



Potentie van bosomvorming als effectgeoriënteerde maatregel tegen bodemverzuring en eutrofiëring van bossen op zandgrond

Eindrapport TWOL-project B&G/31/2002

**Gielis Leen
De Schrijver An
Wuyts Karen
Staelens Jeroen
Geudens Guy
Verheyen Kris**

Woord vooraf

Dit eindverslag geeft een overzicht van de onderzoeksresultaten die werden verzameld in het kader van het TWOL-project 'Potentie van bosomvorming als effectgeoriënteerde maatregel tegen bodemverzuring en eutrofiëring van bossen op zandgrond' en kadert deze binnen het ruime onderzoek omtrent bosccosystemen op zandgrond dat aan het Laboratorium voor Bosbouw (Universiteit Gent) wordt uitgevoerd. Dit verslag presenteert een toegankelijke, Nederlandstalige synthese van het uitgevoerde onderzoek; voor een meer wetenschappelijke onderbouwing en omschrijving van de verscheidene experimenten verwijzen we naar de wetenschappelijke publicaties die zijn opgenomen in de appendices.

In de loop van het onderzoek werd reeds veel aandacht besteed aan de verspreiding van de onderzoeksresultaten bij een breed publiek van bosbeheerders. De technische aspecten en wetenschappelijke onderbouwing van de beheerkeuzes voor dennenbossen op zandgrond werden uiteengezet in de ANB-brochure 'Bosomvorming' en in een themanummer van 'De Bosrevue' (uitgegeven door de Vereniging voor Bos in Vlaanderen). Tevens werd hieromtrent op 23 november 2006 de studiedag 'Van dennenplantages naar een *beloofd* land: theoretische en praktische aspecten van bosomvorming' georganiseerd (170 deelnemers). De belangrijkste bevindingen van deze studiedag werden gepubliceerd in 'Silva Belgica' (uitgegeven door de Koninklijke Belgische Bosbouwmaatschappij). Deze publicaties werden eveneens opgenomen in de appendices.

Inhoudsopgave

1	Kadering, probleemstelling en doelstellingen.....	5
1.1	Eutrofiërende en verzurende depositie in Vlaamse bossen.....	5
1.1.1	Depositie in Vlaanderen	5
1.1.2	Depositie in bossen.....	7
1.2	Bodemverzuring en eutrofiëring (vermesting).....	9
1.2.1	Bodemverzuring	9
1.2.2	Eutrofiëring: definiëring van het concept stikstofverzadiging	12
1.3	Effect van het bostype op bodemverzuring en eutrofiëring	14
1.4	Kwetsbaarheid van bosranden voor verzuring en eutrofiëring	16
1.5	Potentie van bosomvorming als effectgeoriënteerde maatregel tegen bodemverzuring en eutrofiëring van bossen op zandgrond	17
1.5.1	Definitie van bosomvorming.....	17
1.5.2	Mogelijke scenario's voor bosomvorming.....	18
1.5.3	Doelstelling van de onderzoeksoopdracht.....	20
1.5.4	Onderzoeksmethodiek.....	20
2	Resultaten	22
2.1	Effect van het bostype op verzuring en eutrofiëring van bossen op zandgrond.....	22
2.1.1	Effect van het bostype op doorvaldepositie en uitspoeling in boskernen.....	22
2.1.2	Effect van het bostype op doorvaldepositie in bosranden	24
2.1.3	Effect van het bostype op strooiselkwaliteit.....	27
2.1.4	Effect van de boomsoort op nutriëntenopname.....	28
2.2	Effect van het bosomvormingsscenario op verzuring en eutrofiëring van bossen op zandgrond	30
2.2.1	Effect van het bosomvormingsscenario op doorvaldepositie en uitspoeling naar het grondwater.....	30
2.2.2	Effect van het bosomvormingsscenario op strooiselkwaliteit	39
2.2.3	Effect van het bosomvormingsscenario op biomassaproductie en nutriëntenopname	40
2.3	Effect van bosrandbeheer op verzuring en eutrofiëring van bossen op zandgrond.....	42
3	Synthese en concrete adviezen voor de praktijk.....	46
3.1	Synthese aan de hand van concrete vraagstellingen.....	46
3.1.1	Wat zijn de risico's en gevolgen voor het boscossysteem van de vastgestelde verzuring/eutrofiëring van bossen op zandbodem?	46
3.1.2	Is bekalken een optie om de bodemverzuring tegen te gaan?	49
3.1.3	Is plaggen een optie om de eutrofiëring tegen te gaan?	50
3.1.4	Kan het bosbeheer via de boomsoortenkeuze bijdragen tot mildering van deze verzuring en eutrofiëring?	50

3.1.5	Hoe moet naaldbos worden omgevormd? Via kaalkap, schermkap of groepenkap?	51
3.1.6	Kan het bosbeheer via aanleg van bosranden bijdragen tot mitigatie van verzuring en vermesting? - Is het aanleggen van een bosrandgordel van naaldbomen een goede maatregel ter bescherming van de kernzone van het bos?	52
3.1.7	Draagt onze huidige bosoppervlakte significant bij tot het zuiveren van pollutanten uit de atmosfeer?	53
3.1.8	Veroorzaakt een grootschalige bosomvorming nog een toename van de concentratie van pollutanten in de lucht en worden omliggende ecosystemen (vb. heide) dan niet nog meer bedreigd?	53
3.1.9	Is deze verzuring en eutrofiëring van bossen überhaupt omkeerbaar?	54
3.2	De drie Best Management Practices afgeleid uit ons onderzoek	56
4	Samenvatting	57
5	Appendices	59
5.1	Vulgariserende publicaties	59
5.1.1	Appendix 1: Brochure bosomvorming	59
5.1.2	Appendix 2: Themanummer Bosrevue	59
5.1.3	Appendix 3: Artikel in Silva Belgica	59
5.2	Wetenschappelijke publicaties	59
5.2.1	Appendix 4: Belang van het incalculeren van verhoogde deposities in de bosrand ter evaluatie van overschrijding van kritische lasten	59
5.2.2	Appendix 5: Literatuuronderzoek bostype-effect op depositie en uitspoeling	59
5.2.3	Appendix 6: Bostype-effect op depositie en uitspoeling in Vlaamse boskernen	60
5.2.4	Appendix 7: Bostype-effect op depositie en uitspoeling in Vlaamse boskernen	60
5.2.5	Appendix 8: Randeffect op doorvaldepositie in bestanden van Corsicaanse den en berk	60
5.2.6	Appendix 9: Randeffect op doorvaldepositie in drie bostypes in twee regio's in Vlaanderen.	60
5.2.7	Appendix 10: Effect van de boomsoort op wortelopname van stikstof	60
5.2.8	Appendix 11: Impact van omvormingsscenario op biomassa en kringloop van nutriënten	60
5.2.9	Appendix 12: Impact van omvormingsscenario op depositie en uitspoeling	61
5.2.10	Appendix 13: Effect van bosrandstructuur op depositie: een windtunnelstudie	61

1 Kadering, probleemstelling en doelstellingen

De hoge input van verzurende en vermestende depositie in Vlaanderen leidt vooral in naaldbossen op zandgrond tot sterke bodemverzuring en eutrofiëring. Homogene bestanden van grove en Corsicaanse den beslaan ongeveer 45.000 ha in de Kempen en de Vlaamse zandstreek. Van nature zouden hier loofbossen voorkomen met inlandse eik, berk en beuk met lijsterbes, sporkehout en ratelpopulier als meest typische begeleiders. Omvorming van deze naaldbossen naar een meer natuurlijk bostype met een groot aandeel aan loofbomen zou de negatieve gevolgen van luchtverontreiniging kunnen milderen. Met dit onderzoeksproject werd nagegaan welke mogelijkheden bosomvorming biedt om de verzurings- en eutrofiëeringsdruk op bossen te verminderen.

In dit eerste hoofdstuk worden enkele sleutelbegrippen omtrent de verzurings- en eutrofiëringsproblematiek kort toegelicht, waarbij cijfers de situatie in de Vlaamse bossen schetsen. Vervolgens wordt het begrip bosomvorming toegelicht en ten slotte wordt dit hoofdstuk beëindigd met de omschrijving van de specifieke doelstelling en onderzoeksmethodiek van de onderzoeksluiken.

1.1 Eutrofiërende¹ en verzurende depositie in Vlaamse bossen

1.1.1 Depositie in Vlaanderen²

Ondanks een belangrijke afname van de gemiddelde stikstofdepositie³ in Vlaanderen (een daling van 18% in 2004 t.o.v. 1990) is deze depositie, met 39,8 kg N.ha⁻¹.j⁻¹ in 2004, onder de hoogste in Europa en ver boven de middellangetermijndoelstelling voor 2010 van 29,6 kg N.ha⁻¹.j⁻¹. De helft van de stikstofdepositie in Vlaanderen is afkomstig van buitenlandse emissie. De andere helft zijn Vlaamse

¹ Eutrofiëring of vermesting is het voedselrijker worden van het milieu

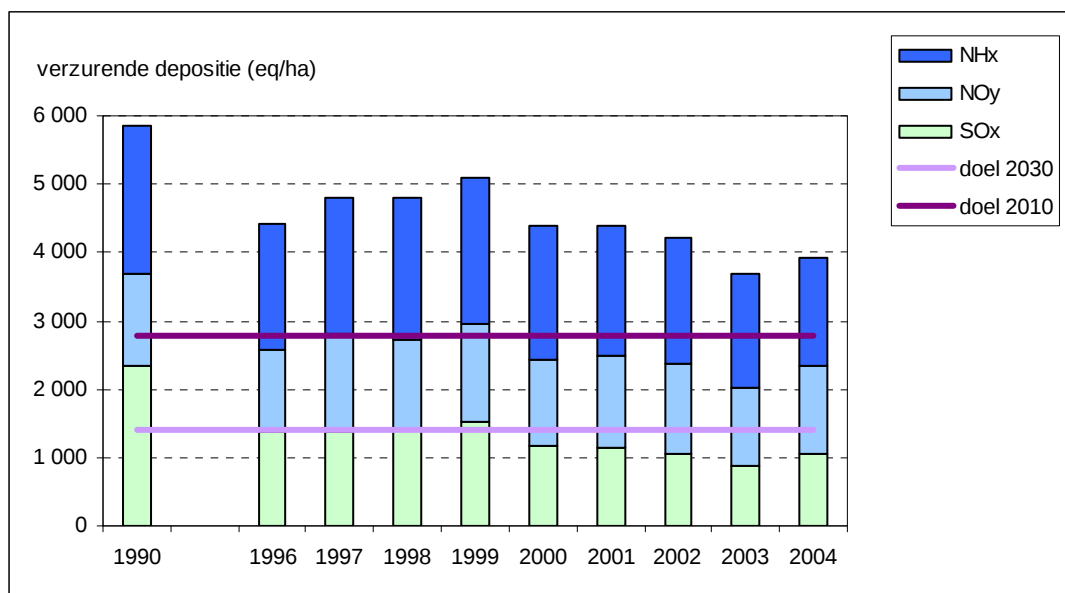
² Van Avermaet, P., Van Hooste, H., Overloop, S. 2006. Milieurapport Vlaanderen. MIRA. Achtergronddocument. Thema Verzuring. 74pp.

Overloop, S., Bossuyt, M., Buysse, M., Ducheyne, S., Dumortier, M., Eppinger, R., Genouw, G., Stemgée K., Van Gijseghe, D., Van Hoof, K., Vogels, N., Vanden Auweele, W., Wustenberghs, H., D'hooghe, J., Vernagut, B. 2007. Milieurapport Vlaanderen. MIRA. Achtergronddocument Thema Vermesting, 166pp
www.milieurapport.be

³ Stikstofdepositie (N-depositie) werkt onder meer vermestend, d.i. maakt het milieu voedselrijker, en bestaat uit gereduceerde of ammoniakale stikstof (NH_x: ammoniakgas NH₃, en ammonium NH₄⁺) en geoxideerde stikstof (NO_y: gasvormige stikstofoxiden zoals onder meer stikstofdioxide NO₂, en nitraat NO₃⁻).

emissies, met als belangrijkste emissiebronnen de landbouwsector (voornamelijk ammoniakale stikstof, NH_x) en de verbranding van fossiele brandstoffen door verkeer, industrie en huishoudens (geoxideerde stikstof, NO_y). In 2004 was 55% van de stikstofdepositie te wijten aan ammoniakale stikstof.

De verzurende depositie omvat de depositie van geoxideerde zwavelverbindingen (SO_x) en de eerder vermelde stikstofverbindingen. De verzurende depositie in Vlaanderen daalde met ongeveer 33% van gemiddeld $5844 \text{ eq.ha}^{-1}.\text{j}^{-1}$ in 1990 tot $3925 \text{ eq.ha}^{-1}.\text{j}^{-1}$ in 2004 (Figuur 1). Deze trend was te wijten aan een daling van de SO_x depositie met meer dan 50%, een afname van de NH_x depositie van 27% en van de NO_y depositie met 5%. Toch is de verzurende depositie nog ver boven de middellangetermijndoelstelling (2010) van $2770 \text{ eq.ha}^{-1}.\text{j}^{-1}$. Net zoals bij de stikstofdepositie is de helft van de verzurende depositie afkomstig van buitenlandse emissies en zorgen in Vlaanderen de landbouwsector en het verkeer voor de belangrijkste binnenlandse emissies.



Figuur 1: Trend in de gemiddelde verzurende depositie in Vlaanderen gedurende de periode 1990-2004 (Bron:²).

De stikstofdepositie en de verzurende depositie variëren sterk binnen Vlaanderen, van minder dan $30 \text{ kg N.ha}^{-1}.\text{j}^{-1}$ tot meer dan $90 \text{ kg N.ha}^{-1}.\text{j}^{-1}$ en van $1111 \text{ eq.ha}^{-1}.\text{j}^{-1}$ tot $11900 \text{ eq.ha}^{-1}.\text{j}^{-1}$. De hoogste waarden komen voor in de

⁴ De eenheid om de hoeveelheid van verzurende stoffen uit te drukken is de zuurequivalent (eq). Een zuurequivalent van een verzurende stof is de massa van die stof die bij volledige verzuring de vrijzetting van 1 mol protonen (H^+ , waterstofionen) geeft. Eén zuurequivalent komt overeen met 32 gram zwaveldioxide, 46 gram stikstofdioxide of 17 gram ammoniak.

omgeving van grote steden, belangrijke verkeerswegen en in landbouwgebieden met intensieve veeteelt (West-Vlaanderen, Noorderkempen).

1.1.2 Depositie in bossen

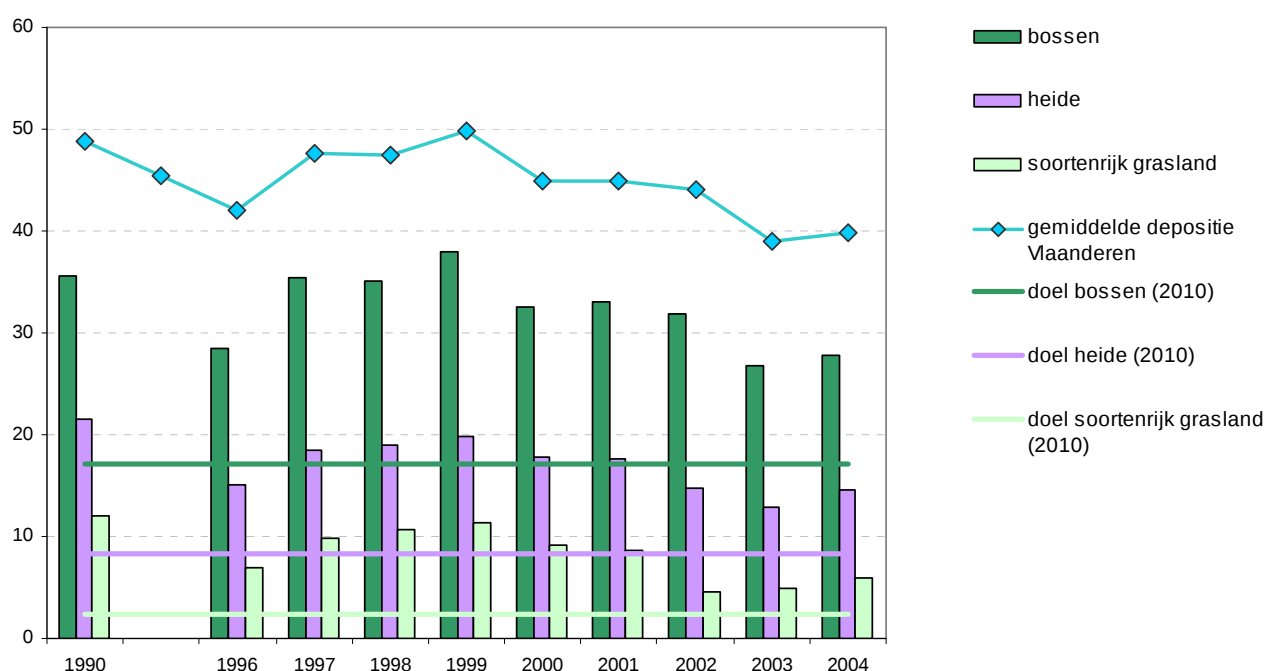
Na transport en mogelijke transformaties worden de atmosferische polluenten afgezet op het aardoppervlak via natte, occulte of droge depositie. De hoeveelheid natte depositie - dit zijn polluenten opgelost in neerslagwater - wordt nauwelijks beïnvloed door de kenmerken van het oppervlak waarop deze wordt afgezet. De hoeveelheid droge depositie - dit zijn de gassen of partikels die rechtstreeks uit de atmosfeer op de vegetatie, bodem of bv. bouwwerken worden afgezet - wordt echter sterk beïnvloed door de ruwheid van het depositieoppervlak. Bossen hebben een oppervlaktestructuur die de droge depositie van stikstof en zwavel sterk bevordert. Ze vertonen, afhankelijk van de vegetatiehoogte, de dichtheid, de bladoppervlakte-index⁵, het al dan niet immergroene karakter en de vorm van de bladeren/naalden, een sterke variabiliteit voor het capteren van droge depositie. Occulte depositie - de depositie die via nevel en mist wordt afgezet - is voornamelijk van belang in bergachtige regio's en is dus in Vlaanderen minimaal. Algemeen kan men aannemen dat in Vlaanderen één derde van de totale depositie wordt afgezet via natte depositie en dus twee derden via droge depositie.

De draagkracht van een ecosysteem voor atmosferische depositie wordt uitgedrukt met een kritische last. Dit is de maximaal toelaatbare depositie per eenheid van oppervlakte en tijd voor een bepaald ecosysteem zonder dat er veranderingen in de chemische samenstelling van bodem, water of vegetatie optreden die, volgens de huidige kennis, op termijn leiden tot schade aan het ecosysteem (Tabel 1). Op lange termijn beoogt het Vlaamse milieubeleidsplan een daling van de stikstofdepositie en verzurende depositie tot onder de kritische lasten voor verzuring en vermesting. In 2004 was nog 100% van het bosareaal blootgesteld aan stikstofdeposities en verzurende deposities hoger dan de bijhorende kritische last vermesting (bescherming van biodiversiteit, behoud van de soortensamenstelling) (Figuur 2) en verzuring (bodemverzuring).

⁵ Bladoppervlakte-index (LAI: leaf area index): de hoeveelheid (enkelzijdige) bladoppervlakte per bodemoppervlak.

Tabel 1: Overzicht van de mediane kritische lasten (in $\text{eq.ha}^{-1}.\text{j}^{-1}$) in functie van het gestelde beschermingscriterium. Tussen haakjes wordt de kritische last vermessing eveneens gegeven in $\text{kg N.ha}^{-1}.\text{j}^{-1}$.
Bron: ⁶

	Naaldbos	Loofbos
kritische last verzuring		
wortelbeschadiging	2700	3100
bodemverzuring	1500	1500
kritische last vermessing		
bescherming van biodiversiteit ⁷	710 (10)	1100 (15)
bescherming ondiep grondwater (drinkwater-norm) ⁸	2900 (40)	4900 (70)



Figuur 2: Evolutie (1990-2004) van de depositie en de gemiddelde overschrijding (kg N/ha.jaar) van de kritische last voor vermessing (ter bescherming van biodiversiteit) in bos, heide en soortenrijk grasland.

⁶ Langouche, D., Wiedemann, T., Van Ranst, E., Neirynck, J., Langorh, R. 2002. Berekening en kartering van kritische lasten en overschrijdingen voor verzuring en eutrofiëring in boscossystemen in Vlaanderen. In: Neirynck, J., de Ridder, K, Langouche, D., Wiedeman, T., Kowalski A., Ceulemans, R., Mensinck C., Roskams, P., Van Ranst E. 2002. Bepaling van de verzuring- en vermessingsgevoeligheid van Vlaamse bossen met gemodelleerde depositiefluxen. Eindverslag van project VLINA 98/01, studie uitgevoerd voor rekening van de Vlaamse Gemeenschap binnen het kader van het Vlaamse Impulsprogramma Natuurontwikkeling

⁷ Behoud van de bosflora

⁸ Bescherming van ondiep grondwater tegen nitraatinfiltatie onder bossen. Dit grondwater moet voldoen aan de huidige norm voor drinkwater, wat wil zeggen dat op het moment dat het infiltratiewater het grondwater bereikt, de concentratie van 50 ppm niet mag overschreden worden

1.2 Bodemverzuring en eutrofiëring (vermesting)

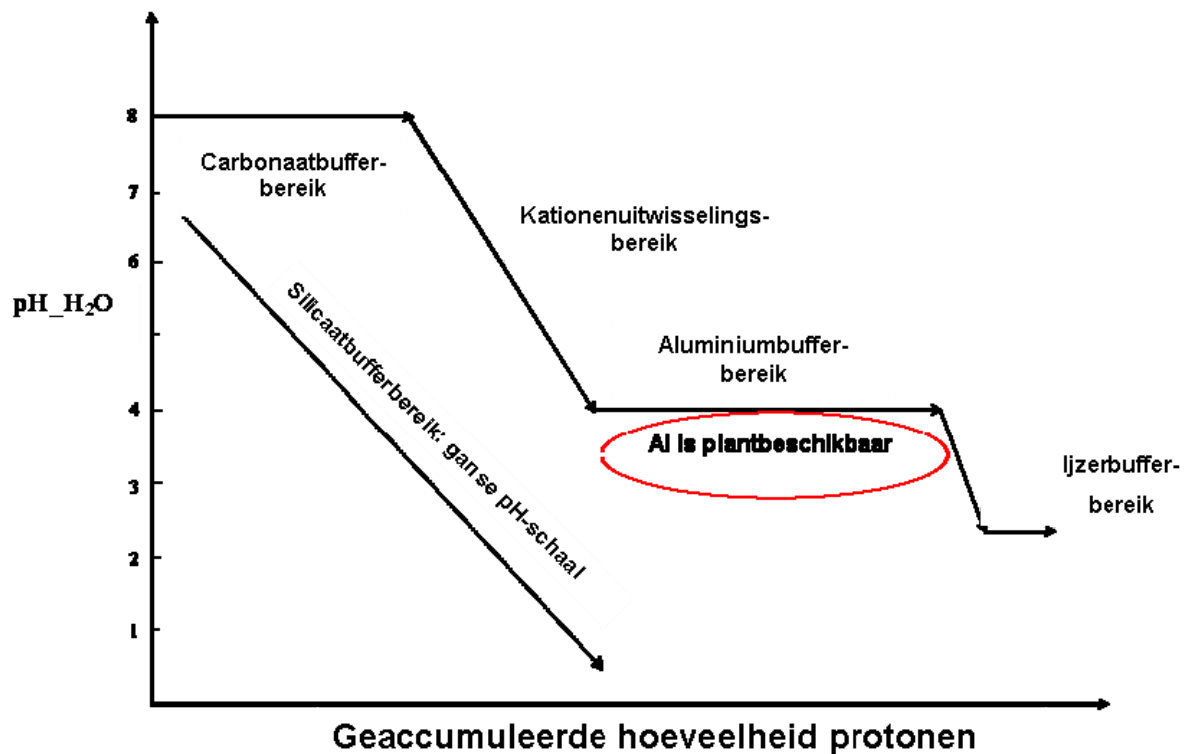
1.2.1 Bodemverzuring

Bodemverzuring is een verandering van het protonenevenwicht in de bodem die resulteert in een hogere concentratie aan protonen (waterstofionen H^+) en een lagere pH⁹. Bodemverzuring is in ons klimaat een natuurlijk proces, als resultaat van verzurende processen (bv. opname van kationen¹⁰ en ammonium door de vegetatie) en ontzurende processen (bv. opname van anionen¹⁰). Antropogene factoren (zoals de aanvoer van verzurende depositie) kunnen dit natuurlijk proces versnellen, waardoor de buffercapaciteit van een bodem vlugger uitgeput geraakt. De buffercapaciteit van een bodem is de weerstand van die bodem tegen een effectieve daling van de pH van de bodemoplossing. Naargelang de pH van de bodem treden verschillende buffermechanismen in werking (zie Figuur 3). Boven pH 6,5 worden verzurende stoffen voornamelijk gebufferd door het oplossen van calciumcarbonaat. Onder pH 6,5 treedt silicaatverwering en het uitwisselen van kationen met het klei-humus-uitwisselingscomplex op. Onder een pH van 4,2 worden verzurende stoffen gebufferd door de dissociatie van aluminium- en ijzerhydroxiden. De gevolgen van verregaande bodemverzuring zijn een verminderde beschikbaarheid van basische kationen en het in oplossing gaan van aluminium.

In Vlaanderen wordt de bodemverzuringproblematiek versterkt door het hoge aandeel naaldbos en de lage buffercapaciteit van de zandbodems. Grove en Corsicaanse den hebben fijne naaldstructuren en zijn immergroen, waardoor ze hoge hoeveelheden atmosferische pollutanten kunnen capteren. Bovendien is hun strooisel vrij slecht van kwaliteit en breekt het traag af, wat de verzuringprocessen nog versterkt (zie verder §2.1.3).

⁹ pH: De zuurtegraad wordt berekend als het negatieve logaritme van de waterstofionenconcentratie en varieert tussen 0 en 14. Een pH 7 is neutraal. Hoe lager de pH, hoe groter de waterstofionenconcentratie en dus hoe zuurder. De vermelde bodem-pH waarden in deze tekst betreffen de analyse van de protonenconcentratie in een waterextract (pH_H₂O).

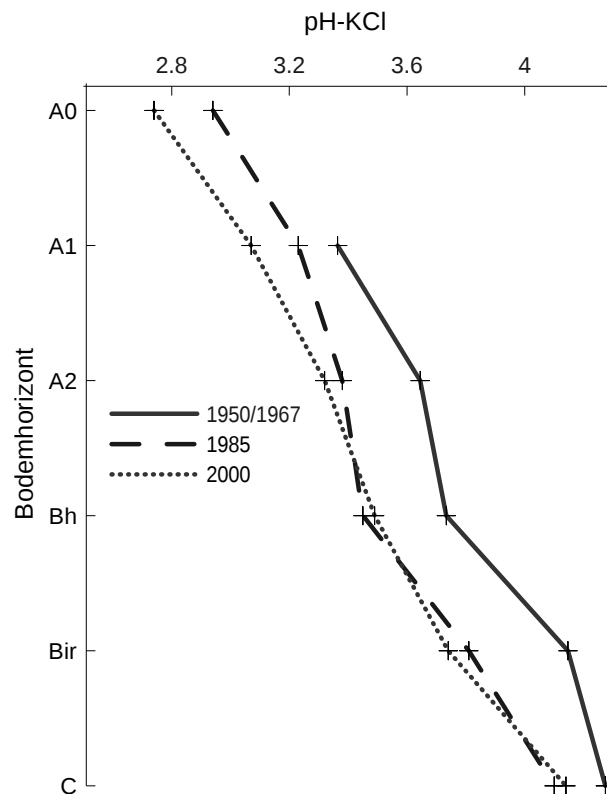
¹⁰ Kationen zijn positief geladen ionen. Belangrijke voedingsstoffen voor planten zijn de zogenaamde basische kationen kalium K^+ , calcium Ca^{2+} , magnesium Mg^{2+} en ammonium NH_4^+ . Sulfaat SO_4^{2-} en nitraat NO_3^- zijn anionen of negatief geladen ionen.



Figuur 3: De verschillende bufferbereiken en veranderingen in bodemzuurtegraad (uitgedrukt in $\text{pH-H}_2\text{O}$) ten gevolge van de toevoer van zuur (protonen) in de bodem (naar Ulrich 1991).

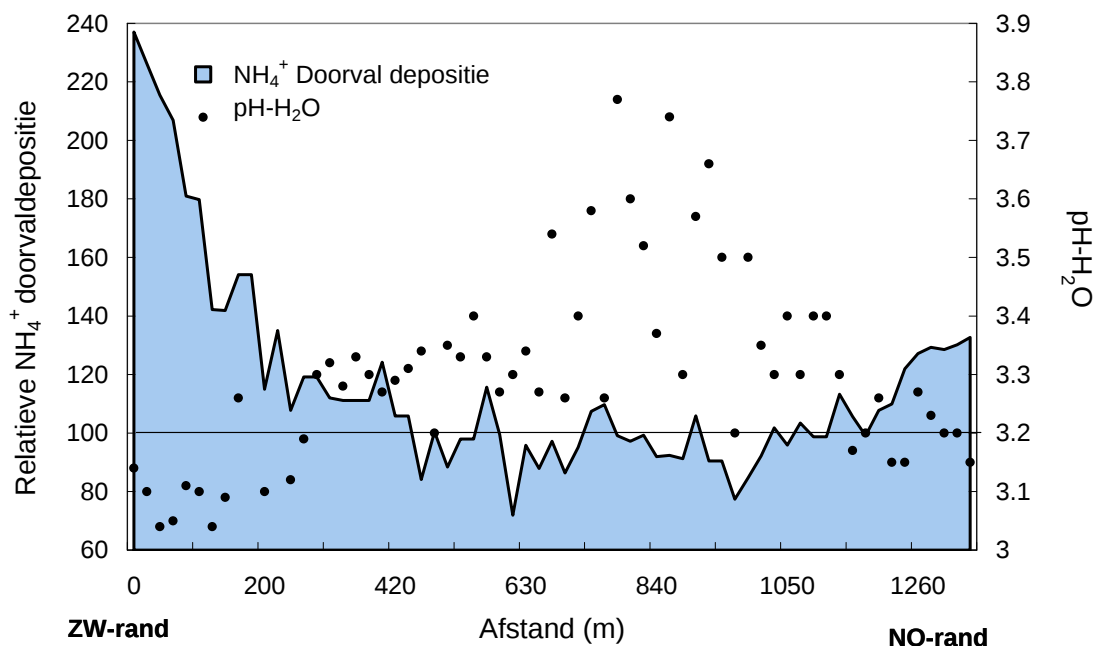
Zandbodems zijn erg kwetsbaar voor bodemverzuring door hun lage buffercapaciteit: door de lage kationenuitwisselingscapaciteit (zandbodems hebben een zeer laag klei- en humusgehalte) en de trage silicaatverwerking is het vermogen om de aangevoerde zuren te neutraliseren door uitwisseling met basische kationen beperkt. Uit metingen blijkt dat zandbodems onder bos de laatste 50 jaar sterk zijn verzuurd, met verzurende depositie als één van de belangrijkste oorzaken¹¹ (Figuur 4).

¹¹ De Schrijver, A., Mertens, J., Geudens, G., Staelens, J., Campforts, E., Luyssaert, S., De Temmerman, L., De Keersmaeker, L., De Neve, S. & Verheyen, K. 2006. Acidification of forested podzols in northern Belgium during the period 1950-2000. *Science of the Total Environment* 361, 189-195.



Figuur 4: Gemiddelde evolutie tussen 1950 en 2000 van de bodem-pH-KCl in de bodemhorizonten van podzolbodems onder bos

De relatie tussen verzurende depositie en bodemverzuring wordt geïllustreerd in Figuur 4. Langsheen een transect in een homogeen naaldbos van Corsicaanse den werd zowel de input van atmosferische depositie van ammonium-N en de bodemzuurtegraad opgemeten. In de ZW en NO bosrandzones werden hogere atmosferische deposities van ammonium-N ten gevolge van verhoogde turbulenties (zie ook verder §2.1.2) gereflecteerd in lagere bodem-pH's. In de bosrandzones bevond de bodem zich reeds in het ijzerbufferbereik, buiten de randzones in een iets minder vergevorderd stadium van bodemverzuring (het aluminiumbufferbereik).



Figuur 5: De relatie tussen atmosferische depositie van ammonium (NH_4^+) en de bodemzuurtegraad (bodem-pH) langs een transect in een homogeen naaldbos (Corsicaanse den) te Ravels. Aan de ZW bosrand, waar de depositie van ammonium hoger ligt, werd ook de hoogste bodemzuurtegraad opgemeten (laagste bodem-pH).

1.2.2 Eutrofiëring: definiëring van het concept stikstofverzadiging

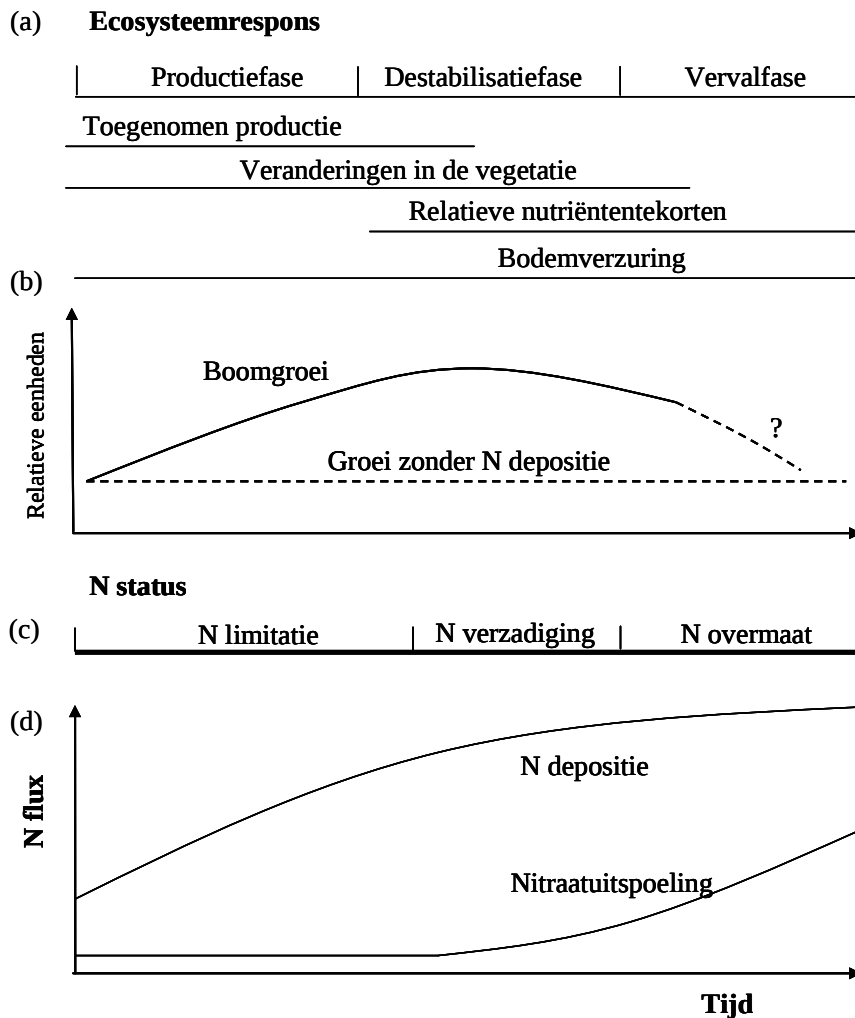
Gedurende de voorbije decennia evolueerden vele van nature stikstofgelimiteerde¹² bossen naar stikstofverzadigde ecosystemen. Oorspronkelijk was de stikstofcyclus van deze bossen gesloten: de input van stikstof via strooisel en deposities werd volledig geconsumeerd door de vegetatie en/of vastgelegd in de humuslaag van de bodem. De hoge input van stikstof via atmosferische deposities leidde tot een overaanbod aan stikstof waardoor de capaciteit van plant en bodem tot accumulatie van stikstof overschreden werd en de overmaat uitspoelt naar het grondwater of geëmitteerd wordt in gasvorm. Stikstofverzadiging impliceert dus een permanente verandering in het functioneren van de N-cyclus: een origineel stikstofgelimiteerd ecosysteem met een virtueel gesloten stikstofcyclus evolueert naar een open cyclus met beduidende verliezen van stikstof. Om van stikstofverzadiging te kunnen spreken, dient de uitspoeling van nitraat hoger te zijn dan de achtergrondwaarde van $5 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$ (wat overeenkomt met $307 \text{ eq} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$) en gedurende het ganse jaar op te treden.

¹² Een van nature gelimiteerd ecosysteem is arm aan stikstof. Stikstof is een beperkend voedingselement voor de groei.

Figuur 6 toont de verwachte evolutie van een boscossysteem onder invloed van atmosferische N-depositie en de potentiële effecten voor het boscossysteem. In een eerste fase zal de primaire productie toenemen tengevolge van het opheffen van de genoemde stikstoflimitatie. Planten en microbiota zullen zeer efficiënt de toegenomen N-beschikbaarheid benutten en de N vastleggen in de biomassa. In respons tot deze toegenomen N-beschikbaarheid stijgt de scheut/wortel verhouding van bomen, de bladoppervlakteindex (LAI) en de N-concentraties in de bladeren. Ten gevolge hiervan zal de fotosynthese toenemen en bijgevolg de boomgroei. De stikstof die in circulatie komt via de bladvalflux zal eveneens toenemen, wat gevolgen heeft voor de hoeveelheid N die op de bodem terecht komt en beschikbaar wordt voor mineralisatie en dus voor de planten en microbiota.

De interne circulatie van N versnelt dus door verschillende oorzaken: toename in de N-flux via bladval, netto mineralisatie en opname van N door planten en microbiota. De toegenomen N-beschikbaarheid heeft gevolgen voor de kruidachtige vegetatie die zal verschuiven naar meer nitrofiele soorten¹³. Andere essentiële nutriënten (P, K, Ca en Mg) of water kunnen limiterend worden voor de boomgroei. Het ecosysteem benadert het stadium van N-verzadiging op het moment dat de hoeveelheid N chronisch en in overmaat beschikbaar wordt en gevolgen heeft voor het ecosysteem. Hierbij horen verstoringen in de plantenvoeding, bodemverzuring door transformatieprocessen in de bodem en uitspoeling van nitraat naar het grondwater, samen met de basische kationen K^+ , Ca^{2+} en Mg^{2+} , en in een verder gevorderd stadium van bodemverzuring samen met aluminium. De input van atmosferische N-depositie veroorzaakt bijgevolg zowel verzuring als vermesting (N-verzadiging) van de bodem. Vermesting van de bodem veroorzaakt ook bodemverarming door het verlies aan basische kationen K^+ , Ca^{2+} en Mg^{2+} .

¹³ Nitrofiele soorten zijn 'stikstofminnend': het zijn soorten die een voorkeur vertonen voor stikstofrijke bodems.



Figuur 6: Veronderstelde respons van beheerde gematigde boscossystemen op toegenomen atmosferische stikstofdepositie: (a) ecosysteemrespons (relatieve tekorten duiden op water en andere nutriënten dan N), (b) relatieve veranderingen in groei, (c) N status en (d) relatie tussen input en output van N. De tijdsschaal (x-as) voor de respons is afhankelijk van het ecosysteemtype en regio en vertoont uiteraard een grote variabiliteit. Bron: ¹⁴

1.3 Effect van het bostype op bodemverzuring en eutrofiëring

Algemeen wordt van loofbomen verondersteld dat ze minder bijdragen aan bodemverzuring en eutrofiëring dan naaldbomen. De redenen hiervoor zijn dat loofbomen minder polluenten capteren uit de atmosfeer, meer stikstof opslaan in hun biomassa en nutriënten beter doen circuleren. Met andere

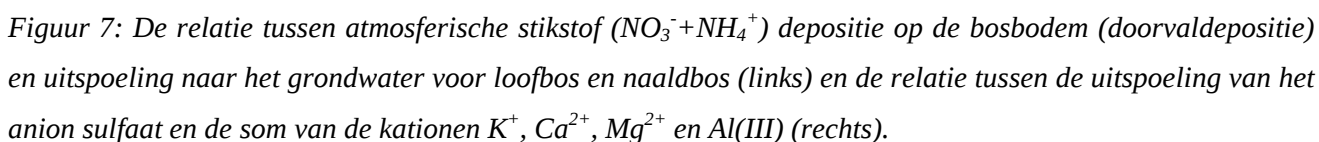
¹⁴ Gundersen, P., Schmidt, I.K., Raulund-Rasmussen, K. 2006. Leaching of nitrate from temperate forests – effects of air pollution and forest management. Environmental Reviews 14, 1-57.

woorden, zowel de input via depositie als de output via uitspoeling zijn theoretisch lager in loofboombestanden dan in naaldboombestanden.

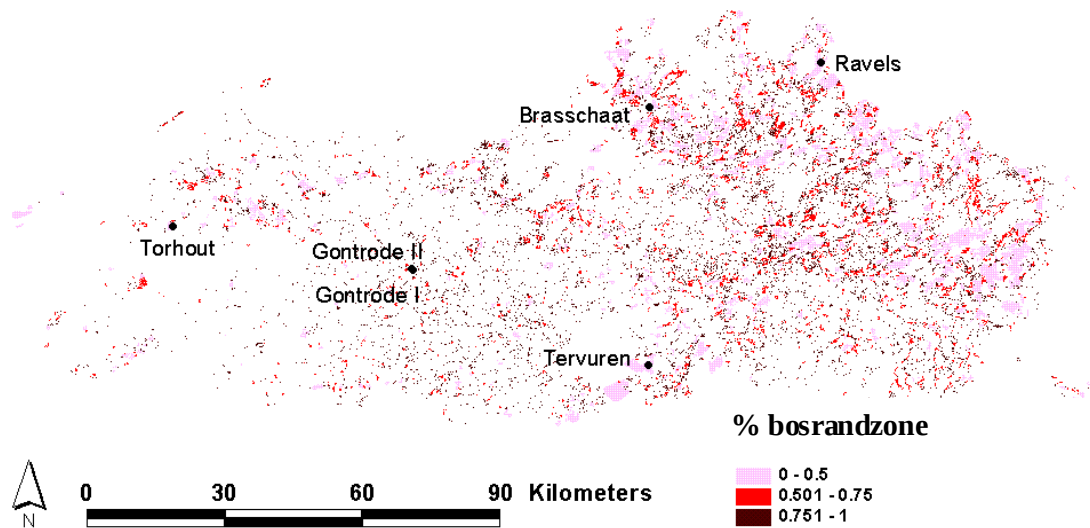
Literatuuronderzoek¹⁵ van vergelijkende studies tussen naald- en loofbestanden op gelijkaardige standplaatsen (dus met een zelfde bodemtype, landgebruiksgeschiedenis, afstand tot de bosrand, klimatologische omstandigheden) bevestigt dat naaldbossen jaarlijks grotere hoeveelheden stikstof en zwavel ontvangen via atmosferische depositie dan loofbossen. De gemiddelde depositie op de bosbodem (de doorvaldepositie) onder naaldboombestanden is voor ammonium, nitraat en sulfaat meer dan 1.7 keer hoger dan in loofboombestanden. Dit verschil tussen beide bostypes wordt voornamelijk veroorzaakt door een hogere droge depositie in de naaldboombestanden. Belangrijke oorzaken voor deze hogere droge depositie zijn de verschillen in vegetatiestructuur. Naaldbestanden hebben over het algemeen een hogere bladoppervlakte-index, boomhoogte, bestands- en kroondichtheid en houtvolume dan loofbestanden. Ook het wintergroene karakter van de naaldbestanden en de hogere efficiëntie van naalden in vergelijking met bladeren voor het opvangen van pollutanten zijn belangrijke factoren.

De hogere atmosferische input van anorganische stikstof ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) en sulfaat (SO_4^{2-}) onder naaldbos wordt gereflecteerd in een hogere uitspoeling van nitraat en sulfaat naar het grondwater. In stikstofverzadigde bosesystemen bestaat een duidelijk verband tussen de depositie van stikstof en de uitspoeling van nitraat: hoe hoger de input van stikstof naar de bosbodem via doorval, hoe hoger de uitspoeling van nitraat onder de wortelzone (Figuur 7). De hogere uitspoeling van de anionen sulfaat en nitraat gaat bovendien gepaard met een hogere uitspoeling van de basische kationen K^+ , Ca^{2+} en Mg^{2+} en aluminium $[\text{Al(III)}]$, wat bodemverzuring induceert.

¹⁵ De Schrijver, A., Geudens, G., Augusto, L., Staelens, J., Mertens, J., Wuyts, K., Gielis, L., Verheyen, K. 2007. The effect of forest type on throughfall deposition and seepage flux: a review. *Oecologia* 153, 663 – 674. Volledige tekst opgenomen in appendix 4.



berekenen door voor de externe 50 m als bosrand (i.e. de overgangen van bos naar open terrein) te beschouwen, dan blijkt 58% van het Vlaamse bosareaal bosrandzone te zijn¹⁶ (zie Figuur 8).



Figuur 8: Kaart van de bosoppervlakte in Vlaanderen met aanduiding van het aandeel bosrandzone van de verschillende bospercelen (Bron:¹⁶)

1.5 Potentie van bosomvorming als effectgeoriënteerde maatregel tegen bodemverzuring en eutrofiëring van bossen op zandgrond

1.5.1 Definitie van bosomvorming

Bosomvorming definiëren we in deze studie als het bosbouwkundige proces waarbij een naaldbos wordt omgevormd naar een bos waarin loofbomen domineren. Bij de omvorming van de ongeveer 45.000 ha homogene bestanden van grove en Corsicaanse den op de zandgronden in de Kempen en de Vlaamse zandstreek wordt de boomsoortenkeuze beperkt door de hoge zuurheid en het lage nutriëntengehalte van de bodem. Loofbomen die van nature op deze arme zandgronden thuishoren zijn inlandse eik en berk in de boomlaag, en lijsterbes en sporkehout in de struiklaag. Ook grove den hoort thuis op deze arme zandgronden, en zal dus deel blijven uitmaken van de boomlaag.

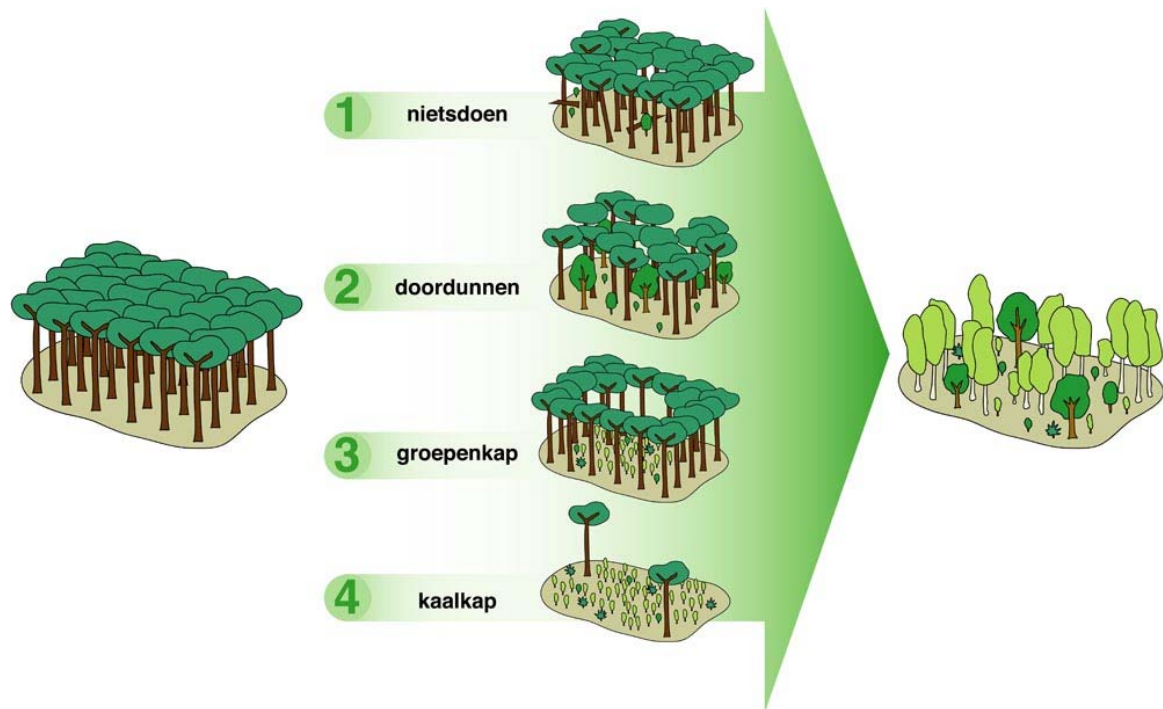
¹⁶ De Schrijver, A., Devlaeminck, R., Mertens, J., Wuyts, K., Hermy, M. & Verheyen, K. 2007. On the importance of incorporating forest edge deposition for evaluating exceedance of critical loads. *Applied Vegetation Science* 10, 293-298. Volledige tekst opgenomen in appendix 4.

1.5.2 Mogelijke scenario's voor bosomvorming

Om de omvorming van de homogene dennenbestanden naar meer gemengde bestanden te verwezenlijken, kan gebruik gemaakt worden van meerdere omvormingsscenario's. Vier omvormingsscenario's dienen zich hierbij aan, waarbij twee intermediaire omvormingsscenario's, nl. doordunnen en groepsgewijze verjonging, worden onderscheiden van twee extremere scenario's – niets doen en kaalkap. Deze vier omvormingsscenario's worden schematisch voorgesteld in Figuur 9. Belangrijke verschillen tussen de scenario's zijn het tempo waarmee het dennenaandeel vermindert ten gunste van de inheemse loofboomsoorten, de nodige planning en beheermaatregelen en de mogelijke houtopbrengst¹⁷.

In het minst beheerintensieve scenario, nl. 'niets doen' (scenario 1 in Figuur 9), blijft het percentage inheems loofhout lange tijd zeer beperkt aangezien dennen een trage zelfdunning kennen. Bovendien kunnen agressieve exoten als Amerikaanse vogelkers en Amerikaanse eik, die wel goed gedijen in donkere dennenbestanden, de vestiging van inheems loofhout verder verhinderen. Bij het meest ingrijpende scenario, de kaalkap (scenario 4 in Figuur 9), wordt het volledige gelijkjarig aangelegde bestand gekapt over een oppervlakte van 1 tot 5 ha. Kaalkap houdt gezien de zuurheid en de hoge stikstofstock in de bosbodems een mogelijks groot risico in voor verdere nitraatuitspoeling en verzuring. Het kappen van bomen induceert een verminderde opname door de bovengrondse vegetatie. Anderzijds verhoogt de hoeveelheid biobeschikbare nutriënten door versnelde mineralisatie van zowel het achtergelaten fijn takmateriaal als de aanwezige strooisellaag. In bodems met hoge kationenuitwisselingscapaciteit (CEC) zal een merendeel van de vrijgestelde kationen worden vastgelegd, terwijl nitraat, dat een zeer lage sorptiecapaciteit heeft, in grote hoeveelheden kan uitspoelen. De zandbodems onder studie hebben omwille van de lage CEC een lage capaciteit tot retentie van zowel basische kationen als nitraat. Na kaalkap wordt dus verwacht dat grote hoeveelheden nitraat en kationen uitspoelen naar het grondwater. Dit impliceert zowel vermesting als verzuring, tenzij de snelle vestiging van een kruidvegetatie de opname van nutriënten verhoogt en bijgevolg de uitspoeling vermindert.

¹⁷ Een meer uitgebreide uitleg over de technische aspecten van de omvormingsscenario's kan gevonden worden in de ANB-brochure 'Bosomvorming' en een themanummer van 'De Bosrevue' (opgenomen in appendix 1 en 2).



Figuur 9: Schematische voorstelling van de vier mogelijke scenario's voor bosomvorming (Figuur: Quinten Vanhellemont)

Om dit risico te beperken zijn meer voorzichtige omvormingsmethodes, waarbij het bosklimaat minder drastisch verandert, mogelijks meer aangewezen. Bij doordunnen (scenario 2 in Figuur 9) wordt het gebruikelijke beheer van dunning van een dennenbestand voortgezet. Het aantal bomen per ha blijft gestaag dalen en er komt licht en groeiruimte vrij voor een verjonging en onderetage. Na 15 tot 25 jaar kan een verjonging van inlandse eik, beuk en lijsterbes zich gevestigd hebben en kan het bovenscherm verwijderd worden. Bij groepenkap of groepsgewijze verjonging (scenario 3 in Figuur 9) worden in het dennenscherm groepen gekapt van uiteenlopende grootte. Het omringende bos heeft nog een belangrijke invloed op de gemaakte opening doordat het mee het klimaat regelt en boomzaad levert. Door de aanmaak van groepen te spreiden in tijd en ruimte wordt een verschuivende mozaïek van boomsoorten en ontwikkelingsstadia in het bos gecreëerd.

Merk op dat deze vier scenario's voor bosomvorming niet te strikt geïnterpreteerd moeten worden. Er zijn immers verschillende varianten en tussenvormen mogelijk, zoals bijvoorbeeld een schermkap. Dit is een meer doorgedreven vorm van het doordunscenario: via een sterke dunning wordt in één keer voldoende ruimte gecreëerd voor een verjonging onder een ijl bovenscherm, dat dan na 10 à 20 jaar wordt verwijderd.

1.5.3 Doelstelling van de onderzoeksopdracht

Door de hoge depositielast vormen bodemverzuring, stikstofverzadiging en dus nitraatuitspoeling naar het grondwater een reële bedreiging voor Vlaamse bosccosystemen. Vooral de bossen op zandbodems zijn erg kwetsbaar. Deze bossen worden sterk belast door de emissies uit intensieve veehouderijen, geconcentreerd in deze regio's, en hebben bovendien een lage capaciteit tot buffering van de zuurdeposities. Het hoge aandeel naaldbos enerzijds, en de versnipperde bosstructuur die voor een hoog aandeel aan bosrand zorgt anderzijds, versterken de pollutiedruk. De laatste decennia is de uitstoot van zwaveldioxide drastisch gedaald, maar de uitstoot van NO_x en NH_y door verkeer en landbouw blijft veel hoger dan de beleidsdoelstellingen. Emissiereducties die leiden tot deposities beneden de respectievelijke kritische lasten zullen nog meerdere decennia op zich laten wachten. Tegenover deze tijdsschaal lijkt bosomvorming een relevante en effectieve maatregel om de effecten van luchtverontreiniging te milderen. Het is de doelstelling van dit onderzoeksproject om na te gaan hoe en in welke mate de omvorming van de homogene naaldbossen op zandgrond de verzuring en eutrofiëringdruk kan verminderen.

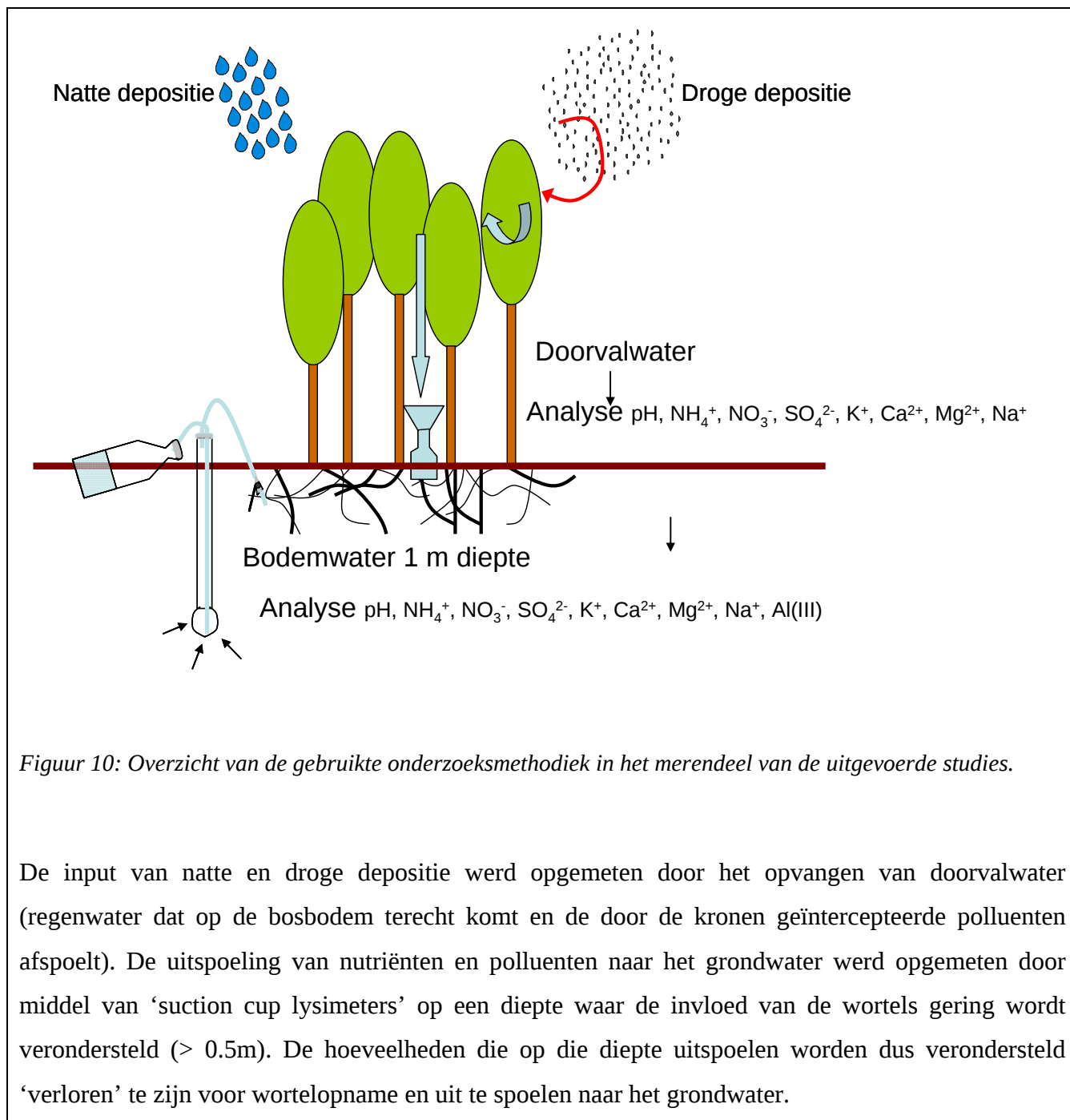
Om de potentie van bosomvorming als effectgeoriënteerde maatregel tegen bodemverzuring en eutrofiëring van bossen op zandgrond in te schatten, werden drie belangrijke thema's onderzocht: (1) de impact van het bostype, (2) de impact van het gekozen scenario voor bosomvorming en (3) het effect van de inrichting van de bosrand. Het eerste onderzoeksluik spitte zich toe op de kwantificering van de verschillen in depositie en uitspoeling tussen bestanden die overeenkomen met de beginsituatie voor bosomvorming enerzijds, en bestanden die overeenkomen met een doelsituatie voor bosomvorming anderzijds, en dit specifiek voor de Vlaamse situatie op zandgrond. Gezien het belangrijke aandeel bosranden binnen het Vlaamse bosareaal, werd het bostype-effect op de depositie zowel in boskernen als in bosranden onderzocht.

In het tweede onderzoeksluik werd de impact van beheeropties onderzocht ter mildering van de gevolgen van de hoge depositielast in Vlaanderen. De onderzochte beheeropties zijn de twee omvormingsscenario's groepenkap en schermkap en de aanleg van geleidelijk opgaande bosranden (met mantel- en zoomvegetatie).

1.5.4 Onderzoeksmethodiek

Het merendeel van de uitgevoerde studies maakt gebruik van een vrij eenvoudige methodiek ter kwantificering van (1) de input (afzetting) van atmosferische pollutanten in bosccosystemen via natte

en droge depositie en (2) de output (uitspoeling) van nutriënten/polluenten onder de wortelzone. Figuur 10 geeft een overzicht van de gebruikte onderzoeksmethodiek in het merendeel van de uitgevoerde studies. Uitgebreidere en gedetailleerde informatie is te vinden in de betreffende appendices.



2 Resultaten

2.1 Effect van het bostype op verzuring en eutrofiëring van bossen op zandgrond

2.1.1 Effect van het bostype op doorvaldepositie en uitspoeling in boskernen

Uit de reviewstudie vermeld in §1.3 werd op basis van een groot aantal internationale studies een duidelijk bostype-effect vastgesteld: de depositie van verzurende en vermestende deposities en de uitspoeling van nitraat, sulfaat, basische kationen en aluminium is significant hoger in naaldbos dan in loofbos.

Om na te gaan of dit bostype-effect ook opgaat voor de Vlaamse bossen op zandgrond, werden doorvaldepositie en uitspoeling opgemeten in boskernen (dus buiten de bosrandzone, minimum 50 m van de bosrand) in nabijgelegen bestanden van naaldbos (Corsicaanse den (*Pinus nigra* ssp. *laricio*, grove den (*Pinus sylvestris* L.)) versus loofbos (zomereik (*Quercus robur* L.) en ruwe berk (*Betula pendula* Roth)). Corsicaanse den en grove den zijn momenteel dominant aanwezig in de Kempense bossen en vormen dus de uitgangssituatie voor het omvormingsbeheer, terwijl zomereik en berk met lijsterbes en sporkehout in de onderetage een doelsituatie voorstellen.

De studies werden uitgevoerd in diverse naald- en loofbossen op zandbodem, zowel in West-Vlaanderen (Zedelgem, Jabbeke, Waregem), de Noorderkempen (Ravels, Merksplas) als de Limburgse Kempen (Vallei van de Zwarte Beek te Koersel). Op elke locatie werden nabijgelegen loof- en naaldbestanden geselecteerd van vergelijkbare leeftijd, op vergelijkbare bodem (zandbodem met vergelijkbare waterhuishouding), en met gelijke voorgeschiedenis en beheer. Uitgebreide informatie over de geselecteerde bestanden alsook over de proefopzet zijn te vinden in de appendices (zie de appendices A8 en A9). In de geselecteerde bestanden werd buiten invloed van de bosrand - een randzone van >50 m werd gemedan - de opstelling uit Figuur 10 geïnstalleerd. In de bestanden uit Tabel 2 werden doorvalcollectoren geplaatst ter kwantificatie van de input van atmosferische polluenten; in de bestanden uit Tabel 3 werden eveneens lysimeters geïnstalleerd ter kwantificatie van de uitspoeling van polluenten onder de wortelzone.

De resultaten van onze studies bevestigen de resultaten uit de voordien vermelde reviewstudie (zie §1.3). De input van verzurende en vermestende deposities via doorvalwater in naaldbos was in alle gevallen beduidend hoger dan in loofbos: gemiddeld lag de doorvaldepositie van stikstof zo'n twee

keer hoger onder naaldbos dan onder loofbos. De sulfaatdoorvaldepositie was gemiddeld 1.5 keer hoger in naaldbos dan in loofbos. De totale verzurende doorvaldepositie was 1.7 keer hoger onder naaldbos dan onder loofbos. De variabiliteit tussen de studies wordt veroorzaakt door de specifieke verschillen in o.a. boomhoogte, bestandsdichtheid en -volume, grondvlak en bladoppervlakte-index. In het geval van de studie uitgevoerd in de Hoogmoerheide te Merksplas bijvoorbeeld, waar de anorganische N depositie in het Corsicaanse dennenbestand meer dan drie keer hoger is dan in het nabijgelegen berkenbestand, zijn de verschillen in grondvlak ($16 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ in het berkenbestand versus $45 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ in het bestand van Corsicaanse den) en bestandvolume ($111 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in het berkenbestand versus $365 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in het bestand van Corsicaanse den) meer uitgesproken dan in de andere bestanden.

Tabel 2: Overzicht van de verhouding in doorvaldepositie tussen naald- en loofbestanden van ammonium (NH_4^+), nitraat (NO_3^-), sulfaat (SO_4^{2-}), stikstof (N; som van nitraat en ammonium) en verzurende polluenten (N+S; som van stikstof en sulfaat). In de kolom 'info' wordt verwezen naar de bijhorende appendix (A6, A7, A9 of A12) of voetnoot.

Locatie	Bostypes	NH_4^+	NO_3^-	SO_4^{2-}	N	N+S	Info
'Overheide', Domeinbos Ravels	Cors. den - berk	1,6	1,3	1,5	1,5	1,8	A7
'Tulderheide' & 'Overheide', Ravels	Cors. den - eik	1,7	1,6	1,1	1,7	1,4	A9
Zedelgem & Jabbeke	Cors. den - berk	1,7	1,5	1,1	1,7	1,5	A9
'Vallei van de Zwarte Beek', Koersel	grove den - berk/eik	1,7	1,5	1,4	1,6	1,6	A6
'Vallei van de Zwarte Beek', Koersel	Cors.den - berk/eik	1,9	1,6	1,4	1,8	1,6	A6
Zedelgem & Waregem	Cors. den - eik	1,9	1,4	1,2	1,8	1,5	A9
Domeinbos Ravels, Ravels	Cors. den - berk	2,1	1,7	1,7	2,0	1,9	A12
Domeinbos Ravels, Ravels	grove den - berk	2,4	2,2	1,8	2,3	2,1	A12
'Tulderheide', Ravels	Cors. den - berk	2,4	1,9	2,0	2,3	2,2	A9
'Hoogmoerheide', Merksplas	Cors. den - berk	3,8	2,4	-	3,5	-	¹⁸
Gemiddelde		2,1	1,7	1,5	2,0	1,7	

De hogere input van verzurende en vermestende polluenten via doorvalwater in naaldbos wordt gereflecteerd in een hogere uitspoeling van nitraat en sulfaat (Tabel 3). De hogere uitspoeling van de anionen nitraat en sulfaat onder naaldbos ging steeds gepaard met grotere verliezen van basische kationen en/of aluminium. De hogere uitspoeling van deze zuurbufferende kationen in naaldbos veroorzaakt een grotere daling van de buffercapaciteit van de bodem, wat resulteert in een hogere bodemverzuring in vergelijking met loofbos. Naast deze daling van de potentie tot buffering van zuur

¹⁸ De Schrijver, A., Nachtergale, L., Staelens, J., Luyssaert, S., De Keersmaeker, L. 2004. Comparison of throughfall and soil solution chemistry between a high density Corsican pine stand and a naturally regenerated silver birch stand. Environmental Pollution 131, 93 – 105.

komen grotere hoeveelheden aluminium en mangaan (niet bestudeerd in het kader van dit onderzoek) in oplossing en dus plantbeschikbaar in naaldbos. De verhoogde concentraties van deze kationen hebben een mogelijks toxische invloed op de vegetatie (zie ook verder § 3.1.1).

Tabel 3: Overzicht van de verhouding in uitspoeling tussen naald- en loofbestanden van nitraat (NO_3^-), sulfaat (SO_4^{2-}), $\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$, aluminium (Al(III)), basische kationen (BK; som van kalium, calcium en magnesium) en alle kationen ($\text{Al(III)} + \text{BK}$). In de kolom 'info' wordt verwezen naar de bijhorende appendix (A6, A7) of voetnoot.

Locatie	Bostypes	NO_3^-	SO_4^{2-}	$\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$	Al(III)	BK	$\text{Al(III)} + \text{BK}$	Info
'Zwarte Beek', Koersel	grove den -berk/eik	1,29	1,17	1,21	1,46	0,91	1,13	A6
'Overheide', Ravels	Cors. den - berk	2,10	1,34	1,70	1,32	0,72	1,13	A7
'Hoogmoerheide', Merksplas	Cors. den - berk	2,22			2,17	1,98	2,10	18
'Zwarte Beek', Koersel	Cors.den - berk/eik	6,61	2,09	3,64	2,72	1,50	1,98	A6
Gemiddelde		3,1	1,5	2,2	1,9	1,3	1,6	

2.1.2 Effect van het bostype op doorvaldepositie in bosranden

Om na te gaan of het hierboven beschreven bostype-effect in boskernen ook opgaat in bosranden voor de Vlaamse bossen op zandgrond, werd de doorvaldepositie (zoals beschreven in Figuur 10) opgemeten in bosranden. In elk bestand werd een transect aangelegd waarlangs op regelmatige afstand het doorvalwater werd opgevangen vanaf de rand tot meer dan 50 m van de bosrand (studie beschreven in Appendix A8¹⁹) en tot 128 m van de bosrand (studie beschreven in Appendix A9²⁰).

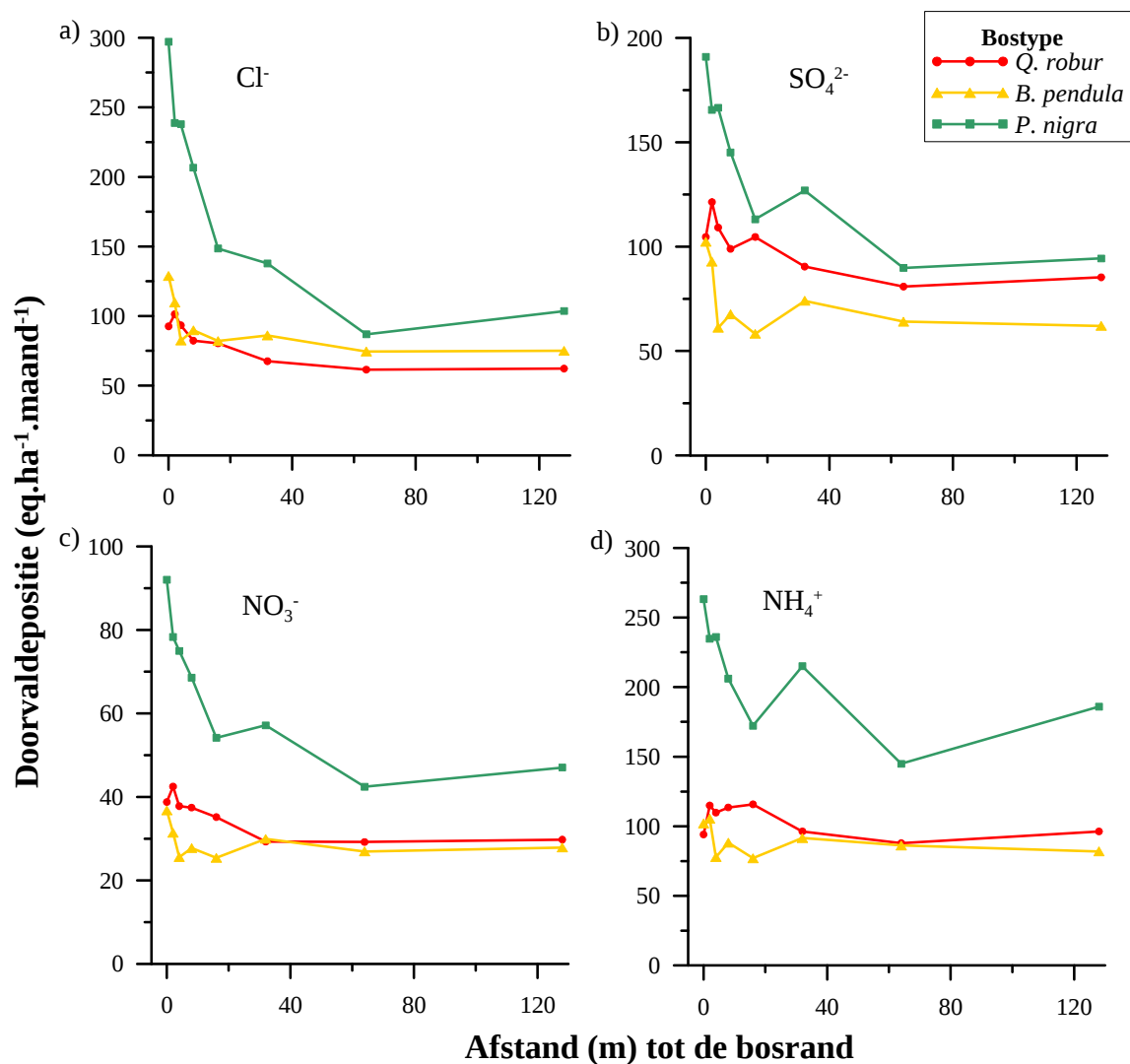
De studies werden uitgevoerd in vijf naald- en loofbossen op zandbodem, zowel in West-Vlaanderen (Zedelgem, Jabbeke, Waregem) als in de Noorderkempen (Ravels) (zie Tabel 4). Op elke locatie werden nabijgelegen loof- en naaldbestanden geselecteerd van vergelijkbare leeftijd, op vergelijkbare bodem (zandbodem met vergelijkbare vochttrap), en met gelijke voorgeschiedenis en beheer. Uitgebreide informatie over de geselecteerde bestanden alsook over de proefopzet zijn te vinden in de appendices (zie de verwijzingen in Tabel 4). De geselecteerde bestanden werden gedomineerd door één boomsoort (ruwe berk, zomereik of Corsicaanse/Oostenrijkse den). De rand van de bestanden

¹⁹ Wuyts, K., De Schrijver, A., Staelens, J., Gielis, L., Geudens, G., Verheyen, K. 2008. Patterns of throughfall deposition along a transect in forest edges of silver birch and Corsican pine. Canadian Journal of Forest Research 38(3), 449-461. Opgenomen in appendix A8

²⁰ Wuyts, K., De Schrijver, A., Staelens, J., Gielis, L., Vandenbruwane, J., Verheyen, K. Comparison of forest edge effects on throughfall deposition in different forest types. Ingediend bij Environmental Pollution. opgenomen in appendix A9

was een abrupte scherpe overgang tussen landbouwgrond en bos en waren zuid tot west georiënteerd, dus gedurende een belangrijke periode van het jaar beïnvloed door inkomende wind.

Voor de doorvaldeposities van ammonium, nitraat en sulfaat werden grotere randeffecten vastgesteld in de Corsicaanse dennenbestanden dan in de loofbestanden en dit in beide onderzochte studies (zie appendices A8 en A9). Deze grotere randeffecten werden veroorzaakt door enerzijds een grotere indringingsdiepte (dit is de afstand van de bosrand met verhoogde depositie t.g.v. randeffecten) en anderzijds een grotere toename van de doorvaldepositie aan de bosrand (Figuur 11, resultaat van studie A9). De randeffecten in de berkenbestanden hadden een kleinere indringingsdiepte dan in de eikenbestanden, maar vertoonden een grotere toename van de depositie aan de rand.



Figuur 11: Gemiddelde doorvaldepositie van Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻ en NH₄⁺ opgemeten langsheen transecten lopend van de bosrand (0 m) tot 128 m van de bosrand (Bron: ¹⁹).

Uit deze studies blijkt duidelijk dat ook in de bosrand het bostype een belangrijke impact heeft op de verzurende en vermestende doorvaldeposities. Om een totaalbeeld te krijgen van het randeffect in de onderzochte bostypes werd de geïntegreerde depositieverhogingsfactor²¹ berekend, die aangeeft hoeveel de depositie in een bosrandzone van 60 m diep is verhoogd. In de Corsicaanse dennenbestanden varieerde deze geïntegreerde depositieverhogingsfactor tussen 1,13 en 1,45 terwijl deze factor in de berken- of eikenbestanden een stuk lager lag en varieerde tussen 1,02 tot 1,14.

Dit grotere randeffect gaf in de bosrandzone van het Corsicaanse dennenbestand uit studie¹⁹ (appendix A8) aanleiding tot een extra input van stikstof en verzurende partikels/gassen die 12 en 9 keer hoger was dan in de bosrandzone van het aanpalende berkenbestand. In studie²⁰ (appendix A9) was de totale stikstofdepositie en verzurende doorvaldepositie veroorzaakt door randeffecten in de bosrandzone van het Corsicaanse dennenbestand gemiddeld 9,0 en 7,5 keer hoger dan bij eik en gemiddeld 9,8 en 6,3 keer hoger dan bij berk.

Het effect van het bostype op eutrofiërende en verzurende deposities blijkt dus nog sterker te zijn in de bosrand dan in de boskern, zoals ook blijkt uit Tabel 4. In de bosrand varieert de verhouding in doorvaldepositie in naald- en loofbestanden van 1,56 tot 3,44 terwijl deze in de boskernen varieert tussen 1,44 en 2,25.

Tabel 4: Overzicht van de verhouding in doorvaldepositietussen naald- en loofbestanden van stikstof (NH_4^+ + NO_3^-) en van stikstof + sulfaat (N+S), zowel in de bosrand als in de boskern. In de kolom 'info' wordt verwezen naar de bijhorende appendix (A8 of A9).

Locatie	Bostypes	Bosrand		Boskern		Info
		N	N+S	N	N+S	
Noorderkempen, Ravels	Cors. den - eik	1,7	1,6	1,7	1,4	A9
Noorderkempen, Ravels	Cors. den - berk	1,8	1,6	1,7	1,5	A9
Noorderkempen Ravels	Cors. den - berk	3,2	2,9	2,0	1,9	A8
West-Vlaanderen, Zedelgem & Waregem	Cors. den - eik	3,3	2,6	1,8	1,5	A9
West-Vlaanderen, Zedelgem	Cors. den - berk	3,4	3,1	2,3	2,2	A9
Gemiddelde		2,7	2,4	1,9	1,7	

²¹ De geïntegreerde depositieverhogingsfactor in de ganse bosrandzone integreert de twee parameters die een randeffect beschrijven, de indringsdiepte en de mate van verhoging in de bosrand in één parameter. Deze wordt berekend als de verhouding van de depositie die de bosrandzone ontvangt in aanwezigheid van het randeffect ten opzichte van de depositie die in dezelfde zone zou neervallen in afwezigheid van het randeffect (Wuyts et al., 2008, opgenomen in appendix A8).

De resultaten van de studies vermeld in Tabel 4 versterken bijgevolg de eerder vermelde hypothese dat de omvorming van Corsicaanse dennenplantages naar eiken-, berken- of gemengde loofbossen een belangrijke bijdrage kan leveren ter reductie van verzurende en eutrofiërende deposities. Deze omvorming van dennenplantages naar eiken/berkenbossen zou in de bosrandzone de extra stikstof en verzurende doorvaldepositie geïnduceerd door randeffecten verminderen met respectievelijk 90% en 85%. Bovendien geven deze studies duidelijk aan dat verschillen in doorvaldepositie tussen dennenbestanden enerzijds en berken- en eikenbestanden anderzijds duidelijk worden onderschat wanneer enkel rekening wordt gehouden met de doorvaldepositie in de interne boszone (zie §2.1.1).

2.1.3 Effect van het bostype op strooiselkwaliteit

Het bostype heeft, naast zijn invloed op droge depositie en uitspoeling naar het grondwater, een belangrijke invloed op de bodemkwaliteit via de chemische samenstelling van het strooisel. Algemeen wordt aangenomen dat loofbomen een betere strooiselkwaliteit hebben dan naaldbomen, en dat loofbomen daardoor een gunstiger effect hebben op de bodem.

Uit recent onderzoek²² is gebleken dat de calciumconcentraties in het strooisel een belangrijke rol spelen in de nutriëntencyclus. Boomsoorten met strooisel met hogere calciumconcentraties waren gerelateerd met een hogere abundantie en diversiteit in de regenwormpopulatie in de bodem, een lagere bodemzuurtegraad, een hoger uitwisselbaar calciumgehalte, een hogere basenverzadigingsgraad in de humuslaag en minerale bodem en een hogere afbraaksnelheid van de strooisellaag²². In deze studie, uitgevoerd in Polen op een iets rijkere lemige zandbodem dan in onze studies, werden hogere calciumconcentraties in het strooisel van *Betula pendula* en *Quercus robur* gereflecteerd in de beschreven positieve effecten, terwijl de lagere calciumconcentraties in het naaldstrooisel van grove den een duidelijk negatief effect hadden op de bodem. De resultaten van deze studie zijn in overeenstemming met bevindingen uit een vergelijkende studie van ruwe berk en Corsicaanse den in Vlaanderen²³. Het bestand van ruwe berk had in vergelijking met dat van Corsicaanse den hogere concentraties aan calcium in het bladstrooisel (zie Tabel 5), vertoonde snellere strooiselmineralisatie en had lagere koolstofconcentraties in de bosbodem.

²² Reich, PB., Oleksyn, J., Modrzyński, J., Mrozinski, P., Hobbie, SE., Eissenstat, DM., Chorover, J., Chadwick, OA., Hale, CM., Tjoelker, MG. 2005. Linking litter calcium, earthworms and soil properties: a common garden test with 14 tree species. *Ecology Letters* 8, 811-818.

Tabel 5: Karakteristieken van blad- en naaldstrooisel van berk en den (Bron:²³): stikstof (N), kalium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), lignine (L), hemicellulose (HC), cellulose (C), en L tot N verhouding..

	N (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	L (%)	HC (%)	C (%)	L/N
Ruwe berk	1,92	0,39	0,43	0,17	35,8	10,9	18,9	16,8
Corsicaanse den	1,23	0,14	0,24	0,05	34,3	13,1	18,1	26

2.1.4 Effect van de boomsoort op nutriëntenopname

Het bostype beïnvloedt niet alleen de strooiselkwaliteit, de doorvaldepositie en uitspoeling van elementen, maar heeft ook invloed op diverse andere processen binnen de nutriëntenkringloop, zoals de bodemtransformatieprocessen, de nutriëntenopname, en de retranslocatie van voedingsstoffen. De hogere uitspoeling van nitraat onder naaldbossen hangt samen met een hogere concentratie aan nitraat in de bodemoplossing, waarvoor meerdere factoren verantwoordelijk kunnen zijn. In de eerste plaats leidt de hogere doorvaldepositie in naaldbossen rechtstreeks tot meer nitraat en ammonium in de bodemoplossing. Ten tweede beïnvloedt het bostype ook de snelheid van de mineralisatie van bodemorganisch materiaal en van de omzetting van ammonium naar nitraat (de zogenaamde nitrificatie), wat verschillende hoeveelheden minerale bodemstikstof (ammonium en nitraat) kan veroorzaken. Ten derde kan ook de vorm en de hoeveelheid waarin stikstof wordt opgenomen door de boomwortels variëren naargelang het bostype en de boomsoort.

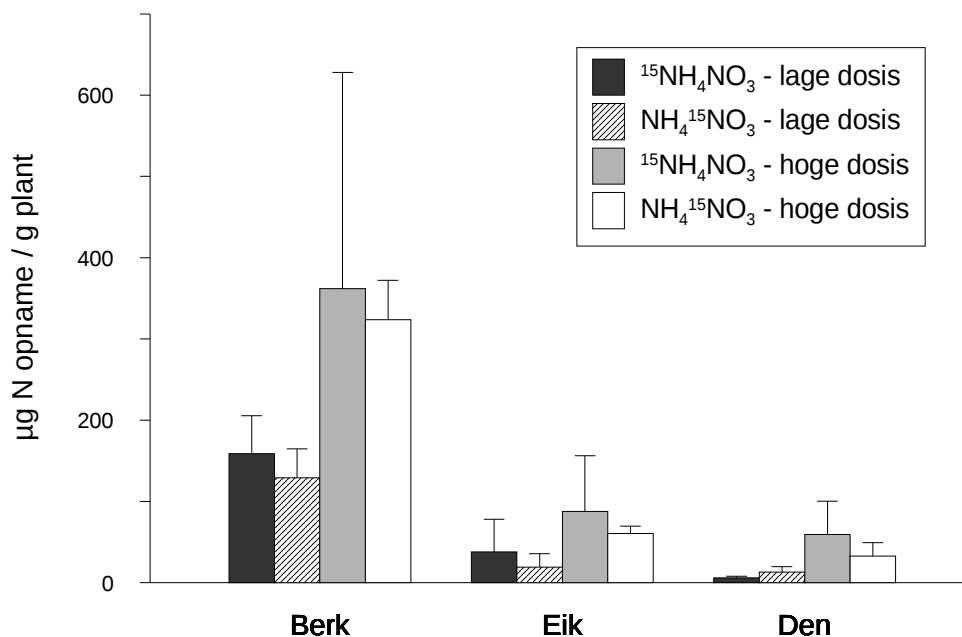
Wat de vorm betreft, nemen planten stikstof uit de bodem voornamelijk op als ammonium of nitraat, hoewel ook organische stikstof kan worden opgenomen. Diverse studies stelden voor naaldbomen een voorkeur vast voor ammonium boven nitraat als minerale stikstofbron. Voor loofbomen, daarentegen, suggereert de literatuur een betere aanpassing voor de opname van nitraat dan van ammonium. Wat de hoeveelheid opgenomen stikstof betreft, kan een onderscheid gemaakt worden tussen de totale opname tijdens een groeiseizoen, en de netto opgenomen hoeveelheid die vastgelegd wordt in de stam en de takken. Door het vaak hogere stikstofgehalte in bladeren dan in naalden is de totale stikstofopname algemeen hoger voor loofbos dan voor naaldbos. Ook de netto groeiopname van stikstof is vaak hoger voor loof- dan naaldbos, hoewel ook belangrijke verschillen bestaan tussen boomsoorten.

Een hogere opnamecapaciteit voor nitraat door loofbomen zou, zeker in combinatie met een hogere totale stikstofopname, kunnen bijdragen tot een lagere hoeveelheid nitraat in de bodem onder loof-

²³ De Schrijver, A. 2007. Acidification and eutrophication of forests on sandy soil: effects of forest type and deposition load, Ph.D.thesis, Ghent University, Belgium. 185p

bomen, en dus tot een lagere uitspoeling van nitraat onder de wortelzone van loofbos dan naaldbos. Om deze hypothese te testen voerden we een experiment uit waarin de wortelopname van ammonium en nitraat bepaald werd voor de boomsoorten grove den, ruwe berk en zomereik. Dit gebeurde omwille van praktische redenen voor zaailingen, geplant in afzonderlijke potten, die verdeeld werden in vier groepen met een verschillende behandeling, nl. twee dosissen van ^{15}N gelabelde nitraat en ammonium. Het gebruik van de stabiele stikstofisotoop ^{15}N liet toe om nauwkeurig de hoeveelheid opgenomen stikstof per plant te bepalen. Meer details over de werkwijze en verwerking is te vinden in appendix 10.

De hoeveelheid stikstofopname verschilde significant tussen de drie boomsoorten (Figuur 12): de opname per eenheid plantbiomassa door ruwe berk was groter dan de opname door zomereik of grove den, ongeacht de stikstofvorm of -dosis. De verwachte verschillen tussen de opname van nitraat en ammonium werden echter niet aangetoond: zowel de loofbomen (ruwe berk en zomereik) als de naaldboom (grove den) vertoonden een gelijkaardige ^{15}N opname van nitraat als van ammonium, zonder significante verschillen tussen de twee stikstofvormen. Hoewel de nutriëntenopname door jonge zaailingen niet rechtstreeks kan vertaald worden naar de totale opname door een volwassen bosbestand, blijkt hieruit dat grove den wel degelijk nitraat kan opnemen. Dit deelonderzoek suggereert met andere woorden dat de hogere nitraatuitspoeling onder grove den dan onder berk en eik niet te wijten is aan een lagere opname van nitraat door grove den.



Figuur 12: Totale opname van N per eenheid biomassa door zaailingen van ruwe berk, zomereik en grove den na toediening van een lage of drie maal hogere dosis ^{15}N -gelabelde ammonium (NH_4^+) of nitraat (NO_3^-) aan de bodem. De verticale lijnen tonen de standaardafwijking per groepsgemiddelde ($n = 4-6$ zaailingen).

2.2 Effect van het bosomvormingsscenario op verzuring en eutrofiëring van bossen op zandgrond

Gezien het duidelijke effect van het bostype op de doorvaldepositie en uitspoeling van verzurende en vermestende polluenten in zowel boskernen als bosranden (aangetoond in §2.1) lijkt de verhoging van het aandeel loofbestanden via een doordacht omvormingsbeheer een aangewezen effectgerichte maatregel ter mildering van verzuring en vermesting van bossen op zandgrond. Uit de hierboven beschreven studies kan afgeleid worden dat in de eindfase van omvorming, dus in volwassen loofboombestanden, de doorvaldepositie en de uitspoeling kleiner is dan in volwassen naaldboombestanden. Omvorming kan echter gerealiseerd worden via verschillende omvormingsscenario's (zie §1.5.2) en tot op heden was inzicht in het effect van het bosomvormingsscenario op de biogeochemische processen ontbrekend.

Hier beschrijven we het effect van twee mogelijke omvormingsscenario's op verschillende facetten van de biogeochemie: op doorvaldepositie en uitspoeling naar het grondwater (§2.2.1), op de kwaliteit van het strooisel (§2.2.2) en op biomassaproductie en nutriëntenopname (§2.2.3). De bestudeerde scenario's voor bosomvorming zijn groepenkap en schermkap 10 jaar na omvorming van een 70-jarig bestand van grove en Corsicaanse den.

Om na te gaan hoe de verzurings- en eutrofiëringsketens worden beïnvloed tijdens het bosomvormingsproces, werden in het Domeinbos Ravels metingen uitgevoerd in twee bestanden in omvorming en in een controlebestand van grove den. In het eerste bestand werd in 1992 een **schermkap** uitgevoerd door het stamtal van de dennen te halveren. De helft van dit bestand werd omheind, waardoor een natuurlijke verjonging van grove den tot stand kwam buiten de omheining en een gemengde natuurlijke verjonging van berk, grove den en lijsterbes binnen de omheining. Het overblijvende scherm werd verwijderd in september 2005. In het tweede bestand werd in 1995 een groep gekapt (**groepenkap**) met een diameter ongeveer gelijk aan drie keer de gemiddelde boomhoogte van de dennen. Het volledige bestand werd omheind en er ontwikkelde zich een gemengde natuurlijke verjonging met groepjes berk, grove den en verspreid daartussen lijsterbes.

2.2.1 Effect van het bosomvormingsscenario op doorvaldepositie en uitspoeling naar het grondwater

In elk van de bestanden werden telkens drie plots afgebakend, waarin zowel doorvalcollectoren als suction cup lysimeters (zie §1.5.4) werden geïnstalleerd. De drie controleplots (C) van grove den

simuleren de uitgangssituatie (het begin van het omvormingsproces). De 12 plots met verjonging simuleren een eerste fase van het omvormingsproces een tiental jaar na de start van de omvorming. De verjongingen onderscheiden zich van elkaar door het gevolgde omvormingsscenario en door de boomsoort in de verjonging: schermkap met verjonging van grove den (SD), schermkap met verjonging van berk (SB), groepenkap met verjonging van den (GD) en groepenkap met verjonging van berk (GB) (Tabel 6).

De doorvaldepositie en uitspoeling zijn 10 jaar na de start van het omvormingsproces reeds sterk gewijzigd ten opzichte van de oorspronkelijke situatie. Zowel de doorvaldepositie van eutrofiërende en verzurende polluenten als de uitspoeling van nitraat, basische kationen en aluminium is een stuk lager in de omvormingsscenario's dan in het controlebestand (Tabel 6). In de berkenverjonging in de schermkap (SB) onder scherm (jaar1) werd de laagste daling van de zuurdepositie vastgesteld (-11%). In de andere verjongingen (SD, GD en GB) daalde de zuurdepositie echter aanzienlijk ($\pm 65\%$ afname) in vergelijking met de uitgangssituatie. Na verwijdering van het bovenscherm in de schermkap (jaar 2) daalde de zuurinput eveneens aanzienlijk in de berkenverjonging in de schermkap (- 63%). Dezelfde trend werd vastgesteld voor de stikstofdepositie (zie Tabel 6). Gedurende het tweede meetjaar, dus na verwijdering van het bovenscherm in de schermkap, bedroeg de stikstofdepositie gemiddeld minder dan $16 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$, terwijl die in de uitgangssituatie ongeveer 20 kg hoger lag ($35 \text{ kg} \cdot \text{N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$).

		Uitgangssituatie	Omvorming via schermkap		Omvorming via groepenkap	
						
		Homogeen bestand van grove den, ±70 jaar	Verjonging grove den	Verjonging berk	Verjonging grove den	Verjonging berk
Code		C	SD	SB	GD	GB
Gemiddelde jaarlijkse hoogtegroei (m)			0.3	0.8	0.5	1.1
Gemiddelde jaarlijkse diametergroei (cm)			0.2	0.4	0.4	0.5
Gemiddelde verzurende depositie (eq.ha ⁻¹ .j ⁻¹)	Jaar1	5384 ± 491	2210 ± 200	4777 ± 626	1619 ± 53	1921 ± 75
	Jaar2	5226 ± 513	2127 ± 123	1953 ± 113	1541 ± 49	1996 ± 137
Gemiddelde stikstofdepositie (kg.ha ⁻¹ .j ⁻¹)	Jaar1	37.1 ± 4.4	14.8 ± 2.3	32.9 ± 7.5	11.5 ± 0.7	13.7 ± 0.6
	Jaar2	35.9 ± 4.6	15.6 ± 1.1	14.2 ± 1.2	10.7 ± 0.6	14.6 ± 1.5
Gemiddelde NO ₃ ⁻ -N uitspoeling (kg.ha ⁻¹ .j ⁻¹)	Jaar1	31.4 ± 24.4	4.2 ± 3.1	5.0 ± 6.6	0.2 ± 0.1	6.4 ± 2.4
	Jaar2	27.2 ± 10.6	3.8 ± 2.9	4.0 ± 4.7	1.1 ± 1.3	13.1 ± 8.2
Gemiddelde Ca ²⁺ uitspoeling (kg.ha ⁻¹ .j ⁻¹)	Jaar1	9.3 ± 10.9	2.6 ± 0.6	2.4 ± 1.3	5.4 ± 3.1	11.1 ± 2.3
	Jaar2	4.8 ± 4.3	2.3 ± 0.9	0.6 ± 0.1	4.6 ± 2.5	10.6 ± 6.0
Gemiddelde Al (III) uitspoeling (kg.ha ⁻¹ .j ⁻¹)	Jaar1	29.2±10.6	11.5 ±3.1	16.3 ±2.3	7.3 ± 1.3	7.6 ± 0.4
	Jaar2	26.9±2.3	11.1 ±1.7	11.1 ±3.4	8.4 ± 2.0	7.3 ± 1.5

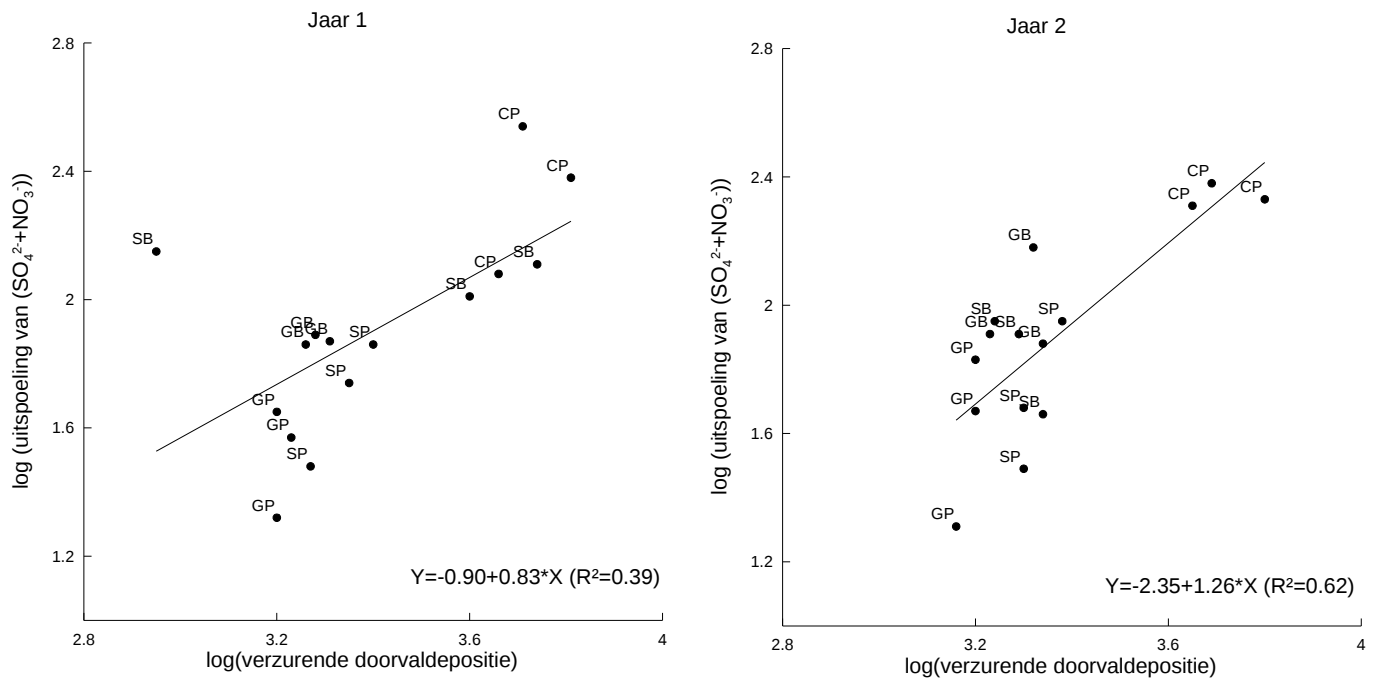
Tabel 6: Overzicht van de bestudeerde bestanden en gemiddelde doorvaldepositie van verzurende pollenten en stikstof, gemiddelde uitspoeling van nitraat-N, calcium (Ca²⁺) en aluminium (Al(III)). In Jaar2 werd in de schermkap het bovenscherm van grove den verwijderd (Bron: ²⁴).

²⁴ Gielis, L., De Schrijver, A., Wuyts, K., Staelens, J., Vandenbruwane, J., Verheyen, K. Comparison of nutrient cycling in two continuous cover scenarios for forest conversion of pine plantations on sandy soil. II. Throughfall deposition and seepage flux in regeneration stands of silver birch and Scots pine. Ingediend bij Canadian Journal of Forest Research – Volledige tekst opgenomen in Appendix 12.

Voor de verwijdering van het bovenscherm in de schermkap was de doorvaldepositie van stikstof en verzurende partikels duidelijk hoger in de schermkap dan in de groepenkap (zie Tabel 6: data jaar 1). Dit werd veroorzaakt door de aanwezigheid van het 20 m hoge bovenscherm van grove en Corsicaanse den. De doorvaldepositie was hoger in de berkenverjonging onder scherm omdat het bovenscherm hier ook denser was (200 versus 116 overstaanders ha⁻¹ boven de verjonging van berk en den respectievelijk). Deze hogere stamdichtheid, en bijgevolg ook hogere kroondichtheid en bladoppervlakteindex (LAI), van de overstaanders veroorzaakten een hogere droge depositie van verzurende en eutrofiërende polluenten in de verjongingsproefvlakken van berk onder scherm (SB). Na de kapping van het bovenscherm (zie data van jaar 2) was de doorvaldepositie in de verjonging van berk in de schermkap zeer vergelijkbaar met deze in de groepenkap.

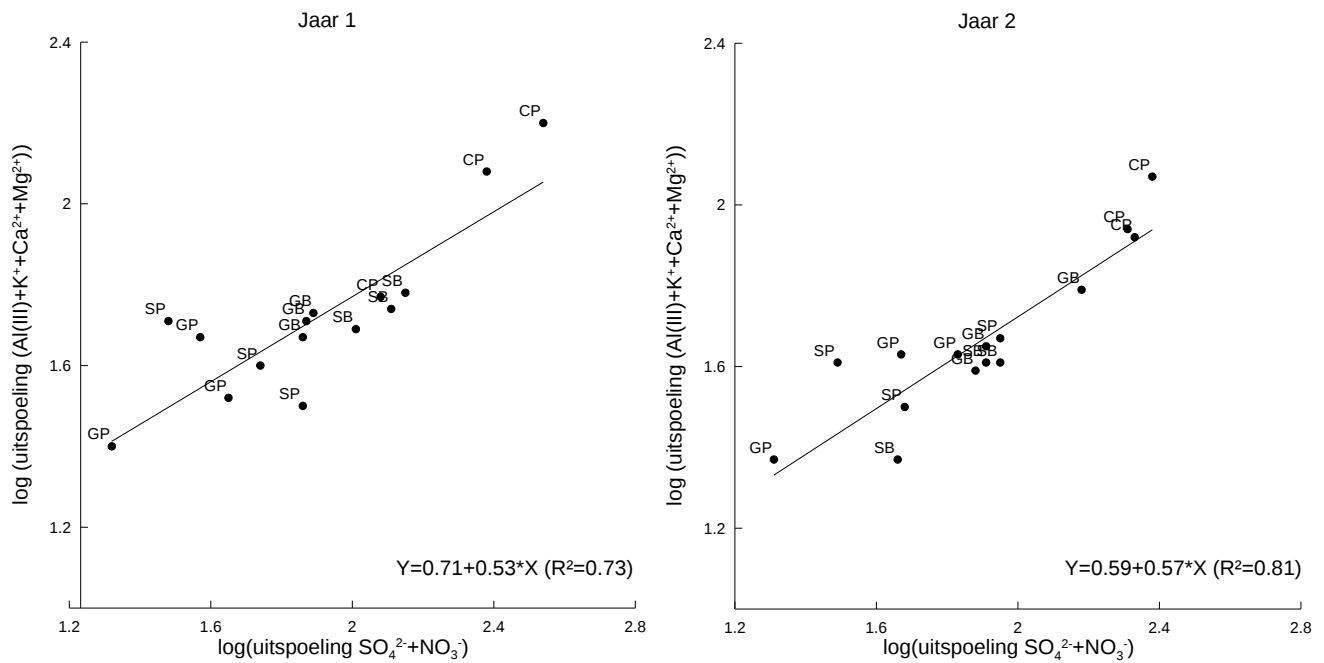
De doorvaldepositie van stikstof en verzurende partikels in de verjongingsproefvlakken blijkt gemiddeld lager te zijn bij den dan bij berk. Deze vaststelling is in contradictie met onze bevindingen beschreven in §2.1: in **volwassen** bestanden van vergelijkbare leeftijd ligt de doorvaldepositie beduidend hoger onder naaldbos dan onder loofbos. In deze oudere bestanden is gemiddeld gezien de boomhoogte, de bladoppervlakte index (LAI), de bestands- en kroondichtheid en het bestandsvolume (allemaal factoren die van invloed zijn op de droge depositie) hoger in naaldbos dan in loofbos. In de bestudeerde verjongingsproefvlakken, momenteel in het dichtwasstadium van de bestandsontwikkeling, waren de gemiddelde boomhoogte en de jaarlijkse gemiddelde hoogte- en diametergroei significant hoger bij berk dan bij den (zie ook Tabel 6). De gemiddelde boomhoogte van de berkenverjonging was 8.4 en 8.6 m in de scherm- en groepenkap, terwijl deze bij de verjongingen van den slechts 2.8 m bedroeg in de schermkap en 4.0 m in de groepenkap.

Figuur 13 toont de relatie tussen de input van verzurende partikels en de uitspoeling van nitraat en sulfaat en dit tijdens de twee meetjaren. Hieruit kan besloten worden dat **een daling van verzurende doorvaldepositie snel resulteert in een daling in uitspoeling van polluenten naar het grondwater.**



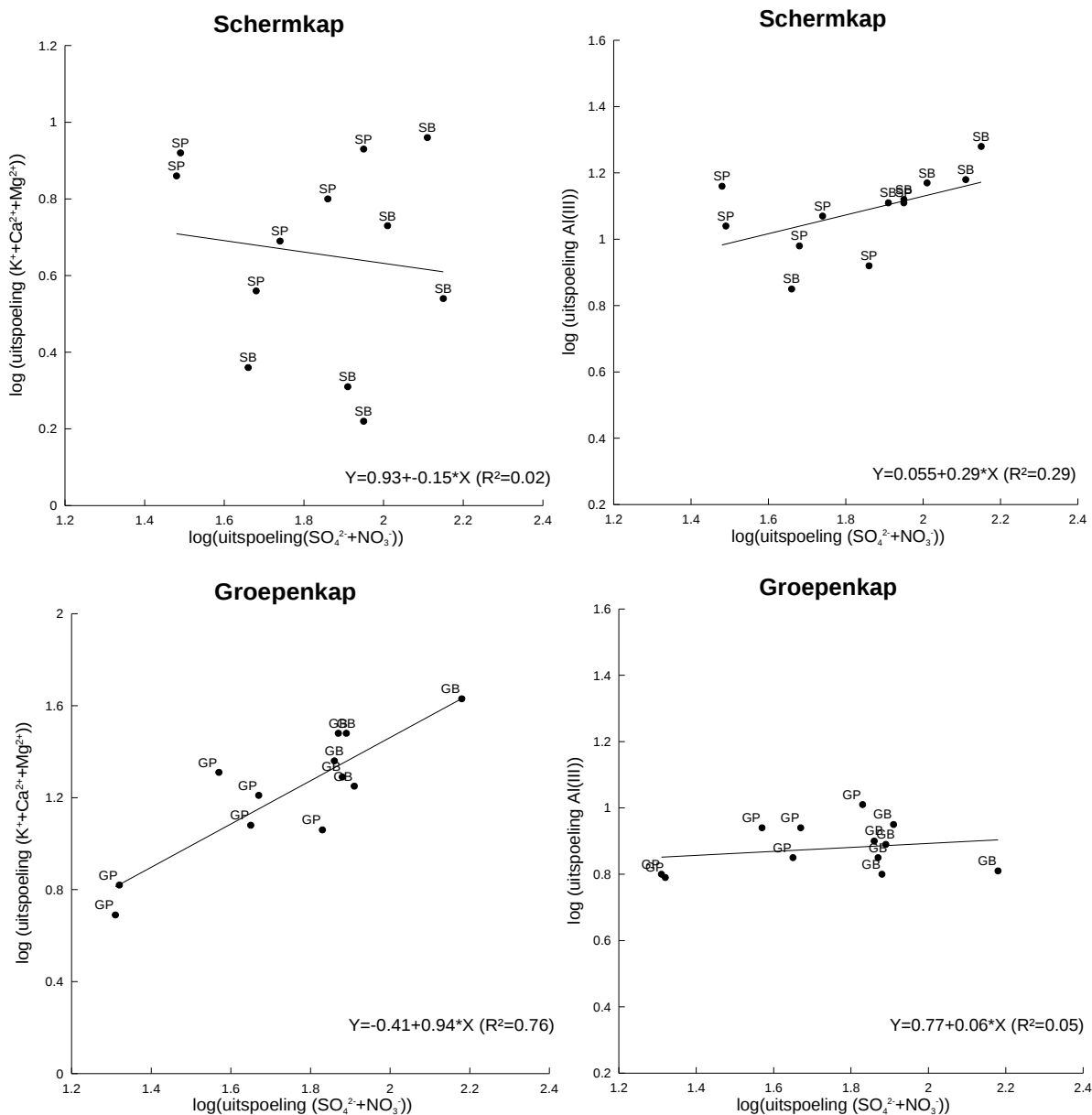
Figuur 13: Relatie tussen de input van verzurende partikels via doorvalwater en de uitspoeling naar het grondwater van de anionen sulfaat en nitraat.

De uitspoeling van anionen was bijgevolg beduidend lager in de bestanden in omvorming dan in het controlebestand. De uitspoeling van sulfaat, nitraat en chloride daalde gedurende het eerste en het tweede meetjaar gemiddeld met ongeveer 80% en 73%. Ook de uitspoeling van basische kationen en aluminium was een stuk lager in de omvormingsscenario's in vergelijking met het controlebestand (zie Tabel 6 en ²⁴). **Een daling in uitspoeling van anionen resulteert eveneens in een daling van de uitspoeling van basische kationen en aluminium (zie Figuur 14), met andere woorden in een minder groot verlies aan zuurbufferende kationen (bodemerarming) en een minder grote verontreiniging van het grondwater met aluminium.**



Figuur 14: Relatie tussen de uitspoeling van anionen ($\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$) en van de kationen (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al(III))

De uitspoeling van anionen gaat dus gepaard met de uitspoeling van kationen. Uit onze studie blijkt dat welke kationen uitspoelen afhankelijk is van het bosvormingssceario. De uitspoeling van de anionen sulfaat en nitraat was in de schermkap significant gecorreleerd met de uitspoeling van het zure kation aluminium, terwijl in de groepenkap een significante correlatie bestaat met de som van de basische kationen K^+ , Ca^{2+} en Mg^{2+} (Figuur 15). Zowel in de schermkap als in de groepenkap is de bodem echter sterk verzuurd en in het aluminiumbufferbereik (zie ook Figuur 3). De reden waarom in de groepenkap echter voornamelijk basische kationen uitspoelden en niet aluminium is wellicht een grotere vrijstelling van basische kationen ten gevolge van de betere en snellere mineralisatie van de strooisellaag. In de groepenkap circuleerden grotere hoeveelheden van de basische kationen K^+ , Ca^{2+} en Mg^{2+} via het strooisel dan in de schermkap (zie ook §2.2.2). Deze betere circulatie, wat in principe positief kan zijn ter remediëring van de hoge zuurtegraad van de bodem, maakt echter dat in de groepenkap een sterk en wellicht onherstelbaar verlies optreedt van kationen door uitspoeling als ‘counterion’ van nitraat en sulfaat naar het grondwater.

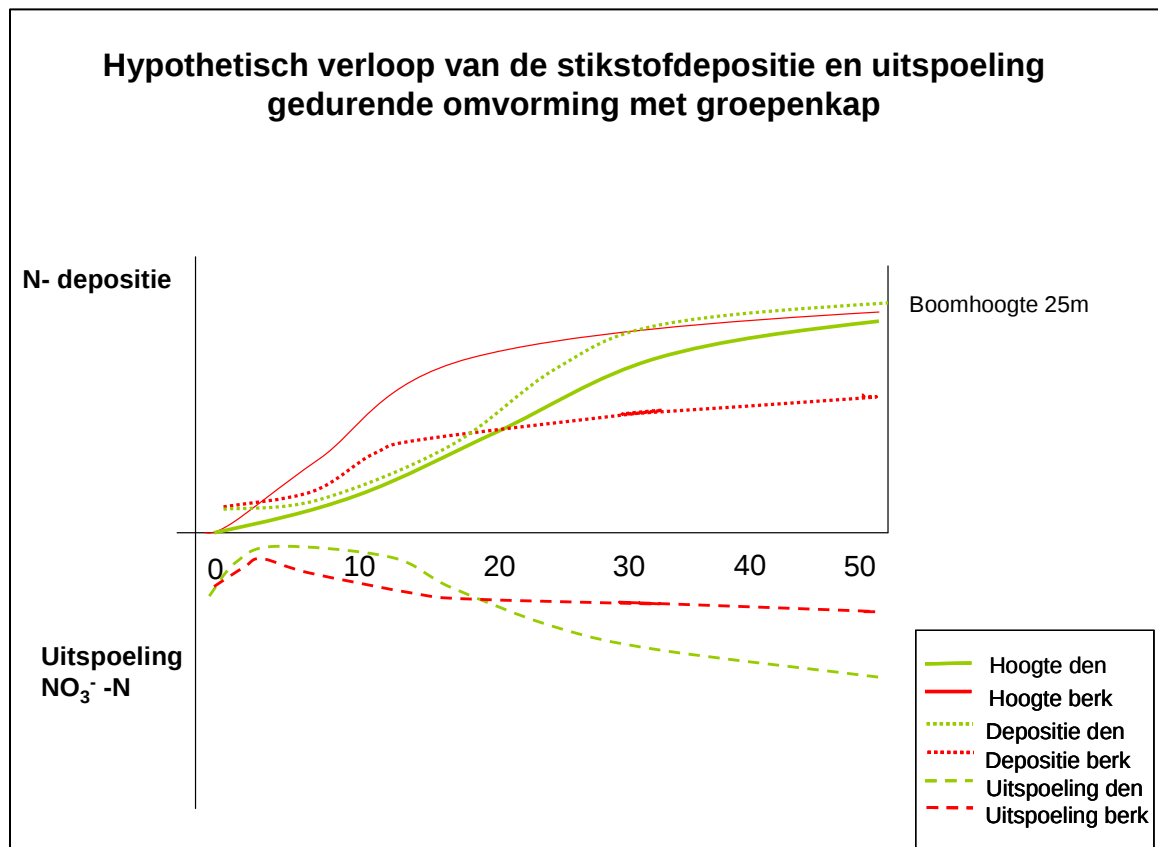


Figuur 15: Uitspoeling van de anionen sulfaat en nitraat in relatie tot uitspoeling van basische kationen (linkse figuren) en aluminium (rechtse figuren) in de schermkap (figuren bovenaan) en de groepenkap (figuren onderaan)

Prospectie:

Het effect van het omvormingsscenario en het bostype op de doorvaldepositie en uitspoeling naar het grondwater verandert met de tijd. Zoals reeds voordien aangehaald spelen zowel boomhoogte, bestandsdichtheid en bladoppervlakteindex een belangrijke rol in de hoeveelheden droge depositie die door een bestand worden geïmporteerd. De doorvaldepositie en de opname door de vegetatie spelen dan weer een belangrijke rol in de hoeveelheden nutriënten en polluenten die uitspoelen naar het grondwater. In onderstaande figuren geven we een hypothetisch verloop van de evolutie in de tijd van

zowel doorvaldepositie en uitspoeling onder de wortelzone en dit gedurende 50 jaar na de start van bosomvorming. Dit verloop schetsen we voor het specifieke geval van stikstofdepositie en uitspoeling van nitraat-N naar het grondwater en dit voor zowel het omvormingsscenario van groepenkap (Figuur 16) als van schermkap (Figuur 17) en voor de beide bestudeerde bostypes homogeen den en homogeen berk.



Figuur 16: Hypothetisch verloop van de stikstofdepositie en uitspoeling van nitraat-N naar het grondwater gedurende omvorming met groepenkap.

Na het kappen van een groep (van bv. 0,5 ha) in een homogeen dennenbestand (boomhoogte van bv. 25 m) daalt de stikstofdepositie zeer sterk omdat de droge depositie wegvalt: er zijn geen boomkronen meer die polluenten kunnen capteren uit de atmosfeer. De hoeveelheid stikstof die de bosbodem op dit moment bereikt wordt op dit moment enkel aangevoerd via natte depositie, dus via inkomende neerslag. Gedurende de eerste jaren na de kapping is het mogelijk dat door versnelde mineralisatie van de strooisellaag en achtergebleven takken een piek is waar te nemen in de uitspoeling van o.a. nitraat-N. De grootte van deze piek zal sterk afhangen van de snelheid waarmee de vegetatie zich (spontaan) hervestigt. In het geval van snelle kolonisatie door pionierboomsoorten

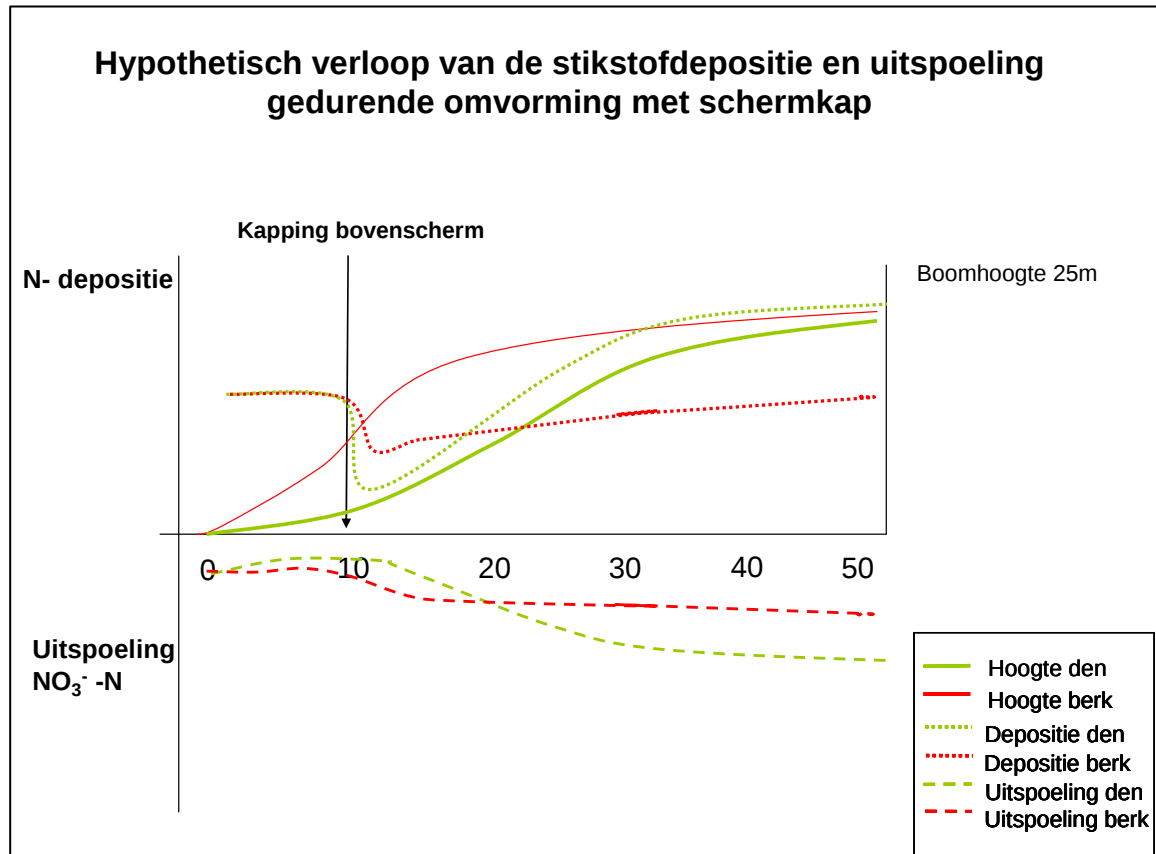
of kruidachtigen zal deze piek beperkt blijven. Omdat zandbodems maar een beperkte capaciteit hebben tot vastlegging van o.a. nitraat-N is het te verwachten dat na kapping wel degelijk een verhoogde nitraat-N uitspoeling zal plaatsvinden.

Wanneer bomen groeien en een zekere boomhoogte bereiken, stijgt hun vermogen tot captatie van droge depositie. Omdat berk sneller groeit dan den (meer dan dubbele jaarlijkse hoogtegroeï) ligt de doorvaldepositie gedurende de eerste 15 tot 20 jaar hoger in de jong- en dichtwas van berk dan van den. Deze hogere depositie reflecteert zich ook in een hogere uitspoeling van nitraat-N naar het grondwater onder berk.

De doorvaldepositie (en bijgevolg ook de uitspoeling) in de berkenverjongingen zal nog toenemen met toenemende hoogtegroeï, maar zal vrij snel stagneren op een niveau vergelijkbaar met dat van het volwassen berkenbestand. Voor de dennen valt te verwachten dat, samen met de hoogtegroeï, nog een aanzienlijk toename in depositie (en uitspoeling) zal plaatsvinden gedurende de jaren na de dichtwasfase. De boomhoogte en ook de bladoppervlakteindex (LAI) blijven immers gestaag toenemen en het effect van het immergroen zijn wordt dus steeds groter. Vanaf ongeveer 15 à 20 jaar wordt verwacht dat de doorvaldepositie van stikstof, en ook de uitspoeling van nitraat-N naar het grondwater, hoger zal zijn onder den dan onder berk.

Na een sterke dunning (schermkap) van een homogeen dennenbestand (met boomhoogte van vb. 25m) daalt de stikstofdepositie omdat de droge depositie vermindert ten gevolge van een daling van de bladoppervlakteindex (Figuur 17). Ondertussen vestigen zich onder het gelichte bovenscherm zaailingen van den en berk. De uitspoeling van nitraat-N naar het grondwater vertoont geen initiële piek zoals bij de groepenkap omdat het microklimaat van het bos minder drastisch werd gewijzigd en ook de afbraak van organisch materiaal wellicht minder snel verloopt. Anderzijds vermindert de uitspoeling van nitraat-N t.o.v. de uitgangssituatie omdat de doorvaldeposities van stikstof verminderen en bovendien de verjonging N opneemt.

Na kapping van het resterende bovenscherm valt de captatie van droge depositie door dit bovenscherm volledig weg en vermindert dus de aanvoer van stikstof via het doorvalwater. De berken zullen, net als in het geval van een groepenkap (Figuur 16), sneller groeien en dus zal gedurende de eerste 15 à 20 jaar de doorvaldepositie hoger zijn in de berkenverjonging. Deze hogere depositie zal zich ook reflecteren in een hogere uitspoeling van nitraat-N naar het grondwater onder berk. Vanaf dit moment is de evolutie in doorvaldepositie en uitspoeling vergelijkbaar met deze in de groepenkap. Na zo'n 15 à 20 jaar wordt verwacht dat de doorvaldepositie van stikstof, en ook de uitspoeling van nitraat-N naar het grondwater, hoger zal zijn onder den dan onder berk.



Figuur 17: Hypothetisch verloop van de stikstofdepositie en uitspoeling van nitraat-N naar het grondwater gedurende omvorming met schermkap.

2.2.2 Effect van het bosomvormingsscenario op strooiselkwaliteit

In §2.1.3 werd kort beschreven dat het bostype (de boomsoort) een belangrijke rol speelt in het circuleren van nutriënten via strooisel en de significante impact hiervan op de bodem. Uit onze studie bleek bovendien dat ook het gekozen bosomvormingsscenario een belangrijke invloed heeft op het circuleren van nutriënten via bladval. In Tabel 7 worden de fluxen via strooiselval gegeven voor de nutriënten stikstof (N), fosfor (P), kalium (K), calcium (Ca) en magnesium (Mg) in de verjongingen van den en berk in de beide bestudeerde scenario's voor bosomvorming. Uit onze analyse blijkt dat de circulatie van de nutriënten N, P, K en Mg via strooisel significant hoger is in beide verjongingen van berk dan in de verjongingen van den, wat de resultaten bevestigt uit §2.3.1. De strooiselflux van Ca echter, is significant hoger in de groepenkap in vergelijking met de schermkap, ongeacht de boomsoort. Voor de berkenverjonging is de P en Mg strooiselflux eveneens hoger in de groepenkap in vergelijking met de schermkap. We veronderstellen dat de significante verschillen in de fluxen van Ca, Mg en P via strooiselval tussen de schermkap en de groepenkap kunnen veroorzaakt zijn door

verschillen in mineralisatie van de strooisellaag ten gevolge van verschillen in microklimaat. In de groepenkap is de mineralisatiesnelheid mogelijks groter omwille van hogere bodemtemperaturen ten gevolge van een betere lichtpenetratie in vergelijking met de schermkap. Bovendien kan de betere mineralisatie van de strooisellaag veroorzaakt zijn door de hogere Ca- concentraties in het strooisel van de berken en dennen in de groepenkap in vergelijking met de schermkap (zie ook §2.3.1).

2.2.3 Effect van het bosomvormingsscenario op biomassaproductie en nutriëntenopname

De gemiddelde jaarlijkse vastlegging van de nutriënten stikstof, fosfor en de basische kationen kalium, calcium en magnesium in de bovengrondse biomassa was het laagste in de dennenverjonging onder scherm (SD) (zie Tabel 7), wat een gevolg was van de lagere biomassaproductie. De jaarlijkse vastlegging van stikstof was sterk vergelijkbaar in de drie andere verjongingen, maar gebeurde voor de dennen hoofdzakelijk in de takken en bij de berken in de stammen. Opmerkelijk is dat de vastlegging van basische kationen in de bovengrondse biomassa voor zowel de berken als de dennen groter was in de groepenkap dan in de schermkap.

De gemiddelde jaarlijkse wortelopname van stikstof, fosfor en kalium (Tabel 7) werd voornamelijk beïnvloed door de boomsoort, en was zowel voor de schermkap als de groepenkap groter bij berk dan bij den. De gemiddelde jaarlijkse wortelopname van calcium werd echter voornamelijk beïnvloed door het omvormingsscenario en was zowel voor berk als voor den hoger in de groepenkap dan in de schermkap. De jaarlijkse wortelopname van magnesium lag enkel voor de berkenverjonging significant hoger in de groepenkap. Ook de hogere opname van basische kationen in de groepenkap is wellicht een gevolg van de hogere biobeschikbaarheid ten gevolge van een betere mineralisatie (zie §2.2.2).

	N				P				K			
	SP	SB	GP	GB	SP	SB	GP	GB	SP	SB	GP	GB
VOORRAAD ($kg.ha^{-1}$)												
Bovengrondse biomassa	190±56a	171±25a	345±69b	171±3a	15±5a	12±2a	33±7b	16±0a	51±15a	48±7a	97±19b	52±1a
Humuslaag	1325±259a	1738±512a	1327±556a	1400±143a	46±7a	60±10a	52±21a	53±5a	24±1a	45±1b	29±9a	38±8ab
Minerale bodem (0-50 cm)	5194±1254b	4040±481ab	3317±207a	3499±646a	15±3.1ab	13.2±2.9a	45.5±15.4c	36.3±12.3bc	53.9±12.5b	48.1±6.7ab	32.7±2.0a	37.3±5.7ab
FLUXEN ($kg.ha^{-1}.yr^{-1}$)												
Immobilizatie stammen	3.0±0.8a	9.8±1.3b	8.1±1.5b	12.2±1.2c	0.2±0.1a	0.7±0.1b	0.8±0.2b	1.2±0.1c	0.7±0.2a	3.0±0.4c	2.2±0.4b	4.1±0.4d
Immobilizatie takken	4.9±1.5a	5.6±0.9a	11.3±2.2b	7.6a±0.5a	0.4±0.1a	0.4±0.1a	1.0±0.2c	0.7±0.1b	1.0±0.3a	1.3±0.2a	2.6±0.5c	2.0±0.2b
Immobilizatie stam+tak	8.0±2.3a	15.4±2.2b	19.4±3.7b	19.7±1.6b	0.6±0.2a	1.1±0.2b	1.8±0.4c	1.9±0.2c	1.7±0.5a	4.4±0.6b	4.7±0.9b	6.0±0.6c
Bladval	24.7±3.1a	39.1±3.7b	22.9±3.7a	49.6±5.9b	1.0±0.2a	1.5±0.2b	1.2±0.2a	2.7±0.3c	1.9±0.3a	8.0±0.3c	1.9±0.3a	6.5±0.5b
Kroonuitwisseling	-4.3±1.4ab	-2.7±0.9a	-6.2±1.1b	-5.0±1.8ab	-	-	-	-	6.9±0.7a	6.4±1.6a	6.1±1.0a	6.0±1.6a
Totale wortelopname	28.3±2.7a	51.8±2.8b	36.2±5.2a	64.3±5.8c	1.6±0.1a	2.6±0.2b	3.0±0.4b	4.6±0.4c	10.5±0.8a	17.7±2.4b	12.5±2.0a	18.5±2.4b
	Ca				Mg							
	SP	SB	GP	GB	SP	SB	GP	GB				
VOORRAAD ($kg.ha^{-1}$)												
Bovengrondse biomassa	40±11a	61±8ab	109±21c	75±4b	13±4a	15±2a	31±6b	16±0a				
Humuslaag	117±25a	184±32b	117±29a	185±30b	19±4a	34±3ab	22±7a	37±10b				
Minerale bodem (0-50 cm)	278.4±23.3	169.7±38.2	292.5±37.3	314.4±100.3	29.5±3.2	20.2±1.1	15.0±0.7	27.0±2.5				
FLUXEN ($kg.ha^{-1}.yr^{-1}$)												
Immobilizatie stammen	1.5±0.4a	4.1±0.5b	6.2±1.1c	5.7±0.4c	0.4±0.1a	0.9±0.1bc	1.5±0.3c	1.2±0.1bc				
Immobilizatie takken	1.2±0.4a	1.5±0.2a	4.0±0.9b	3.4±0.3b	0.4±0.1a	0.4±0.1a	1.0±0.2c	0.7±0.0b				
Immobilizatie stam+tak	2.6±0.7a	5.5±0.7b	10.2±1.9c	9.1±0.6c	0.8±0.2a	1.3±0.2b	2.5±0.5d	1.9±0.1c				
Bladval	8.0±1.1a	8.8±1.0a	13.9±2.1b	15.3±1.7b	1.8±0.2a	3.4±0.3b	2.1±0.3a	5.8±0.6c				
Kroonuitwisseling	0.8±0.7a	-0.5±0.4a	2.7±1.2b	1.3±1.2ab	1.2±0.7ab	0.7±0.1a	1.9±0.5b	1.8±0.5b				
Totale wortelopname	11.5±2.0a	13.8±1.1a	26.9±3.6b	25.7±3.5b	3.8±0.7a	5.5±0.4b	6.6±0.9b	9.5±1.1c				

Tabel 7: Voorraden en fluxen van de nutriënten stikstof (N), fosfor (P), kalium (K), calcium (Ca) en magnesium (Mg) voor ruwe berk en grove den in zowel de groepenkap als de schermkap (SD= dennenverjonging in schermkap, SB= berkenverjonging in schermkap, GD= dennenverjonging in de groepenkap, GB = berkenverjonging in groepenkap) Bron²⁵

²⁵ De Schrijver, A., Geudens, G., Gielis, L., Wuyts, K., Staelens, J., Verheyen, K. Comparison of nutrient cycling in two continuous cover scenarios for forest conversion of pine plantations on sandy soil. I. Aboveground biomass production and nutrient cycling in regeneration stands of silver birch and Scots pine. Ingediend bij Canadian Journal of Forest Research.

2.3 Effect van bosrandbeheer op verzuring en eutrofiëring van bossen op zandgrond

Het verschil tussen naald- en loofbos in doorvaldepositie van stikstof en verzurende partikels werd duidelijk aangetoond in §2.1.1. Deze verschillen bleken nog sterker uitgesproken te zijn in de bosrand dan in de boskern (zie §2.1.2). Op basis van deze gegevens konden we concluderen dat de aanwezigheid van naaldbomen in de bosrand resulteert in hogere deposities én een grotere indringingsdiepte, m.a.w. een grotere bosrandzone met verhoogde deposities.

De diepte van het randeffect en de depositietoename aan de bosrand zijn bovendien sterk afhankelijk van de structuur van de bosrand, maar studies over de invloed van de bosrandstructuur op patronen van atmosferische depositie in de bosrand zijn zeer beperkt. Een Duitse modelstudie en een Nederlandse veldstudie toonden een positief verband aan tussen de hoogte, het stamtal en de relatieve bladoppervlakte (*leaf area index*, LAI) van de bosrand enerzijds en de grootte van het randeffect anderzijds. Echter, aanwijzingen betreffende de optimale inrichting en een aangepast bosrandbeheer om het bosecosysteem te beschermen tegen verdere verzuring en eutrofiëring, werden nog niet geformuleerd.

Naast de aanwezigheid van loofbomen in de bosrand kan een aangepaste bosrandaanleg mogelijk bijkomend bijdragen tot verminderde deposities in de bosrand. De aanleg van een geleidelijk opgaande bosrand zou de overgang van niet-bos naar bos voor luchtstromingen minder abrupt kunnen maken en het aangetoonde randeffect op verzurende en eutrofiërende deposities kunnen reduceren. We onderzochten of de aanleg van geleidelijk opgaande bosranden via een mantel- en zoomvegetatie de deposities in de achterliggende bosrand zou kunnen verlagen. Daartoe werden experimenten uitgevoerd d.m.v. zowel een windtunnelstudie als terreinexperimenten, waarbij de deposities in een bosrand met scherpe overgang (Figuur 18 links) vergeleken werden met deze in een bosrand met een geleidelijk opgaande vegetatie (Figuur 18 rechts).



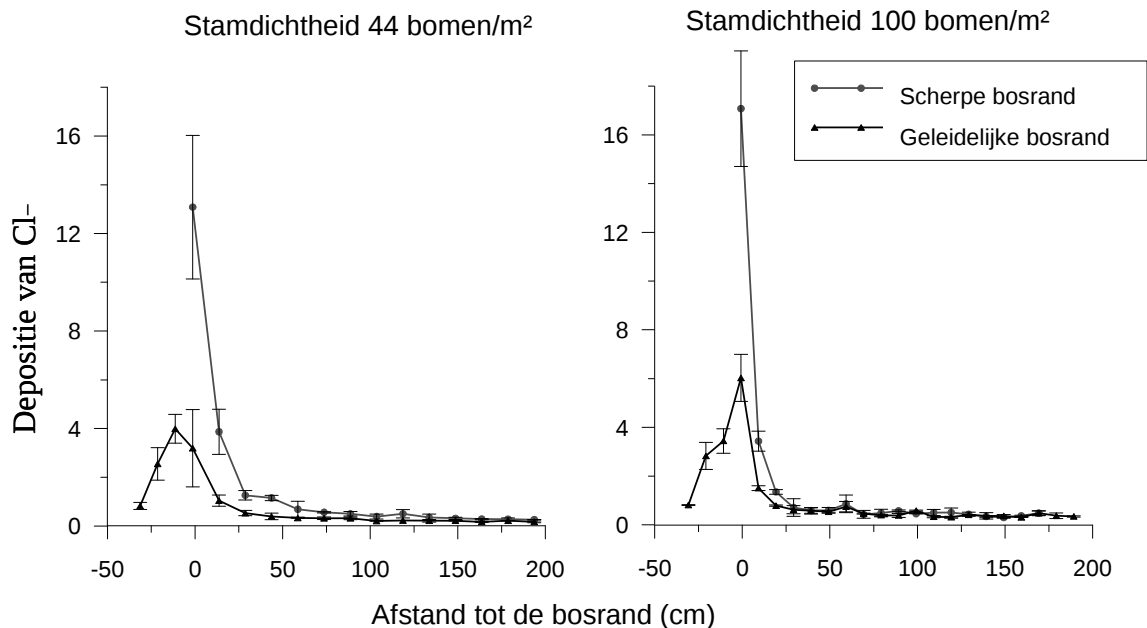
Figuur 18: Overgang tussen akkerland/weiland en bos via een scherpe overgang (links) of een geleidelijk opgaande bosrand met mantel-zoomvegetatie (rechts)

In samenwerking met het Centrum voor Eremologie van de UGent, werd een studie²⁶ in de windtunnel uitgevoerd met behulp van plastic modelboompjes, geïnstalleerd in vier combinaties van stamtal en kroondiepte, waarbij telkens één modelbestand werd opgesteld met en één zonder een geleidelijk opgaande bosrandvegetatie. Windsnelheid werd opgemeten langsheen verschillende locaties en op drie hoogtes doorheen het modelbestand en depositie werd gesimuleerd met verneveld NaCl. De geleidelijk opgaande bosranden bleken in staat te zijn het randeffect op de depositie van chloride sterk te reduceren: de depositietoename aan de rand werd sterk verminderd in aanwezigheid van een geleidelijke rand (Figuur 19). **De aanwezigheid van een geleidelijk opgaande rand reduceerde de depositie in de totale bosrandzone met 66%. Een denser bestand verminderde de penetratiediepte en bijgevolg ook de totale depositie in de ganse bosrandzone met 40%.**

Zelfs wanneer de depositie op de geleidelijke bosrandvegetatie werd meegerekend, was de depositie nog steeds hoger in geval van een scherpe bosrand. De oorzaak van dit verminderde randeffect lag in een significante daling van de windsnelheid en turbulentie in het onderste deel van de kronen. Een geleidelijk opgaande randvegetatie bleek bijgevolg in staat te zijn de windsnelheid te verminderen in

²⁶ Wuyts, K., Verheyen, K., De Schrijver, A., Cornelis, W.M., Gabriels, D. Taking the edge off: Forest edge structure determines longitudinal patterns of deposition, wind speed, and turbulence. Ingediend bij Atmospheric Environment. Volledige tekst opgenomen in A13.

de bosrand en de windstroming ter hoogte van de kronen vóór de bosrand af te leiden naar de zone boven de kronen.



Figuur 19: Depositie op verschillende afstanden van de bosrand in het geval van een scherpe bosrand (cfr. Figuur 18 links) of een geleidelijk opgaande bosrand met een mantel- en zoomvegetatie (cfr. Figuur 18 rechts). De studie is het resultaat van simulaties binnen een windtunnel met een stamdichtheid van 44 of 100 bomen per m² (of: 123 en 278 bomen per ha als opgeschaald naar een 18 m hoog bos).

Naast de studie in de windtunnel, die ons inzicht gaf in het effect van de inrichting van de bosrand onder gecontroleerde omstandigheden, werden terreinmetingen²⁷ uitgevoerd gedurende drie wintermaanden (januari - maart 2007) en drie zomermaanden (juni - augustus 2007) in drie bestanden. Telkens werden twee parallelle transecten uitgezet: één aan een geleidelijk opgaande bosrand en één aan een scherpe bosrand (de mantel- en zoomvegetatie werd er gekapt en gemaaid of was over een bepaalde lengte afwezig). In twee van de drie bestanden (Dombergheide nabij Turnhout en Neterselsche heide in Noord-Limburg, NL) was de doorvaldepositie van sulfaat, nitraat en ammonium in de bosrandzone verminderd in geval van een geleidelijk opgaande bosrand. In het bestand op de Neterselsche heide, echter, was het randeffect over dezelfde afstand voorwaarts verschoven als de lengte van de geleidelijke rand, wat niet een gewenste situatie is en mogelijks een

²⁷ Wuyts, K., De Schrijver, A., Vermeiren, F., Verheyen, K., The potential of a gradual forest edge vegetation to mitigate edge effects on throughfall deposition. In voorbereiding

gevolg is van een nog niet voldoende geleidelijke overgang. In Dombergheide gaf de mantel- en zoomvegetatie geen aanleiding tot een verschoven randeffect, maar slaagde die erin om het randeffect gedeeltelijk tot volledig op te heffen. In het derde bestand (Neigembos nabij Ninove) werd geen significante reductie van het randeffect geconstateerd, waarschijnlijk een gevolg van het nog grote hoogteverschil tussen de hoogste struiken van de mantelvegetatie en de eerste bomen van de rand.

Deze studies demonstreren **de potentiële rol die geleidelijk opgaande bosranden kunnen spelen ter bescherming van bosecosystemen tegen verzuring en eutrofiëring**. Het is echter duidelijk dat de structuur en de dimensies van een geleidelijk opgaande bosrand sterk bepalend zullen zijn voor diens impact op het verminderen van de randeffecten van atmosferische depositie.

3 Synthese en concrete adviezen voor de praktijk

In de hier volgende pagina's trachten we een synthese te maken van onze huidige kennis betreffende verzuring en eutrofiëring van bossen op zandgrond en de rol die het bosbeheer kan spelen ter mitigatie hiervan. Om deze synthese gemakkelijk leesbaar en eveneens zo concreet en gebruiksvriendelijk te maken voor bos- en natuurbeheerders hebben we ze opgebouwd rond een aantal concrete vraagstellingen. Deze vragen zijn enerzijds direct afgeleid uit ons onderzoek, anderzijds zijn het vragen die bij de voorstelling van ons onderzoek op studiedagen en buitenlandse congressen regelmatig aan bod kwamen. Ten slotte geven we concrete adviezen voor het bosbeheer in drie 'Best Management Practices'.

3.1 Synthese aan de hand van concrete vraagstellingen

3.1.1 Wat zijn de risico's en gevolgen voor het boscysteem van de vastgestelde verzuring/eutrofiëring van bossen op zandbodem?

De boomsoortensamenstelling van onze bossen op zandbodem (*Pinus* spp., *Betula* spp. en *Quercus* spp.) bestaat uit soorten waarvan wordt aangenomen dat ze vrij zuurtolerant zijn. De natuurlijke plantendiversiteit is bovendien vrij laag in bossen op zandgrond alhoewel vooral loofbos nog een vrij rijke mossenflora kan bezitten. Zandbodems zijn dikwijls van nature zuur met een lage buffercapaciteit ten gevolge van eeuwenlang bodemverarmend landbouwgebruik. Zeker vanaf de middeleeuwen was het belangrijkste landbouwsysteem op deze bodems een intensief plaggenbeheer waarbij de strooisellaag van heide- en bosgebieden periodiek over grote oppervlaktes werd verwijderd. Bovenop dit plaggenbeheer werden grote gebieden begraasd met schapen. Deze praktijken resulteerden in sterke podzolizatie en verlies van bodemvruchtbaarheid. Rekening houdend met deze informatie kan men zich afvragen **of de huidige input van verzurende en eutrofiërende deposities nog zo'n zware bedreiging vormt voor onze boscystemen**. Hiernavolgend schetsen we kort de huidige kennis van zaken wat betreft effecten van verzuring en eutrofiëring op de biodiversiteit van de kruid- en mosvegetatie, toxiciteit voor aluminium en het risico op verspreiding van polluenten naar andere ecosystemen en verontreiniging van het grondwater.

Effect op biodiversiteit?

Voor Nederlandse bosccosystemen op zandbodem werden als gevolg van eutrofiëring duidelijke verschuivingen in de kruidlaag en de mycoflora gevonden. Behalve in het geval van (korst-)mossen leidde eutrofiëring niet tot een verlies aan soorten maar steeg het aantal plantensoorten gedurende de voorbije decennia²⁸. Deze toename in soortenaantal is te wijten aan de stijging van het aantal nitrofiele soorten (*Deschampsia flexuosa*, *Molinia caerulea*, *Corydalis claviculata*, *Rubus sp.* en *Dryopteris dilatata*). Het aantal stikstofgevoelige en -intolerante soorten is echter zeer sterk achteruitgegaan (vnl. korstmossen uit het geslacht *Cladonia*). In Vlaanderen staan 40% van onze nitrofobe soorten op de rode lijst. Gedurende de periode 1960-1980 stelde men in Nederland bovendien een algemene daling vast van het aantal ectomycorrhiza soorten [vb. hanekam (*Cantharellus cibarius*)]. Langsheen een latitudinale gradient van Noord-Europa tot Centraal-Europa werd eveneens een significante relatie vastgesteld tussen de diversiteit van het aantal ectomycorrhiza-soorten in bossen van fijnspar en beuk en de N-depositie²⁹.

Kanttekening: naast de effecten van verzuring en eutrofiëring spelen nog andere factoren zoals de bosleeftijd en het vroegere bosbeheer een rol in de verschuivingen in de biodiversiteit van de kruidlaag in onze bossen. Het ouder laten worden van bestanden en een meer duurzaam bosbeheer (langere omloopstijden, vermijden van kaalkap, bodembewerking, strooiselroof, plaggen en het kiezen voor gemengde loofbosbestanden i.p.v. homogene naaldboomplantages) zullen op termijn zeker bijdragen tot een verbetering van de biodiversiteit²⁹.

Aluminiumtoxiciteit?

In al de bestudeerde bosccosystemen ging de uitspoeling van nitraat en aluminium gepaard met de uitspoeling van basische kationen en aluminium. Dit fenomeen veroorzaakt een sterke verarming van de bodem in termen van vermindering van de buffercapaciteit. Hoe minder kationen nog op het uitwisselingscomplex van de bodem zitten, hoe minder inkomend zuur nog kan gebufferd worden. De

²⁸ Van Dobben, HF., Vocks, MJMR., Jansen, E., Dirkse, GM. 1994. Veranderingen in de ondergroei van het Nederlandse dennenbos over de periode 1985-1993. IBN-rapport 085, Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek, Wageningen.

²⁹ Geudens, G., Verheyen, K., Degraeve, F., Carnol, M. 2006. Ecological feasibility of forest conversion: Can forest conversion of seconarcy coniferous into deciduous forests enhance biodiversity. In: Geudens, G. (Ed.) 2006. Feasibility of forest conversion: ecological, social and economic aspects (FEFOCON). Report part of the PODOII program by the Belgian Science Policy, pp. 41-52.

verhoogde concentraties aan aluminium maar ook van mangaan (in het kader van deze studie echter niet bestudeerd) in het bodemwater heeft een mogelijks toxisch effect op de vegetatie. Toxiciteit door een overmaat aan mangaan (een essentieel nutriënt voor plantengroei) kan verstoring in het voedingsevenwicht veroorzaken door een abnormaal hoge accumulatie in het plantenweefsel (Summer et al. 1991). Toxiciteit door aluminium bleek zich bij verschillende boomsoorten^{30,31} maar ook bij kruidachtigen³² reeds te uiten in misvormingen en storingen in de functies van het wortelstelsel. Voor de bestudeerde bostypes in Vlaanderen, in het specifieke geval van zeer zure zandbodems met hoge concentraties aan plantbeschikbaar aluminium, is echter nog geen informatie of kennis beschikbaar. Naast dit direct toxische effect kunnen verhoogde concentraties aan aluminium in de bodemoplossing leiden tot verstoringen in de nutriëntenopname van andere positief geladen ionen zoals calcium en/of magnesium omwille van antagonistische effecten^{33,34,35}. Bovendien bleek ook de microbiële biomassa sterk negatief gecorreleerd te zijn met de concentraties aan aluminium, en positief met de concentraties aan calcium in de bodemoplossing. Hoge concentraties aan aluminium in de bodemoplossing blijken dus eveneens desastreus te zijn voor de diversiteit van het bodemleven³⁶.

³⁰ Weber-Blaschke, G., Claus, M., Rehfuss, K.E. 2002. Growth and nutrition of ash (*Fraxinus excelsior* L.), and sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.) on soils of different base saturation in pot experiments. *Forest Ecology and Management* 167, 43-56.

³¹ Summer, M.E., Fey, M.V., Noble, A.D. 1991. Nutrient status and toxicity problems in acid soils. In: Ulrich B., Sumner M.E. (Ed.). *Soil Acidity*. Springer Verlag, Berlin, pp.149-182.

³² Falkengren-Grerup, U., Tyler, G. 1993. Experimental evidence for the relative sensitivity of deciduous forest plants to high soil acidity. *Forest Ecology and Management* 60, 311-326.

³³ Alewell, C., Mandersheid, B., Gerstberger, P., Matzner, E. 2000. Effects of reduced atmospheric deposition on soil solution chemistry and element contents of spruce needles in NE-Bavaria, Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 163, 509-516.

³⁴ De Wit, H.A., Mulder, J., Nygaard, P.H., Aamlid, D. 2001. Testing the aluminium toxicity hypothesis: a field manipulation experiment in mature spruce forest in Norway. *Water, Air and Soil Pollution* 130, 995-1000.

³⁵ Weber-Blaschke, G., Claus, M., Rehfuss, K.E. 2002. Growth and nutrition of ash (*Fraxinus excelsior* L.), and sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.) on soils of different base saturation in pot experiments. *Forest Ecology and Management* 167, 43-56.

³⁶ Zhong, Z., Makeschin, F. 2003. Soil biochemical and chemical changes in relation to mature spruce (*Picea abies*) forest conversion and regeneration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 166, 291-299.

Risico op verspreiding naar andere ecosystemen en verontreiniging van het grondwater?

De geobserveerde uitspoeling van nitraat, sulfaat en aluminium betekent een bijkomend risico voor verspreiding van deze ionen via grond- en oppervlaktewater. Er bestaan drie mogelijke 'pathways' voor nitraat aanwezig in het grondwater: (1) accumulatie, (2) omzetting naar gas door het proces van denitrificatie of (3) verspreiding naar andere ecosystemen en oppervlaktewater. Accumulatie van nitraat in het grondwater is echter geen belangrijke stock: in regio's van intensief landbouwgebruik in Europa en de Verenigde Staten bedroeg het in het grondwater geaccumuleerde nitraat slechts enkele procenten van de totale N input³⁷. De relatieve bijdrage van de andere twee processen is sterk afhankelijk van de lokale omstandigheden én van de verblijftijd van nitraat in het grondwater³⁷.

Drinkwaterwinningen onder bos in de zandstreek gebeuren doorgaans op zeer grote diepte. Tot nu toe werden geen verontreinigingen van dit grondwater vastgesteld (mondelinge communicatie PIDPA). Dit komt doordat doorsijpelend grondwater een zeer lange weg heeft af te leggen en tijdens deze weg gezuiverd kan worden door o.a. denitrificatie (verwijdering van nitraat) en uitwisselingsreacties in de verschillende kleilenzen waardoor het moet filtreren. De snelheid van passage door klei is zeer traag, waardoor er een grote kans bestaat dat bv. ook het toxische aluminium door uitwisseling met andere kationen terug wordt vastgelegd.

3.1.2 Is bekalken een optie om de bodemverzuring tegen te gaan?

Om de zuurtegraad van de bodem te verlagen kan bekalkt worden. Bekalking stimuleert immers mineralisatie- en nitrificatieprocessen en bijgevolg stijgen de bodem-pH en de concentraties aan plantopneembaar calcium³⁸. Er is echter nog discussie of bekalken op lange termijn echter gunstig is voor de stabiliteit van het bosecosysteem. Na bekalking stijgt initieel inderdaad de bodem-pH, maar dit effect blijkt maar van korte duur te zijn (in het geval van ³⁶ slechts 4 jaar). Bovendien heeft de praktijk van bekalking een negatief effect op de bodemvruchtbaarheid omdat het op korte termijn een ongewoon grote stijging veroorzaakt in het aantal micro-organismen, springstaarten en regenwormen. Deze significante stijging in diversiteit en abundantie van de bodemfauna veroorzaakt een abnormaal snelle afbraak van de humuslaag, en daardoor een grote vrijstelling van nitraat dat, omwille van de

³⁷ Galloway, JN., Aber, JD., Erisman, JW., Seitzinger, SP., Howarth, RW., Cowling, EB., Cosby, BJ. 2003. The nitrogen cascade. *Bioscience* 53, 341-356.

³⁸ Kreutzer, K. 1995. Effects of forest liming on soil processes. *Plant and Soil* 168-169, 447-470.

overmaat, grotendeels zal uitspoelen met een basisch kation of aluminium als 'counterion'. De bedoelde nutriëntengift door de bekalking resulteert bijgevolg in een verarming aan nutriënten door uitspoeling.

3.1.3 Is plaggen een optie om de eutrofiëring tegen te gaan?

Een recente Nederlandse studie³⁹ stelt dat het plaggen van de humuslaag kan bijdragen tot verlaging van de stikstofvoorraad in de bodems van stikstofverzadigde bossen. De idee hierachter is dat het wegnemen van de humuslaag de voorraad aan stikstof drastisch vermindert omdat in de strooisellaag inderdaad zeer veel stikstof ligt opgeslagen. Het wegnemen van deze stikstof maakt dat deze hoeveelheid potentieel niet meer kan vrijkomen op langere termijn. In dit experiment werd via plagbeheer een totale hoeveelheid van 2400 kg stikstof per hectare weggenomen. Het wegnemen van de strooisellaag veroorzaakte echter niet enkel de verwijdering van stikstof, maar ook van zeer grote hoeveelheden essentiële nutriënten zoals basische kationen en fosfor (40 kg kalium, 200 kg calcium, 30 kg magnesium en 50 kg fosfor). De naaldbossen op zandgrond hebben immers een dikke strooisel- en humuslaag waarin een grote voorraad aan nutriënten ligt opgeslagen. De minerale zandbodem is, zoals ook besproken in §1.2, arm aan basische kationen en heeft een lage buffercapaciteit waardoor de strooisellaag proportioneel een belangrijke potentiële bron is van zuurbufferende kationen. De nutriëntenpool in de strooisel/humuslaag vormt ons inziens een belangrijke basis voor het herstel van deze ecosystemen op langere termijn, en een plagbeheer is volgens onze huidige kennis eerder een nadeel dan een voordeel.

3.1.4 Kan het bosbeheer via de boomsoortenkeuze bijdragen tot mildering van deze verzuring en eutrofiëring?

Uit onze studie blijkt dat omvorming van naaldbos naar loofbos de depositie en de uitspoeling naar het grondwater van stikstof en verzurende polluenten vermindert. Bovendien is het strooisel van loofbomen over het algemeen van een betere kwaliteit wat bijdraagt tot een betere afbraak en dus een snellere vrijstelling en circulatie van nutriënten.

³⁹ Boxman, D., Roelofs, JGM. 2006. Effects of liming, sod-cutting and fertilization at ambient and decreased nitrogen deposition on the soil solution chemistry in a Scots pine forest in the Netherlands. *Forest Ecology and Management* 237, 237-245.

In naaldboombestanden is bovendien de circulatie van aluminium sneller dan in loofboombestanden⁴⁰. De omvorming van naald- naar loofboombestanden heeft een groot kortetermijneffect op de uitwisselbare concentraties van complexgebonden aluminium en ijzer in het organisch materiaal van de bosbodem⁴¹. De naaldboombestanden hadden significant hogere concentraties aan aluminium en ijzer en lagere concentraties aan kalium, calcium en magnesium in de strooisellaag. Ook Vlaamse wetenschappers⁴² formuleerden hun bezorgdheid voor een toenemende ‘aluminisatie’ van de organische complexen in de strooisellaag van naaldbos op zandbodem in de Kempen.

3.1.5 Hoe moet naaldbos worden omgevormd? Via kaalkap, schermkap of groepenkap?

Bij de omvorming van naaldbos naar loofbos moet voorzichtig te werk gegaan worden. De hoge voorraad aan o.a. stikstof kan snel vrijkomen bij een sterke toename van de mineralisatiesnelheid door bv. kappingen (zie §2.2.1). De strooisellaag herbergt naast de hoge voorraad aan stikstof ook grote hoeveelheden basische kationen (kalium, calcium en magnesium) die een essentiële rol spelen in het toekomstige herstel van deze bodems. Van kaalkappen is geweten dat ze een drastische wijziging veroorzaken in de mineralisatiesnelheid van de strooisellaag en dat, afhankelijk van de snelheid van herkolonisatie door vegetatie van de bodem, de uitspoeling van nitraat en geassocieerde kationen, zeer groot kan zijn. Tot op heden bestond geen of nauwelijks inzicht in hoe de omvormingen van naald- naar loofbos dienen te gebeuren om (1) grote nitraatuitspoeling en (2) verlies aan kationen te voorkomen. Onze studie geeft een eerste inzicht.

Bij omvorming d.m.v. schermkap liggen de deposities, voor de kap van het bovenscherm, hoger dan in de groepenkap omwille van de aanwezigheid van het bovenscherm, maar in beide scenario's significant lager dan in de uitgangssituatie. Na kapping zijn de deposities in de verjongingen in de scherm- en de groepenkap sterk vergelijkbaar. De uitspoeling van nitraat naar het grondwater is na 10

⁴⁰ Bergkvist, B., Folkeson, L. 1995. The influence of tree species on acid deposition, proton budgets and element fluxes in south Swedish forest ecosystems. *Ecological Bulletins* 44, 90-99.

⁴¹ Brandtberg, P.O., Simonsson, M. 2003. Aluminum and iron chemistry in the O horizon changed by a shift in tree species composition. *Biogeochemistry* 63, 207-228.

⁴² Van Ranst, E., De Coninck, F., Roskams, P., Vindevogel, N. 2002. Acid-neutralizing capacity of forest floor and mineral topsoil in Flemish forests (North Belgium). *Forest Ecology and Management* 166, 45-53.

jaar significant lager dan die in de uitgangssituatie. Beide scenario's brachten een significante verbetering, en de verschillen tussen de beide scenario's zijn niet groot. In beide scenario's gaat de uitspoeling van anionen gepaard met een uitspoeling van aluminium. In de groepenkap spoelt bovendien vrij veel calcium uit.

Omvorming gebeurt ons inziens best zo voorzichtig mogelijk. Hiermee bedoelen we dat een omvorming best zo weinig mogelijk verandering brengt in het microklimaat, en dus in de afbraaksnelheid van het strooisel. Onze huidige resultaten tonen aan dat een omvorming onder scherm wellicht de minste verstoring veroorzaakt in de uitspoeling van calcium en dit scenario, vanuit biogeochemisch standpunt, te verkiezen is. Onze resultaten hebben echter aangetoond dat kapping van het scherm boven een berkenverjonging best gebeurt vooraleer diens boomhoogte de onderkant van de kronen van het dennenscherm raakt, dit om groeistilstand van berk te voorkomen.

3.1.6 Kan het bosbeheer via aanleg van bosranden bijdragen tot mitigatie van verzuring en vermesting? - Is het aanleggen van een bosrandgordel van naaldbomen een goede maatregel ter bescherming van de kernzone van het bos?

De grootte van de indringingsdiepte van het randeffect en/of de mate van depositietoename aan de bosrand blijken sterk te worden bepaald door de boomsoortensamenstelling, de densiteit van het bestand en de aanwezigheid van een geleidelijk opgaande bosrand (vb. via een mantel- en zoomvegetatie). Via een aangepast bosrandbeheer kan de structuur van de bosrand zo worden aangepast dat het randeffect op de depositie wordt beperkt in indringingsdiepte en depositietoename.

Omvorming van een homogeen dennenbestand naar een berken- of zomereikenbestand leidt zowel tot een lagere toename van depositie aan de rand als een kleinere indringingsdiepte van het randeffect. Indien de bosrand dens wordt gehouden, treedt het randeffect minder diep in het bestand. De aanleg van een geleidelijk opgaande bosrand resulteert in een lagere depositietoename aan de rand. Zowel in het geval van het dens houden van de bosrand als in het geval van de aanleg van een geleidelijke rand wordt de depositie in de ganse bosrandzone verminderd. Het succes van een geleidelijk opgaande bosrand blijkt echter afhankelijk te zijn van de vorm en dimensies t.o.v. het achterliggende bestand. Zowel wanneer de geleidelijke bosrand wordt aangelegd als 'uitbreiding' van het bos (i.e. door bvb. de afrastering van een weide verder van de bosrand te plaatsen) als wanneer het wordt bewerkstelligd als 'inbreiding' (i.e. door het kappen van enkele bomenrijen), kan er een afname van depositie worden verwacht.

Ter illustratie: Hoe beïnvloedt de aanleg van een naaldbomengordel aan de bosrand de depositie in een loofboombestand?

De deposities zijn hoger en het randeffect dringt dieper door in naald- dan in loofboomranden. In vergelijking met een loofboomgordel neemt de aanvoer van pollutanten over de ganse beboste oppervlakte dus toe. Het effect op de deposities in het achterliggende loofbestand is echter minimaal tot nihil: de naaldboomgordel veroorzaakt wel een sterkere afname van de concentratie aan pollutanten in de lucht, maar dit vermindert het depositieniveau in de interne loofboszone niet omwille van de sowieso hoge luchtconcentraties.

3.1.7 Draagt onze huidige bosoppervlakte significant bij tot het zuiveren van pollutanten uit de atmosfeer?

Bossen zijn in staat om vrij grote hoeveelheden verzurende en eutrofiërende pollutanten uit de lucht te vangen. Dragen onze bossen nu werkelijk bij tot het zuiveren van de lucht rekening houdend met (1) de hoge concentraties van pollutanten in de lucht en (2) de beperkte oppervlakte bos (1450 km²) in Vlaanderen? Een eenvoudige berekening leert dat om de huidige jaarlijkse emissies aan pollutanten naar de atmosfeer (nl. 10141 miljoen eq.j⁻¹) te verwijderen d.m.v. naaldbos (we veronderstellen een naaldbos dat jaarlijks zo'n 5000 eq.ha⁻¹ aan zuur uit de atmosfeer filtert), we een oppervlakte aan bos nodig hebben van 20280 km², dit is 150% de Vlaamse oppervlakte. In het geval van loofbos, dat gemiddeld minder pollutanten uit de lucht filtert, is de nodige oppervlakte bos nog groter.

3.1.8 Veroorzaakt een grootschalige bosomvorming nog een toename van de concentratie van pollutanten in de lucht en worden omliggende ecosystemen (vb. heide) dan niet nog meer bedreigd?

In het hypothetische geval dat onze 1450 km² bos volledig uit naaldbos bestaat, zou bos volgens bovenstaand rekenvoorbeeld ongeveer 7% van de totale emissies kunnen capteren uit de atmosfeer. In het geval van loofbos (met bv. 3000 eq.ha⁻¹.j⁻¹ filtercapaciteit) zou dit slechts 4% bedragen. Omvorming van naaldbos naar loofbos zal dus inderdaad een daling veroorzaken van de filtercapaciteit uit de atmosfeer. Echter, de bijdrage van bos ter zuivering van de atmosfeer is op het niveau van de regio Vlaanderen sowieso zeer beperkt, ook in het geval van naaldbos. Dat neemt niet

weg dat bomen(rijen) op lokaal vlak, bv. nabij luchtverontreinigingsbronnen en in steden, wel een betekenisvolle bijdrage kunnen leveren aan het filteren van stoffen uit de atmosfeer.

Stikstof en andere polluenten die gecapteerd worden uit de atmosfeer worden in stikstofverzadigde ecosystemen voor een groot gedeelte verplaatst naar het grondwater. De eutrofiëring verschuift op deze manier van een probleem van luchtverontreiniging naar een probleem van verontreiniging van grond- en oppervlaktewater dat bij naaldbos dan weer hoger is dan bij loofbos. Via lokale grondwaterstromingen kunnen deze polluenten dan terecht komen in bijvoorbeeld aanpalende natte heide-ecosystemen. De mate waarin bijvoorbeeld aan bos grenzende heide-ecosystemen negatief worden beïnvloed door het omvormen van naald- naar loofbos wordt sterk beïnvloed door lokale factoren: indien het heidegebied windafwaarts van het bos ligt zal de input van polluenten uit de lucht kleiner zijn, in andere gevallen is er geen of nauwelijks effect. Indien het heidegebied beïnvloed wordt door lokale grondwaterstroming en het water is (deels) afkomstig van het bos, zal de verontreiniging in geval van loofbos kleiner zijn (maar dit is wederom sterk afhankelijk van de capaciteit tot denitrificatie van het grondwater).

Hoewel naaldbossen grotere hoeveelheden polluenten uit de lucht vangen, blijken loofbossen bovendien te beschikken over een grotere buffercapaciteit ten opzichte van verzurende en vermestende polluenten dan naaldboombestanden. Dit blijkt uit de hogere waarden voor kritische lasten (zie §1.1.2). Loofbossen vormen een betere buffer in de verschuiving van de vervuilingproblematiek van de atmosfeer naar het bosesysteem en het grondwater dan naaldbos.

3.1.9 Is deze verzuring en eutrofiëring van bossen überhaupt omkeerbaar?

De hoge depositielast (historisch en actueel) van stikstof en verzurende polluenten in bosesystemen doet ons vragen stellen over de tijdschaal van herstel van de bodem en het bosesysteem in het algemeen. Grootschalig Europees onderzoek (NITREX, EXMAN) heeft aangetoond dat na reductie van de stikstofdeposities de nitraatuitspoeling eveneens zeer sterk gereduceerd werd. De voorraad aan zowel anorganische als organische stikstof in de bosbodem is echter zo hoog dat elke verstoring van het bosmicroklimaat dat leidt tot verstoringen/veranderingen in de strooiselafbraak, een sterke vertraging kan veroorzaken in het verwachte positieve effect op nitraatuitspoeling. De sterke daling van de sulfaatdeposities leidde niet tot dezelfde daling in uitpoeling. Ten gevolge van deze hoge uitpoeling van sulfaat werd eveneens geen daling vastgesteld van de uitpoeling van basische kationen, en dus in de verarming van de bodem.

De resultaten uit eerder aangehaald onderzoek^{22,41} tonen aan dat een verandering van boomsoortensamenstelling een vrij snel effect kan hebben op de bodemvruchtbaarheid. De hogere concentraties aan calcium in het strooisel van berk kunnen wellicht een trage maar positieve bijdrage leveren aan de snelheid van strooiselafbraak, en dus aan de mate van ionenvrijstelling. Deze betere nutriëntencirculatie en hogere beschikbaarheid van nutriënten kan de biodiversiteit van de bodemfauna mogelijks positief beïnvloeden, met positief effect op de nutriëntenkringloop. Qua regenwormpopulatie zal een boomsoortenwijziging wellicht weinig effect hebben, omdat dit type zure bodems algemeen geen tot nauwelijks regenwormsoorten herbergt⁴³.

De vegetatie, de bodemorganismen en de bodemchemie zijn ecosysteemcomponenten die nauw samen hangen. Veranderingen in de boomsoort zullen dus op korte of middellange termijn effect hebben op de bodem en de bodemfauna. In deze zin kan de boomsoort beschouwd worden als een ‘ecosysteem-ingenieur’, die significant kan bijdragen tot herstel van het ecosysteem^{44,45}.

⁴³ Muys, B. 1993. Synecologische evaluatie van regenwormactiviteit en strooiselafbraak in de bossen van het Vlaamse Gewest als bijdrage tot een duurzaam bosbeheer. Doctoraatswerk, Universiteit Gent, Faculteit Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen, 335p.

⁴⁴ Muys, B., Lust, N., Granval, PH. 1992. Effects of grassland afforestation with different tree species on earthworm communities, litter decomposition and nutrient status. *Soil Biology and Biochemistry* 24, 1459-1466.

⁴⁵ Binkley, D., Giardina, C. 1998. Why do tree species affect soils? The warp and woof of tree-soil interactions. *Biogeochemistry* 42, 89-106.

3.2 De drie Best Management Practices afgeleid uit ons onderzoek

1. Omvorming van homogene dennenplantages naar homogeen of gemengd loofbos met berk en/of eik in de bovenetage en een onderetage van lijsterbes en spork biedt belangrijke potenties ter mitigatie van verzuring en vermessing van deze bossen op zandgrond. In loofbos zijn de deposities van stikstof en zwavel gemiddeld 1,7 keer lager dan in naaldbos, wat zich reflecteert in een twee maal lagere uitspoeling. De strooiselkwaliteit in loofbos is beter, wat garanties biedt voor een betere strooiselafbraak, een snellere circulatie van nutriënten doorheen het boscossysteem en bijgevolg doorheen het ganse voedselweb.

2. Omvorming van naaldbos naar loofbos gebeurt best zo voorzichtig mogelijk. Uit onze resultaten durven we tentatief besluiten dat vanuit biogeochemisch standpunt schermkap wellicht de meest aangewezen omvormingswijze is. Via schermkap wordt immers het minst drastisch ingegrepen in het bosmicroklimaat, wat garanties biedt tot het behouden van essentiële kationen (bv. calcium) binnen het ecosysteem. Onder een sterk gelicht bovenscherm kan zich vrij snel een verjonging vestigen waarvan men de doorgroei moet vrijwaren door het bovenscherm tijdig weg te nemen.

3. Een goed bosrandbeheer kan bijdragen tot verminderde deposities in de bosrand. De aanwezigheid van loofbomen in de bosrand maakt dat de pollutanten minder diep doordringen in de boskern en dat de depositie aan de bosrand tot 3,4 keer lager is in vergelijking met naaldbos. Het denser houden van de bosrand maakt eveneens dat de pollutanten minder diep doordringen in de boskern en dat de deposities in de bosrandzone lager zijn. Ook de aanleg van geleidelijk opgaande bosranden reduceert de mate van depositietoename aan de rand en bijgevolg ook de totale depositie in de bosrandzone. Het succes van een dergelijke geleidelijk opgaande bosrand blijkt echter afhankelijk te zijn van de vorm en dimensies t.o.v. het achterliggende bestand.

4 Samenvatting

De verzurende en vermestende deposities in Vlaanderen behoren tot de hoogste van Europa en betekenen een reële bedreiging voor bosccosystemen op zandgrond. De bossen op zandbodems zijn immers dikwijls gelegen in de nabijheid van intensieve veeteeltbedrijven, welke verantwoordelijk zijn voor hoge emissies van ammoniakgas.

Momenteel zijn grove en Corsicaanse den de dominant aanwezige boomsoorten. Door hun hoge bladoppervlakte en immergroen karakter zijn bostypes op basis van deze naaldboomsoorten veel efficiënter in het uit de lucht filteren van atmosferische depositie dan meer natuurlijk bostypes met een groot aandeel loofbomen. De input aan verzurende en vermestende depositie is in bestanden met als hoofdboomsoorten grove en Corsicaanse den gemiddeld 1,7 keer groter dan in bestanden met als hoofdboomsoorten berk en eik. De verhoogde input via atmosferische depositie zorgt ook voor een verhoogde anionenuitspoeling die gemiddeld 2 keer hoger is. De hogere nitraat- en sulfaatuitspoelingen gaan steeds gepaard met grotere verliezen aan basische kationen en aluminium, waardoor de buffercapaciteit van de bodem sterker daalt in de dennenbestanden. Dit maakt dat de dennenbestanden gevoeliger zijn voor bodemverzuring en eutrofiëring dan de loofboombestanden op basis van berk en/of eik. Door de vaststelling van dit duidelijke bostype-effect kunnen we concluderen dat de omvorming van naaldboomplantages naar gemengd loofbos potenties inhoudt om de depositielast van stikstof en verzurende partikels te verminderen. Hierdoor worden ook de geassocieerde negatieve gevolgen, zoals verzuring en vermesting van het ecosysteem en vervuiling van het grondwater, verminderd.

Bosomvorming van homogene naaldboombestanden naar gemengde loofbestanden is een proces dat tijd vraagt en dat op verschillende manieren kan gerealiseerd worden. Twee mogelijke omvormingsscenario's, nl. groepenkap en schermkap, werden met elkaar vergeleken. Beide omvormingsscenario's zorgden reeds na een tiental jaar voor een sterke reductie in de input van verzurende en vermestende depositie. In eerste instantie was de depositieafname beperkter in de schermkap (11%) dan in de groepenkap, afhankelijk van de dichtheid van het bovenscherm. Na de verwijdering van het bovenscherm werd in beide scenario's een gelijkaardige afname van de verzurende en vermestende depositie vastgesteld van 65%. Deze verminderde input aan verzurende en vermestende pollutanten leidde tot een verminderde uitspoeling van nitraat en sulfaat (met een gemiddelde afname van 75%) en hierdoor tot een verminderde uitspoeling van basische kationen en aluminium. De omvormingsscenario's bleken ook een duidelijke impact te hebben op de kringloop van nutriënten, die sneller verloopt bij berk dan bij den en sneller in de groepenkap dan in de

schermkap. Deze onderzoeksresultaten tonen duidelijk aan dat bosomvorming inderdaad belangrijke potenties inhoudt om reeds na een tiental jaar de input aan verzurende en vermestende depositie te verminderen, evenals de geassocieerde negatieve gevolgen. De verschillende omvormingsscenario's leiden tot belangrijke verschillen in bestandsopbouw en hebben een duidelijke impact op de verzurings- en eutrofiëringsketen. Om de impact van ieder omvormingsscenario gedurende de volledige omvormingsperiode te kunnen inschatten, zou bijkomend onderzoek in de verdere ontwikkelingsstadia tijdens het omvormingsproces erg relevant zijn, alsook onderzoek naar de impact van bijvoorbeeld de dubbele bestandstructuur en de dichtheid van het bovenscherm bij een schermkap, het al dan niet optreden van een intern randeffect bij groepenkap, etc..

De versnipperde bosstructuur in Vlaanderen maakt dat het aandeel van bosrandzones erg hoog is. In vergelijking met de boskern wordt in de bosrand een input aan verzurende en vermestende depositie vastgesteld die tot vier keer hoger kan zijn. Dit randeffect bleek sterk beïnvloed door het bostype en was zowel qua indringsdiepte als mate van verhoging in de bosrand groter in bosranden van Corsicaanse dan in bosranden van berken- en eikenbestanden. Het bostype-effect op de depositie, dat al duidelijk werd vastgesteld in boskernen, is dus nog groter in bosranden, zodat in bosranden de potenties voor bosomvorming nog groter zijn. Naast bosomvorming bleek ook een aangepast bosrandbeheer duidelijke potenties in te houden om verdere verzuring en eutrofiëring te voorkomen. De eerste onderzoeksresultaten tonen immers aan dat de aanleg van geleidelijk opgaande bosranden de overgang van niet-bos naar bos voor luchtstromingen minder abrupt kan maken, waardoor het randeffect op de deposities kan gereduceerd worden. De structuur en dimensies van een geleidelijk opgaande bosrand zijn sterk bepalend voor de impact van deze rand op de randeffecten van atmosferische depositie. Bijkomend onderzoek in dit verband zou dan ook erg waardevol zijn voor het uitwerken van concrete richtlijnen voor een aangepast bosrandbeheer.

5 Appendices

5.1 Vulgariserende publicaties

5.1.1 Appendix 1: Brochure bosomvorming

Bosomvorming 2006. Infobrochure Bosomvorming. UGent Laboratorium voor Bosbouw, Laboratorium voor Houttechnologie, VUB Vakgroep Menselijke Ecologie en Agentschap voor Natuur en Bos. D/2006/3241/296. 46 p.

5.1.2 Appendix 2: Themanummer Bosrevue

Geudens, G., Gielis, L., Vanhellemont, M., Verheyen, K. 2007. Themanummer 'Omvorming van dennenbos op arme zandgronden'. De Bosrevue 19, 1-5, 7-13, 15-16.

5.1.3 Appendix 3: Artikel in Silva Belgica

Verheyen, K., De Schrijver, A., Wuyts, K., Gielis, M., Van Gossum, P., Geudens, G., Van Herzele, A., De Boever, L., Vanhellemont, M. 2007. Van dennenplantages naar een *beloofd* land?! Theoretische en praktische aspecten van bosomvorming. Silva Belgica 114, 20-26.

5.2 Wetenschappelijke publicaties

5.2.1 Appendix 4: Belang van het incalculeren van verhoogde deposities in de bosrand ter evaluatie van overschrijding van kritische lasten

De Schrijver, A., Devlaeminck, R., Mertens, J., Wuyts, K., Hermly, M. & Verheyen, K. 2007. On the importance of incorporating forest edge deposition for evaluating exceedance of critical loads. Applied Vegetation Science 10, 293-298.

5.2.2 Appendix 5: Literatuuronderzoek bostype-effect op depositie en uitspoeling

De Schrijver, A., Geudens, G., Augusto, L., Staelens, J., Mertens, J., Wuyts, K., Gielis, L., Verheyen, K. 2007. The effect of forest type on throughfall deposition and seepage flux: a review. Oecologia 153, 663-674.

5.2.3 Appendix 6: Bostype-effect op depositie en uitspoeling in Vlaamse boskernen

De Schrijver A., Staelens, J., Van Hoydonck, G., Janssen, N., Mertens, J., Gielis, L., Wuyts, K., Geudens, G. Augusto, L., Verheyen, K. Effect of vegetation type on throughfall deposition and seepage flux. Environmental Pollution. In druk (doi:10.1016/j.envpol.2007.08.025).

5.2.4 Appendix 7: Bostype-effect op depositie en uitspoeling in Vlaamse boskernen

Gielis, L. 2007. Intern rapport: depositie en uitspoeling in een volwassen dennenbestand en een volwassen berkenbestand

5.2.5 Appendix 8: Randeffect op doorvaldepositie in bestanden van Corsicaanse den en berk

Wuyts, K., De Schrijver, A., Staelens, J., Gielis, L., Geudens, G., Verheyen, K. 2008. Patterns of throughfall deposition along a transect in forest edges of silver birch and Corsican pine. Canadian Journal of Forest Research 38, 449-461.

5.2.6 Appendix 9: Randeffect op doorvaldepositie in drie bostypes in twee regio's in Vlaanderen

Wuyts, K., De Schrijver, A., Staelens, J., Gielis, L., Vandenbruwane, J., Verheyen, K. Comparison of forest edge effects on throughfall deposition in different forest types. Ingediend bij Environmental Pollution.

5.2.7 Appendix 10: Effect van de boomsoort op wortelopname van stikstof

Staelens, J., De Schrijver, A., Wuyts, K., Gielis, L., Boeckx, P., Verheyen, K. Intern rapport 'Inorganic ¹⁵N root uptake by silver birch, pedunculate oak and Scots pine seedlings'

5.2.8 Appendix 11: Impact van omvormingsscenario op biomassa en kringloop van nutriënten

De Schrijver, A., Geudens, G., Gielis, L., Wuyts, K., Staelens, J., Verheyen, K. Comparison of nutrient cycling in two continuous cover scenarios for forest conversion of pine plantations on sandy soil. I. Aboveground biomass production and nutrient cycling in regeneration stands of silver birch and Scots pine. Ingediend bij Canadian Journal of Forest Research.

5.2.9 Appendix 12: Impact van omvormingsscenario op depositie en uitspoeling

Gielis, L., De Schrijver, A., Wuyts, K., Staelens, J., Vandenbruwane, J., Verheyen, K. Comparison of nutrient cycling in two continuous cover scenarios for forest conversion of pine plantations on sandy soil. II. Throughfall deposition and seepage flux in regeneration stands of silver birch and Scots pine. Ingediend bij Canadian Journal of Forest Research

5.2.10 Appendix 13: Effect van bosrandstructuur op depositie: een windtunnelstudie

Wuyts, K., Verheyen, K., De Schrijver, A., Cornelis, W.M., Gabriels, D. Taking the edge off: Forest edge structure determines longitudinal patterns of deposition, wind speed, and turbulence. Ingediend bij Atmospheric Environment.