



ALTERRA

WAGENINGEN UR



Effecten van oogst van takhout op de voedingstoestand en bijgroei van bos

Een literatuurstudie

Alterra-rapport 2202
ISSN 1566-7197

J.J. de Jong

Effecten van oogst van takhout op de
voedingstoestand en bijgroei van bos

Dit onderzoek is uitgevoerd binnen het kader van het Beleidsondersteunend onderzoek voor het ministerie van Economie,
Landbouw & Innovatie
Projectcode BO-11-009-005 Biomassa uit bos en natuur

Effecten van oogst van takhout op de voedingstoestand en bijgroei van bos

Een literatuurstudie

J.J. de Jong

Alterra-rapport 2202

Alterra, onderdeel van Wageningen UR
Wageningen, 2011

Referaat

Jong, J.J. de, 2011. *Effecten van oogst van takhout op de voedingstoestand en bijgroei van bos, een literatuurstudie*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 2202. 50 blz.; 7 fig.; 6 tab.; 86 ref.

De Nederlandse overheid heeft als doel gesteld om meer energie uit biomassa te winnen. Eén van de mogelijkheden daarvoor is het winnen van energie uit takhout dat normaal gesproken als oogstresten in het bos achter blijft. Oogst van takhout leidt echter tot een verhoging van de afvoer van voedingsstoffen uit het bos. Uit de literatuurstudie die in dit rapport is weergegeven, blijkt dat er in het buitenland veel onderzoek naar dit thema is gedaan. Over de effecten daarvan op de bodemvruchtbaarheid en groei van bos geeft de aanwezige literatuur geen eenduidig beeld. In het algemeen blijven vooral zorgen bestaan om uitputting van calcium en andere kationen op de armere bodems. Stikstoftekort zal naar verwachting in Nederland niet optreden. Effecten op de groei van bomen worden soms wel en soms niet geconstateerd, wat verklaard wordt door het complex aan factoren die bepalen hoe snel voedingsstoffen vrijkomen. Buitenlandse richtlijnen over hutoogst en oogst van takhout delen veelal bodems in risicoklassen en schrijven mitigerende maatregelen voor op de risicovolle arme bodems.

Trefwoorden: Hutoogst, oogst, takhout en tophout, energiehout, bio-energie, resthout, dunning, bijgroei, productie, stikstof, calcium, organische stof, vegetatie, bodemverdichting

ISSN 1566-7197

Dit rapport is gratis te downloaden van www.alterra.wur.nl (ga naar 'Alterra-rapporten'). Alterra Wageningen UR verstrekt geen gedrukte exemplaren van rapporten. Gedrukte exemplaren zijn verkrijgbaar via een externe leverancier. Kijk hiervoor op www.rapportbestellen.nl.

© 2011 Alterra (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek)
Postbus 47; 6700 AA Wageningen; info.alterra@wur.nl

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

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

Alterra-rapport 2202
Wageningen, juli 2011

Inhoud

Samenvatting	7
1 Inleiding	11
1.1 Aanleiding van deze studie	11
1.2 Probleemstelling en onderzoeksvragen	11
1.3 Methode	12
1.4 Afbakening	12
1.5 Begrippen en afkortingen	12
2 Houtoogst	13
2.1 Reguliere oogstmethoden van stamhout in Nederland	13
2.2 Oogst van tak- en tophout	13
3 Effecten van houtoogst op de bodem	15
3.1 Algemeen	15
3.2 Verdeling van biomassa in bomen	15
3.3 Gehalten aan voedingsstoffen in bomen	16
3.4 Afvoer van voedingsstoffen door houtoogst	18
3.5 Effecten van oogst van takhout op de nutriëntenhuishouding van de bodem	20
3.6 Effecten van oogst van takhout op organische stof in de bodem	23
3.7 Effect van oogst van takhout op de bodemvegetatie	24
3.8 Balans van voedingsstoffen	24
4 Effecten van oogst van takhout op de bijgroei	31
4.1 Voedingsstoffen en bijgroei	31
4.2 Effecten van oogst van tak- en tophout op de bijgroei	32
5 Bestaande richtlijnen oogst takhout	35
6 Discussie	39
7 Conclusies en aanbevelingen	43
7.1 Conclusies	43
7.2 Aanbevelingen	43
Literatuur	45

Samenvatting

In Nederland wordt bij een reguliere houtoogst vrijwel alleen stamhout geoogst. Bij de meest gebruikelijke oogst met een harvester (oogstmachine) wordt bij het ontdoen van takken (uitsnoeien) en aftoppen het tak- en tophout (in deze studie takhout genoemd) doorgaans neergelegd op het te berijden spoor van de harvester en de forwarder (uitrijwagen), zodat daarmee de bodem wordt beschermd. De stobben blijven eveneens achter in het terrein. Takhout en stobben worden doorgaans alleen geoogst (verwijderd) als dit voor het terreinbeheer noodzakelijk is (bijvoorbeeld bij omvorming, functieverandering). Het takhout en de stobben zijn echter uitermate geschikt voor energetische toepassing omdat het doorgaans geen andere toepassingen kent. Daarbij draagt het bij aan een toename van het aandeel duurzame energie. Met name takhout bevat relatief hoge concentraties voedingsstoffen, en in veel gevallen worden bij het afvoeren van takhout ook blad of naalden afgevoerd die ook relatief veel voedingsstoffen bevatten. Om meer inzicht te geven in de bijbehorende effect van het oogsten van takhout (stobben blijven buiten beschouwing) geeft dit rapport antwoord op de volgende vragen:

- Hoeveel voedingsstoffen worden er afgevoerd bij de oogst van takhout?
- Hoe verhoudt die hoeveelheid zich tot reguliere oogst van stamhout?
- Wat is het effect van de oogst van takhout op de bodemvruchtbaarheid?
- Wat is het effect van de oogst van takhout op de bijgroei?

Afvoer van voedingsstoffen bij de oogst van takhout en stamhout

De verhouding tussen de hoeveelheid takhout en stamhout varieert afhankelijk van de leeftijd van de bomen, de boomsoort en de groeiomstandigheden. Na verloop van tijd (vaak grofweg 20 jaar) bedraagt het takhout circa 15 - 30% van het totale houtvolume. Het takhout en blad of naalden hebben echter aanzienlijk hogere concentraties voedingsstoffen. Daardoor wordt de afvoer van voedingsstoffen bij het oogsten van hele bomen (WTH, whole tree harvesting) grofweg verdubbeld ten opzichte van oogst van stamhout (CH, conventional harvesting). Bij een eindvelling van 300 m³ha⁻¹ stamhout wordt daardoor met stamhout, takhout en blad/naalden 330 - 600 kg stikstof per ha afgevoerd tegenover 120 - 360 kg stikstof per ha bij CH, maar die hoeveelheden kunnen sterk tussen locaties verschillen. Bij structurele WTH wordt jaarlijks gemiddeld grofweg 14 kg stikstof per ha en 9 kg calcium per ha afgevoerd, waarbij grote verschillen tussen situaties (bodem, boomsoort) bestaan. Bij CH bedraagt dit jaarlijks gemiddeld grofweg 6 kg stikstof en 4 kg calcium per hectare.

Voedingsstoffen in takhout en blad/naalden die in het bos worden achtergelaten, komen vrij waarbij ze bijdragen aan de beschikbaarheid van voedingsstoffen voor bomen. De voedingsstoffen komen niet in hetzelfde tempo vrij. Kalium komt bijvoorbeeld voor het grootste deel in de eerste jaren vrij, terwijl calcium over een periode van vele jaren vrij komt. Voedingsstoffen uit blad en naalden komen veel sneller vrij dan uit hout.

Het achterlaten van takhout in het bos heeft ook nog andere effecten, waardoor het takhout niet per se leidt tot een hogere beschikbaarheid aan voedingsstoffen in de eerste jaren na houtoogst. Hout dat in contact staat met de bodem kan namelijk ook voedingsstoffen vastleggen (vooral stikstof), die overigens wel op termijn weer vrijkomen. Takhout onderschept daarnaast ook voedingsstoffen (uit depositie) die zonder bedekking met takhout op de bosbodem terecht zouden zijn gekomen.

Takhout onderschept verder ook regenwater, het beperkt verdamping en het isoleert de bosbodem waardoor de temperatuur onder takhout gelijkmatiger is dan bij een onbedekte bosbodem. Het effect hiervan is dat in bepaalde situaties organische stof in de bodem onder takhout sneller mineraliseert dan bij een onbedekte

bosbodem, waardoor versneld voedingsstoffen vrijkomen. Het laten liggen van takhout heeft daarom niet in alle gevallen een positief effect op de hoeveelheid organische stof in de bodem, hoewel dat wel verwacht kan worden aangezien het takhout in de loop der jaren tot (bodem)organische stof wordt omgezet. De bedekking met takhout onderdrukt in veel gevallen de ontwikkeling van bodemvegetatie. Hierdoor wordt concurrentie met eventuele bosverjonging beperkt. Aan de andere kant kunnen daardoor ook meer voedingsstoffen uitspoelen. De mate waarin dat laatste gebeurt hangt mede af van de mate waarin de bodem voedingsstoffen kan vasthouden.

De hoeveelheid voedingsstoffen in takhout die - afhankelijk van de oogstmethode - al dan niet vrijkomt of wordt afgevoerd is in veel bossen van een niet te verwaarlozen grootte, in vergelijking met de hoeveelheden die vrijkomen door verwerking en depositie. Het afvoeren van takhout kan daarmee een negatief effect hebben op de hoeveelheid beschikbare voedingsstoffen in de bodem voor bomen. Voor stikstof is de depositie duidelijk groter dan de afvoer met houtoogst, zodat daarvoor geen probleem worden verwacht. Voor calcium kan de balans van aanvoer en afvoer negatief zijn, met name op bodems die van zichzelf arm zijn aan calcium en die calcium moeilijk vast houden waardoor ook uitspoeling optreedt. De onderstaande tabel geeft een indicatie van de waarden van verschillende inputs en outputs van de belangrijkste voedingsstoffen.

Tabel 1

Globale indicatie van aan- en afvoer van voedingsstoffen voor N, P, K Ca en Mg voor bosgronden.

		Verandering per element (kg ¹ ha ⁻¹ jr ⁻¹)				
		N	P	K	Ca	Mg
Input	Verwerking	-	?	2,6 - 3,2	0,5 - 3,2 (kalkarm) >100 (kalkrijk)	2,6 - 3,2
	Depositie	30 - 50	0,3 - 0,5	1,1 - 3,0	6,0 - 11,0	1,5 - 5,0
Output	Houtoogst 1	3,3 - 9,5	0,4 - 1,1	1,7 - 6,7	2,4 - 6,2	0,4 - 1,7
	Houtoogst 2	6,1 - 11,9	0,7 - 1,4	2,9 - 8,4	4,6 - 9,6	0,7 - 1,8
	Houtoogst 3	9,6 - 16,3	0,9 - 1,7	4,5 - 10,1	5,7 - 13,6	1,1 - 2,0
	Uitspoeling	5 - 28	?	> 1,1 - 3,0	?	1,5 - ?

Houtoogst 1: CH 8 m³ha⁻¹jr⁻¹;

Houtoogst 2: oogst stamhout 8 m³ha⁻¹jr⁻¹ en oogst takhout (incl. naalden, excl. blad) alleen bij eindvelling

Houtoogst 3: WTH 8 m³ha⁻¹jr⁻¹ incl. naalden, excl. blad.

Effect van de oogst van takhout op de bodemvruchtbaarheid

In diverse studies is het effect onderzocht van het afvoeren van takhout op de voorraad beschikbare voedingsstoffen in de bodem. Daaruit komt geen eenduidig beeld naar voren, wat komt door het complex aan factoren dat hierop van invloed is. Zo is hierboven ook beschreven dat hoewel er voedingsstoffen vrijkomen uit takhout, het takhout ook enkele jaren voedingsstoffen kan vastleggen. Daarnaast zijn verschillen veelal (statistisch) moeilijk aan te tonen door grote variaties in de bodem binnen een proeflocatie en doordat gehalten soms klein zijn waardoor kleine afwijkingen moeilijk zijn aan te tonen. In de buitenlandse literatuur werd aanvankelijk zorg geuit over de uitputting van stikstof in de bodem, maar die zorg is voor het grootste deel weg, aangezien de depositie van stikstof in veel gevallen beduidend groter is dan de afvoer via oogst van takhout. In recentere literatuur wordt vooral gewezen op de risico's van uitputting van de voorraad calcium in de bodem.

Effect van de oogst van takhout op de bijgroei

De beschikbaarheid van voedingsstoffen heeft effect op de groei van bomen. Boomgroei wordt echter niet alleen bepaald door de concentraties voedingsstoffen in de bodem. Ook de mate waarin bomen de

voedingsstoffen kunnen opnemen speelt een rol. De aanwezigheid van mycorrhiza (symbiose van schimmels met plantenwortels) speelt een belangrijke rol en versterkt de capaciteit om voedingsstoffen uit de bodem op te nemen.

De beschikbaarheid van stikstof is in veel bossen de meest groeibeperkende voedingsstof. Maar ook andere voedingsstoffen, zoals fosfor en base kationen, hebben invloed op de groei van bomen. In bossen nabij intensieve veehouderij en dicht bevolkte gebieden, zoals de Nederlandse bossen, is stikstof in het algemeen relatief ruim beschikbaar. De beschikbaarheid van andere voedingsstoffen varieert sterk.

In diverse studies is het effect onderzocht van het oogsten van takhout op de bijgroei. In diverse studies is na CH een hogere groei gemeten (tot ca. 30% hoger), maar in sommige studies zijn geen verschillen geconstateerd. De hogere groei na CH wordt vooral verklaard door onder andere de beschikbaarheid van voedingsstoffen, zowel uit oogstresten, omzetting van organisch bodemmateriaal en minder concurrentie van bodemvegetatie. Daarnaast worden bodemverdichting, een gunstigere bodemtemperatuur en vochtgehalte aangegeven als factoren die de groei beïnvloeden.

In verschillende landen (o.a. het Verenigd Koninkrijk, Scandinavische landen, de VS en Canada) zijn richtlijnen opgesteld voor de oogst van takhout. Daarbij is in meerdere gevallen het bos ingedeeld in risicoklassen, en per risicoklasse is aangegeven hoe er gehandeld moet worden. In sommige landen is het aandeel takhout dat geoogst mag worden beperkt, en in sommige landen zijn maatregelen voorgeschreven zoals het terug in het bos brengen van de as van het takhout.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding van deze studie

In 2007 presenteerde het Nederlandse kabinet het werkprogramma 'Nieuwe energie voor het klimaat: schoon en zuinig'. Hierin kondigt het kabinet aan dat het in wil zetten op 30% CO₂-reductie in 2020 ten opzichte van het referentiejaar 1990, op een energiebesparingstempo van 2% per jaar vanaf 2008 en op een aandeel van 20% duurzame energie van het totale energiegebruik in 2020. In het regeerakkoord van het kabinet Rutte-Verhagen (Anoniem, 2010) is de doelstelling voor Nederland voor het aandeel duurzame energie in 2020 verlaagd tot de door Europa vastgestelde doelstelling voor Nederland van 14,5% (Beurskens en Hekkenberg, 2010).

In toenemende mate wordt onderkend dat er bij landbouw, bos en natuur een verantwoordelijkheid en een kans liggen in het bijdragen aan biomassa productie voor energie. In Nederland wordt er momenteel uit de bossen naast het stamhout maar beperkt andere houtige biomassa geoogst. Deze biomassa van tak- en top hout (in het vervolg takhout genoemd) en stobben is juist geschikt voor energetische toepassing omdat het doorgaans geen andere toepassingen kent. Het stamhout kan in het kader van cascadering beter hoogwaardiger worden ingezet dan als energiehout.

1.2 Probleemstelling en onderzoeksvragen

Takhout bevat relatief hoge concentraties voedingsstoffen, en in veel gevallen worden bij het afvoeren van takhout ook blad of naalden afgevoerd die ook relatief veel voedingsstoffen bevatten. Daarmee worden bij het oogsten van takhout, al dan niet met blad of naalden, relatief veel voedingsstoffen afgevoerd uit het bos. In vooral Duitsland, Oostenrijk, de Scandinavische landen en Canada is al veel ervaring met de oogst van takhout uit het bos. Hier is ook onderzoek uitgevoerd naar de effecten van deze oogst op de nutriëntenvoorraad in de bosbodem.

In deze studie wordt op een rij gezet welke effecten in de buitenlandse literatuur zijn gevonden van de (extra) oogst van takhout op de nutriëntenvoorraad in de bodem. Ook wordt hierbij ingegaan op maatregelen en 'best practices' om eventuele negatieve effecten te kunnen tegengaan of verminderen. De resultaten worden zoveel mogelijk afgezet tegen de context van de Nederlandse omstandigheden.

Het achterliggende doel is om op basis van kennis over de effecten van het oogsten van top- en takhout op nutriëntenvoorraad in de bodem te komen tot een richtlijn (best practice) voor oogst van tak- en top hout in Nederland.

Vragen die beantwoord dienen te worden zijn:

- Hoeveel voedingsstoffen worden er afgevoerd bij de oogst van takhout?
- Hoe verhoudt die hoeveelheid zich tot reguliere oogst van stamhout?
- Wat is het effect van de oogst van takhout op de bodemvruchtbaarheid?
- Wat is het effect van de oogst van takhout op de bijgroei?

1.3 Methode

Om antwoord te krijgen op de onderzoeksvragen is een uitgebreide literatuurstudie verricht. De bestudeerde literatuur beschrijft veelal onderzoeken en ervaringen in het buitenland. Er is gekeken of die informatie algemeenheden bevat die aanwijzingen geven voor de effecten van het oogsten van takhout in Nederland. Daarnaast zijn ook Nederlands bronnen gebruikt, vooral om een inschatting te maken van de voedingsstoffenbalansen in bossen. Voorwerk voor deze studie is gedaan door dhr. Ko Vos in het kader van een afstudeeropdracht voor Hogeschool Van Hall Larenstein (Vos, 2010).

Dhr. J. Spijker en dhr. W. de Vries (Alterra, Wageningen UR) hebben het concept van dit rapport toegestuurd gekregen en hebben suggesties gedaan voor verbetering van het rapport.

1.4 Afbakening

Het project beperkt zich tot de effecten van het oogsten van tak- en tophout in permanent bos. Oogst van stobben wordt buiten beschouwing gelaten omdat dat in Nederland niet wordt toegepast en ook niet verwacht wordt dat het op korte termijn toegepast wordt.

Het opstellen van een richtlijn, wat uiteindelijk gewenst is, is geen onderdeel van deze studie.

1.5 Begrippen en afkortingen

In dit rapport wordt regelmatig gewerkt met afkortingen. Hieronder volgt een lijst van die afkortingen en hun betekenis.

- CH	oogst van alleen stamhout, ofwel Conventional Harvesting
- WTH	oogst van bovengrondse delen van de boom, ofwel Whole Tree Harvesting
- N	stikstof
- P	fosfor (gewicht uitgedrukt in pure fosfor, niet fosfaat, P2O5)
- Al	aluminium
- Ca	calcium
- Fe	ijzer
- K	kalium
- Mg	magnesium
- Na	natrium
- C	koolstof, maatgevend voor het organische stofgehalte
- pH (H ₂ O)	zuurgraad (gemeten in wateroplossing)
- base kationen	Ca, K, Mg, Na
- kg ¹ ha ⁻¹ jr ⁻¹	kilogram per ha per jaar
- m ³ ha ⁻¹ jr ⁻¹	kubieke meter per ha per jaar

In deze studie is het begrip takhout gebruikt voor het bovengrondse hout dat normaal gesproken in Nederland na oogst achter blijft in het bos. In sommige bronnen wordt het begrip tak- en tophout gebruikt, wat feitelijk een meer correcte benaming is, aangezien bedoeld wordt op zowel takken als het dunste deel van de stam of spil. Ook wordt het begrip oogstresten (logging residues, slash) in sommige bronnen gebruikt, maar dit begrip dekt de lading niet goed als het betreffende materiaal geoogst wordt. Voor de leesbaarheid wordt het begrip takhout gebruikt in plaats van tak- en tophout.

Van boomsoorten is zo veel mogelijk de Nederlandse naam gebruikt. In gevallen dat die niet beschikbaar of algemeen gebruikt is, is de wetenschappelijke naam gebruikt.

2 Houtoogst

2.1 Reguliere oogstmethoden van stamhout in Nederland

Onder reguliere oogstmethode wordt hier verstaan de in Nederland meest gebruikelijke methoden voor het oogsten van stamhout. Belangrijkste activiteiten voor het oogsten van stamhout zijn (zie o.a. Van Raffe et al., 1998) vellen (scheiden van de stam van de stobbe), snoeien (de stam ontdoen van takken) en het transporteren van het stamhout naar een voor vrachtwagen bereikbare plek (bostransport). Daarnaast wordt het stamhout veelal gekort.

Momenteel gebeurt het vellen, snoeien en korten doorgaans door een harvester (oogstmachine). De harvester heeft een knikarm met een zaagkop waarmee hij de boom achtereenvolgens vastpakt, velt, snoeit en kort. Daarbij wordt het tak- en tophout op het nog te berijden pad gelegd, zodat bodembeschadiging door het berijden van de bodem door de harvester wordt beperkt. Daarmee wordt het tak- en tophout min of meer geconcentreerd in banen in het bos. Vellen, snoeien en korten is voor veel situaties het meest efficiënt als dit gebeurt met harvesters. Daar waar harvesters niet (kunnen) worden ingezet worden de handelingen uitgevoerd met een motorkettingzaag. Dit is bijvoorbeeld het geval op slecht begaanbare plekken of bij te dikke, kromme en/of te zwaar betakte bomen. Bij oogst met een motorkettingzaag blijft het takhout meer gespreid in de opstand achter.

Het bostransport van het stamhout gebeurt doorgaans door een forwarder (uitrijcombinatie). Dit is een trekker met (aangebouwde) wagen en kraan om het hout te laden en te lossen. De forwarder volgt meestal het pad van de harvester. Een alternatief is uitslepen met een trekker met uitsleeptang en in bepaalde gevallen met een paard. Op moeilijk begaanbare plekken wordt het hout eerst met een trekker met een lier naar beter bereikbare plekken gesleept. Verschillende combinaties worden ook toegepast.

Houtoogst gebeurt merendeels door dunning en in mindere mate door eindvelling. In 2008 werd bij particuliere bosbedrijven 2,5 van de 2,9 m³ha⁻¹jr⁻¹ in dunningen geoogst (Berger et al., 2009). Kapvlaktes komen bijna niet meer voor (Dirkse et al., 2006). De weinige kapvlaktes zijn in het algemeen kleinschalig, bijvoorbeeld één of twee maal de hoogte van de omringende bomen.

2.2 Oogst van tak- en tophout

Het is in Nederland momenteel niet gebruikelijk om takhout te oogsten in opgaande bossen. Het gebeurt wel bij omvormingen naar bijvoorbeeld heide, maar die situaties vallen buiten de scope van dit onderzoek omdat ze niet relevant zijn voor een volgende generatie bos. Het oogsten van hout inclusief takhout uit opgaand bos kan bij zowel dunningen als eindvelling gebeuren. Bij eindvelling komen er veel grotere hoeveelheden takhout vrij dan bij dunningen. Hierdoor zullen de oogstkosten per ton takhout bij eindvelling lager zijn. Daarnaast heeft oogst bij dunningen als nadeel dat de blijvende bomen hinder kunnen veroorzaken voor de machines.

De oogst kan uitgevoerd worden door het oogsten van takhout na reguliere oogst van stammen of door het oogsten van volledige bomen. In Nederland is het momenteel gebruikelijk om het stamhout voor een andere (hoogwaardigere) toepassing te bestemmen dan het takhout. Daarvoor wordt eerst het stamhout geoogst en in een latere werkgang wordt het takhout opgehaald. Bij dun stamhout (eerste dunningen bijvoorbeeld) zal er

meer voor gekozen worden om de gehele boom voor energiedoeleinden te oogsten, en zodoende bij oogst niet eerst de stam van de takken te ontdoen (uitsnoeien).

Het hout kan na het vellen en (eventueel) uitsnoeien direct afgevoerd worden, maar kan ook nog enige tijd in op de plaats van velling blijven liggen. Voordeel van dat laatste is dat het hout droogt, zodat minder water wordt getransporteerd en minder drogen op de werf nodig is. Daarnaast blijft er meer blad/naalden achter in het bos, zodat minder voedingsstoffen worden afgevoerd.

Zowel bij het oogsten van hele bomen als het oogsten van takhout kan het hout op de locatie van oogst worden versnipperd (tot een bepaalde diameter), maar het kan ook eerst afgevoerd worden. Lokaal versnipperen heeft als voordeel dat het volume per hoeveelheid massa fors afneemt, waardoor per rijbeweging meer hout afgevoerd kan worden. Er zijn machines die verschillende bewerkingen combineren, zoals vellen, versnipperen en transporteren, maar de kosten per eenheid zijn daardoor niet altijd lager dan bewerking in verschillende werkgangen.

Als het hout niet in de opstand versnipperd wordt, kan het als losse takken en als bundels afgevoerd worden. Bij gebundelde afvoer wordt takhout in de opstand tot bundels gebonden, die vervolgens (veelal) door een forwarder worden afgevoerd. Gebundelde afvoer heeft als voordeel dat het volume per eenheid massa afneemt zodat er minder rijbewegingen nodig zijn en de transportkosten lager zijn.

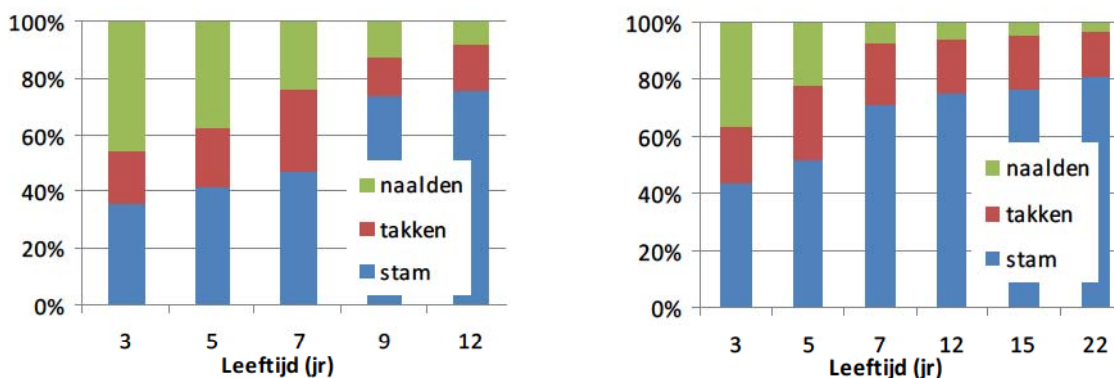
3 Effecten van houtoogst op de bodem

3.1 Algemeen

Om een inschatting te kunnen maken van de effecten van het verwijderen van biomassa uit bos is het van belang om te weten om hoeveel biomassa het gaat. Daarom wordt in paragraaf 3.2 ingegaan op de verdeling van biomassa over de boomcomponenten. In paragraaf 3.3 wordt vervolgens ingegaan op de concentraties voedingsstoffen in bomen. Op basis hiervan wordt in paragraaf 3.4 aangegeven hoeveel voedingsstoffen afgevoerd worden bij houtoogst. In paragraaf 3.5 wordt aangegeven welke effecten van oogst van hout er direct gevonden zijn op de voedingstoestand van de bodem, en in paragraaf 3.6 wordt hetzelfde gedaan voor het organische stofgehalte van de bodem. In paragraaf 3.7 wordt ingegaan op de effecten op de bodemvegetatie, die aan de ene kant concurreert om voedingsstoffen met bomen, maar die ook een indicatie van de voedingstoestand van de bodem kan zijn. In paragraaf 3.8 wordt ten slotte ingegaan op de mineralenbalans op basis van de toevoer door depositie en verwerking en de afvoer door netto oogst en uitspoeling.

3.2 Verdeling van biomassa in bomen

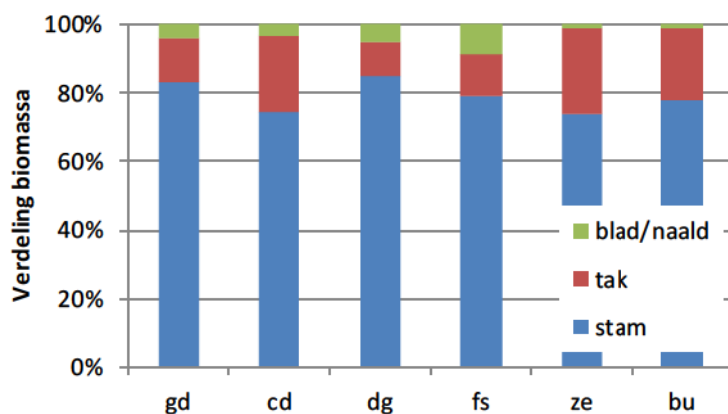
De bovengrondse biomassa van bomen wordt in de literatuur veelal verdeeld over de stam, de takken en blad of naalden. De grens tussen takken en stam wordt doorgaans gelegd bij een diameter van grofweg 7 tot 13 cm (bv. Baritz en Strich (2000) en Forest Guild Biomass Working Group (2010)). De verhouding tussen de hoeveelheid biomassa in de boomcomponenten varieert met de leeftijd. In figuur 1 is de verdeling van de biomassa over de boomcomponenten weergegeven voor *Pinus radiata* (Forrest en Ovington, 1970) en *P. keyisia* (Das en Ramakrishnan, 1987) van verschillende leeftijden. Daaruit blijkt dat het aandeel stamhout in de tijd toeneemt, terwijl het aandeel naalden en in de eerste jaren het aandeel takken afnemen. De verhouding takhout/stamhout is na verloop van tijd (bij een stambiomassa van circa 50 - 80 ton¹ha⁻¹ voor *Pinus radiata* en *P. keyisia*) min of meer constant. Vanaf dat moment nemen de hoeveelheden stamhout en takhout min of meer in gelijke mate toe, zodat de verhouding daartussen constant blijft. De Vries et al. (1990) geven aan dat de tak-stamverhouding vanaf 50 ton¹ha⁻¹ of 20 jr. min of meer constant blijft. De hoeveelheid naalden of blad (absoluut) is vanaf 20 jaar min of meer constant (De Vries et al., 1990), waardoor bij een toenemende houtvoorraad het aandeel blad in de totale bovengrondse biomassa afneemt.



Figuur 1

Verdeling van biomassa over de boomcomponenten bij verschillende leeftijden voor (links) *Pinus radiata* (Forrest en Ovington, 1970) en (rechts) *P. keyisia* (Das en Ramakrishan, 1987).

De Vries et al. (1990) laat zien dat de verhoudingen tussen stamhout, takhout en blad/naalden verschillen tussen boomsoorten maar ook tussen bomen van een gematigd zeeklimaat en een landklimaat. In figuur 2 zijn de verhoudingen weergegeven voor verschillende boomsoorten voor een zeeklimaat. De verhoudingen verschillen van de regelmatig gebruikte biomassa expansie factoren (BEFs) die bijvoorbeeld door Baritz en Strich (2000) zijn berekend voor Duitsland (verhouding takhout/stamhout van 0,24 op 1 voor loofboomsoorten en 0,14 op 1 voor naaldboomsoorten). De gegevens van De Vries et al. (1990) laten zien dat bomen in een gematigd zeeklimaat doorgaans een groter aandeel takhout hebben dan in het binnenland. Bijvoorbeeld bij zomereik is de verhouding takhout/stamhout 0,21 in het binnenland en 0,34 bij een gematigd zeeklimaat. Dit betekent dat bij de oogst van 100 m³ stamhout nog 21 resp. 34 m³ takhout geoogst kan worden.



Figuur 2

Verhouding tussen de biomassa van blad of naalden, takken en stam, voor bomen vanaf 20 jr, voor de soorten grove den (gd), Corsicaanse den (cd), Douglas (dg), fijnspar (fs), zomereik (ze) en beuk (bu), naar De Vries et al. (1990).

3.3 Gehalten aan voedingsstoffen in bomen

De hoeveelheid voedingsstoffen die wordt afgevoerd bij houtoogst is afhankelijk van de hoeveelheid afgevoerde biomassa en de concentratie voedingsstoffen daarin. Cole en Rapp (1981) geven van een aantal

studies de gevonden hoeveelheden biomassa en voedingsstoffen in bovengrondse delen van de bomen. In loofbossen van de gematigde zone werd bij een gemiddeld hoeveelheid biomassa van 150 ton per ha concentraties van 0,29% N, 0,02% P, 0,15% K, 0,37% Ca en 0,04% Mg gevonden. In naaldbossen van de gematigde zone werd bij een gemiddelde hoeveelheid biomassa van 307 ton per ha concentraties van 0,16% N, 0,02% P, 0,11% K, 0,16% Ca en 0,02% Mg gevonden. Bij de loofbossen is er geen verband tussen de hoeveelheid biomassa en de gehalten aan N of P. Voor de naaldbossen lijken de bossen met minder biomassa een lagere concentratie N te hebben.

De verdeling van biomassa en voedingsstoffen over de boomcomponenten verschilt tussen boomsoorten en bodems (Perala en Alban, 1982). Voor de drie onderzochte boomsoorten (ratelpopulier, *Picea glauca*, *Pinus resinosa* en *Pinus banksiana*) zit op zand en leembodems grofweg iets meer dan de helft van de hoeveelheid N, P en K in de takken en het blad, en het andere deel in de stam. Voor Ca en Mg is het aandeel in blad/naalden en takken minder dan de helft (ca. 1/3^{de}). *Picea glauca* heeft voor N, P en K grotere aandelen in naalden en takken, namelijk ca 3/4^{de} van het totaal en voor Ca en Mg 2/3^{de} van die voedingsstoffen.

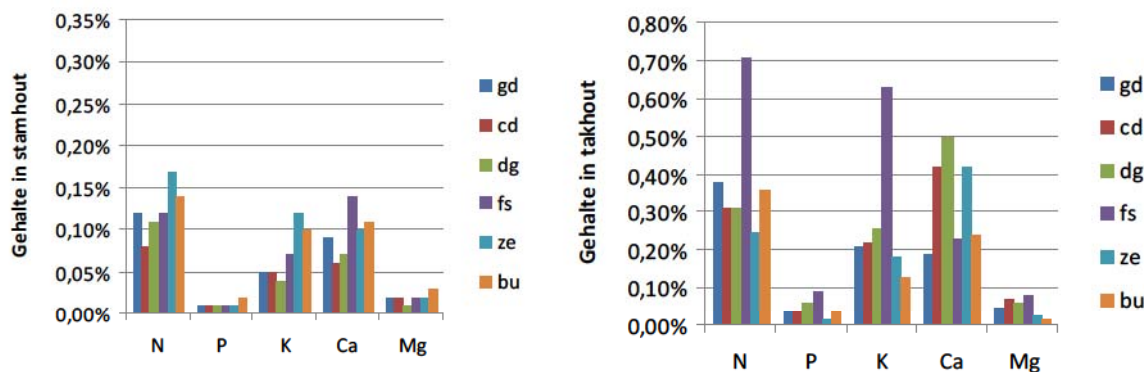
Het is lastig om soortspecifieke waarden van concentraties aan voedingsstoffen te bepalen, doordat die waarden afhankelijk zijn van bodem, klimaat, tijd van het jaar etc. (Hagen-Thorn et al., 2004; Van den Burg, 1985). Vooral de concentraties Ca kunnen sterk variëren, afhankelijk van de bodem en wateropname van bomen (Hagen-Thorn et al., 2004). Maar ook concentraties van andere voedingsstoffen kunnen variëren. De Vries et al. (1990) concluderen dat de concentraties voedingsstoffen in de tijd veranderen wat voor een deel wordt veroorzaakt door (verandering van) depositie.

Bomen op rijkere gronden hebben niet altijd hogere concentraties voedingsstoffen. Augusto et al. (2000) concluderen na vergelijking van de concentraties van voedingsstoffen in de totale bovengrondse delen van bomen van dezelfde leeftijd dat er wel variaties zijn in concentraties, maar dat bomen op armere gronden niet per se lagere concentraties voedingsstoffen hebben. Jongere bomen hebben in het algemeen wel hogere concentraties voedingsstoffen dan oudere bomen. Mogelijk kan bij de studie van Augusto et al. (2000) - die alleen ingaat op de nutriëntconcentraties van de totale bovengrondse delen - de verdeling van de biomassa over de boomcomponenten van invloed zijn geweest (zie paragraaf 3.2). Langzaam groeiende bomen hebben bij eenzelfde leeftijd een groter aandeel takhout (tot zekere leeftijd of hoeveelheid biomassa) en blad/naalden dan snel gegroeide bomen, en dus een groter aandeel componenten met een relatief hoge concentratie voedingsstoffen.

De hoeveelheid voedingsstoffen in bomen wordt verder niet alleen beïnvloed door de aanwezigheid van voedingsstoffen in de bodem, maar meer door de beschikbaarheid er van. Het is lastig om de beschikbaarheid voor bomen te bepalen, omdat die van veel factoren afhankelijk is, zoals de vochtigheid van de bodem en het voorkomen van mycorrhiza (Hagen-Thorn et al., 2004).

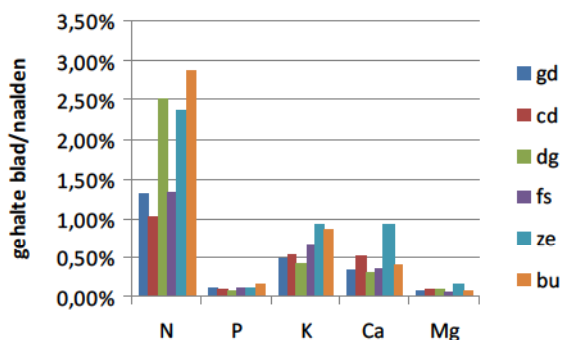
De Vries et al. (1990) geven op basis van literatuuronderzoek voor een aantal boomsoorten de gehalten aan voedingsstoffen. In figuur 3 en figuur 4 zijn deze weergegeven voor blad en naalden, takhout en stamhout. De concentratie Ca in stamhout van eiken is gebaseerd op De Vries (1994), aangezien de waarde van Vries et al. (1990) afwijkt en in de publicatie van 1994 is gecorrigeerd. De waarde van de publicatie van 1990 was ook hoog in vergelijking met bijvoorbeeld die van Hagen-Thorn et al. (2004).

Het blijkt dat de concentraties voedingsstoffen in het algemeen het hoogst zijn in blad en naalden en het laagst in het stamhout. Van K, Ca en Mg zijn de concentraties in takhout in het algemeen niet veel lager dan in blad. Er zijn duidelijke verschillen in concentraties per component tussen de boomsoorten. Blad van eik en beuk en naalden van Douglas hebben relatief hoge gehalten aan voedingsstoffen; vaak het dubbele van dat in andere boomsoorten. De gehalten van N en K in takhout van fijnspar en van Ca in takhout van enkele boomsoorten lijken aan de hoge kant vergeleken met andere bronnen (Hagen-Thorn et al., 2004). Dit kan mogelijk verklaard worden door de hoge beschikbaarheid van die voedingsstoffen op de onderzochte locaties. De waarden zullen ook binnen Nederland tussen locaties verschillen. Omgerekend naar de totale bovengrondse biomassa komen de concentraties van De Vries in orde van grootte overeen met die van Cole en Rapp (1981).



Figuur 3

Gehalten aan voedingsstoffen in takhout (links) en stamhout (rechts) voor de soorten grove den (gd), Corsicaanse den (cd), Douglas (dg), fijnspar (fs), zomereik (ze) en beuk (bu), naar De Vries et al. (1990) en De Vries (1994).



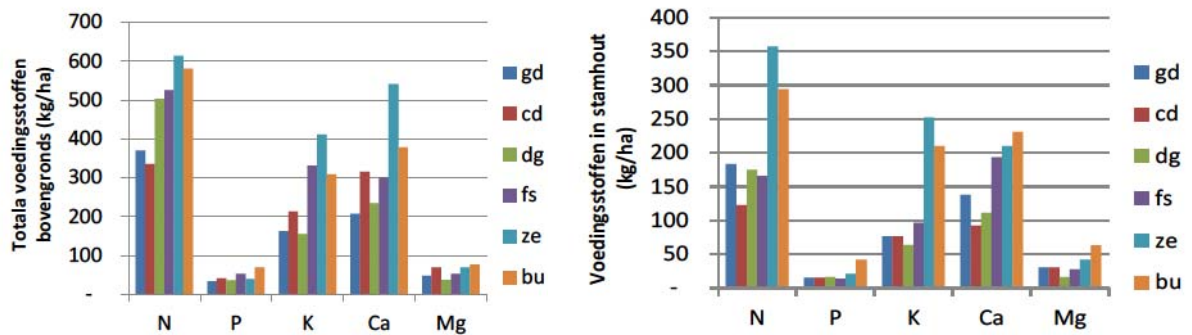
Figuur 4

Gehalten aan voedingsstoffen in blad of naalden voor de soorten grove den (gd), Corsicaanse den (cd), Douglas (dg), fijnspar (fs), zomereik (ze) en beuk (bu), naar De Vries et al. (1990) en De Vries (1994).

3.4 Afvoer van voedingsstoffen door houtoogst

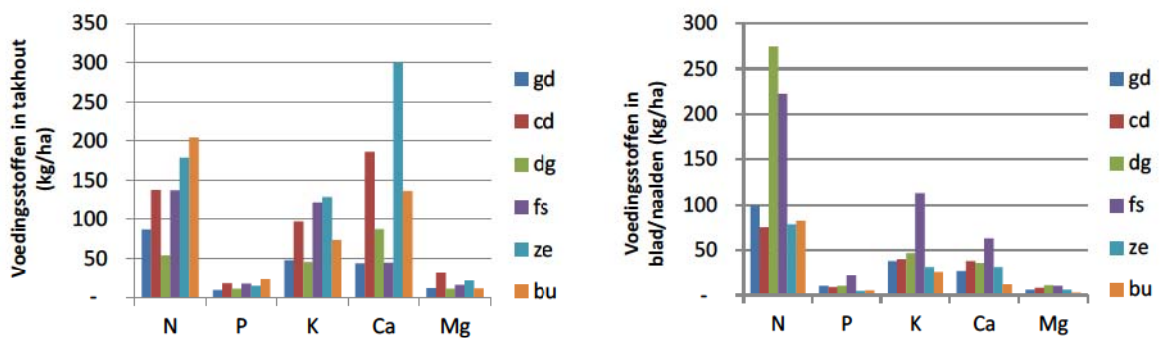
In hoofdstuk 2 is aangegeven dat hout in Nederland vooral door middel van dunningen wordt geoogst en dat oogst van takhout bij dunningen enkele nadelen heeft ten opzichte van oogst bij eindvelling. In het geval dat er takhout geoogst wordt, ligt het voor de hand om dat in ieder geval bij eindvellingen te doen en eventueel bij dunningen. Daarom wordt in het onderstaande aangegeven hoeveel voedingsstoffen worden afgevoerd bij eindvelling.

Op basis van de gegevens in De Vries et al. (1990) is berekend hoeveel voedingsstoffen afgevoerd worden bij een oogst van 300 m³ha⁻¹ (zie figuur 5 en figuur 6). Daaruit blijkt dat bij oogst van volledige bomen met name veel N wordt afgevoerd, namelijk ongeveer 330 - 600 kg¹ha⁻¹. Daarnaast wordt ook relatief veel Ca (gemiddeld 330 kg¹ha⁻¹) en K (gemiddeld 265 kg¹ha⁻¹) afgevoerd.



Figuur 5

Hoeveelheid voedingsstoffen ($\text{kg}^1 \text{ha}^1$) in de totale bovengrondse biomassa (links) en in stambout (rechts) bij een stamvolume van $300 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ berekend o.b.v. De Vries et al. (1990) en De Vries (1994) voor de soorten grove den (gd), Corsicaanse den (cd), Douglas (dg), fijnspar (fs), zomereik (ze) en beuk (bu).

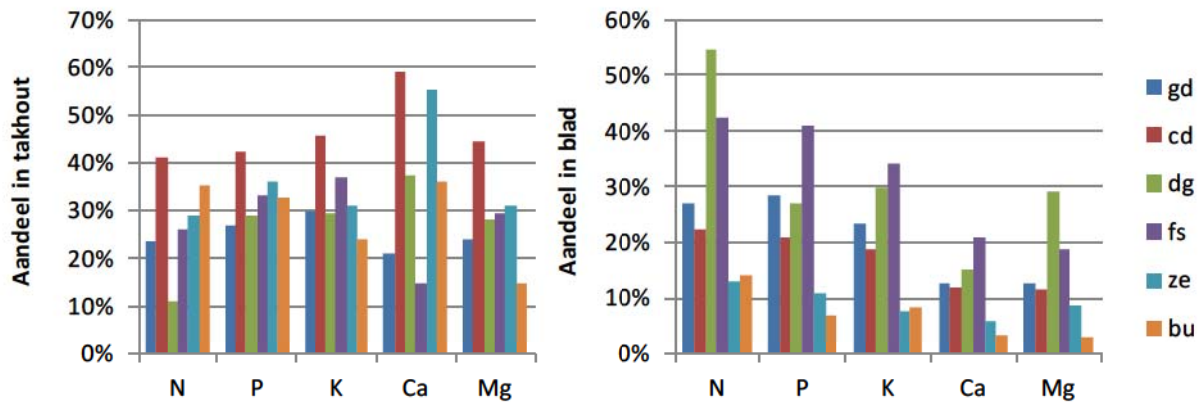


Figuur 6

Hoeveelheid voedingsstoffen ($\text{kg}^1 \text{ha}^1$) in takhout (links) en in takhout met blad/naalden (rechts) bij een stamvolume van $300 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ berekend o.b.v. De Vries et al. (1990) en De Vries (1994) voor de soorten grove den (gd), Corsicaanse den (cd), Douglas (dg), fijnspar (fs), zomereik (ze) en beuk (bu).

In figuur 7 zijn de aandelen voedingsstoffen over takhout en blad weergegeven. Daaruit blijkt dat gemiddeld over de boomsoorten een kwart van de hoeveelheid N in de bovengrondse biomassa in blad/naalden zit en een kwart in takhout. Bij Douglas en fijnspar zit relatief veel N in de naalden, terwijl het aandeel bij de loofboomsoorten relatief klein is. Ongeveer een derde tot de helft van de bovengrondse N zit in stambout. De verdeling van Ca over de componenten verschilt ook sterk tussen de boomsoorten. Gemiddeld over de zes boomsoorten zit 40% van de Ca in de takken en de helft in de stam. Slechts een klein deel zit in blad / naalden. Oogst van het takhout leidt dus gemiddeld tot (ruim) een verdubbeling van de afvoer van Ca bij eindvellingen, maar er zijn grote verschillen tussen de boomsoorten.

Het achter laten van naalden (of vermijden van zomervelling bij zomereik en beuk) is vooral gunstig om N, P en K te behouden in naalddhoutopstanden, en met name in fijnspar en Douglas. Daarnaast is het relatief gunstig voor behoud van Ca in fijnspar en Douglasopstanden. Bij beuk en eik zitten relatief weinig voedingsstoffen in het blad, namelijk grofweg een tiende van de voedingsstoffen.



Figuur 7

Aandeel van bovengrondse voedingsstoffen in takhout (grafiek links) en blad (grafiek rechts) bij een stamvolume van $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ berekend o.b.v. De Vries et al. (1990) en De Vries (1994) voor de soorten grove den (gd), Corsicaanse den (cd), Douglas (dg), fijnspar (fs), zomereik (ze) en beuk (bu).

3.5 Effecten van oogst van takhout op de nutriëntenhuishouding van de bodem

Vrijkomen van voedingsstoffen

Verschillende studies laten een toegenomen beschikbaarheid van voedingsstoffen zien onder hopen takhout vergeleken met kale grond. Oorzaken hiervoor zijn het vrijkomen van voedingsstoffen uit het takhout, toegenomen activiteit van microben, toegenomen afbraak van organisch bodemmateriaal door een gunstiger temperatuur en vochtigheid van de bodem en minder opname van voedingsstoffen door bodemvegetatie die door het takhout in groei wordt beperkt (Wall, 2008; Sterba, 1988; Stevens en Hornung, 1990).

Takhout, stammen en ook wortels zijn een langdurige bron van voedingsstoffen. Verschillende voedingsstoffen komen echter in verschillend tempo vrij uit dood hout. Palviainen (2004) concludeert dat K vrij snel vrij komt uit takhout inclusief blad en naalden (90% binnen drie jaar), en ook een groot deel van Fe en Al komen in de eerste drie jaar vrij. Ca in blad en fijne wortels komt ook vrij snel vrij, maar de relatief grote hoeveelheden Ca in bovengronds hout komen maar langzaam vrij. Door Staaf en Olsson (1994) werden ook vrij snel na oogst verhoogde concentraties K in het grondwater gevonden, wat er op wijst dat dit vrij snel vrij komt en niet allemaal opgenomen kan worden door de vegetatie (Olsson et al., 1996a). Weatherall et al. (2006) concluderen dat takhout een belangrijke bron van Ca is voor bomen, op basis van potproeven met sitkaspar.

Nord-Larsen (2002) vond bij een onderzoek naar de effecten van WTH dat concentraties voedingsstoffen voorafgaand aan dunning (te) laag waren, maar dat ze drie jaar na dunning bij CH meer verbeterd waren dan bij WTH (niet significant, maar wel verschil bij K, Mg, Ca). Dit wijst er op dat takhout al vrij snel bijdraagt aan de beschikbaarheid van voedingsstoffen. Vooral twijgen en bladeren leveren vrij snel kationen, terwijl takhout, stammen, stobben en wortels een vrij langdurige bron van voedingsstoffen en organische stof vormen (Knoepp en Swank, 1997).

Vastlegging van voedingsstoffen

Het is niet altijd zo dat er na oogst van takhout minder voedingsstoffen beschikbaar zijn voor bomen dan wanneer het takhout is achtergebleven. Sommige voedingsstoffen worden aanvankelijk geïmmobiliseerd, om later vrij te komen (Fahey et al., 1988; Abbott en Crossley, 1982). Palviainen et al. (2010) laten zien dat de concentraties van verschillende voedingsstoffen in stobben na oogst toe kunnen nemen. Vooral P wordt aanvankelijk door schimmels opgenomen uit de bodem en vastgelegd in hout. Van K wordt aangegeven dat de concentraties in de stobben wel snel afnemen door uitspoeling. De vastlegging van voedingsstoffen in de stobben beperkt uitspoeling na een verstoring bijvoorbeeld door houtoogst. Het effect zal echter niet in dezelfde mate optreden met takhout, omdat het niet dezelfde mate van contact heeft met de bodem. In diverse publicaties (o.a. Homyaka et al., 2008) wordt er op gewezen dat voor de omzetting van hout in eerste instantie N wordt vastgelegd, wat negatief is voor de N-beschikbaarheid voor bomen. Homyaka et al. (2008) tonen dit aan door na oogst houtchips op de bodem aan te brengen, waarna in bodems onder de houtchips lagere concentraties N werden gemeten dan bij de onbehandelde bodems. Daarnaast werd een toename van N in de houtchips gemeten, wat er op wijst dat N wordt vastgelegd.

Wall (2008) onderzocht de flux van neerslag en voedingsstoffen en constateert dat de input van water en N vanuit neerslag groter is dan de output van het takhout naar de bodem. Takhout houdt water vast (dat weer verdampt en niet op de bodem komt) en bindt N, dat wordt gebruikt voor het omzetten van het organische materiaal. Voor P, K, Ca en Mg is de output groter dan de input en dit betekent dat deze voedingsstoffen vrijkomen uit takhout en in de bodem terecht komen. Stevens en Hornung (1990) meten maar een kleine flux van N uit takhout na eindvelling van sitkaspar van 50 jaar oud.

Wall (2008) concludeert dat hopen takhout depositie van stikstof vasthouden en zodoende op korte termijn een negatief effect kunnen hebben op de groei van bomen op door stikstof beperkte bodems (op langere termijn komt het stikstof alsnog beschikbaar). Het verwijderen van takhout heeft een negatief effect op de beschikbaarheid van K, zodat op K-beperkte bodems het verwijderen een negatieve impact heeft op de bijgroei. Vitousek en Matson (1984) concluderen eveneens dat takhout N bindt. Dit betekent aan de ene kant dat dit niet voor bomen beschikbaar komt (in geval die aanwezig zijn als verjonging na eindvelling of bij dunning), maar dat daardoor ook minder stikstof uitspoelt. Ook Jussy et al. (2004) vinden een verlaagde beschikbaarheid van N na eindvelling (CH), door een verlaagde depositie (minder invang) en toegenomen microbiële activiteit (door input van organische stof en verhoogde bodemtemperatuur). De beschikbare N werd daarnaast voor een deel opgenomen door de bodemvegetatie die zich na kap had ontwikkeld.

Effect van houtoogst op de voorraad beschikbare voedingsstoffen

Algemeen wordt aangenomen dat CH weinig effect heeft op de voorraad beschikbare voedingsstoffen in de bodem. Knoepp en Swank (1997) vinden bijvoorbeeld zeventien jaar na oogst geen verschil in de voorraad voedingsstoffen tussen CH en ongestoord bos, terwijl (op basis van berekeningen van afvoer) er wel aangenomen wordt dat WTH effect heeft op de voorraad voedingsstoffen (Fox, 2000). Voor WTH vonden verschillende studies echter weinig effect op de C- en N-voorraad in de bodem tussen CH en WTH (Wall, 2008). Wall geeft aan dat vaak wel effecten gevonden zijn van WTH op de voorraad K, Ca en Mg, maar zelden op de voorraad P.

Verschillende studies richten zich met name op N als belangrijkste elementen in relatie tot groei van bomen en de afvoer daarvan door oogst van takhout, terwijl Ca mogelijk het element is dat vooral uitgeput raakt door deze extra oogst (Johnson en Todd, 1998; Johnson et al., 1982; Federer et al., 1989). Reynolds en Stevens (1998) geven voor het Verenigd Koninkrijk aan dat uitputting van N onwaarschijnlijk is gezien het niveau van stikstofdepositie. Ze zien meer kans op problemen met K-, P- en Ca-uitputting. Voor Ca verwachten ze dat de balans van afvoer met inputs via atmosferische depositie en verwerking van gesteente cruciaal zal zijn op zuurgevoelige bodems met weinig Ca in de bodem. Hoewel in het oosten van de Verenigde Staten Ca niet als groei beperkende factor wordt gezien, kan een tekort aan Ca daar in de toekomst wel een probleem vormen gezien de snelheid van uitspoeling en de mate van afvoer door houtoogst (Federer et al., 1989). Johnson et al.

(1982) schatten in dat de (extra) afvoer van N en P bij WTH voor een belangrijk deel wordt gecompenseerd door atmosferische depositie, maar voor Ca schatten ze in dat de afvoer door WTH, in combinatie met uitspoeling door zure depositie en vastlegging in vegetatie, tot uitputting kan leiden. Die uitputting is echter afhankelijk van de boomsoortensamenstelling (bepaalde soorten leggen meer Ca vast dan andere) en de mate waarin Ca kan vrijkomen uit verwerking.

Johnson en Todd (1998) laten zien dat bij een gemengd eikenbos in Tennessee WTH 15% van de totale hoeveelheid beschikbare Ca verwijderde, tegenover 7% bij CH. Vergelijking van de voorraden Ca in de oogstresten en de bodem door Johnson en Todd (1998) laat zien dat bij CH een groot deel van de Ca in de oogstresten ten goede is gekomen aan de voorraad Ca in de bodem vijftien jaar later, waardoor de voorraad Ca vijftien jaar na CH hoger is dan na WTH. Bij Mg treedt dit effect ook op, maar in mindere mate. Voor P en in mindere mate bij K werd gevonden dat WTH leidde tot een lagere voorraad in de bodem ten opzichte van CH. Voor P werd aangegeven dat dit ook verklaard kan worden door de grote variatie van beschikbaar P in de bodem. Voor K werd aangegeven dat de afname van K bij WTH kan worden verklaard door opname van de vegetatie.

Rosenberg en Jacobson (2004) vinden na twee dunningen in opstanden van fijnspar en grove den dat de hoeveelheid opneembaar Ca en Mg in de humuslaag groter is na CH ten opzichte van WTH, maar voor de totale voorraad in de humuslaag en de bovenste 10 cm van de minerale bodem vonden ze geen significant verschil. Thiffault et al (2006) vinden bij oogst van *Pinus banksiana* op zandige podzolen dat 15-20 jaar na CH de voorraad Ca en Mg hoger is dan na WTH bij uiteenlopende bodems. Dit uitte zich ook in hogere concentraties in naalden. Effecten van het afvoeren van takhout zijn dus in verschillende studies geconstateerd, maar de effecten zijn niet altijd duidelijk.

WTH leidt in verschillende bossen tot een lagere pH van de bodem in vergelijking met CH (Staaf en Olsson, 1991). Olsson et al. (1996a) vinden een lagere voorraad kationen (K, Ca, Mg, Mn en Zn) vijftien jaar na eindvelling WTH in vergelijking met CH, wat eveneens duidt op een verzurend effect van afvoer van takhout, maar kan geen verzurend effect aantonen voor de pH (H₂O).

Het gegeven dat met WTH meer voedingsstoffen worden afgevoerd dan bij CH betekent niet dat de voorraad voedingsstoffen in de bodem (op termijn) in eenzelfde mate afneemt. Jacobson et al. (2000) wijzen er op dat door het verwijderen van takhout de temperatuur van de bodem in het groeiseizoen toeneemt waardoor organische stof sneller mineraliseert en voedingsstoffen sneller vrijkomen. Wanneer voedingsstoffen uit mineraliserende bodem en takhout vrijkomen maar er onvoldoende vegetatie is om de voedingsstoffen op te nemen kan dit tot uitspoeling leiden (Jacobson et al., 2000; Likens et al., 1978). Fahey et al. (1991) constateren vooral een hogere uitspoeling van N en K na CH ten opzichte van WTH, wat volgens hen voor een deel komt door het vrijkomen van N en K uit takhout. Maar voor N gaan ze er van uit dat opname door bodemvegetatie een belangrijke rol speelt bij WTH.

Het effect van uitspoeling zal sterk plaat afhankelijk zijn. Bij een studie van Hornbeck (1990) was de hoeveelheid voedingsstoffen die door uitspoeling uit het systeem verdween klein in verhouding tot wat er met WTH werd afgevoerd. Dit wordt ook door Morris en Miller (1994) aangegeven. De uitspoeling nam in drie jaar na oogst duidelijk af, maar de uitspoeling van K kan langer doorgaan. Vitousek en Matson (1984) laten zien dat het achterlaten van takhout de uitspoeling van N ook kan beperken. Algemeen kan gesteld worden dat na oogst een extra deel van de voedingsstoffen van een systeem door uitspoeling uit het systeem kan verdwijnen en dat vegetatiebedekking die uitspoeling kan beperken.

De effecten op de lange termijn van houtoogst op de voedingstoestand van de bodem zijn uiteindelijk afhankelijk van allerlei factoren die de verplaatsing van voedingsstoffen beïnvloeden, zoals de bodemvruchtbaarheid, boomsoortensamenstelling, oogstintensiteit (inclusief WTH of CH) en (micro)klimaat. Bossen met de hoogste risico's voor uitputting van base kationen (Ca, Mg, K, Na) zijn onder andere bossen met 1) boomsoorten die veel kationen opslaan in de bovengrondse biomassa, 2) een matig tot lage basenverzadiging van de bodem, 3) een bodem met een lage kationen-uitwisselingscapaciteit en 4) met een

bodem waaruit weinig kationen vrijkomen door verwerking (Adams et al., 2000). Voor de Nederlandse bossen kan daarbij gedacht worden aan bijvoorbeeld zomereik op arme grove zandgronden.

Bepalen concentraties en voorraad voedingsstoffen in de bodem

Het feit dat verschillende onderzoeken leiden tot verschillende conclusies over het effect van oogstintensiteiten op de voedingstoestand van bodems komt aan de ene kant waarschijnlijk door onderzoek dat steeds op verschillende locaties is uitgevoerd waar verschillende processen zich in verschillende maten voordoen. Aan de andere kant zijn concentraties voedingsstoffen in bosbodems moeilijk goed te bepalen door de relatief grote variaties in ruimte en tijd (Mahendrappa et al., 1986; Knoepp en Swank, 1996). Daarnaast is het moeilijk in te schatten in welke mate voedingsstoffen vrij komen uit bodemmateriaal (Johnson et al., 1982). Olsson et al. (1996a) vonden voor de kationenvoorraad voor verschillende locaties effecten van WTH ten opzichte van CH, maar niet voor de meest voedselarme locatie. Dit werd verklaard doordat het moeilijk is om kleine verschillen aan te tonen bij lage concentraties voedingsstoffen. Het al dan niet vinden van verschillen heeft dus voor een deel te maken met (statistische) beperkingen van onderzoeken.

3.6 Effecten van oogst van takhout op organische stof in de bodem

Het organischestofgehalte van de bodem is van invloed op de productiviteit van bomen, vooral door de fysieke aspecten er van (dichtheid, waterhoudend vermogen) en door het vermogen om voedingsstoffen vast te houden (uitwisselingscapaciteit). Een tekort aan organische stof in de bodem is in vergelijking met een tekort aan voedingsstoffen als N, P en K lastig op korte termijn op te lossen, omdat het moeilijk toe te dienen is (Johnson, 1994). Onder andere Olsson et al. (1996b) noemen het risico dat afvoer van takhout een negatief effect heeft op de hoeveelheid organische stof in de bodem. Lagere organischestofgehalten leiden tot een lager vermogen om vocht vast te houden. Vooral op drogere bodems zou dit daarom een negatief effect kunnen hebben op o.a. de groei van bomen.

Kaalkap heeft geen eenduidig effect op de mineralisatie van organische stof in de bodem. Dit komt doordat bepaalde aspecten van het verdwijnen van de boomkronen er een gunstig effect op hebben (meer invang van regen, minder verdamping door planten, hogere temperatuur door zonnestraling), terwijl andere een negatief effect hebben (meer uitdroging door expositie, nachtelijk afkoelen doordat er minder beschutting is) (Palviainen et al., 2004).

Het laten liggen of juist oogsten van takhout heeft om dezelfde redenen eveneens geen eenduidig effect op de mineralisatie (Jacobson et al., 2000). Op bepaalde locaties heeft WTH een positief effect op de hoeveelheid C in de bodem. Jacobson et al. (2000) wijzen er op dat door het verwijderen van takhout de temperatuur van de bodem in het groeiseizoen toeneemt waardoor organische stof sneller mineraliseert, maar ze geven niet aan of dat voor alleen boreale streken of ook voor gematigde streken geldt. Voor veenbodems vonden Vanguelova et al. (2010) dat het afvoeren van takhout in vergelijking met laten liggen gunstig is voor het vochtgehalte en de hoeveelheid C van de bodem. Hun veronderstelling is dat door takhout te laten liggen de mineralisatiesnelheid van organische stof toeneemt omdat de bodem minder vochtig wordt. Bij een experiment van Walmsley et al. (2009) op polzodbodems in Wales is de hoeveelheid C in de bodem ook hoger na WTH, ten opzichte van CH, wat verklaard wordt door mogelijk versnelde mineralisatie van organische stof na CH. Moroni (2007) geeft ook aan dat takhout een dempend effect heeft op temperatuur- en vochtigheidsveranderingen en dit is gunstig voor de omzetting van organische stof. Hij concludeert verder dat verhoogde beschikbaarheid van voedingsstoffen uit takhout de microbiële activiteit stimuleert. Johnson en Todd (1998) vinden na CH een toename van C in de bodem, maar de toename is groter bij WTH, wat wordt verklaard door een mogelijk grotere vastlegging van C door de bodemvegetatie bij WTH.

Een meta-analyse door Johnson en Crutis (2001) laat zien dat gemiddeld over meerdere studies WTH een afname van C van 6% in de bodem veroorzaakt, terwijl CH een toename van 18% veroorzaakt. Die toename bij

CH komt echter alleen voor bij naaldboomsoorten. De toename van C is doorgaans van korte duur (enkele jaren).

In verschillende studies wordt geen effect aangetoond op de hoeveelheid C in de bodem. Rosenberg en Jacobson (2004) vonden vier jaar na dunning geen significant verschil tussen WTH en CH, al leek er wel een tendens te zijn naar een lagere hoeveelheid C na WTH ten opzichte van CH. Olsson et al. (1996b) konden vijftien jaar na eindvellingen ook geen verschil in de hoeveelheid C in de bodem vinden tussen CH en WTH. Huntington (1990) verwachtte - gezien de uitkomst van andere studies - een verschil te meten in de hoeveelheid organische stof in de bodem na WTH resp. CH. Het verschil werd echter niet aangetoond en dit werd verklaard door onder andere door grote (ruimtelijke) variatie van de bodem. Dit verklaart mogelijk ook waarom in bepaalde studies geen verschillen tussen WTH en CH worden aangetoond, terwijl dat bij andere studies wel het geval is.

3.7 Effect van oogst van takhout op de bodemvegetatie

Kaalkap is voor het bos een ingrijpende maatregel die invloed heeft op de samenstelling van de bodemvegetatie (Bormann en Likens, 1979). Er zijn fysieke effecten omdat achtergebleven takhout de lichtbeschikbaarheid beperkt, de bodem beschadigd wordt en de beschikbaarheid van voedingsstoffen verandert. De wijze waarop de maatregel wordt uitgevoerd is dan ook van invloed op de verdere ontwikkeling van de vegetatie.

De fysieke effecten lijken maar enkele jaren een rol te spelen. Zo nam op achttien verschillende locaties in Zweden de vegetatiebedekking na CH af van gemiddeld 40% naar 10% in zes jaar tijd (Kardell, 1992). Mann et al (1988) vonden dat biomassa van bodemvegetatie twee jaar na WTH 25 - 50% hoger is dan na CH. Fahey et al. (1991) vonden een hogere biomassa in bodemvegetatie in de eerste vier jaar na WTH in vergelijking met CH.

In enkele andere studies zijn na langere perioden weinig verschillen meer aan te tonen in vegetatiebedekking na CH of WTH. Rosenberg en Jacobson (2004) vonden bijvoorbeeld circa 15 jaar na een eerste en vijf jaar na een tweede dunning geen verschil in samenstelling tussen WTH en CH. Wel vonden ze kleine verschillen in de bedekking van verschillende vegetatielagen, maar die verschillen waren niet significant. Olsson en Staaf (1995) vonden bij monitoring van vegetatie na kaalkap de grootste veranderingen vlak na de oogst. Ze vonden acht resp. zestien jaar na oogst geen lagere bedekking van bodemvegetatie na CH kaalkap ten opzichte van WTH, wat er op wijst dat de fysieke effecten geen rol meer speelden. Ze vonden wel verschillen in vegetatiesamenstelling, die ze toeschrijven aan hogere beschikbaarheid van voedingsstoffen na CH. Grotere toename van *Rubus idaeus* en *Epilobium angustifolium* die ze vonden na CH komt namelijk overeen met toename van deze soorten na bemesting.

3.8 Balans van voedingsstoffen

In een bos vindt op verschillende manieren transport plaats van voedingsstoffen. Voedingsstoffen worden onder andere opgenomen door planten, getransporteerd in planten, vastgelegd in plantendelen, komen terug in en op de bodem als dood organisch materiaal, en komen vervolgens weer terecht in het bodemvocht of worden gebonden aan minerale grond of humus. Daarnaast vindt er aanvoer van voedingsstoffen plaats van buiten het systeem, en raakt het systeem voedingsstoffen kwijt. De afvoer van voedingsstoffen in hout is één van de componenten van één van de manieren waarop het bos voedingsstoffen kwijt raakt. Voedingsstoffen verlaten het bos ook door uitspoeling. Voedingsstoffen worden daarnaast vastgelegd in biomassa, waardoor ze nog wel in het systeem zijn, maar (tijdelijk) niet beschikbaar zijn voor opname door planten (Knoepp en Swank, 1990). Voedingsstoffen worden aangevoerd door depositie en uit vertering van gesteente komen daarnaast nieuwe voedingsstoffen beschikbaar. Ten slotte zijn er enkele, meestal kleine en/of lokale fluxen,

bijvoorbeeld door aan- en afvoer door dieren, stikstoffixatie en kwel. In deze paragraaf worden de belangrijkste componenten behandeld, om een indruk te krijgen in welke mate afvoer van takhout invloed heeft op de totale balans van voedingsstoffen.

In verschillende publicaties is de voedingsstoffenbalans voor verschillende mineralen berekend. De resultaten verschillen sterk tussen de verschillende publicaties. Algemene waarden voor depositie, verwerking en cetera zijn daarom niet te geven. In het volgende worden gegevens weergegeven om een indruk te hebben van de orden van grootte. De aan- en afvoer is uitgedrukt in waarden per hectare per jaar, zodat ze eenvoudig te combineren zijn.

Verwerking van mineraal bodemmateriaal

Door verwerking van minerale delen van de bodem komen vooral metaalionen vrij (Ca, Mg, K, Na, Fe, Al en Mn) en in mindere mate P. De vrijkomende hoeveelheden variëren sterk, afhankelijk van het moedermateriaal (Mahendrappa et al., 1986). Maar ook factoren zoals bodemtemperatuur, vocht, mate van contact tussen mineralen en water, contactoppervlak van mineralen hebben invloed en die factoren kunnen worden beïnvloed door oogstactiviteiten (Zabowski et al., 1994). Het is daarom niet mogelijk algemene waarden aan te geven voor het vrijkomen van mineralen door verwerking.

In Nederland kan op kalkrijke gronden door natuurlijke verwerking jaarlijks 150 - 300 kg Ca per hectare per jaar vrijkomen. Op kalkarme gronden (diverse haar- veld- en holtpodzolen) komen slechts enkele kilogrammen Ca per hectare per jaar vrij (Breeuwsma en De Vries, 1984). Juist op dergelijke bodems zijn veel van de Nederlandse bossen gelegen. Van de Salm et al. (1997) geven voor drie locaties in Nederland gemiddelde verwerkingssnelheden voor van 0,5 kg¹ha⁻¹jr⁻¹ voor Ca en Mg, en 2,6 kg¹ha⁻¹jr⁻¹ voor K. De Vries (1994) geeft voor een aantal verschillende kalkarme zandgronden (podzolen) verwerkingssnelheden van (groveweg) 1,5 - 3,2 kg¹ha⁻¹jr⁻¹ voor Ca en Mg en K.

Depositie

De totale depositie kan worden verdeeld in natte en droge depositie. De natte depositie bestaat uit elementen die zijn opgelost in regenwater en is mede afhankelijk van de hoeveelheid neerslag. Droge depositie kent een sterk ruimtelijk aspect en is mede afhankelijk van de begroeiing (ruwheid). De droge depositie is voor bladhoudende boomsoorten hoger dan voor bladverliezende soorten (De Vries, 1994).

De depositie van N varieert ruimtelijk sterk. In het midden en zuiden van Nederland is de stikstofdepositie hoger dan in het noorden en Zeeland. Het gemiddelde depositieniveau bedraagt grofweg 30 kg¹ha⁻¹jr⁻¹, en op bepaalde plaatsen meer dan 50 kg¹ha⁻¹jr⁻¹. Het depositieniveau is in de jaren '90 gedaald, maar is de laatste jaren vrij constant. Het Rijksbeleid is erop gericht om de depositie van verzurende en vermestende stoffen verder te laten afnemen. Voor P geven Meinardi en Van den Berg (2008) een gemiddelde waarde van 0,5 kg¹ha⁻¹jr⁻¹, terwijl Witte et al. (2006) uitgaan van 0,26 kg¹ha⁻¹jr⁻¹ langs de kust.

Boschloo en Stolk (1998) berekenen een natte depositie van Ca van ongeveer 2 kg¹ha⁻¹jr⁻¹ en 0,8 kg¹ha⁻¹jr⁻¹ voor Mg en K, gemiddeld over meerdere locaties in Nederland. Om tot de totale depositie te komen dient daar de droge depositie bijgeteld te worden. De Vries (1994) gebruikt een omrekenfactor van 3 van natte naar totale depositie. Draaijers et al. (1996) geeft aan dat de droge depositie van basen gemiddelde 45% van de totale depositie is, terwijl dat voor Ca 66% is. Daarmee komt de depositie voor Ca eveneens gemiddeld op circa 6 kg¹ha⁻¹jr⁻¹, terwijl die voor K en Mg ca. 1,5 kg¹ha⁻¹jr⁻¹ bedraagt. De gemiddelde depositie van Ca bedraagt begin jaren 1990 volgens Hedin et al. (1994) circa 6 kg¹ha⁻¹jr⁻¹. De Vries en Jansen (1994) geven aan dat depositie van Ca het hoogste is nabij de kust (door zeemineralen) en in Zuid-Limburg (de laagste door de kalkbodems). Leeters et al. (1994) vinden depositiewaarden tot circa 11 kg¹ha⁻¹jr⁻¹. De depositie is in de orde van grootte van die van het oosten van de VS met een depositie van Ca tot 7 kg¹ha⁻¹jr⁻¹ (Federer et al., 1989), maar tot ongeveer de helft lager dan wat in Duitsland is gemeten (Meesenburg et al., 1995). De depositie van

Mg bedraagt circa 1,5 - 5 kg¹ha⁻¹jr⁻¹ en van K circa 1,1 - 3 kg¹ha⁻¹jr⁻¹ (Draaijers et al., 1996; Boschloo et al., 1998; De Vries, 1994; De Vries en Jansen, 1994; Leeters et al., 1994).

De depositie van base kationen is niet constant in de tijd. Hedin et al. (1994) constateren een afname van de basendepositie van 32% in Nederland in de periode 1970 - 1990, waaronder ook die van Ca. Dat verklaart mogelijk waarom De Vries (1994) een totaal depositieniveau van base kationen geeft van Ca 8,5 kg¹ha⁻¹jr⁻¹, Mg 3,6 kg¹ha⁻¹jr⁻¹ en K 1,3 kg¹ha⁻¹jr⁻¹ voor de jaren 1978 - 1985. De afname komt vooral door minder uitstoot bij energieproductie en de cement- en steenindustrie en mogelijk een afname van onverharde wegen. Meesenburg et al. (1995) constateren ook voor twee locaties in Duitsland een aanzienlijke afname van de depositie van Ca, Mg en K door afname van de uitstoot van stof.

Afvoer uit houtoogst

Op basis van de gegevens in De Vries (1994) is voor zes boomsoorten bij een bijgroei van gemiddeld 8 m³ha⁻¹jr⁻¹ berekend hoeveel voedingsstoffen er bij de oogst wordt afgevoerd. Bedacht moet worden dat de afvoer sterk afhankelijk is van de beschikbaarheid van voedingsstoffen voor bomen. Bij een lage beschikbaarheid van voedingsstoffen en een lage groei (bijvoorbeeld op kalkarme zandgronden) zal de afvoer van voedingsstoffen door oogst sterk lager zijn dan in rijke situaties. De getallen die hier gepresenteerd worden zijn dan ook slechts indicatief.

In tabel 2 is de gemiddelde afvoer van voedingsstoffen in stamhout, takhout en bladeren/naalden per hectare per jaar weergegeven bij eindvelling van 50% van de bijgroei (de rest van de bijgroei is bijvoorbeeld afgevoerd in dunningen of als dood hout achtergebleven; zie ook paragraaf 3.4). Daaruit blijkt dat bij een eindvelling van alleen stamhout vooral N en Ca worden afgevoerd, namelijk gemiddeld ongeveer 3 resp. 2 kg¹ha⁻¹jr⁻¹, en voor K daarnaast gemiddeld 1,7 kg¹ha⁻¹jr⁻¹. Bij zomereik en beuk worden met het stamhout duidelijk meer voedingsstoffen afgevoerd dan bij de naaldhoutsoorten.

Wanneer ook takhout wordt afgevoerd leidt dit gemiddeld over de verschillende boomsoorten tot bijna een verdubbeling van de afvoer van voedingsstoffen, en in bepaalde gevallen (bijvoorbeeld bij Corsicaanse den) tot een ruime verdubbeling. Gemiddeld over de boomsoorten wordt dan van N 6,5 kg¹ha⁻¹jr⁻¹ afgevoerd. De afvoer van Ca bedraagt gemiddeld over de boomsoorten 4,4 kg¹ha⁻¹jr⁻¹, maar bij zomereik is dat aanzienlijk meer. Als daarnaast ook naalden en - in geval van zomervellingen - blad worden afgevoerd komt daar afhankelijk van de voedingsstof gemiddeld over de boomsoorten nog 10 - 40% bij. Maar voor bijvoorbeeld N bij fijnspar en Douglas leidt afvoer van naalden tot een toename van resp. 73% en 120% van de afvoer van N ten opzichte van afvoer van alleen stam- en takhout.

Tabel 2

Afvoer van voedingsstoffen (in $\text{kg}^1 \text{ha}^1 \text{jr}^1$) bij oogst van de eindvelling na 75 jaar van 50% van de bijgroei van (gemiddeld $8 \text{ m}^3 \text{ha}^1 \text{jr}^1$) stamhout, voor de soorten grove den (gd), Corsicaanse den (cd), Douglas (dg), fijnspar (fs), zomereik (ze) en beuk (bu), **berekend** o.b.v. De Vries et al. (1990) en De Vries (1994).

Component	Boomsoort	Element ($\text{kg}^1 \text{ha}^1 \text{jr}^1$)				
		N	P	K	Ca	Mg
Stamhout	gd	2,4	0,2	1,0	1,8	0,4
	cd	1,6	0,2	1,0	1,2	0,4
	dg	2,3	0,2	0,8	1,5	0,2
	fs	2,2	0,2	1,3	2,6	0,4
	ze	4,8	0,3	3,4	2,8	0,6
	bu	3,9	0,6	2,8	3,1	0,8
	Gemiddeld	2,9	0,3	1,7	2,2	0,5
Takhout	gd	1,2	0,1	0,6	0,6	0,2
	cd	1,8	0,2	1,3	2,5	0,4
	dg	0,7	0,1	0,6	1,2	0,1
	fs	1,8	0,2	1,6	0,6	0,2
	ze	2,4	0,2	1,7	4,0	0,3
	bu	2,7	0,3	1,0	1,8	0,2
	Gemiddeld	1,8	0,2	1,1	1,8	0,2
Blad/naald	gd	1,3	0,1	0,5	0,3	0,1
	cd	1,0	0,1	0,5	0,5	0,1
	dg	3,7	0,1	0,6	0,5	0,1
	fs	3,0	0,3	1,5	0,8	0,1
	ze	1,0	0,1	0,4	0,4	0,1
	bu	1,1	0,1	0,3	0,2	0,0
	Gemiddeld	1,8	0,1	0,7	0,5	0,1
Totaal	gd	4,9	0,5	2,2	2,8	0,6
	cd	4,5	0,6	2,9	4,2	0,9
	dg	6,7	0,5	2,1	3,1	0,5
	fs	7,0	0,7	4,4	4,0	0,7
	ze	8,2	0,5	5,5	7,2	0,9
	bu	7,7	0,9	4,1	5,1	1,0
	Gemiddeld	6,5	0,6	3,5	4,4	0,8

In tabel 3 is de gemiddelde afvoer van voedingsstoffen in stamhout, takhout en bladeren/naalden per hectare per jaar weergegeven bij eindvelling en dunningen bij een gemiddelde bijgroei van $8 \text{ m}^3 \text{ha}^1 \text{jr}^1$ over een omloop van 75 jaar. Als alleen het stamhout wordt geoogst dan wordt over de boomsoorten gemiddeld per hectare jaarlijks circa bijna 6 kg N en ruim 4 kg Ca afgevoerd. Als daarnaast ook het takhout wordt afgevoerd, dan verdubbelt de afvoer van voedingsstoffen ongeveer en wordt er gemiddeld per ha per jaar ruim 10 kg N afgevoerd, tegenover ruim 8 kg Ca.

Bij afvoer van de totale bovengrondse biomassa wordt gemiddeld per hectare per jaar over de verschillende boomsoorten ongeveer 14 kg N, en ruim 9 kg Ca afgevoerd. Bij grove den worden in het algemeen de kleinste hoeveelheden voedingsstoffen afgevoerd. Bij zomereik en beuk wordt relatief veel N afgevoerd, terwijl de afvoer van Ca met name relatief hoog is bij zomereik, en in mindere mate bij beuk en Corsicaanse den.

Tabel 3

Afvoer van voedingsstoffen (in $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{jr}^{-1}$) bij oogst (eindvellingen + dunningen) over een omloop van 75 jaar van de totale bijgroei (gemiddeld $8 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \cdot \text{jr}^{-1}$), voor de soorten grove den (gd), Corsicaanse den (cd), Douglas (dg), fijnspar (fs), zomereik (ze) en beuk (bu), berekend o.b.v. De Vries et al. (1990) en De Vries (1994).

Component	Boomsoort	Element ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{jr}^{-1}$)				
		N	P	K	Ca	Mg
Stamhout	gd	4,9	0,4	2,0	3,7	0,8
	cd	3,3	0,4	2,0	2,4	0,8
	dg	4,7	0,4	1,7	3,0	0,4
	fs	4,4	0,4	2,6	5,2	0,7
	ze	9,5	0,6	6,7	5,6	1,1
	bu	7,8	1,1	5,6	6,2	1,7
	Gemiddeld	5,8	0,5	3,4	4,3	0,9
Takhout	gd	2,3	0,2	1,3	1,2	0,3
	cd	3,7	0,5	2,6	5,0	0,8
	dg	1,4	0,3	1,2	2,3	0,3
	fs	3,7	0,5	3,2	1,2	0,4
	ze	4,8	0,4	3,4	8,0	0,6
	bu	5,4	0,6	2,0	3,6	0,3
	Gemiddeld	3,6	0,4	2,3	3,5	0,4
Blad/naald	gd	3,1	0,3	1,2	0,8	0,2
	cd	2,6	0,3	1,4	1,3	0,3
	dg	10,2	0,4	1,7	1,3	0,4
	fs	7,3	0,7	3,7	2,1	0,3
	ze	2,6	0,1	1,1	1,1	0,2
	bu	2,7	0,2	0,8	0,4	0,1
	Gemiddeld	4,8	0,3	1,6	1,2	0,2
Totaal	gd	10,4	1,0	4,5	5,7	1,3
	cd	9,6	1,2	6,0	8,7	1,9
	dg	16,3	1,1	4,6	6,6	1,1
	fs	15,4	1,5	9,5	8,4	1,5
	ze	16,9	1,1	11,2	14,6	1,9
	bu	15,9	1,9	8,4	10,2	2,1
	Gemiddeld	14,1	1,3	7,4	9,0	1,6

Er zijn diverse varianten denkbaar waarin takhout wordt geoogst. Zo kan het takhout bij eindkap, dunningen of beide worden geoogst, en kan er voor worden gekozen om blad/naalden niet af te voeren. Aangezien afvoer van takhout uit dunningen technisch lastiger uitvoerbaar en kostbaarder is dan uit eindkap is in tabel 4 het totaal van afvoer van voedingsstoffen weergegeven van stamhout uit eindkap en dunningen en takhout uit alleen eindkap. Daarnaast is er van uitgegaan dat van loofhout geen blad wordt afgevoerd vanwege oogst in de winter, terwijl er bij naaldhout wel naalden worden afgevoerd. In dat scenario wordt gemiddeld over de boomsoorten rond $9 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{jr}^{-1}$ N afgevoerd. De afvoer van Ca bedraagt bij de naaldhoutsoorten rond $5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{jr}^{-1}$, maar bij de loofhoutsoorten kan dat het aanzienlijk meer zijn.

Voor bossen op arme groeiplaatsen met een veel lagere bijgroei is de gemiddelde afvoer veel lager. Bij grove den op zeer arme grond met een bijgroei van gemiddeld $4 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \cdot \text{jr}^{-1}$ zal bijvoorbeeld minder dan de helft van de in tabel 4 opgegeven waarden bij grove den worden afgevoerd, omdat de hoeveelheid afgevoerde biomassa gemiddeld per jaar lager is, maar ook omdat de concentraties voedingsstoffen lager zullen zijn.

Tabel 4

Afvoer van voedingsstoffen (in $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{jr}^{-1}$) bij oogst (eindvellingen + dunningen) over een omloop van 75 jaar van de totale bijgroei van stamhout (gemiddeld $8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{jr}^{-1}$), takhout en naalden uit eindkap, geen blad (als gevolg van winterveling), voor de soorten grove den (gd), Corsicaanse den (cd), Douglas (dg), fijnspar (fs), zomereik (ze) en beuk (bu), berekend o.b.v. De Vries et al. (1990).

Boomsoort	Element ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{jr}^{-1}$)				
	N	P	K	Ca	Mg
gd	7,4	0,7	3,2	4,6	1,0
cd	6,1	0,8	3,9	5,4	1,3
dg	9,0	0,7	2,9	4,6	0,7
fs	9,2	0,9	5,7	6,6	1,1
ze	11,9	0,8	8,4	9,6	1,4
bu	10,6	1,4	6,6	8,0	1,8
Gemiddeld	9,0	0,9	5,1	6,5	1,2

Uitspoeling

Uitspoeling van voedingsstoffen kan een belangrijke component zijn van de balans van voedingsstoffen. Federer et al. (1989) wijzen er op dat over een periode van 120 jaar uitspoeling - versterkt door zure depositie versterkt door de mens - een belangrijke factor is van het verdwijnen van Ca uit een bossysteem. Het tempo van uitspoeling van voedingsstoffen is sterk locatieafhankelijk. Zo neemt de uitspoeling van Ca toe naarmate de beschikbaarheid er van hoger is (Johnson en Todd, 1987). Uitspoeling wordt beïnvloed door de boomsoortensamenstelling. Soorten die relatief veel Ca opnemen putten de (diepere) minerale bodem uit, en verrijken de strooisel en humuslaag met Ca en Mg. Soorten die relatief weinig voedingsstoffen opnemen produceren zure humus en arm strooisel (Alban, 1982). Daardoor kan de uitspoeling van mineralen onder dennen hoger zijn dan onder eiken (Johnson en Todd, 1987).

Houtoogst vergroot de uitspoeling van voedingsstoffen, maar het effect is afhankelijk van de oogstmethode en het bostype (Knoepp en Swank, 1996). Kaapkap kan de uitspoeling versterken doordat er minder interceptie van regen is en bomen ontbreken om voedingsstoffen op te nemen (Palviainen et al., 2004). In een studie van Mann et al. (1988) is de uitspoeling van voedingsstoffen direct na oogst in sommige plots hoger en in andere lager dan voor de oogst. Mann et al. (1988) vond bij WTH dat de uitspoeling voor P tijdelijk hoger was dan na CH, maar voor andere voedingsstoffen werd geen verschil aangetoond. Het effect is mogelijk afhankelijk van een combinatie van herstel van de vegetatie (paragraaf 3.7) en de snelheid van vrijkomen van voedingsstoffen (paragraaf 3.5).

Rosen en Lundmark-Thelin (1987) vonden onder hopen takhout van takhout een podzolbodem in Zweden en hogere uitspoeling van N dan tussen de hopen. De uitspoeling was hoger dan de hoeveelheid N die uit het takhout vrijkwam. De auteurs verklaarden de hogere uitspoeling door een hoger bodemvochtgehalte en een gematigdere bodemtemperatuur, wat leidde tot een hogere mineralisatie van organische stof in de bodem.

Berekeningen van de voedingsstoffenbalansen voor 150 Nederlandse boslocaties laten zien dat de uitspoeling van Ca en Mg in ongeveer een derde tot een kwart van de gevallen groter is dan de depositie. Voor K is de uitspoeling vrijwel steeds groter dan de depositie (De Vries en Jansen, 1994). De uitspoeling van N bedroeg $12 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{jr}^{-1}$, maar de variatie was aanzienlijk, namelijk van $5 - 28 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{jr}^{-1}$ maar is steeds aanzienlijk lager dan de depositie. In diverse bronnen (Mann et al., 1998; Swank et al., 2001; Yanai 1998; Alban, 1982) wordt uitspoeling van P als zeer laag aangegeven, ook in verhouding tot de afvoer via houtoogst.

Totaal balans

Een totale balans van aanvoer en afvoer van voedingsstoffen is niet algemeen te geven. Zorg om de voedingsstoestand komt in verschillende studies naar voren op basis van berekening van voorraden voor

specifieke situaties (Fox, 2000). Federer et al. (1989) concluderen bijvoorbeeld dat voor het oosten van de VS de depositie van Ca in combinatie met verwerking van gesteente niet genoeg is om de afvoer door houtoogst en uitspoeling te compenseren. Volgens Federer et al. (1989) kan WTH het tempo waarin bossen Ca kwijt raken verdubbelen.

Op basis van verschillende bronnen is enig inzicht te krijgen in de orde van grootte van aan- en afvoer van voedingsstoffen, maar de verschillen tussen locaties kunnen erg groot zijn. Bedacht moet worden dat de bijdragen van de verschillende componenten aan de voedingsstoffenbalans vaak moeilijk te bepalen zijn en dat de uitkomsten slechts indicatief kunnen zijn (Reynolds en Stevens, 1998).

Afvoer van (tak)hout lijkt voor de beschikbaarheid van N in Nederlandse bossen nauwelijks een probleem te vormen gezien de verhouding ervan met niveau van depositie. Voor P is de potentiële afvoer door houtoogst groter dan de depositie. Vrijkomen van P uit de voorraad en uitspoeling zijn sterk afhankelijk van onder andere de pH.

Voor Ca zijn de verschillen tussen locaties en situaties erg groot. In het voorgaande is aangegeven dat voor een aantal voorbeeldsituaties de afvoer van Ca bij oogst van al het stamhout en van takhout bij eindvellingen ongeveer 5 - 12 kg¹ha⁻¹jr⁻¹ bedraagt, maar voor diverse bossen en oogstscenario's kan dit ook de helft meer of minder zijn. Aanvoer van Ca door depositie bedraagt naar schatting 6 kg ha⁻¹jr⁻¹. Uit verwerking komen hoeveelheden Ca vrij die variëren van 0,5 kg¹ha⁻¹jr⁻¹ tot > 100 kg¹ha⁻¹jr⁻¹. Daarnaast zijn er verliezen door uitspoeling die afhangen van de hoeveelheid die vrijkomt bij verwerking. Algemeen kan gesteld worden dat de hoeveelheden Ca die (potentieel) vrij komen uit hout een factor van belang zijn op bodems waar weinig Ca vrijkomt door verwerking. Voor Mg lijken potentiële problemen veel minder te spelen door de beperktere afvoer hiervan bij houtoogst.

Tabel 5

Globale indicatie van aan- en afvoer van voedingsstoffen voor N, P, K Ca en Mg voor bosgronden.

		Verandering per element (kg ¹ ha ⁻¹ jr ⁻¹)				
		N	P	K	Ca	Mg
Input	Verwerking	-	?	2,6 - 3,2	0,5 - 3,2 (kalkarm) >100 (kalkrijk)	2,6 - 3,2
	Depositie	30 - 50	0,3 - 0,5	1,1 - 3,0	6,0 - 11,0	1,5 - 5,0
Output	Houtoogst 1	3,3 - 9,5	0,4 - 1,1	1,7 - 6,7	2,4 - 6,2	0,4 - 1,7
	Houtoogst 2	6,1 - 11,9	0,7 - 1,4	2,9 - 8,4	4,6 - 9,6	0,7 - 1,8
	Houtoogst 3	9,6 - 16,3	0,9 - 1,7	4,5 - 10,1	5,7 - 13,6	1,1 - 2,0
	Uitspoeling	5 - 28	?	> 1,1 - 3,0	?	1,5 - ?

Houtoogst 1: CH 8 m³ha⁻¹jr⁻¹.

Houtoogst 2: oogst stamhout 8 m³ha⁻¹jr⁻¹, en oogst takhout (incl. naalden, excl. blad) alleen bij eindvelling.

Houtoogst 3: WTH 8 m³ha⁻¹jr⁻¹ incl. naalden, excl. blad

4 Effecten van oogst van takhout op de bijgroei

4.1 Voedingsstoffen en bijgroei

Al in de late 19^{de} eeuw ontstond enige bezorgdheid over het effect van houtoogst op de productie van bossen. In de jaren '60 van de 20^{ste} eeuw werden enkele onderzoeken gedaan naar met name de uitspoeling van N na houtoogst in bossen. De tegenstrijdige resultaten leidde tot het opzetten van meerdere onderzoeksprogramma's op dit onderwerp. In de jaren '70 verschoof de aandacht van uitspoeling van N naar het afvoeren van voedingsstoffen door WTH en de effecten daarvan op de bijgroei (Johnson, 1994).

Verschillende auteurs (Egnell en Leijon, 1997; Mahendrappa et al., 1986; Johnson en Todd, 1998) geven aan dat N meestal de groeibeperkende voedingsstof is in diverse bossen. Veel onderzoek naar de effecten van oogst van takhout richten zich op de beschikbaarheid van N. Maar ook andere voedingsstoffen zoals base kationen beïnvloeden de groeisnelheid en vitaliteit van bomen (Thiffault et al., 2006). Baribault et al. (2010) vonden bijvoorbeeld een hoge correlatie tussen de hoeveelheid beschikbare Ca en de bovengrondse productie voor laagproductieve groeiplaatsen. Van den Burg en Oosterbaan (1988) geven voor verschillende voedingsstoffen de concentraties in blad aan waarbij groeivertragingen optreden en waarbij bemesting van die voedingsstoffen de bijgroei bevordert.

Het effect van de beschikbaarheid van voedingsstoffen op de groei van bomen blijkt uit verschillende proeven. Krause (1981) vindt in een experiment met verschillende bemestingsniveaus van N, P en K bij verschillende naaldboomsoorten een groeitoename na het toedienen van N. Bij K werd echter geen effect gevonden, ook geen positieve interactie met het toedienen van N. Hij geeft aan dat in de betreffende bodems K een goede voorraad heeft en dat K goed door het ecosysteem gerecycled wordt. Bij toediening van P werd alleen een positief effect op de bijgroei gevonden in combinatie met N.

Proe et al. (1996) vonden bij CH van sitkaspar een gemiddeld grotere bijgroei bij bemesting (iedere drie jaar 150 kg N, 50 kg P en 100 kg K per ha), maar verschillen met onbemeste behandelingen waren niet significant. Wel vonden ze een lagere bijgroei na WTH ten opzichte van CH, wat werd toegeschreven aan de beschikbaarheid van voedingsstoffen. Hogere groei werd ook na 20 jaar gevonden door Vanguelova et al. (2010) na bemesting bij aanplant met 150 kg N, 50 kg P en 30 kg Ca per ha.

Ca dat door bomen wordt opgenomen komt voor een groot deel vrij uit blad- en naaldval, maar de hoeveelheid varieert sterk afhankelijk van de boomsoort en de grondsoort. Perala en Alban (1982) berekenden voor zand-, resp. leemgronden een jaarlijkse hoeveelheid van 24 - 83 kg¹ha⁻¹ Ca dat via blad- en naaldval op de bodem terecht komt. Voor N (33-54 kg¹ha⁻¹), P (3,1 - 8,0 kg¹ha⁻¹), K (11 - 22 kg¹ha⁻¹) en Mg (4,1 - 8,5 kg¹ha⁻¹) varieerden die hoeveelheden veel minder. Met name de hoeveelheid beschikbare Ca was bij de zandgronden lager dan bij de leemgronden, wat leidde tot een lagere hoeveelheid Ca die jaarlijks via blad- en naaldval terugkomt in de bodem.

Hornbeck et al. (1990) schatten dat bosverjonging een opname had van gemiddeld 50 kg Ca ha⁻¹jr⁻¹ in de eerste drie jaar. Ze geven aan dat mede door uitspoeling van Ca direct na oogst en door afvoer bij oogst met name voor Ca een kans is op gebrek. Maar ook voor N en K wordt aangegeven dat er kansen zijn op een gebrek aan deze voedingsstoffen na uitspoeling en directe afvoer door WTH.

Een tekort aan voedingsstoffen hoeft niet direct tot een geringere groei te leiden. Merino (2005) vond op basis van bladanalyses tekorten in onderzochte opstanden voor P, Mg en Ca. Desondanks was de productiviteit wel hoog, wat Merino verklaarde door het efficiënt(er) omgaan van de bomen met de voedingsstoffen.

4.2 Effecten van oogst van tak- en tophout op de bijgroei

Er is veel onderzoek gedaan naar het effect van het oogsten van takhout op de bijgroei van bomen. De resultaten van de onderzoeken zijn niet eenduidig (tabel 6). Bij verschillende onderzoeken is een negatief effect gevonden van oogst van takhout op de bijgroei. Sterba (1988) vond een gemiddeld 12% lagere bijgroei na WTH dunning ten opzichte van CH. Gezien de hogere concentraties aan N en P in het blad bij CH vermoedde Sterba dat een lagere beschikbaarheid aan voedingsstoffen bij WTH de oorzaak van het verschil was. Vanguelova et al. (2010) vonden eveneens een hogere hoogte en diametergroei na CH ten opzichte van WTH, 20 jaar na oogst, hoewel de groei de jaren direct daarna vergelijkbaar was. Voor *Pinus banksiana* werd na WTH een 18% lagere groei gemeten dan na CH (Thiffault et al., 2010). *Pinus banksiana* reageert relatief snel op veranderingen op de bodemgesteldheid door een snelle jeugdgroei, diepe beworteling en hoge omzetting van naalden.

Tabel 6

Enkele resultaten uit verschillende studies naar de effecten van WTH op de bijgroei.

Auteur (jaar)	Waargenomen effect WTH t.o.v. CH	Beschrijving
Egnell en Leijon (1997)	geen resp. beperkt effect	dunning in fijnspar en grove den op rijke resp. arme bodem
Jacobson et al. (2000)	5-6% minder bijgroei	Grove den en fijnspar op grof en fijn zand, effect na dunning
Mard (1998)	geen (significant) verschil in groei	20-30 jarige berk en fijnspar na dunning
Nord-Larsen (2002)	5 - 18% minder bijgroei in eerste vier jaar, daarna geen effect	arme bodem, vroege dunningen,
Proe et al. (1999)	minder hoogtegroe	Sitka spar, eerste vijf jaar na oogst
Proe et al. (1996)	32% minder bijgroei	Sitka spar, over twaalf jaar
Sterba (1988)	gemiddeld 12% (tot 19%) minder groei in volume	vroege dunningen in fijnspar
Thiffault et al. (2010).	18% minder bijgroei	zandige bodem
Walmsley et al, 2009	10% minder DBH groei en 8% minder hoogtegroe	Sitka spar, 22 jaar na aanplant

Egnell en Leijon (1997) vonden over een periode van tien jaar geen statistisch significant verschil voor de grondvlakgroei na dunning tussen WTH en CH. Wel geven ze aan dat het verschil in grondvlak met de tijd toeneemt ten gunste van CH. Ze geven de toegenomen stikstofdepositie ter plaatse (tot 10 kg.ha⁻¹jr⁻¹) als mogelijke oorzaak van het relatief kleine effect. Een andere mogelijke verklaring die ze geven voor effecten die in andere studies zijn gevonden is het gunstige fysieke effect van het liggende tak- en tophout op het vochtgehalte en de temperatuur van de bodem, waardoor organische stof die er onder zit sneller mineraliseert. Daarnaast geven ze aan dat het taktophout (bij andere studies) de groei van concurrerende bodemvegetatie kan beperken, iets wat in hun studie geen rol speelde.

Nord-Larsen (2002) vond na WTH dunning van ca. 18 ton¹ha⁻¹ een lagere bijgroei van 5 - 18% ten opzichte van CH. Het effect duurde circa vier jaar, waarna in beide situaties de bijgroei weer vergelijkbaar was. Proe et al.

(1996) vinden juist in de eerste jaren weinig effect tussen WTH en CH, maar vanaf een leeftijd van vier jaar was het verschil significant. Na twaalf jaar werd een verschil van 32% in de bijgroei gemeten.

Mard (1998) vond slechts een klein, maar niet significant effect op de bijgroei van WTH dunning in 20-30 jarige opstanden van ruwe berk en fijnspar. Nord-Larsen (2002) en Egnell en Leijon (1997) geven aan dat uit hun onderzoek niet blijkt dat WTH een groter negatief effect op de bijgroei heeft dan CH. Mogelijke verklaringen zijn dat er op de armere bodems die ze onderzochten minder voedingsstoffen worden afgevoerd dan op rijkere bodems. Daarnaast reageren bomen op armere bodems minder snel op bijvoorbeeld de beschikbaarheid van voedingsstoffen dan op rijkere bodems, zodat groeiverschillen minder makkelijk zijn waar te nemen op armere bodems (Egnell en Leijon, 1997). Ook kan N tijdelijk worden vastgelegd in takhout (Wall, 2008) wat vooral op sterk door N-beperkte bodems bij CH negatief kan zijn voor de bijgroei in de eerste jaren na de oogst.

Bij een proef in Engeland blijkt het achterlaten van takhout een positief effect te hebben op de groei. In de eerste twee jaren na de oogst kon dit niet verklaard worden door een verschil in beschikbaarheid van voedingsstoffen, aangezien de concentraties daarvan in de naalden niet verschilden tussen de behandelingen (Proe et al., 1999). In de jaren daarna hadden tekorten van N en K (te lage concentraties in naalden) mogelijk wel effect op de groei.

Verschillende bronnen adviseren om geen WTH toe te passen op armere gronden (Hornbeck et al., 1990; Evans et al. 2010). Jacobson et al. (2000) vinden echter op rijkere gronden een groter effect (absolute bijgroeiverschillen) van WTH ten opzichte van CH op de bijgroei dan op armere gronden. Modelstudies van Paré et al. (2002) laten zien dat met name bij boomsoorten die relatief inefficiënt met voedingsstoffen omgaan (lees: hoge concentraties bevatten) en snel groeien problemen met uitputting van voedingsstoffen verwacht kunnen worden.

De ligging van bos bepaalt mede het effect van WTH op de bijgroei. Een hoge depositie, bijvoorbeeld van N uit de landbouw en base kationen nabij zee, beperkt het effect van de afvoer van voedingsstoffen met oogst van takhout (Nord-Larsen, 2002). Takhout dat na oogst achterblijft beïnvloedt de bijgroei door effect op de beschikbaarheid van voedingsstoffen, maar ook door effect op bodemverdichting, microklimaat (vooral wind dicht bij de grond), bodemvegetatie (competitie) (Proe et al., 1997).

5 Bestaande richtlijnen oogst takhout

In het buitenland zijn enkele richtlijnen opgesteld voor het oogsten van takhout en het beperken van de negatieve effecten ervan. Hieronder volgt een greep daaruit.

Zweden

Bij de Zweedse richtlijn worden bossen ingedeeld in risicoklassen, die allen een andere aanpak hebben voor de oogst van takhout. Algemeen dient takhout in het bos gedroogd te worden en blijven naalden en blad achter. In bossen met speciale korstmossenbegroeiing dient geen takhout geoogst te worden en op verzuurde bodems of veengronden dient de afvoer van mineralen gecompenseerd te worden met as en stikstofbemesting. Het wordt aanbevolen om as te recyclen als er meer dan 0,5 ton per ha is afgevoerd over een omloop. Het toedienen van as wordt ook toegestaan als er verwacht wordt dat op de betreffende locaties takhout geoogst gaat worden in de nabije toekomst (Levin en Erikson, 2010).

Finland

De Finse richtlijn gaat eveneens uit van een indeling van bos in risicoklassen. Aangezien het oogsten van stobben gebruikelijk is in Finland richt de leidraad zich voor een deel op die praktijk. De Finse richtlijn geeft daarnaast aan dat 30% van het takhout achter moet blijven in het bos en gelijkmatig verspreid dient te worden na kaalkap. Er zijn geen regels voor het recyclen van as, maar het wordt wel aanbevolen voor veengronden en na oogst van takhout en stobben op arme bodems. In de praktijk wordt circa 10% van de as gerecycled (Evans, 2010).

Denemarken

In Denemarken is het gebruikelijk om bij vroege dunningen WTH toe te passen, maar het oogsten van takhout na CH is niet gebruikelijk vanwege logistieke problemen en risico's voor de bodemvruchtbaarheid. De richtlijn beveelt aan dat takhout gedroogd dient te worden voor de oogst en dat per opstand geëvalueerd dient te worden op basis van een classificatie naar hardhout/zachthout en flora en fauna van de opstand.

Verenigd Koninkrijk

Forest reseach (2009) heeft voor het Verenigd Koninkrijk (VK) een richtlijn opgesteld, die dient om fysieke bodembeschadigingen, verlaagde bodemvruchtbaarheid en verzuring van de bodem tegen te gaan. De richtlijn geeft aan dat het oogsten van takhout minder schadelijk is voor de bodem dan oogst van stamhout, omdat de forwarders door de lage dichtheid van het takhout minder zwaar beladen worden. De schade door oogst van takhout is met name beperkt als achterwaarts wordt gewerkt en de forwarder alleen over takhout rijdt. Meer schade ontstaat als het takhout eerst enkele (drie tot negen) maanden blijft liggen om te drogen en de mat van takken niet goed is neergelegd. Als het takhout als balen wordt afgevoerd ontstaat weer meer schade, omdat er dan werkgangen zijn van zowel de balenpers als de forwarder. De richtlijn geeft aan schade te beperken door op matig kwetsbare bodems niet in natte periodes te oogsten. De kwetsbare bodems zijn niet geschikt om takhout op te oogst.

Om schade aan de bodemvruchtbaarheid te beperken zijn eveneens drie klassen bodems onderscheiden. Voor de minst kwetsbare bodems zijn er geen beperkingen. Op de matig kwetsbare bodems dient blad en naalden door drogen van het takhout achter te blijven. Op de kwetsbaarste bodems is een assessment gewenst. Aangegeven wordt dat het niet effectief is om takhout geconcentreerd (langs werkroutes) achter te laten, omdat er op die plekken uitspoeling ontstaat. In alle gevallen kan oogst uitgevoerd worden als afgevoerde voedingsstoffen op een goede manier gecompenseerd worden.

Om schade door verzuring te beperken geldt voor de kwetsbare bodems dat blad en naalden in het bos achter moeten blijven terwijl op de minst kwetsbare bodems geen beperkingen gelden. Op de meest kwetsbare bodems dient oogst van takhout vermeden te worden, tenzij afgevoerde mineralen gecompenseerd worden.

Verenigde Staten

In de Verenigde Staten (VS) zijn richtlijnen per staat opgesteld. Alle staten hebben al een (algemene) richtlijn voor oogst (best management practice). De status van de regels varieert van wetgeving tot vrijwillige richtlijnen. Er zijn veelal aanvullende richtlijnen voor oogst van takhout ten behoeve van de bodemvruchtbaarheid en bescherming van oppervlaktewater, maar in sommige staten zijn geen duidelijk aanvullende richtlijnen, of is zelfs een beperking opgegeven van de aanwezige hoeveelheid takhout die achter mag blijven in verband met brandgevaar (Forest Guild Biomass Working Group, 2010).

De 'ForestGuild', een organisatie met leden in de VS die zich inzet voor verantwoord bosbeheer, heeft voor zijn leden eveneens een handleiding gemaakt voor het verantwoord oogsten van takhout. Belangrijke doelen zijn om bodemvruchtbaarheid, waterkwaliteit, ecologische functies van dood hout (groeiplaats voor schimmels, planten, bescherming voor wild etc.) te beschermen. Belangrijkste regels zijn:

- geen oogst in oerbos;
- kwetsbare en/of natuurbossen alleen takhout oogsten voor het behoud van die bossen om bijvoorbeeld woekerende soorten tegen te gaan;
- in voedselarme bossen geen takhout oogsten;
- in overige bossen 25-33% van het takhout achter laten bij een 'normaal' oogstniveau;
- laat hout van verschillende diameters achter;
- laat hout verspreid over de opstand achter;
- laat een aantal kwijnende bomen staan.

Canada

In Canada zijn richtlijnen per provincie opgesteld of provincies zijn nog bezig met het opstellen ervan. In bepaalde provincies wordt aangegeven om op arme gronden geen takhout te oogsten. In sommige staten is het oogsten van takhout geregeld in wetgeving, waarbij bijvoorbeeld een bepaalde hoeveelheid dood hout na oogst achter moet blijven. Er worden nog steeds gegevens verzameld en ontwikkelingen gevolgd om beleid op vast te stellen, wat ook de wens kan betekenen dat de oogst van biomassa toeneemt.

Algemene lijn

Uit de bovenstaande richtlijnen blijkt dat er in verschillende landen zorgen zijn over de effecten van de oogst van takhout. Die zorg is omgezet in richtlijnen die negatieve effecten dienen te beperken of voorkomen. Een strategie die meerdere keren wordt toegepast is het indelen van het bos in een aantal (kwetsbaarheids)klassen, waarbij voor verschillende klassen meer of minder strenge richtlijnen gelden. In het algemeen worden vooral beperkingen gesteld voor de bossen op de arme gronden.

6 Discussie

Bijgroei en bodemvruchtbaarheid

Er is in het buitenland veel onderzoek gedaan naar de effecten van oogst van takhout op de bodemvruchtbaarheid en de bijgroei van bossen. De belangrijkste reden in het algemeen is zorg om de afname van de productiviteit van de bossen, met name door het afvoeren van voedingsstoffen.

In verschillende studies worden effecten aangetoond van het oogsten van takhout op de bodemvruchtbaarheid en de bijgroei van bomen. Andere studies tonen geen verschil aan. Dat kan voor een deel komen doordat er daadwerkelijk geen of nauwelijks effecten zijn (op bepaalde bodems), maar het kan ook komen doordat effecten moeilijk (statistisch) aan te tonen zijn, bijvoorbeeld door variatie van voedingstoestand en groei per boom. Ook zijn verschillen moeilijk te meten als de groeisnelheden van bomen laag zijn of als de concentraties van voedingsstoffen in de bodem klein zijn.

De afname in bijgroei kan verschillende oorzaken hebben die sterk beïnvloed worden door specifieke kenmerken van het bos waarvan de boomsoortensamenstelling, bodemgesteldheid, depositie en het klimaat vooral van belang zijn. Maar daarnaast is ook de wijze waarop het hout geoogst wordt relevant, doordat bijvoorbeeld meer voedingsstoffen achter kunnen blijven als takhout en blad/naalden na velling eerst enige tijd achter blijven in het bos, of doordat de verschillende methoden van oogst een andere mate van bodemverdichting veroorzaken. Resultaten van een specifieke studie kunnen daarom niet één op één vertaald worden naar de Nederlandse situatie. Dit wordt onderstreept doordat de resultaten van de verschillende onderzoeken niet eenduidig zijn.

Boseigenaren dienen zich er bewust van te zijn dat het oogsten van relatief laagwaardig takhout dat relatief lastig is om te oogsten ten koste kan gaan van de productie van relatief hoogwaardig hout dat relatief gemakkelijk te oogsten is. Echter, het is niet duidelijk hoe lang WTH een negatief effect op de groei kan blijven hebben. Als WTH de bijgroei na eindkap over een periode van tien jaar met 10% verlaagt, gaat dit ten koste van grofweg 4 - 6 m³ bijgroei aan stamhout, of een groeiachterstand van een jaar. Die hoeveelheid is klein ten opzichte van de hoeveelheid takhout die bij eindkap kan worden geoogst. Maar het is vooralsnog onduidelijk hoe lang, en in welke mate deze effecten optreden, en wat het gevolg is als structureel al het takhout - ook bij dunningen - wordt geoogst. Bij een constante beperking van de groei met 10% ziet het plaatje er een stuk ongunstiger uit.

Voedingsstoffenbalansen spelen een belangrijke rol in de onderzoeken naar de effecten van oogst van takhout. De bijdragen van verschillende componenten van de voedingsstoffenbalansen zijn moeilijk goed te bepalen, zoals het vrijkomen van voedingsstoffen uit gesteente en de depositie (met name droge depositie). Berekeningen van de voedingsstoffenbalansen zijn daarom met een bepaalde mate van onzekerheid omgeven. Ook het al dan niet laten liggen van het takhout heeft effect op de voedingsstoffenbalans. Bijvoorbeeld doordat op bepaalde bodems onder takhout de organische stof sneller mineraliseert, wat vooral bij gebrek aan opname door vegetatie en beperkte capaciteit om voedingsstoffen vast te houden kan leiden tot uitspoeling. Duidelijk is dat het afvoeren van hout en blad/naalden een belangrijke factor is in de voedingsstoffenbalans en sterk bijdraagt aan het afvoeren van voedingsstoffen uit het bos.

Effecten van extra rijbewegingen

In deze studie is gekeken naar met name de effecten van afvoer op de voedingstoestand en de bijgroei van bossen. Er zijn echter ook andere effecten van de oogst van takhout op het bos. Oogst van tak- en tophout na de reguliere oogst van stamhout betekent extra werkgangen in het bos. Dit leidt tot mogelijk tot extra belasting en beschadiging van de bodem. Aan de ene kant komt dat doordat er meer en/of zwaardere rijbewegingen plaats vinden in het bos. Bij reguliere oogst wordt daarnaast doorgaans door de machines over het vrijgekomen takhout gereden, om de beschadiging van de bodem te beperken. Als takhout na de reguliere oogst voor energieopwekking toegepast moet kunnen worden, is het gewenst om niet over de takken heen te rijden zodat het takhout schoon blijft. Daarmee kan de beoogde functie van het takhout om bodembeschadiging te beperken niet meer vervuld worden.

Bodemverdichting leidt tot een hogere weerstand voor wortelgroei en tot minder macroporiën en kan daarmee de groei van bomen en ontwikkeling en overleving van verjonging beperken (Grigal, 2000; Fox, 2000). Spontaan herstel kan decennia duren (Grigal, 2000). Bodembewerking kan een goed middel zijn tegen bodemverdichting. Wel moet bedacht worden dat oppervlakkige bodembewerkingen groeiproblemen door diepere verdichtingen niet verhelpen (Fox, 2000). Bodemverdichting ontstaat voor het grootste deel door de eerste (enkele) passages (Grigal, 2000; Williamson en Neilsen, 2000). Het zou daarom goed zijn te analyseren in hoeverre er na de eerste passages door de harvester en forwarder bij WTH nog extra verdichting optreedt door werkgangen voor afvoer van takhout.

Het achterlaten van (tak)hout

In enkele richtlijnen wordt aangegeven dat takhout gespreid over de opstand achter dient te blijven na oogst. Ook in Nederland is het waarschijnlijk goed om takhout gespreid achter te laten. Bij de huidige praktijk wordt veel van het takhout geconcentreerd achtergelaten op het spoor van de oogstmachines. Mogelijk gevolg is dat delen van het bos verschaald worden terwijl op het spoor verrijking plaats vindt die tot uitspoeling leidt. Het is daarom goed om na te gaan op welke bodems het bedekken van het spoor leidt tot minder bodemverdichting en waar dit niet het geval is. Op die bodems waar het takhout weinig bescherming biedt tegen insporing kan het takhout wellicht beter gespreid in het bos achterblijven in plaats van op het spoor.

Rudolphi en Gustafsson (2005) concluderen dat bij het oogsten van takhout ook een deel van de dode bomen (die eerder zijn achtergebleven voor functies zoals natuur) wordt meegenomen, wat dus een extra impact heeft op het bos. Goede afspraken en controle is mogelijk nodig om dit te beperken bij oogst van takhout.

Overige effecten

Het al dan niet achter laten van takhout heeft naast effecten op de bodem en de bijgroei ook nog andere effecten. Dood hout heeft bijvoorbeeld functies voor organismen zoals geleedpotigen, schimmels en mossen. Dat geldt niet alleen voor het dikke dode hout, maar ook het dunnere dode hout heeft een functie voor diverse organismen (Jagers op Akkerhuis et al., 2005). Daarnaast heeft takhout soms ook effect op de bedekking en samenstelling van de vegetatie (zie paragraaf 3.7). Het oogsten van takhout heeft daarmee direct een invloed op de vervulling van de natuurfunctie van bossen. Doordat er in het algemeen meer werkzaamheden uitgevoerd worden bij WTH dan bij CH zal er doorgaans ook meer verstoring zijn van dieren.

Extra oogstactiviteiten kunnen ook een verstrend effect hebben op de belevingswaarde van het bos. Daarnaast wordt ook het bosbeeld direct beïnvloed door het afvoeren van takhout. Dit zal door bepaalde recreanten positief gewaardeerd worden, bijvoorbeeld omdat het bos er verzorgder uit ziet, terwijl anderen het negatief waarderen, bijvoorbeeld omdat het beeld mogelijk te netjes wordt of omdat ze takhout vanwege de natuurfunctie relevant vinden.

Takhout dat na oogst achter blijft kan als brandstof dienen bij bosbranden en daarmee de omvang en gevolgen van bosbrand vergroten. Dit is de reden dat in delen van de Verenigde Staten het oogsten van takhout verplicht is gesteld (Forest Guild Biomass Working Group, 2010). In Nederland is steeds meer aandacht voor gevaar van bosbrand.

Naast de bovengenoemde effecten zijn er nog meer effecten mogelijk (bijvoorbeeld op grond- en oppervlaktewater). In deze studie wordt niet verder ingegaan op de effecten buiten de bodemvruchtbaarheid

en bijgroei. Het belang van deze overige effecten is sterk afhankelijk van de doelen van de bouseigenaar. Juist voor het Nederlandse bos, waarvoor houtproductie doorgaans één van de meerdere functies is, is het van belang om bewust te zijn van de verschillende effecten van het oogsten van takhout.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

Door het oogsten van takhout wordt maximaal grofweg 15-30% meer biomassa uit het bos gehaald dan bij oogst van alleen stamhout. Daarbij wordt, afhankelijk van de voedingsstof, boomsoort, oogstmethode en standplaats grofweg twee tot vier maal zoveel aan voedingsstoffen afgevoerd.

Er wordt vooral veel stikstof afgevoerd met de oogst van takhout, maar dat lijkt geen probleem op te leveren in Nederland, gezien het niveau van stikstofdepositie.

In de buitenlandse literatuur wordt met name gewezen op de risico's van uitputting van calcium in de bodem. Ook voor Nederlandse bossen zijn er op bepaalde plaatsen risico's. De risico's voor uitputting van base kationen zijn het grootst bij boomsoorten die veel kationen opslaan, bodems met een matig tot lage basenverzadiging, bodems met een lage kationen uitwisselingscapaciteit en bodems waaruit weinig kationen vrijkomen door verwerking. Daarbij kan voor Nederland bijvoorbeeld gedacht worden aan zomereikenbos op arme grove zandgronden.

Er zijn veel studies gedaan naar de effecten van de oogst van takhout op de voorraad beschikbare voedingsstoffen van bossen. Effecten van het oogsten van takhout op de voorraad beschikbare voedingsstoffen worden in veel gevallen niet aangetoond. Dit wordt voor een deel verklaard door de relatief grote variaties in de bodems en doordat bij lage concentraties kleine verschillen moeilijk zijn aan te tonen.

Er zijn in het buitenland diverse studies gedaan naar de effecten van de oogst van takhout op de bijgroei van bossen. In meerdere gevallen wordt na WTH een lagere groei gemeten dan na CH. In een aantal gevallen worden geen verschillen aangetoond.

Het oogsten van takhout heeft op meerdere manieren invloed op de bijgroei van bomen, maar vooral door effect op de beschikbaarheid van voedingsstoffen, door effect op het microklimaat en door bodemverdichting.

Diverse landen hebben richtlijnen opgesteld waarin de bodems in risicoklassen zijn ingedeeld. Per risicoklassen is aangegeven onder welke voorwaarden takhout geoogst kan worden. Doorgaans gelden er beperkingen voor het oogsten van takhout op arme voor verzuring gevoelige bodems.

7.2 Aanbevelingen

Op basis van de bestudeerde literatuur is geen eenduidig beeld verkregen van de effecten van WTH op de bodemvruchtbaarheid en de bijgroei. De effecten in de literatuur zijn daarvoor te afhankelijk van de specifieke situaties. Het wordt aanbevolen om meer gedetailleerd voor de belangrijkste bosgronden in Nederland waar de oogst van takhout overwogen wordt voedingsstoffenbalansen op te stellen, zodat daaruit beter een beeld verkregen kan worden van de effecten in specifieke situaties.

In verschillende studies is een negatief effect gevonden van WTH op de groei van bomen. Het is niet duidelijk in hoeverre en onder welke omstandigheden dat ook in Nederland gaat optreden. Het is daarom goed om in een aantal verschillende situaties de effecten van oogst van takhout te monitoren.

De resultaten van monitoring en aanvullend veldonderzoek zullen pas na enkele jaren beschikbaar zijn. Een mogelijkheid om sneller en over meer verschillende situaties inzicht te krijgen in de effecten van WTH is door modelmatig scenario's door te rekenen met computermodellen. Daarvoor dienen de modellen wel goed voor het doel geschikt te zijn. Paré et al. (2002) ontwikkelden bijvoorbeeld een model om de balans van voedingsstoffen voor bossen te bepalen. Eén van de resultaten daarvan is dat opstanden van *Pinus banksiana* weinig risico heeft op verlies van voedingsstoffen als gevolg van WTH, onder andere doordat de soort relatief weinig takhout en naalden heeft. Thiffault et al. (2006) vonden voor die omstandigheden echter 15 - 20 jaar na WTH ten opzichte van CH lagere concentraties voedingsstoffen (Ca en Mg) in de naalden en een lagere kationenomwisselingscapaciteit (CEC) van de bodem. Daarnaast werd na WTH een 18% lagere groei gemeten dan na CH (Thiffault et al., 2010). Daarbij werd aangegeven dat *Pinus banksiana* relatief snel reageert op veranderingen op de bodemgesteldheid door een snelle jeugdgroei, diepe beworteling en hoge turnover van naalden. Het effect dat takhout heeft op de capaciteit van de bodem om water en voedingsstoffen vast te houden werd als mogelijke oorzaak van de gevonden verschillen tussen de modeluitkomsten en de metingen in het veld (Thiffault et al., 2010). Het is dus van belang om bij gebruik van computermodellen relevante factoren in de modellering mee te nemen om betrouwbare uitspraken te kunnen doen.

Totdat meer duidelijk is over de gevolgen van WTH voor specifieke Nederlandse situaties wordt aanbevolen om terughoudend te zijn het met oogsten van takhout op de armere, zure en voor verzuring gevoelige gronden. Het verdient aanbeveling om ook voor Nederland te komen tot een wetenschappelijk onderbouwde indeling in risicoklassen voor de oogst van takhout.

Beperken van ongewenste effecten

In diverse bronnen worden voor bepaalde bodems maatregelen voorgesteld om potentieel schadelijke effecten van de oogst van takhout te beperken of te voorkomen. Veel van die maatregelen hebben ook nadelen. Het toepassen van as wordt soms aanbevolen, maar Aronson en Ekelund (2004) wijzen er op dat er nog relatief weinig over de effecten van het toedienen van as bekend is, op bijvoorbeeld vegetatie en bodemleven. Toedienen van as kan de pH van de bodem verhogen wat kan leiden tot versnelde mineralisatie van organische stof (Stupak et al. 2007) en daardoor verhoogde uitspoeling van voedingsstoffen. Ook is het toedienen van as niet overal zinvol. Het is daarom van belang vooraf goed na te gaan waar en in welke vorm en hoeveelheden as toegediend kan worden.

Sommige bronnen en richtlijnen bevelen aan om takhout van naaldbomen eerst te laten drogen in het bos, zodat de naalden van de takken vallen. Dit beperkt de afvoer van voedingsstoffen. Het nadeel is dat enige tijd na de oogst van stamhout opnieuw een oogstoperatie in het bos uitgevoerd moet worden, wat logistiek nadelig kan zijn, extra kosten voor herstel van wegen kan veroorzaken en ook meer verstoring voor natuur en recreanten kan betekenen. Het is van belang om bij de keuze van de oogstmethode rekening te houden met deze aspecten. Aanbevolen wordt om die aspecten mee te wegen in een richtlijn voor WTH.

Uit takhout dat niet wordt geoogst komen voedingsstoffen vrij. Het wordt aanbevolen om, waar mogelijk, takhout dat niet wordt geoogst gespreid achter te laten in het bos. Op bodems die gevoelig zijn voor verdichting door oogstmachines is het echter nuttig om het takhout op het spoor van de machines te concentreren.

Literatuur

Abbott, D.T. en D.A. Crossley, 1982. Woody Litter Decomposition Following Clear-Cutting. *Ecology* 63, 1, pp. 35 - 42.

Adams, M.B., J.A. Burger, A.B. Jenkins en L. Zelazny, 2000. Impact of harvesting and atmospheric pollution on nutrient depletion of eastern US hardwood forests. *Forest Ecology and Management* 138, pp. 301 - 319.

Alban, D.H., 1982. Effects of Nutrient Accumulation by Aspen, Spruce, and Pine on Soil Properties. *Soil Science Society of America Journal* 46, pp. 853 - 861.

Anoniem, 2010. *Vrijheid en verantwoordelijkheid*. Regeerakkoord WD-CDA. z.pl., 46 p.

Aronson, K.A. en N.G.A. Ekelund, 2004. Biological Effects of Wood Ash Application to Forest and Aquatic Ecosystems. *Journal of Environmental Quality* 33, pp. 1595 - 1605.

Baribault, T.W., R.K. Kobe en D.E. Rothstein, 2010. Soil calcium, nitrogen, and water are correlated with aboveground net primary production in northern hardwood forests. *Forest Ecology and Management* 260, pp. 723 - 733.

Berger, E.P., J. Luijt en M.J. Voskuilen, 2009. *Bedrijfsuitkomsten in de Nederlandse particuliere bosbouw over 2008*. Den Haag, LEI, Rapport 2009-091, 90 p.

Bormann, F.H. en G.E. Likens, 1979. *Pattern and Process in a Forested Ecosystem*. New York, Springer-Verlag.

Boschloo, D.J. en A.P. Stolk, 1998. *Landelijk Meetnet Regenwatersamenstelling. Meetresultaten 1998*. Bilthoven, RIVM Rapport 723101 054, 62 p.

Breeuwsma, A. en W. de Vries, 1984. *Gevolgen van de zure regen voor de bodem. 2. Aandeel in de bodemverzuring in Nederland*. Wageningen, Stichting voor Bodemkartering. Rapport 1787, 654 p.

Beurskens, L.W.M. en M. Hekkenberg, 2010. *Renewable Energy Projections as Published in the National Renewable Energy Action Plans of the European Member States*. z.pl., ECN Beleidsstudies, ECNE-10-069, 210 p.

Brown, T.C. en D. Binkley, 1994. Effects of management on water quality in North American forests. USDA Forest Service General Technical Report RM-248, 27 p.

Burg J. van den, 1985. Foliar analysis for determination of tree nutrient status - a compilation of literature data. Wageningen, Rijksinstituut voor onderzoek in de bos - en landschapsbouw 'De Dorschkamp', Rapport no. 414.

Cardellichio, P., A. Colnes, J. Gunn, B. Kittler, C. Recchia, D. Saah en T. Walker, 2010. *Massachusetts Biomass Sustainability and Carbon Policy Study: Report to the Commonwealth of Massachusetts Department*

of Energy Resources. Brunswick, Maine, Manomet Center for Conservation Sciences. Natural Capital Initiative Report NCI-2010-03, 182 p.

Cole, D. W. en M. Rapp, 1981. Elemental cycling in forest ecosystems. In: D. E. Reichle, ed. *Dynamic properties of forest ecosystems*. Cambridge, Cambridge University Press 23, pp. 411 - 450.

Das, A.K. en P.S. Ramakrishnan, 1987. Above-ground biomass and nutrient contents in an age series of Khasi Pine (*Pinus kesiya*). *Forest Ecology and Management*, 18, pp. 61-72.

Dirkse, G.M., W.P. Daamen, H. Schoonderwoerd, M. Japink, M. van Jole, R. van Moorsel, P. Schnitger, W. Stouthamer en M. Vocks, 2006. *Meetnet Functievervulling bos 2001-2005*. Vijfde Nederlandse Bosstatistiek. Ede, Directie Kennis, LNV, Rapport DK065, 95 p.

Draaijers, G.P.J., E.P. van Leeuwen, P.G.H. de Jong en J.P. Erisman, 1996. *Deposition of base-cations in Europe and its role in acid neutralization and forest nutrition*. Bilthoven, RIVM, report no 722108017.

Egnell, G. en B. Leijon, 1997. Effects of Different Levels of Biomass Removal in Thinning on Short-term Production of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* stands. In: *Scandinavian Journal of Forest Research* 12, pp. 17-26.

Evans, M., R.T. Perschel en B.A. Kittler, 2010. *Revised assessment of biomass harvesting and retention guidelines*. Santa Fe, Forest Guild, 33 p.

Fahey, T.J., J.W. Hughes, M. Pu en M.A. Mary, 1988. Root Decomposition and Nutrient Flux Following Whole-Tree Harvest of Northern Hardwood Forest. In: *Forest Science* 34, 3, p. 744 - 768.

Fahey, T.J., M. O. Hill, P. A. Stevens, M. Hornung en P. Rowland, 1991. Nutrient Accumulation in Vegetation Following Conventional and Whole-Tree Harvest of Sitka Spruce Plantations in North Wales. *Forestry* 64, 3 2 71 - 288.

Forest Guild Biomass Working Group, 2010. *Forest biomass retention and harvesting guidelines for the Northeast*. Santa Fe, Forestguild, 17 p.

Forest Research, 2009. *Guidance on site selection for brash removal*. z.pl. 15 p.

Fox, T.R., 2000. Sustained productivity in intensively managed forest plantations. *Forest Ecology and Management* 138, p. 187 - 202

Grigal, D.F., 2000. Effects of extensive forest management on soil productivity. *Forest Ecology and Management* 138, p. 167 - 185.

Hagen-Thorn, A., K. Armolaitis, I. Callesen, I. Stjernquist, 2004. Macronutrients in tree stems and foliage: a comparative study of six temperate forest species planted at the same sites. *Annals of Forest Science* 61, p. 489 - 498.

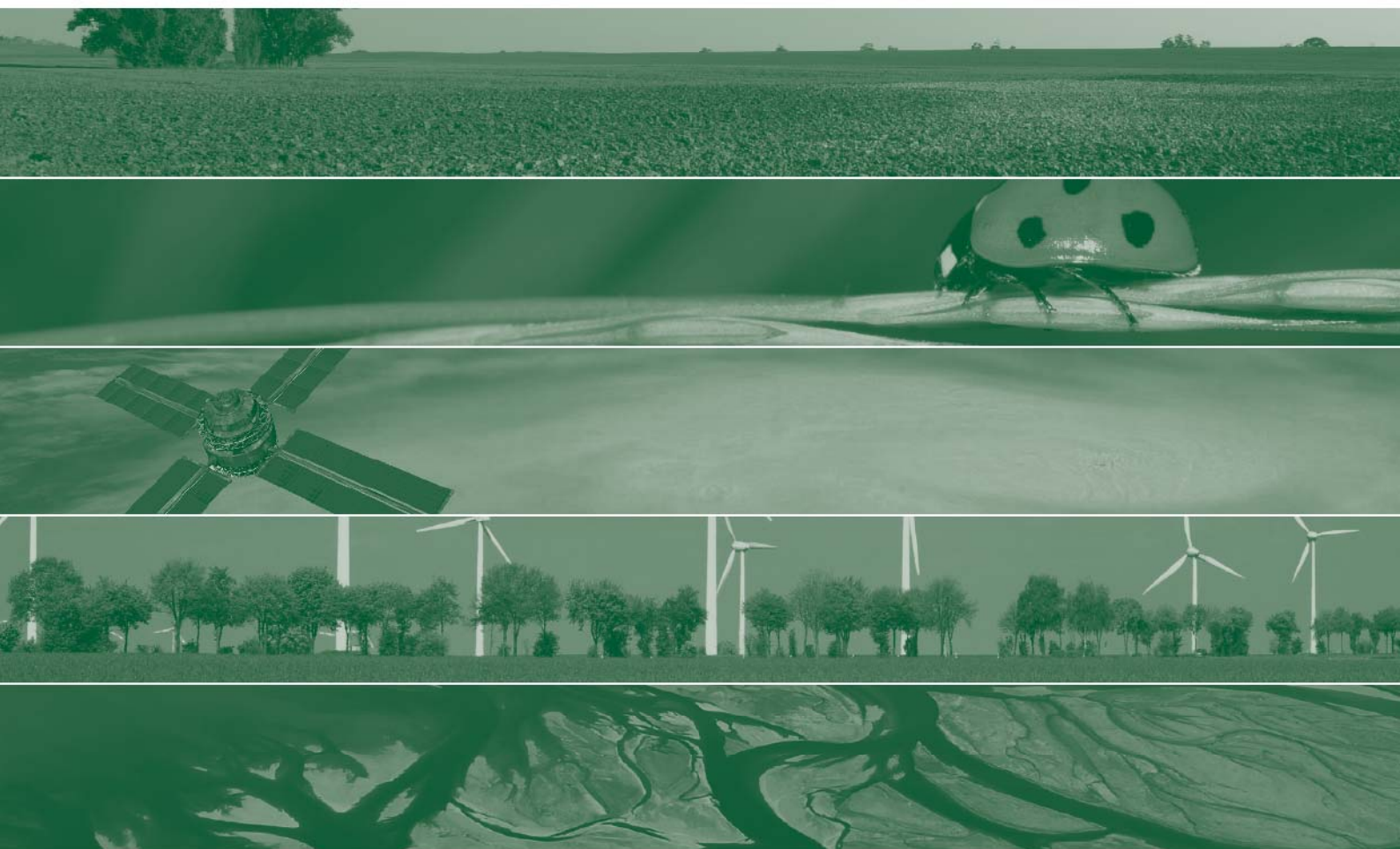
Hedin, L.O., L. Grana, G.E. Likens, T.A. Buishandparallel, J. N. Galloway, Th. J. Butler en H. Rodhe, 1994. Steep declines in atmospheric base cations in regions of Europe and North America. *Nature* 367, pp. 351 - 354.

- Homyaka, P.M., R.D. Yanaib, D.A. Burnsc, R.D. Briggsb en R.H. Germain, 2008. Nitrogen immobilization by wood-chip application: Protecting water quality in a northern hardwood forest. *Forest Ecology and Management* 255, 7, pp. 2589 - 2601.
- Hornbeck, J.W., C.T. Smith, C.W. Martin, L.M. Tritton en R.S. Pierce, 1990. Effects of intensive harvesting on nutrient capitals of three forest types in New England. *Forest Ecology and Management* 30, pp. 55-64.
- Jacobson, S., M. Kukkolab, E. Mälkönen en B. Tveitec, 2000. Impact of whole-tree harvesting and compensatory fertilization on growth of coniferous thinning stands. *Forest Ecology and Management* 129, pp. 41 - 51.
- Jagers op Akkerhuis, G.A.J.M., S.M.J. Wijdeven, L.G. Moraal, M.T. Veerkamp en R.J. Bijlsma, 2005. *Dood hout en biodiversiteit; een literatuurstudie naar het voorkomen van dood hout in de Nederlandse bossen en het belang ervan voor de duurzame instandhouding van geleedpotigen, paddenstoelen en mossen*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1320. 160 p.
- Johnson, D.W., 1994. Reasons for concern over impacts of harvesting. Dyck, W.J., D.W. Cole en N.B. Comeford, *Impacts of forest harvesting on long-term site productivity*. London, Chapman & Hall, 371 p.
- Johnson, D.W., en P.S. Curtis, 2001. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. In: *Forest Ecology and Management*, 140, p. 227 - 238.
- Johnson, D.W. en D.E. Todd, 1987. Nutrient export by leaching and whole-tree harvesting in a oblolly pine and mixed oak forest. *Plant and Soil* 102, p.. 99 - 109.
- Johnson, D.W. en D.E. Todd, 1998. Harvesting effects on long-term changes in nutrient pools of mixed oak forest. *Soil Science Society of America* 62, p. 1725-1735.
- Johnson, D.W., D.C. West, D.E. Todd en L.K. Mann, 1982. Effects of sawlog vs. whole-tree harvesting on the nitrogen, phosphorus, potassium, and calcium budgets of an upland mixed oak forest. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 6, pp. 1304 -1309.
- Jussy, J.H., J. Ranger, S. Bienaimé en E. Dambrine, 2004. Effects of a clear-cut on the in situ nitrogen mineralisation and the nitrogen cycle in a 67-year-old Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) plantation. In: *EDP Sciences, Annals of forest science* 61, 5, pp. 397-408.
- Kardell, L., 1992. *Vegetationsförändring, plantetablering samt bärproduktion efter stubb- och riståkt*. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Environmental Forestry, Report 50. 79 p.
- Knoepp, J.D. en W.T. Swank, 1994. Long-Term Soil Chemistry Changes in Aggrading Forest Ecosystems. *Soil Science Society of America Journal* 58, 2, pp. 325 - 331.
- Krause, H. H., 1981. *Factorial experiments with nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers in spruce and fir stands of New Brunswick :10-year results*. Fredericton, NB, Maritimes Forest Research Centre. 27 p.
- Leeters, E.E.J.M., J.G. Hartholt, W. de Vries en L.J.M. Boumans, 1994. *Effects of acid deposition on 150 forest stands in The Netherlands. Assessment of the chemical compositions of foliage, soil soil solution and groundwater on a national scale*. Wageningen, DLO Winand Staring Centre, Report 69.4, 156 p.

- Levin, R. en H. Erikson, 2010. Good-practise guidelines for whole-tree harvesting in Sweden: Moving science into policy. *The Forestry Chronicle* 86, 1, p. 51-56.
- Likens, G.E., F.H. Borman, R.S. Pierce en W.A. Reiners, 1978. Recovery of a Deforested Ecosystem. *Science* 199, p. 492-496.
- Mahendrappa, M.K., N.W. Foster, G.F. Weetman en H.H. Krause, 1986. Nutrient cycling and availability in forest soils. *Can. J. Soil Sci.* 66, p. 547-572.
- Mann, L.K., D.W. Johnson, D.C. West, D.W. Cole, J.W. Hornbeck, C.W. Martin, H. Rlekerk, C.T. Smith, W.T. Swank, L.M. Trttton en D.H. van Lear. 1988. Effects of Whole-Tree and Stem-Only Clearcutting on Postharvest Hydrologic Losses, Nutrient Capital, and Regrowth. *Forest Science* 34, 2, p. 412 -428.
- Meesenburg, H., K. J. Meiwes en P. Rademacher, 1995. Long term trends in atmospheric deposition and Seepage output in northwest German forest Ecosystems. *Water, Air and Soil Pollution* 85, p. 61.
- Meinardi, C.R. en R. van den Berg, 2008. *Basisdocument karakterisering grondwaterkwaliteit voor de Kaderrichtlijn Water*. RIVM, Planbureau voor de Leefomgeving, PBL-publicatienummer 500003006, 90 p.
- Merino, A., M.A. Balboa, J.G. Rodríguez Soalleiro en Á. González. 2005. Nutrient exports under different harvesting regimes in fast-growing forest plantations in Southern Europe. *Forest Ecology and Management* 207, p. 325-339.
- Moroni, M.T., P.Q. Carter, D.W. Strickland, F. Makeschin, D.R. Parkinson en L. Kahnt, 2007. Effect of forest harvesting and slash piling on microbial biomass and respiration in Newfoundland boreal forests. *Canadian Journal of Soil Science* 87, 4, p. 455-458.
- Morris, L.A. en R.E. Miller, 1979. Evidence for long-term productivity change as provided by field trails. Dyck, W.J., D.W. Cole en N.B. Comeford, *Impacts of forest harvesting on long-term site productivity*. London, Chapman & Hall, 371 p.
- Nord-Larsen, T., 2002. Stand and site productivity response following whole-tree harvesting in early thinnings of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Biomass and Bioenergy* 23, p. 1-12.
- Olsson, B.A., J. Bengtsson en H. Lundkvist, 1996a. Effects of different forest harvest intensities on the pools of exchangeable cations in coniferous forest soils. *Forest Ecology and Management* 84, p. 135 - 147.
- Olsson, B.A., H. Staaf, H. Lundkvist, J. Bengtsson en K. Rosh, 1996b. Carbon and nitrogen in coniferous forest soils after clear-felling and harvests of different intensity. *Forest Ecology and Management* 82, p. 19-32.
- Olssen, B.A., 1999. Effects of biomass removal in thinnings and compensatory fertilization on exchangeable base cation pools in acid forest soils. *Forest Ecology and Management* 122, p. 29-39.
- Palviainen, M., L. Finer, A. Kurka, H. Mannerkoski, S. Piirainen en M. Starr, 2004. Release of potassium, calcium, iron and aluminium from Norway spruce, Scots pine and silver birch logging residues. *Plant and Soil* 259, p. 123-136.
- Perala, D.A. en D.H. Alban, 1982. Biomass, nutrient distribution and litterfall in *Populus*, *Pinus* and *Picea* stands on two different soils in Minnesota. *Plant en Soil* 64, p. 177-192.

- Planbureau voor de Leefomgeving, 2009. *Milieubalans 2009*. Bilthoven, PBL-publicatienummer 500081015.
- Proe, M.F., A.D. Cameron, J. Dutch en X.C. Christodoulou, 1996. The effect of whole-tree harvesting on the growth of second rotation Sitka spruce. *Forestry* 96, 4, p. 389- 401.
- Proe, M.F., J. Craiga, J. Dutchb en J. Griffiths, 1999. Use of vector analysis to determine the effects of harvest residues on early growth of second-rotation Sitka spruce. *Forest Ecology and Management* 122, 1-2, p. 87-105.
- Proe, M. F., J. C. Dutch, D. G. Pyatt en J. P. Kimmmins, 1997. A strategy to develop a guide for whole-tree harvesting of Sitka spruce in Great Britain: In *Biomass and Bioenergy*, 13, 4-5, pp. 289-299.
- Raffe, J.K., F.T.J. Hoksbergen, A.A.J.M. Leenaars, A.H. Schaafsma en C.M. van Schagen, 1998. *Houtoogst bij kleinschalig bosbeheer*. Wageningen, IBNDLO, IBN-rapport 349, 105 p.
- Reynolds, B. en P.A. Stevens, 1998. Assessing soil calcium depletion following growth and harvesting of Sitka spruce plantation forestry in the acid sensitive Welsh uplands. *Hydrology and Earth System Sciences* 2, 2/3, pp. 345-352.
- Rosen, K. en A. Lundmark-Thelin, 1987. Increased nitrogen leaching under piles of slash - a consequence of modern forest harvesting techniques. In: *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2, p. 21 - 29.
- Rosenberg, O. en S. Jacobson, 2004. Effects of repeated slash removal in thinned stands on soil chemistry and understorey vegetation. *Silva Fennica* 38, 2, pp. 133-142.
- Rudolphi, J. en L. Gustafsson, 2005. Effects of forest-fuel harvesting on the amount of deadwood on clear-cuts. *Scandinavian Journal of Forest Research* 20, pp. 235-242.
- Salm, C. van der, W. de Vries, M. Olssen en K. Raulund-Rasmussen, 1997. Modelling impacts of atmospheric deposition, nutrient cycling and soilweathering on the sustainability of nine forest ecosystems. *Water, air and soil pollution* 109, pp. 101-135.
- Staaf, H. en B.A. Olsson, 1991. Acidity in four coniferous forest soils after different harvesting regimes of logging residues. *Scandinavian Journal of Forest Research* 6, pp. 19 - 29.
- Sterba, H. 1988. Increment losses by whole-tree harvesting in Norway spruce (*Picea abies*). *Forest Ecology and Management* 24 pp. 283-292.
- Stupaka, I., A. Asikainen, M. Jonsell et al., 2007. Sustainable utilization of forest biomass for energy - Possibilities and problems: Policy, legislation, certification, and recommendations and guidelines in the Nordic, Baltic and other European countries. *Biomass and Bioenergy* 31, pp. 666-684.
- Swank, W.T., J.M. Vose en K.J. Elliott, 2001. Long-term hydrologic and water quality responses following commercial clearcutting of mixed hardwoods on a southern Appalachian catchment. *Forest Ecology and Management* 143, pp. 163-178.
- Thiffault, E., D. Paré, S. Brais en B.D. Titus, 2010. Intensive biomass removals and site productivity in Canada: A review of relevant issues. *Forestry Chronicle* 86, 1, pp. 36-42.

- Thiffault, E., D. Paré, N. Bélanger, A. Munson en F. Marquis, 2006. Harvesting Intensity at Clear-Felling in the Boreal Forest: Impact on Soil and Foliar Nutrient Status. *Soil Science Society of America Journal* 70, pp. 691-701.
- Vanguelova, E., R. Pitman, J. Luiro en H. Helmisaar, 2010. Long term effects of whole tree harvesting on soil carbon and nutrient sustainability in the UK. *Biochemistry* 101, 1-3, pp. 43-59
- Vitousek, P.M. en P.A. Matson, 1984. Mechanisms of nitrogen retention in forested ecosystems: a field experiment. *Science* 225, pp. 51-52.
- Vos, K., 2010. *Effecten op de bosbodem als gevolg van het oogsten van tak- en top hout*. Hogeschool Van Hall Larenstein, afstudeerscriptie, 58 p.
- Vries, W. de, 1994. Soil response to acid deposition at different regional scales. Field and laboratory data, critical loads and model predictions. Wageningen, DLO Winand Staring centre, Thesis Wageningen, 487 p.
- Vries, W. de, A. Hol, S. Tjalma en J.C.H. Voogd, 1990. *Literatuurstudie naar voorraden en verblijftijden van elementen in bosesystemen*. Wageningen : Staring Centrum, rapport 94, 205 p.
- Vries, W. de en P.C. Jansen, 1994. *Effects of acid deposition on 150 forest stands in the Netherlands, Wageningen*. DLO Winand Staring Centre. Report 69.3, 60 p.
- Wall, A., 2008. Effect of removal of logging residue on nutrient leaching and nutrient pools in the soil after clearcutting in a Norway spruce stand. *Forest Ecology and Management* 256, p. 1372-1383.
- Wall, A. en J. Hytönen, in press. The long-term effects of logging residue removal on forest floor nutrient capital, foliar chemistry and growth of a Norway spruce stand. *Biomass and Bioenergy*, 7 p.
- Walmsley, J.D., D.L. Jones, B. Reynolds, M.H. Price en J.R. Healey, 2009. Whole tree harvesting can reduce second rotation forest productivity. *Forest Ecology and Management* 257, p. 1104 -1111.
- Williamson, J.R. en W.A. Neilsen, 2000. The influence of forest site on rate and extent of soil compaction and profile disturbance of skid trails during ground-based harvesting. *Canadian journal of forest resources* 30, pp. 1196-1205.
- Witte, J.P.M., M.W.A. de Haan, B. Raterman en C.J.S. Aggenbach, 2006. *PROBE. Versie 1: effecten van grondwaterbeheer, atmosferische depositie, maaien en plaggen*. Nieuwegein, KIWA, KWR 06.036, 111 p.
- Yanai, R.D., 1998. The effect of whole-tree harvest on phosphorus cycling in a northern hardwood forest. *Forest Ecology and Management* 104, pp. 281-295.
- Zabowski, D., M.F. Skinner en P.T. Rygielwicz, 1994. Timber harvesting and long-term productivity: weathering processes and soil disturbance. *Forest Ecology and Management* 66, pp. 55-68



Alterra is onderdeel van de internationale kennisorganisatie Wageningen UR (University & Research centre). De missie is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen negen gespecialiseerde en meer toegepaste onderzoeksinstituten, Wageningen University en hogeschool Van Hall Larenstein hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 40 vestigingen (in Nederland, Brazilië en China), 6.500 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de vooraanstaande kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen natuurwetenschappelijke, technologische en maatschappijwetenschappelijke disciplines vormen het hart van de Wageningen Aanpak.

Alterra Wageningen UR is het kennisinstituut voor de groene leefomgeving en bundelt een grote hoeveelheid expertise op het gebied van de groene ruimte en het duurzaam maatschappelijk gebruik ervan: kennis van water, natuur, bos, milieu, bodem, landschap, klimaat, landgebruik, recreatie etc.

Meer informatie: www.alterra.wur.nl