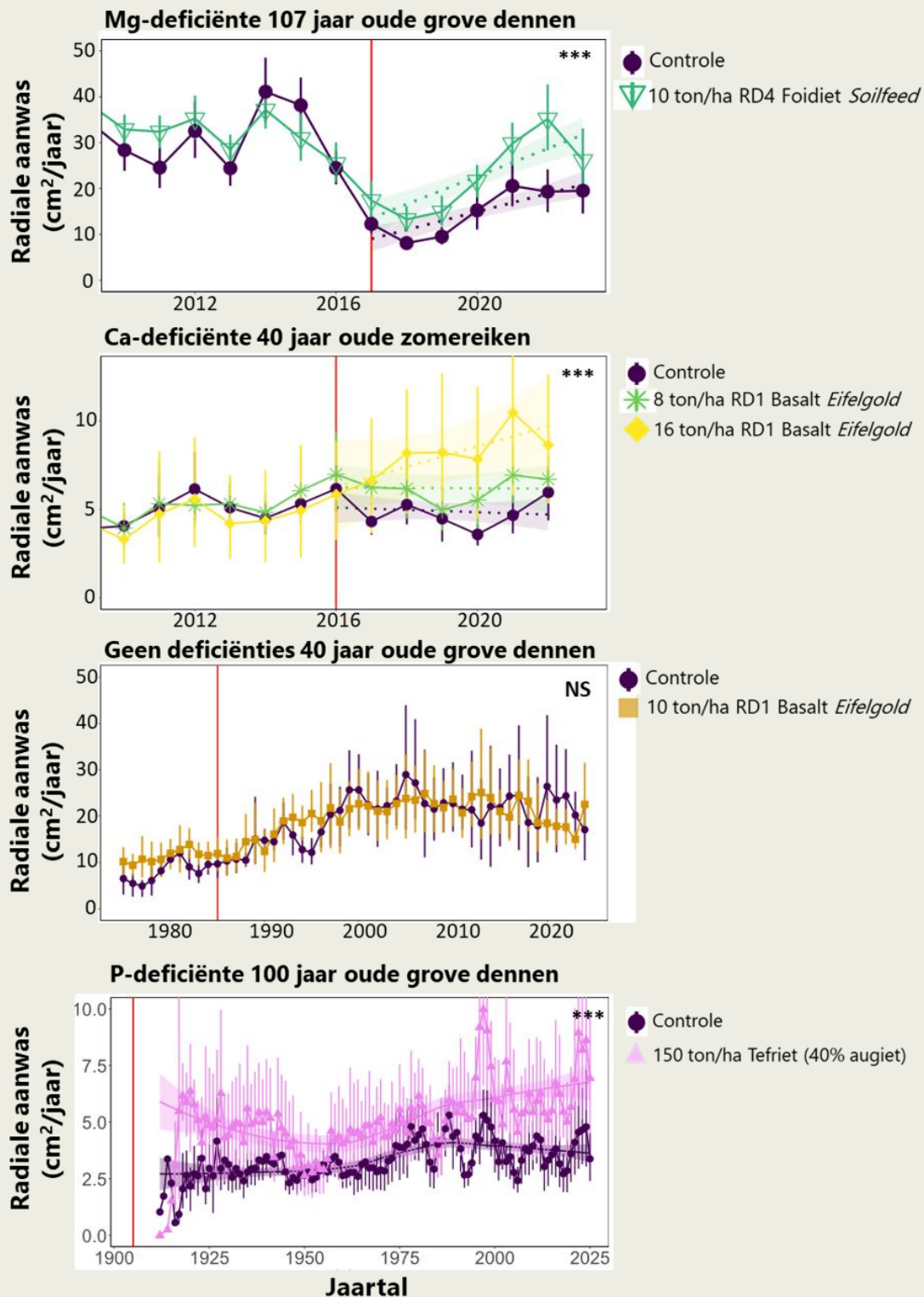
De ammonium/nitraat-ratio nam lichtjes af, duidende op verbeterde omstandigheden voor nitrificerende bacteriën, die gevoelig zijn voor verzuring. Het is belangrijk waakzaam te blijven over te snelle strooiselafbraak, om verruiging van de vegetatie door nitraat te voorkomen. In sommige gevallen is een alarmerend verhoogde N-uitspoeling mogelijk, bijvoorbeeld bij 10 ton RD2 *Vulkamin*/ha tot 20 kg N/ha/jaar, dit omdat het steenmeel zelf ook 10% kalk bevat (Van Der Bauwhede et al., 2025a, 2024a). Maar dit kan voorkomen worden door een trager werkend steenmeel zoals *Soilfeed* of *Eifelgold* te kiezen (Feger and Armbruster, 2003).

In zowel bossen als heide werd na steenmeeltoepassing ook een verhoogde biomassa van (saprotrofe) fungi gevonden (Brouwer et al., 2022; Findeisen et al., 2025). De toename van regenwormen, fijne wortels, nitrificatie en saprotrofe fungi duidt op een verschuiving richting een bodemleven dat rijker is aan voedingsstoffen, met name in de strooisellaag (de Vries et al., 2019). Recent werd ook een verhoogde activiteit van mycorrhizae en verhoogde bodemkoolstofstocks aangetoond in Nederlandse proeven behandeld met *Eifelgold* of *Soilfeed* (eigen data, nog niet gepubliceerd).

BOMEN GROEIEN BETER NA STEENMEELADDITIE ALS HET LIMITERENDE NUTRIËNT WORDT GELEVERD

We namen op verschillende locaties (>13) in Nederland, Polen, Oostenrijk en Duitsland boorkernen en blad/naaldstalen van bomen in controleplots en steenmeelplots en vergeleken hun radiale aanwas (cm²/jaar) en de respons na de toediening. De radiale aanwas is het oppervlak van hout dat een boom per jaar gemiddeld gevormd heeft.

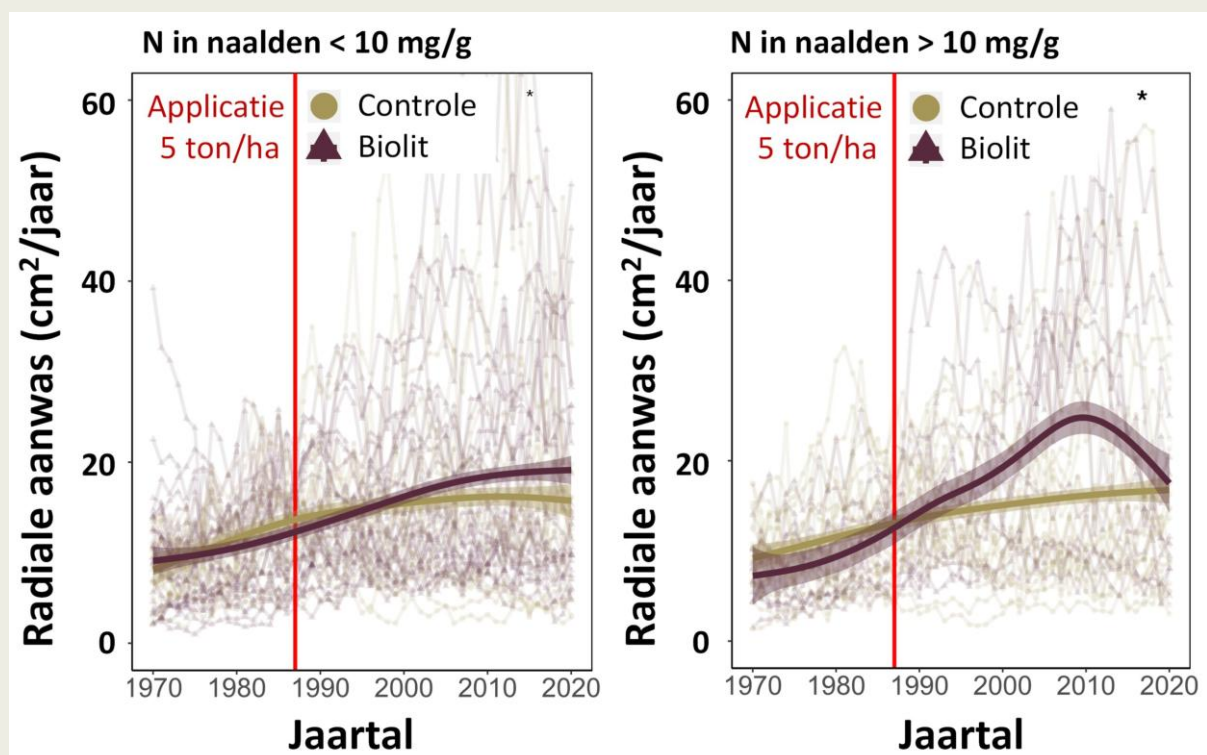
In verzuurde zanderige bossen vonden we een onmiddellijke verdubbeling van de jaarlijkse radiale groeitoename na steenmeelapplicaties uit 2016 en 2017 op Ca-deficiënte 40-jarige zomereik (*Quercus robur* L.) en 107-jarige grove dennen (Figuur 5). Steenmeel doet de bladnutriëntenconcentraties van Ca, Mg en K meetbaar verhogen en doet ook het bladverlies van de bomen afnemen (Plas, 2024). In een site op de Hoge Veluwe waren er geen nutriëntengebreken in de naalden van de grove dennen en was er bijgevolg ook geen groeirespons te bespeuren na ons bezoek in 2024 op de experimentele toediening van 10 ton RD1 *Eifelgold*/ha uit 1985 (Dilz et al., 1987). In Polen werd in het jaar 1905 ook experimenteel 150 ton steenmeel/ha toegediend waarna dennen werden aangeplant (Albert, 1936). We bezochten dit experiment en vonden een indrukwekkend en 120-jaar lang aanhoudend effect op de radiale groei (factor 1,6) dankzij het wegnemen van de P-deficiëntie (Figuur 5).



Figuur 5: Significante toename van de jaarlijkse radiale groei van met steenmeel behandelde eiken en dennen als er sprake is van een duidelijk nutriëntengebrek in de bladeren/naalden. Het jaartal van de applicatie is weergegeven met een verticale rode lijn en significantietest in de rechterbovenhoek (***) $p < 0.001$, NS = Niet Significant). In Polen is er ook sprake van stikstofgebrek, dat verklaart de relatief kleine aanwas voor grove den in het vierde paneel.

Ook op lemige bodems hebben we experimentele steenmeeladdities uit de jaren 1980-90 herbezoekt en vergeleken met nabijgelegen controleplots, zowel in Oostenrijk (applicatie 5 ton RD5 *Biolit*/ha in 1987) (Van Der Bauwhede et al., 2024b), als in Duitsland (applicatie 10 ton RD2 *Vulkamin*/ha in 1994) (Van Der Bauwhede et al., 2025a). In de Oostenrijks sparrenbossen (100-250 jarig) nam de radiale stamgroei met een factor 1,3 toe. Dit effect was het grootste op jongere bomen die voldoende N beschikbaar hadden in hun naalden (Figuur 6), dus voor de bomen die niet in het hooggebergte stonden (<1500 m). Kalium was daarentegen het limiterende nutriënt in sparrenbossen in Baden-Württemberg en een kaliumtoediening deed de groei met een factor 1,5 stijgen gedurende 30 jaar (Van Der Bauwhede et al., 2025a).

Concreet kan steenmeel bij vastgestelde nutriëntengebreken naast het verbeteren van de vitaliteit dus ook de productiviteit ten goede komen, wat belangrijk is aangezien hout als grondstof belangrijker zal worden.

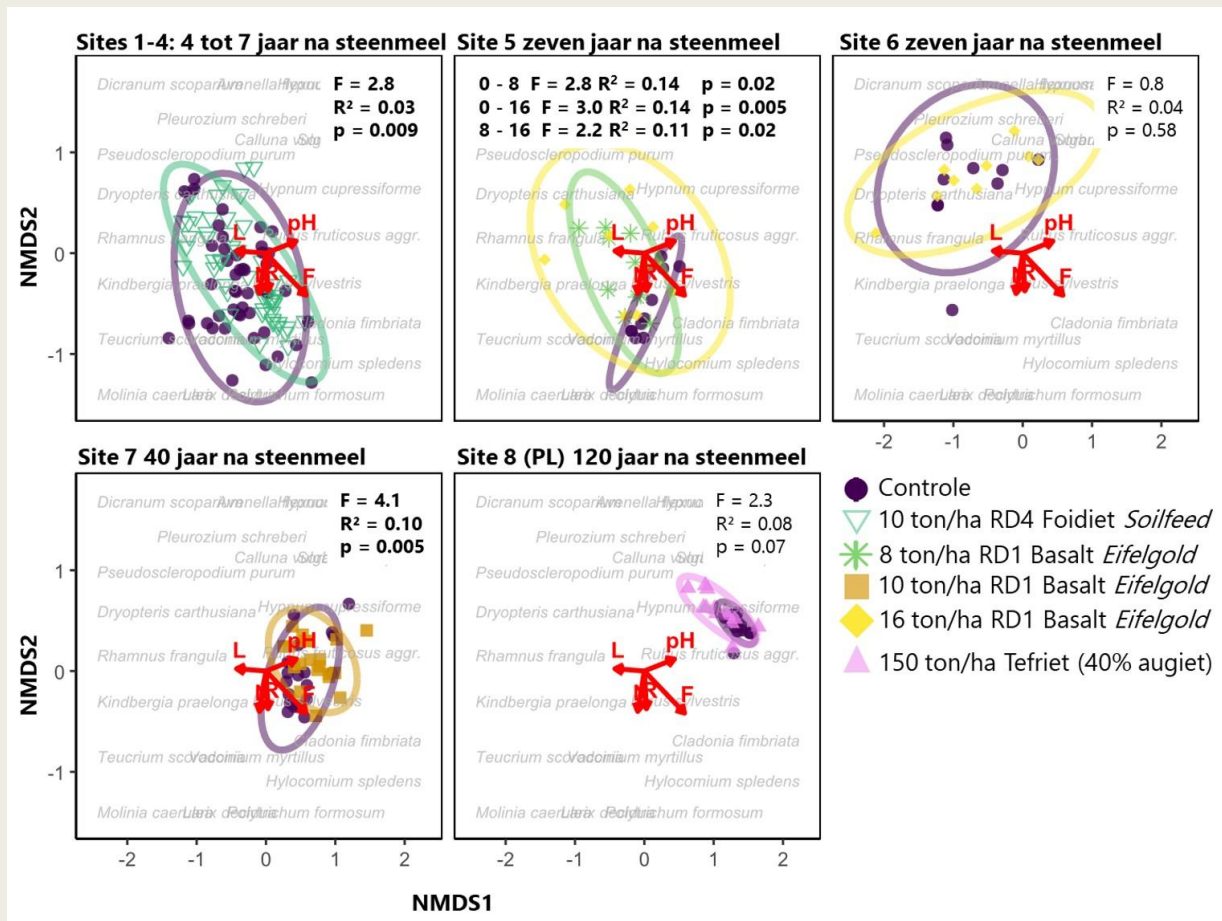


Figuur 6: Gemiddelde jaarlijkse radiale groei van fijnsparren tussen 1970 en 2021 in Oostenrijk, na steenmeelapplicatie (5 ton/ha in 1987) en in controleplots, verdeeld in twee stikstofklassen. Bomen toonden slechts een geringe groeireactie op de toepassing van steenmeel wanneer stikstof sterk deficiënt was (linkerpaneel, $n = 48$), maar een significante groeirespons over 30 jaar wanneer de stikstofconcentratie in de naalden boven de drempel van 10 mg N/g lag (rechterpaneel, $n = 36$). De waarde van 10 mg N/g geldt als de drempel voor extreme stikstofgebreken bij fijnspar (Mellert and Göttlein, 2012).

KRUIDLAGEN VERTONEN EEN SLECHTS MATIGE RESPONS EN EEN ALGEMENE STIJGING VAN DE DIVERSITEIT

We weten dat bij een conventionele bekalking ruderele planten zoals bramen (*Rubus* sp.) sterk kunnen uitbreiden (dosis > 3 ton/ha) en daarmee de biodiversiteit sterk verstoren (Bobbink et al., 2018), hoewel dat bij lagere dosis (< 3 ton/ha) beperkt is. Na het toedienen van steenmeel is er geen tot een beperkte verstoring. In Oostenrijk werden in de ondergroei de mossen tijdelijk verstoord door steenmeeltoepassing, maar deze herstelden zich altijd na een vijftal jaar (Scherer, 1993). In de kruidlaag was de verschuiving in de soortensamenstelling van de plantengemeenschap minimaal. Op de lange termijn nam de soortenrijkdom altijd toe zonder verlies van karakteristieke zuurminnende soorten (Van Der Bauwhede et al., 2025a, 2024b). Zo kwamen in Oostenrijk en Duitsland soorten zoals grote veldbies (*Luzula sylvatica* subsp. *sieberi*), een oud-bos-indicator, brede wespenorchis (*Epipactis helleborine*) en dalkruid (*Maianthemum bifolium*) sporadisch en enkel voor in met steenmeel behandelde plots.

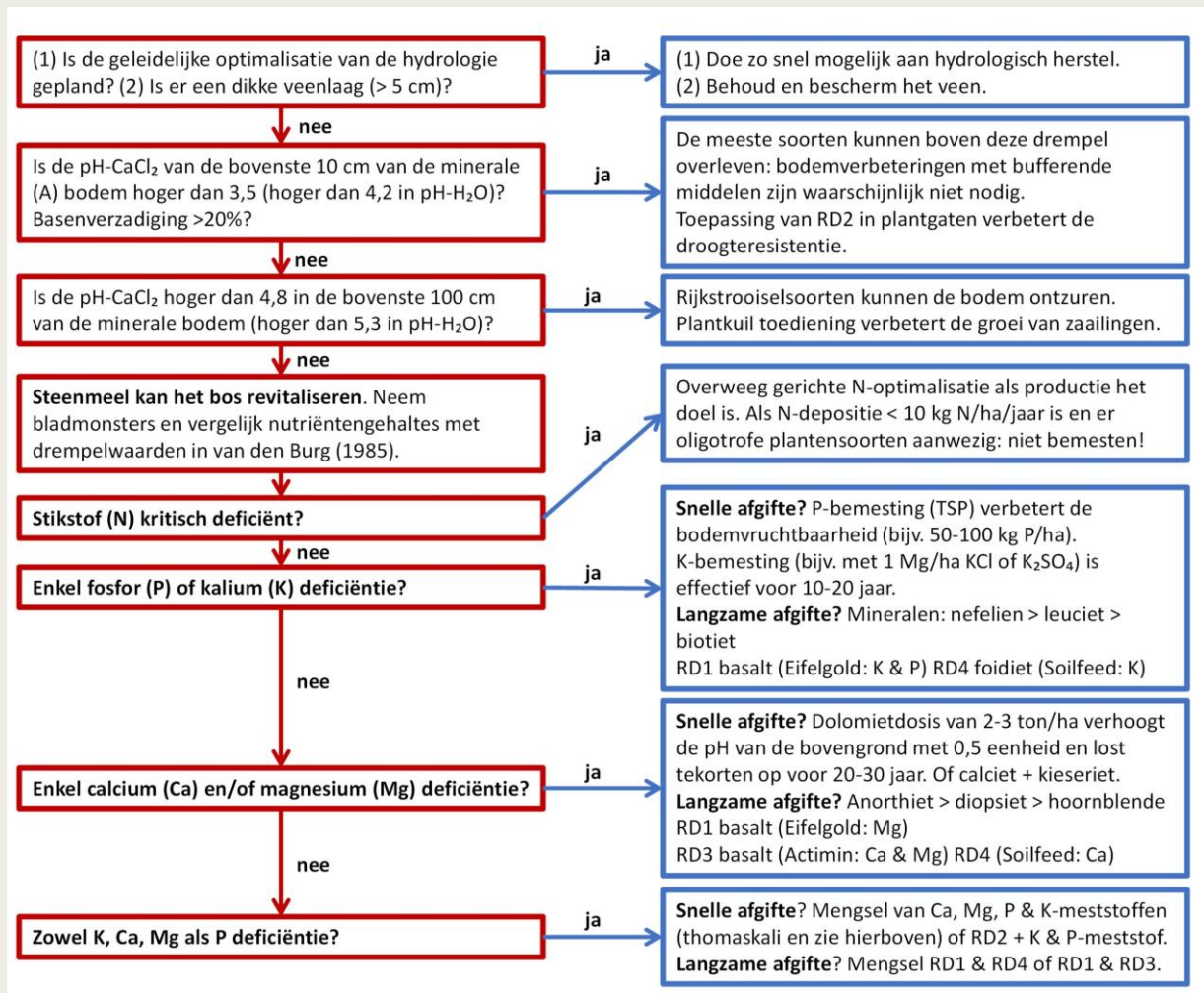
Op arme zandbodems in Nederland en Polen was er door het steenmeel een verhoging van de variatie in soortensamenstellingen, weergegeven als bredere gemeenschapsellipsen (Figuur 7). Bovendien kwamen vier tot 120 jaar na de steenmeeladdities het gewoon struisgras (*Agrostis capillaris*), wilde kamperfoelie (*Lonicera periclymenum*), gewoon haarmos (*Polytrichum commune*), groot laddermos (*Pseudoscleropodium purum*), gewoon dikkopmos (*Brachythecium rutabulum*), bosbes (*Vaccinium myrtillus*) enkel tevoorschijn in de steenmeelplots, al was het dan sporadisch (bedekking <1%). De verjonging van eik en den was altijd hoger in de steenmeelplots (ongepubliceerde resultaten).



Figuur 7: Resultaten van NMDS (Non-metric Multidimensional Scaling) ordinaties van de plantengemeenschappen in de bemonsterde plots in Nederland en Polen, met 95%-betrouwbaarheidsellipsen rond iedere behandeling. De ecologische gemeenschappen van controleplots en steenmeelplots zijn vergelijkbaar, want ze staan niet ver uit elkaar, maar kunnen wel kleine significante verschillen vertonen die site-afhankelijk zijn. De vectoren (licht L, reactie R, vocht F, vruchtbaarheid N) tonen geen consistente verschuivingsrichting van de gemeenschappen.

Beslisboom steenmeel

Steenmeel is een nuttige revitalisatiemaatregel maar de noodzakelijkheid is afhankelijk van de bodem pH. Het groei-limiterende nutriënt verschilt ook sterk per locatie. Daarom zijn bladanalyses en vergelijking met de kritische drempelwaarden afgeleid door van den Burg de aan te bevelen aanpak (Van den Burg, 1985). Dit maakt een gerichte toepassing van steenmeel mogelijk via een veréenvoudigd expertsysteem (Figuur 8).



Figuur 8: Beslissingsboom voor de toepassing van kalk, minerale meststoffen en steenmeel vanuit het perspectief van de pH van de minerale bodem en de bladvoeding van bomen. Geïnspireerd door de beslissingsboom van Bosgroep Zuid-Nederland.

Conclusies en samenvatting

Steenmeel, zowel in de plantkuil als oppervlakkig toegediend, is een revitalisatiemaatregel die bewezen heeft dat hij werkt in verzuurde bossen en de inkomende stikstofdepositie gedurende 15 tot 50 jaar kan bufferen. De sleutel tot succes ligt echter in een op maat gemaakte aanpak. Daarom kunnen op visuele probleemlocaties het beste bodem (- en bladstalen) worden genomen om de beslisvorming te ondersteunen.

Vanaf maart 2026 zal een erkend labo, de Bodemkundige Dienst van België, deze stalen kunnen analyseren voor de bodem pH, basenverzadiging en bladnutriëntenconcentraties. Momenteel maken we een handleiding op in opdracht van het Agentschap voor Natuur en Bos die stap-voor-stap toont hoe deze stalen genomen moeten worden. De Bodemkundige Dienst zal dan het advies verlenen met behulp van een uitgebreid expertsysteem en modellen getraind op alle beschikbare experimentele data die we de afgelopen vijf jaar verzamelden. Ten eerste wordt een advies voor steenmeel (ja of nee), steenmeeltype en dosis gegeven. Ten tweede wordt een voorspelling gemaakt van het effect van alle steenmeeltypen op bodem

pH, basenverzadiging, boomvitaliteit (nutriënten) en groei. Belangrijk is dat dit expertsysteem bij het bepalen van een dosis ook de afweging maakt tussen bodemherstel en de diversiteit van de kruidlaag, waarbij verruiging actief wordt tegengegaan. De komende jaren zal ons onderzoek nagaan wat het effect is op de stabiliteit van bodemorganische stof (KU Leuven) en op de diversiteit van ectomycorrhizae (UAntwerpen).

Lees hier de tekst van het doctoraat: <https://tinyurl.com/ynmta9vb/>.

Gelieve als volgt te citeren:

Robrecht Van Der Bauwhede, Leon van den Berg, Wim Buysse, Joke Plas, Nele Schillebeeks, Jordi Troonbeeckx, Iris Serbest, Anjo de Jong, Thomas Rombouts, Erik Verbruggen, Matteo Campioli, Annemie Elsen, Ellen Desie, Karen Vancampenhout, Erik Smolders, Bart Muys (2026) Steenmeel als veelbelovende revitalisatiemaatregel voor verzuurde bossen: inzichten uit recent Europees onderzoek. Bosrevue 124a.

ISSN 2565-6953 – Bosrevue 124a

REFERENTIES

Albert, R., 1936. Ein nachhaltig wirksamer Forstdüngungsversuch. Forstarchiv 158–162.

Beerten, K., Vandersmissen, N., Deforce, K., Vandenberghe, N., 2014. Late Quaternary (15 ka to present) development of a sandy landscape in the Mol area, Campine region, north-east Belgium. *Journal of Quaternary Science* 29, 433–444. <https://doi.org/10.1002/jqs.2713>

Bloem, J., Polling, M., de Groot, G., Laros, I., de Jong, J., Verbaarschot, E., Weijters, M., van Duinen, G.-J., 2022. Effecten van steenmeel op bodemleven in droge eikenbossen: special bodem. *Vakblad Natuur Bos Landschap* 19, 30–33.

Bobbink, R., van den Burg, A., Brouwer, E., van de Riet, S., 2018. Langetermijneffecten van bosbekalking en -bemesting: de Harderwijkerproef. Monitoring OBN-17-DZ. VBNE, Driebergen.

Brouwer, E., Bobbink, R., Lucassen, E.C.H.E.T., Weijters, M., 2022. Effecten van bekalking of steenmeel op paddenstoelen.

Chadwick, O.A., Chorover, J., 2001. The chemistry of pedogenic thresholds. *Geoderma, Developments and Trends in Soil Science* 100, 321–353. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00027-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00027-1)

de Jong, A., de Vries, W., Dijk, P.G., Lerink, B.J.W., 2024. Veranderingen van voorraden koolstof, stikstof, fosfor, kalium, calcium, magnesium, ijzer en aluminium in bosbodems tussen 1990 en 2023. Wageningen Environmental Research, Wageningen. <https://doi.org/10.18174/669938>

De Schrijver, A., Mertens, J., Geudens, G., Staelens, J., Campforts, E., Luysaert, S., De Temmerman, L., De Keersmaeker, L., De Neve, S., Verheyen, K., 2006. Acidification

of forested podzols in North Belgium during the period 1950–2000. *Science of The Total Environment* 361, 189–195. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.06.015>

de Vries, W., Weijters, M., de Jong, A., van Delft, B., Bloem, J., van de Burg, A., van Duinen, G.-J., Verbaarschot, E., Bobbink, R., 2019. Verzuring van loofbossen op droge zandgronden en herstelmogelijkheden door steenmeeltoediening (No. 2019/OBN229-DZ), Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren (VBNE). VBNE, Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren, Driebergen.

Desie, E., Muys, B., den Ouden, J., Nyssen, B., Sousa-Silva, R., van den Berg, L., van den Burg, A., van Duinen, G.-J., Van Meerbeek, K., Weijters, M., Vancampenhout, K., 2023. Impact of black cherry on pedunculate oak vitality in mixed forests: Balancing benefits and concerns. *Forest Ecosystems* 10, 100148. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2023.100148>

Desie, E., Vancampenhout, K., Muys, B., 2021. De donkere kant van het bos: kansen voor rijkstrooisel. *Bosrevue* 97, 1–11.

Desie, E., Vancampenhout, K., Nyssen, B., van den Berg, L., Weijters, M., van Duinen, G.-J., den Ouden, J., Van Meerbeek, K., Muys, B., 2020a. Litter quality and the law of the most limiting: Opportunities for restoring nutrient cycles in acidified forest soils. *Science of The Total Environment* 699, 134383. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134383>

Desie, E., Vancampenhout, K., van den Berg, L., Nyssen, B., Weijters, M., den Ouden, J., Muys, B., 2020b. Litter share and clay content determine soil restoration effects of rich litter tree species in forests on acidified sandy soils. *Forest Ecology and Management* 474, 118377. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118377>

Dilz, K., Hekstra, A., van Diest, A., van den Burg, J., 1987. Bosbemestingsproef jaarverslag 1985/1986, Bemestingsproef in het gemeentebos van Harderwijk. De Dorschkamp Instituut van Bosbouw en Groenbeheer, Wageningen.

Feger, K.H., Armbruster, M., 2003. Langfristige Effekte der Waldbodenmeliorationen mit Dolomitmehl und basaltischem Gesteinsmehl im Trinkwasserschutzgebiet Mannheim-Käfertal. Technische Universität Dresden Institut für Bodenkunde und Standortslehre.

Findeisen, S., Weijters, M., Bobbink, R., Emsens, W.-J., Siepel, H., Vogels, J.J., Verbruggen, E., 2025. Silicate rock powder application: perspectives for the use as buffer restoration measure in acidified heathlands. *Restoration Ecology* 33, e70013. <https://doi.org/10.1111/rec.70013>

Graveland, J., van der Wal, R., van Balen, J.H., van Noordwijk, A.J., 1994. Poor reproduction in forest passerines from decline of snail abundance on acidified soils. *Nature* 368, 446–448. <https://doi.org/10.1038/368446a0>

Hartmann, P., Jansone, L., Mahlau, L., Maier, M., Lang, V., Puhmann, H., 2024. Liming leads to changes in the physical properties of acidified forest soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 187, 195–204. <https://doi.org/10.1002/jpln.202300055>

Högberg, P., Fan, H., Quist, M., Binkley, D., Tamm, C.O., 2006. Tree growth and soil acidification in response to 30 years of experimental nitrogen loading on boreal

forest. *Global Change Biology* 12, 489–499. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01102.x>

Hommel, P., den Ouden, J., Huiskes, H., Ozinga, W., van Duinen, G., Weijters, M., Bobbink, R., Smits, N., 2020. Herstelstrategie H9190: Oude eikenbossen.

Huang, Y., Kang, R., Mulder, J., Zhang, T., Duan, L., 2015. Nitrogen saturation, soil acidification, and ecological effects in a subtropical pine forest on acid soil in southwest China. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 120, 2457–2472. <https://doi.org/10.1002/2015JG003048>

Lucassen, E., van den Berg, L., Aben, R., Smolders, F., Roelofs, J., Bobbink, R., 2014. Bodemverzuring en achteruitgang zomereik. *Landschap* 4, 185–193.

Mellert, K.H., Göttlein, A., 2012. Comparison of new foliar nutrient thresholds derived from van den Burg's literature compilation with established central European references. *Eur J Forest Res* 131, 1461–1472. <https://doi.org/10.1007/s10342-012-0615-8>

Meyer, E., Steinberger, K.-H., 1993. Über die Bodenfauna in Wäldern Vorarlbergs (Österreich) Bestand und Auswirkungen von Gesteinsmehlapplikationen. *VERHANDLUNGEN-GESELLSCHAFT FÜR ÖKOLOGIE* 143–149.

Mol, G., Vriend, S.P., van Gaans, P.F.M., 2003. Feldspar weathering as the key to understanding soil acidification monitoring data; a study of acid sandy soils in the Netherlands. *Chemical Geology, Controls on Chemical Weathering* 202, 417–441. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2002.07.001>

Muys, B., 1990. N excess in the forest: effects and possible measures. *Silva Gandavensis* 55. <https://doi.org/10.21825/sg.v55i0.899>

Nijssen, M., Vogels, J., van Turnhout, C., Alefs, P., Foppen, R., van den Burg, A., Koenraads, K., Hallmann, C., 2023. Stikstof als mogelijke oorzaak van contrasterende aantaltrends bij insectivore vogels van droge bossen en heide.

Plas, J., 2024. Rebalancing nutrients: exploring rock dust applications to restore forest health on acidified sandy soils. KU Leuven. Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen, Leuven.

Rozas, V., Sampedro, L., 2013. Soil chemical properties and dieback of *Quercus robur* in Atlantic wet forests after a weather extreme. *Plant Soil* 373, 673–685. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1835-5>

Rubin, L., 2014. Die Wirkung unterschiedlicher Basenträger auf Bodenstruktur und Bodenfunktion. Bachelorarbeit im Fachbereich Bodenkunde Studiengang Umweltnaturwissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Schelfhout, S., Mertens, J., Verheyen, K., Vesterdal, L., Baeten, L., Muys, B., De Schrijver, A., 2017. Tree Species Identity Shapes Earthworm Communities. *Forests* 8, 85. <https://doi.org/10.3390/f8030085>

Scherer, J., 1993. Projekt Waldökosystemforschung – Waldbodensanierung: abschließender Bericht (No. 3). Lebensraum Vorarlberg, Amt der Vorarlberger Landesregierung Bregenz.

Sioen, G., Verschelde, P., Roskams, P., 2023. Bosvitaliteitsinventaris 2022. Resultaten uit het bosvitaliteitsmeetnet (Level 1). Rapporten van het Instituut voor Natuur-en Bosonderzoek.

Skidmore, A.K., Abdullah, H., Siegenthaler, A., Adiningrat, D.P., Rousseau, M., Duan, Y., Torres-Rodriguez, A., Neinavaz, E., 2024. Forest soils further acidify in core Natura 2000 areas amongst unaware government policy. *Ecological Indicators* 159, 111621. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111621>

Termorshuizen, A.J., Ket, P.C., 1991. Effects of ammonium and nitrate on mycorrhizal seedlings of *Pinus sylvestris*. *European Journal of Forest Pathology* 21, 404–413. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.1991.tb00777.x>

Van Calster, H., Cools, N., De Keersmaeker, L., Denys, L., Herr, C., Leyssen, A., Provoost, S., Vanderhaeghe, F., Vandevoorde, B., Wouters, J., Raman, M., 2019. Gunstige abiotische bereiken voor vegetatietypes in Vlaanderen, Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2020 (44). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel. <https://doi.org/10.21436/inbor.19362510>

van den Berg, L.J.L., Dorland, E., Vergeer, P., Hart, M.A.C., Bobbink, R., Roelofs, J.G.M., 2005. Decline of acid-sensitive plant species in heathland can be attributed to ammonium toxicity in combination with low pH. *New Phytologist* 166, 551–564. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01338.x>

Van den Burg, J., 1985. Foliar analysis for determination of tree nutrient status: a compilation of literature data, = Overzicht van blad- en naaldanalyses voor de beoordeling van de minerale voedingstoestand van bomen: een samenvoeging van literatuurgegevens, Rijksinstituut voor onderzoek in de bos- en landschapsbouw De Dorschkamp. Rapport 414. Rijksinstituut voor onderzoek in de bos- en landschapsbouw De Dorschkamp, Wageningen.

Van Der Bauwhede, R., 2025. Rock dust as a restoration measure for acidified forests. From mineral dissolution to helicopter application. KU Leuven, Leuven. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27736.20487>

Van Der Bauwhede, R., Muys, B., Vancampenhout, K., Smolders, E., 2024a. Accelerated weathering of silicate rock dusts predicts the slow-release liming in soils depending on rock mineralogy, soil acidity, and test methodology. *Geoderma* 441, 116734. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116734>

Van Der Bauwhede, R., Schillebeeks, N., Hartmann, P., von Wilpert, K., Habel, R., Vancampenhout, K., Smolders, E., Muys, B., 2025a. Three decades of monitoring the responses to alkaline K-rich applications in an acidified, K-deficient Norway spruce (*Picea abies*) stand reveals that forest restoration depends on treatment type: Rock dust, wood ash, dolomite and/or potassium sulphate. *Geoderma* 461, 117485. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117485>

Van Der Bauwhede, R., Troonbeeckx, J., Serbest, I., Moens, C., Desie, E., Katzensteiner, K., Vancampenhout, K., Smolders, E., Muys, B., 2024b. Restoration rocks: The long-term impact of rock dust application on soil, tree foliar nutrition, tree radial growth, and understory biodiversity in Norway spruce forest stands. *Forest Ecology and Management* 568, 122109. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122109>

Van Der Bauwhede, R., van den Berg, L., Vancampenhout, K., Smolders, E., Muys, B., 2025b. Field phytometers and lab tests demonstrate that rock dust can outperform dolomite and fertilisers for acid forest soil restoration. *Plant Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-07175-8>

Van der Burg, R., Brouwer, E., Bijlsma, R.J., der, B., Duinen, G.A. (Gert-J., Hommel, P.W.F.M., Jansen, A.J.M., Lucassen, E.C.H.E.T., de, W., 2014. Preadvies voor herstel en ontwikkeling van vochtige bossen op de pleistocene zandgronden.

Van Diggelen, R., Bergsma, H., Bijlsma, R., Bobbink, R., Van den Burg, A., Sevink, J., Siebel, H., Siepel, H., Vogels, J., De Vries, W., 2019. Steenmeel en natuurherstel: een gelukkige relatie of een risicovolle combinatie. *Vakblad natuur bos landschap* 155, 20–23.

Vogels, J., Verbaarschot, E., Loeb, R., Weijters, M., Bobbink, R., Bergsma, H., Scherpenisse, M., Verbeek, P.J.M., Jong, V., 2020. Steenmeeltoepassing ten behoeve van herstel biodiversiteit in Het Nationale Park De Hoge Veluwe – Eindrapport monitoring 2015–2019. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34620.46722>

von Mersi, W., Kuhnert-Finkernagel, R., Schinner, F., 1992. The influence of rock powders on microbial activity of three forest soils. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 155, 29–33. <https://doi.org/10.1002/jpln.19921550107>

von Oheimb, G., Härdtle, W., Naumann, P.S., Westphal, C., Assmann, T., Meyer, H., 2008. Long-term effects of historical heathland farming on soil properties of forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 255, 1984–1993. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.12.021>

von Wilpert, K., Lukes, M., 2003. Ecochemical effects of phonolite rock powder, dolomite and potassium sulfate in a spruce stand on an acidified glacial loam. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 65, 115–127. <https://doi.org/10.1023/A:1022103325310>

Vos, M., Sterck, F., Ouden, J., Hoosbeek, M., Vries, W., 2024. Effecten van beheermaatregelen op aanvoer en afvoer van nutriënten in bossen.

Vos, M.A.E., den Ouden, J., Hoosbeek, M., Valtera, M., de Vries, W., Sterck, F., 2023. The sustainability of timber and biomass harvest in perspective of forest nutrient uptake and nutrient stocks. *Forest Ecology and Management* 530, 120791. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120791>