



Het effect van houtoogst op nutriëntenbalansen in bossen op zandgronden

Onderbouwing van een adviessysteem

Wim de Vries, Anjo de Jong, Hans Kros & Joop Spijker



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Het effect van houtoogst op nutriëntenbalansen in bossen op zandgronden

Onderbouwing van een adviessysteem

Wim de Vries, Anjo de Jong, Hans Kros & Joop Spijker

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research in opdracht van en gefinancierd door het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoekthema BO-11 Natuur en Regio en het KennisBasis thema KB-24 System Earth Management (projectnummers BO-11-021-005 en KB-24-002-026).

Wageningen Environmental Research
Wageningen, februari 2019

Rapport 2923
ISSN 1566-7197

W. de Vries, J.J. de Jong, J. Kros, J.H. Spijker, 2019. *Het effect van houtoogst op nutriëntenbalansen in bossen op zandgronden. Onderbouwing van een adviessysteem.* Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 2923. 78 blz.; 17 fig.; 20 tab.; 51 ref.

Licht aangepast rapport d.d. 26 februari 2019.

Dit rapport is gereviewd door dr. ir. F.J. Sterck, Wageningen University.


Dit rapport beschrijft de onderbouwing van een adviessysteem dat bosbeheerders helpt bij het kiezen van het oogststelsel, namelijk het oogsten van uitsluitend stamhout of ook top- en takhout, bij een gegeven houtoogstniveau. Het adviessysteem richt zich op het op peil houden van de nutriënten calcium (Ca), kalium (K), magnesium (Mg) en fosfor (P) door het vaststellen van de effecten van houtoogst op de balansen van deze nutriënten. Op basis van de netto aanvoer van Ca, K, Mg en P via depositie en verwerking – gecorrigeerd voor uitspoeling – is voor zeven onderscheiden boomsoorten, drie bodemtypes en vier regio's aangegeven hoeveel hout (stamhout en/of tak- en top hout) er geogst kan worden. Het gaat specifiek om berk, beuk, eik, Douglas, fijnspar, grove den en lariks op arm zand, matig arm zand en rijk zand op de Hogere Zandgronden, onderscheiden in de regio's Noord, Oost, Midden en Zuid. Uit de resultaten van het adviessysteem blijkt onder andere dat bij het oogsten van alleen stamhout voor beuk en eik de bodemvoorraad aan Ca, K en P in veel situaties kan afnemen. Alleen bij een laag oogstniveau is de oogst voor eik voor alle bodems en alle regio's rond het evenwichtsniveau en voor beuk alleen voor rijke zandgronden. Voor fijnspar en Douglas kan de voorraad ervan afnemen bij een matig en hoog oogstniveau.

Trefwoorden: adviessysteem, houtoogst, groeiplaats, nutriëntenbalans, uitputting, calcium, magnesium, kalium, fosfaat, mitigerende maatregelen

This report describes the approach and data that were used to develop forest harvesting guidelines for the Netherlands that helps forest managers to choose suitable harvesting methods, i.e. stem-only harvesting or also additional removal of tree tops and branches, for a given harvest level. The guidelines focus on maintaining the stock of the nutrients calcium (Ca), potassium (K), magnesium (Mg), and phosphorus (P) in soil by determining the effects of wood harvest on the balance of these nutrients. Based on the net supply of Ca, K, Mg and P through deposition and weathering corrected for leaching, the guidelines indicate how much wood can be harvested, distinguishing seven tree species (birch, beech, oak, Douglas fir, spruce, pine and larch) on poor sand, moderately poor sand and rich sand in four regions (North, East, Middle and South). The harvesting guidelines show that the stock of Ca, K and P in soil decrease for oak and beech even in case of stem-only harvesting, except for a low harvest level. For spruce and Douglas fir the stock can decrease at a moderate and high harvest level.

Key words: forest, harvesting guidelines, nutrient balance, calcium, magnesium, potassium, phosphate, mitigation measures

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/470548> of op www.wur.nl/environmental-research (ga naar 'Wageningen Environmental Research' in de grijze balk onderaan). Wageningen Environmental Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

 2019 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, www.wur.nl/environmental-research. Wageningen Environmental Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

- Overname, 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.

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

Wageningen Environmental Research Rapport 2923 | ISSN 1566-7197

Foto omslag: bospad met geogst hout, Oostereng, Renkum, A. de Jong

Inhoud

	Woord vooraf	5
	Samenvatting	7
1	Inleiding	9
	1.1 Achtergrond en doel van het adviessysteem	9
	1.2 Nutriënten in het adviessysteem	10
	1.3 Inhoud van het rapport	11
2	Berekeningswijze en invoergegevens	13
	2.1 De nutriëntenbalansmethode	13
	2.2 Onderscheiden boomsoorten, bodems en regio's binnen het adviessysteem	14
	2.3 Netto afvoer van nutriënten via houtoogst	16
	2.3.1 Berekeningsmethode	16
	2.3.2 Nutriëntgehalten in stammen en takken	17
	2.4 Netto toevoer van nutriënten via depositie, verwerking en uitspoeling	21
	2.4.1 Aanvoer van nutriënten door depositie	21
	2.4.2 Aanvoer van nutriënten door verwerking	23
	2.4.3 Afvoer van nutriënten door uitspoeling	24
3	Resultaten	29
	3.1 Nutriëntbalansen in bossen	29
	3.2 Vertaling van balansresultaten in een houtoogst-adviesstelsel	33
4	Discussie en conclusies	37
	4.1 Onzekerheden	37
	4.2 Mitigerende maatregelen	40
	4.3 Aanbevelingen	43
	4.4 Conclusies	44
	Literatuur	47
	Bijlage 1 Bemonsteringsprotocol voor metingen van nutriënten in hout	51
	Bijlage 2 Methoden en data voor het schatten van nutriëntgehalten in hout	55
	Bijlage 3 Verband tussen nutriënt-gehalten in bodem en hout	65
	Bijlage 4 Bemonstering ondiep grondwater	69
	Bijlage 5 Het adviessysteem	73

Woord vooraf

Het kabinet heeft ambitieuze doelstellingen voor het klimaat en de circulaire economie. Daarin past een groter gebruik van groene grondstoffen zoals hout. Er zal daarvoor een groter beroep worden gedaan op het Nederlandse bos. In principe kan dat ook, want momenteel is de bijgroei een stuk groter dan de oogst. Maar voorzichtigheid is wel geboden. Veel bossen staan op arme zandgronden. Beheerders hebben daarom behoefte aan actuele kennis over het effect van houtoogst op de bodemvruchtbaarheid.

Met dit rapport is er een actueel overzicht beschikbaar over de relatie tussen houtoogst en nutriëntenvoorziening. De betrokken onderzoekers hebben vijf jaar hard gewerkt om alle benodigde gegevens over bossen en bodems op tafel te krijgen. De gegevens moesten bovendien worden geactualiseerd; het bossysteem is immers de afgelopen decennia veranderd door allerlei oorzaken, zoals onder andere een hoge stikstofdepositie.

Eerder heeft de VBNE, de Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren, resultaten van dit onderzoek gepresenteerd in de brochure *Houtoogst in relatie tot nutriëntenvoorraden in bossen op droge zandgronden*. De kennis zal ook haar weg vinden naar de praktijk via pilots voor klimaatslim bos- en natuurbeheer.

Dit rapport kwam mede tot stand door een actieve opstelling van de bos- en houtsector. De VBNE en Staatsbosbeheer hebben het onderzoek meegefinancierd; beheerders gaven toestemming voor het nemen van hout-, bodem- en grondwatermonsters; discussies en advies vanuit de bosbouwkundige praktijk in de begeleidingscommissie hielpen om de soms ingewikkelde wetenschappelijke gedachten beter toegesneden op de praktijk over het voetlicht te krijgen.

Dank daarvoor!

Peter van der Knaap
Directie Natuur en Biodiversiteit,
Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit

Samenvatting

Brochure houtoogst

Een grotere houtoogst uit het Nederlandse bos sluit aan op Actieplan Bos en Hout (oktober 2016), waarin een van de doelen een productiever bos is. Een belemmering voor het bereiken van een hogere houtoogst is de mogelijke uitputting van de bodem van met name bossen op arme(re) bodems. In dit kader is er behoefte aan een adviesstelsel dat beheerders helpt bij het kiezen van het juiste oogstniveau, onderverdeeld in het oogsten van uitsluitend stamhout of ook top- en takhout, en het eventueel treffen van mitigerende maatregelen om de nutriëntenbalans van het bos gezond te houden.

In 2017 is een brochure met daarin een eerste versie van een adviesstelsel (1.0) uitgebracht, gericht op de voedingstoffenbalans van de bodem van zeven veel in Nederland voorkomende boomsoorten (berk, beuk, eik, Douglas, fijnspar, grove den en lariks) op zandgronden in vier regio's. Na het uitbrengen van de brochure zijn in de winter van 2017/18 aanvullende bemonsteringen uitgevoerd aan de nutriëntgehalten in het afgevoerde hout en in het ondiepe grondwater. Dit rapport beschrijft de achtergrond van bovengenoemde brochure. Daarbij zijn tevens de resultaten van de aanvullende bemonsteringen meegenomen in de gepresenteerde balansen en een bijbehorend adviesstelsel 1.1. Dit stelsel wijkt slechts licht af van het adviesstelsel (1.0) gepubliceerd in 2017 in de VBNE-brochure. In bijlage 5 zijn de houtoogstadviesstabellen van adviesstelsel 1.0 en 1.1 naast elkaar gepresenteerd, zodat de verschillen gemakkelijk zichtbaar zijn.

Methoden balansberekeningen

In het adviesstelsel zijn de zandgronden zijn onderscheiden in arm zand (grof, leemarm), matig arm zand en rijk zand en leem (fijn, leemhoudend) in verband met verschillen in verwerkingssnelheid. De vier onderscheiden regio's zijn de Hogere Zandgronden Noord, Oost, Midden en Zuid. Het adviesstelsel richt zich op vier belangrijke (macro)nutriënten: calcium (Ca), kalium (K), magnesium (Mg) en fosfor (P). Stikstof (N) is buiten beschouwing gelaten, omdat de aanvoer ervan door depositie in de Nederlandse bossen zeer hoog is en de komende decennia naar verwachting hoog zal blijven, waardoor er geen tekorten worden verwacht. Het adviesstelsel geeft de maximale houtafvoer in $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{jr}^{-1}$ over de looptijd van de bosopstand. Andere duurzaamheidsaspecten van het bos, zoals biodiversiteit, recreatieve beleving, de bijdrage van bosgebieden aan wateropvang, luchtkwaliteit en dergelijke zijn daarin niet meegenomen.

Op basis van de netto aanvoer van Ca, K, Mg en P via depositie en verwerking, gecorrigeerd voor uitspoeling, is voor de onderscheiden boomsoorten, bodemtypes en regio's aangegeven hoeveel hout (stamhout en/of tak- en top hout) er geoogst kan worden. In het adviesstelsel is geen rekening gehouden met aanvoer van nutriënten door kwelstromen of door inundatie van bossen met rivier- of beekwater. De afvoer van nutriënten via houtoogst is berekend met het boomgroeimodel GrowUp, dat de opname, vastlegging en afvoer van de nutriënten per boomsoort berekent. Met het model is per combinatie van boomsoort, groeiklasse (groeiverwachting) en oogstscenario de netto afvoer van Ca, K, Mg en P bepaald. Hierbij is voor deze studie onderscheid gemaakt in de biomassa compartimenten stamhout en tak- en top hout.

De nutriëntgehalten in de onderscheiden boomcomponenten zijn gebaseerd op onderzoek door bemonstering van de zeven boomsoorten in de periode 2016-2018. Daarbij is stamhout, waar mogelijk, onderverdeeld in spinthout, kernhout en schors, en takhout in dik takhout (onderscheiden in hout en schors) en dun takhout. In het algemeen zijn de gehalten het hoogst in de schors van takken, gevolgd door fijne takken (hout + schors), schors van stammen, hout van takken, spinthout en kernhout. In vergelijking met literatuurgegevens zijn de gehalten van Ca, K, Mg en P in zowel stamhout als takhout vrijwel altijd lager (veelal ca. 20-60%). De stikstofgehalten voor stamhout zijn duidelijk hoger (ca. 30-70%), maar bij takhout is dat niet het geval. Dit kan te maken hebben met

verschillen in bemonsteringsmethode. De verschillende houtsoorten blijken betrekkelijk weinig fosfor en magnesium te bevatten, terwijl stikstof en calcium in de hoogste concentraties voorkomen.

De resultaten van de bemonsteringsanalyses zijn gebruikt om de nutriëntgehalten voor stammen en takken als geheel te berekenen op basis van gemiddelde massaverdelingen over een gehele omloop. Die gehalten zijn gedurende de gehele omlooptijd constant verondersteld. De nutriëntafvoeren zijn berekend als de jaargemiddelde afvoer van 4, 7 of 11 kuub stamhout over de omlooptijd van de betreffende boomsoort, al dan niet met takhout bij eindkap. Uit de resultaten blijkt dat de gehalten in stammen in eik en beuk vaak hoger zijn dan die in de andere boomsoorten, maar voor fijnspar zijn enkele gehalten (Ca, Mg) ook duidelijk hoger dan bij de andere naaldboomsoorten en berk. Voor het takhout zijn de verschillen tussen de boomsoorten betrekkelijk klein.

De ruimtelijk variatie in de totale (de som van natte en droge) atmosferische depositie van de basische kationen, Ca, K en Mg, is gebaseerd op een combinatie van metingen (natte depositie) en modelberekeningen (droge depositie) voor de periode 2000 tot en met 2005. De ruimtelijk variatie in de totale depositie van P is gebaseerd op metingen van de natte P-depositie van zestien meetstations over de periode 1992-2015 en een gemiddelde ratio voor totale P-depositie/natte P-depositie uit de literatuur waarbij doorval onder bos als een schatter voor de totale P depositie is gebruikt. De verwerking van Ca, Mg en K uit arm zand, matig rijk zand en rijk is afgeleid op basis van verwerings- experimenten voor zandgronden en literatuuronderzoek naar verwerkingssnelheden op basis van veldonderzoek en verweringsmodellen. De range in de P-verwerking is gebaseerd op een literatuurstudie. De uitspoeling van Ca, K, Mg en P is bepaald door het vermenigvuldigen van een berekend neerslagoverschot, afhankelijke van het bostype, met een schatting van de jaarlijks gemiddelde concentratie in ondiep grondwater.

De balansen van de nutriënten Ca, K, Mg en P zijn ten behoeve van het adviessysteem allemaal berekend met standaardwaarden voor de depositie, verwerking en uitspoeling van Ca, K, Mg en P. Daarnaast is berekend wat het effect is van een veronderstelde range in depositie, verwerking en uitspoeling van Ca, K, Mg en P.

Resultaten balansberekeningen

Uit de resultaten van de balansberekeningen blijkt dat bij het oogsten van alleen stamhout voor beuk en eik de bodemvoorraad aan Ca, K en P in veel situaties kan afnemen. Alleen bij een laag oogstniveau ($4 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{jr}^{-1}$) is de oogst voor eik voor alle bodems en alle regio's rond het evenwichtsniveau en voor beuk alleen voor rijke zandgronden. Voor fijnspar en Douglas kan de voorraad ervan afnemen bij een matig ($7 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{jr}^{-1}$) en hoog oogstniveau ($11 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{jr}^{-1}$). Bij het oogsten van stamhout en tak- en tophout bij eindkap kan voor beuk en eik de K-voorraad ook bij lage oogstniveaus afnemen. Opvallend is dat in geen van de beschouwde situaties een negatieve balans van Mg optreedt. De verschillen ten opzichte van adviessysteem 1.0 betreffen met name de P-voorraad, die in versie 1.1 in mindere mate een beperkende rol speelt dan in versie 1.0. Daarnaast is er voor Ca voor berk in geen enkele situatie meer sprake van een afname van de voorraad. Voor eik daarentegen laten de nieuwe resultaten zien dat bij het oogsten van stamhout en tak- en tophout in Zuid-Nederland ook sprake is van afname in de K-voorraad bij het lage oogstniveau.

In dit rapport is een overzicht gegeven van mogelijke mitigerende maatregelen, waaronder: (i) nutriënten toedienen (P-bemesting of bemesting met steenmeel voor de basen), (ii) takhout ca. 4-6 maanden na de velling in het perceel laten liggen voor de oogst, (iii) hanteren van een langere omlooptijd en (iv) aanpassen van de houtoogstmethode om meer depositie in te vangen en uitspoeling te beperken. Bij het nutriënten toedienen is het geven van een P-kunstmestgift, indien de P-voorraad onvoldoende is, een goede en kosteneffectieve mogelijkheid. Voor de basen kan beter gewerkt worden met een langzaam werkende meststof, zoals steenmeel, wat een dure methode is die alleen nog in pilots is toegepast. Van de andere mitigerende maatregelen is de kennis van het precieze effect beperkt.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en doel van het adviessysteem

Een grotere houtoogst uit het Nederlandse bos sluit aan op Actieplan Bos en Hout (oktober 2016), waarin een van de doelen is een productiever bos. Dit actieplan is tot stand gekomen met steun van het ministerie van Economische Zaken en door belangrijke organisaties betrokken bij het bosbeheer en ondertekend tijdens de Nederlandse klimaatop in Rotterdam (26 oktober 2016). Een hogere houtoogst en waar mogelijk beter gebruik van stamhout en tak- en top hout uit bossen in Nederland, sluit ook aan op de doelstellingen van het nationale Energieakkoord (2013) en het mondiale Klimaatakkoord (in werking getreden sinds 4 november 2016) en is onderdeel van de afspraken van de Klimaattafel Landbouw en Landgebruik als opmaat naar de implementatie van de nieuwe Klimaatwet. Verder draagt een hogere houtoogst bij aan de totstandkoming van een biobased economy en helpt het ook bij het verwerven van meer eigen inkomsten door beheerders van bos en natuur. Ten slotte draagt een hogere houtoogst bij aan een betere grondstoffenpositie van de (regionale) economie.

Over het gebruik van biomassa voor energie en materiële toepassingen bestaat veel maatschappelijke discussie. Een belemmering voor het bereiken van een hogere houtoogst is de mogelijke uitputting van de bodem van met name bossen op arme(re) bodems. In dit kader is er behoefte aan een adviessysteem dat beheerders helpt bij het kiezen van het juiste oogstniveau, onderverdeeld in het oogsten van uitsluitend stamhout of ook top- en takhout, en het treffen van mogelijke mitigerende maatregelen om de nutriëntenbalans van het bos gezond te houden. Het tegengaan van deze negatieve effecten is ook van belang voor het bereiken van de natuurdoelstellingen van de beheerders en de voor het natuurbeleid verantwoordelijke provincies.

Voor de begeleiding van dit onderzoek naar het adviessysteem is in 2016 een begeleidingscommissie ingesteld. De begeleidingscommissie bestond uit de volgende organisaties en leden:

Ministerie van EZ/LNV	Peter van der Knaap
VBNE	Anne Reichgelt, Annika van Dijk
Staatsbosbeheer	Erwin Al, Sander Wijdeven
AVIH	Maarten Willemen, Cees Boon
Borgman Beheer Advies	Davis Borgman
Kroondomein Het Loo	Arno Willems
Landgoed Twickel	Hans Gierveld
LandschappenNL	Gerrit-Jan van Herwaarden
Natuurmonumenten	Henk Siebel
Rijksvastgoedbedrijf	Jaap Riemens
Unie van Bosgroepen	Wouter Delforterie, Rino Jans
Wageningen University	Frank Sterck, Marleen Vos

In 2017 is een brochure met daarin een eerste versie van een adviessysteem uitgebracht (De Jong et al., 2017). Dit adviessysteem, dat is gericht op zeven hoofdboomsoorten (berk, beuk, eik, Douglas, fijnspaar, grove den en lariks) op zandgronden, heeft als doel beheerders en overheden een tool te geven die bijdraagt aan een duurzaam bosbeheer, gericht op de voedingstoffenbalans van de bodem. Andere duurzaamheidsaspecten van het bos, zoals biodiversiteit, recreatieve beleving, de bijdrage van bosgebieden aan wateropvang, luchtkwaliteit en dergelijke worden niet meegenomen. Het adviessysteem geeft de maximale houtafvoer in $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{jr}^{-1}$ over de looptijd van de bosopstand. Het richt zich op de bospercelen in Nederland (uitgezonderd de overzeese landsdelen in het Caribisch gebied). Voor lijnvormige boomelementen geldt het adviessysteem niet. Dit rapport beschrijft de achtergrond van bovengenoemde brochure.

De tabellen met oogstadviezen die zijn opgenomen in adviessysteem 1.0 (in de brochure van 2017) zijn wat houtafvoer betreft gebaseerd op analyses van nutriëntgehalten in hout (stammen, takken, schors) van beuk, eik, Douglas, fijnspar, grove den en lariks die in de periode 2015 en 2016 zijn bemonsterd, terwijl de data voor berk gebaseerd zijn op literatuurgegevens. Wat uitspoeling betreft, zijn de tabellen gebaseerd op gehalten in de bovenste meter van het grondwater, zoals gemeten van het Trendmeetnet Verzuring (TMV, Boumans et al., 2014). In de winter van 2017 en 2018 zijn echter nieuwe bemonsteringen uitgevoerd van hout, waarbij ook berk is meegenomen, en ook bemonsteringen van ondiep grondwater. De gegevens in voorliggende rapportage bevatten deze extra meetgegevens. De resultaten van nutriëntgehalten in de extra houtmonsters en in het ondiepe grondwater hebben geleid tot geringe aanpassingen van de tabellen. In overleg met de begeleidingscommissie is echter besloten vooralsnog geen nieuwe brochure van het adviessysteem uit te brengen. Daarvoor zijn de verschillen te gering. Voor een compleet beeld zijn de resultaten wel opgenomen in dit achtergronddocument (bijlage 5).

1.2 Nutriënten in het adviessysteem

Het adviessysteem richt zich op vier belangrijke (macro)nutriënten: calcium (Ca), kalium (K), magnesium (Mg), en fosfor (P). De rol van deze (macro)nutriënten in bossen wordt hieronder kort beschreven. Stikstof (N) is buiten beschouwing gelaten, omdat de aanvoer ervan door depositie in de Nederlandse bossen zeer hoog is en de komende decennia naar verwachting hoog zal blijven, waardoor er geen tekorten worden verwacht.

Calcium

Bomen hebben calcium nodig voor de regulering van de wateropname en enzymactiviteit en calcium is bovendien nodig voor de stevigheid. Calciumgebrek wordt zelden waargenomen. Een tekort kan o.a. leiden tot geelverkleuring en uiteindelijk necrose (dode, zwarte vlekken), beginnend aan de randen en tussen de nerven. De loofhoutsoorten en fijnspar hebben relatief hoge Ca-gehalten in het stamhout (ca. 1,5 g/kg ds). Dit komt voor een groot deel door hoge gehalten in de schors. De gehalten in takhout zijn voor alle soorten gemiddeld hoger dan in stamhout, namelijk ca. 3 g/kg ds. Bij eik en beuk, en in mindere mate berk en fijnspar, dient er rekening mee gehouden te worden dat de balans door oogst negatief kan worden. Dit betekent dat er meer nutriënten worden afgevoerd dan er worden aangevoerd. Dit treedt vooral op bij de hogere oogstniveaus.

Kalium

Kalium is nodig voor de wateropname en het nutriëntentransport, de werking van enzymen en de aanmaak van eiwitten. Een tekort aan K verhoogt de gevoeligheid voor schimmelinfecties, beïnvloedt de groei ongunstig en veroorzaakt een vermindering van de droogte- en vorstresistentie. Het is ook te zien aan gedeeltelijke geelverkleuring van blad en naalden (veelal de punten en randen). Het gemiddelde K-gehalte in stamhout is 0,6 g/kg ds. De hoogste gehalten in stamhout komen voor bij beuk (ca. 1,0 g/kg ds) en eik (ca. 0,8 g/kg ds). In takhout is het gemiddelde K-gehalte 1,8 g/kg ds, en de verschillende boomsoorten wijken daar niet meer dan 15% van af. Bij eik en beuk dient er rekening mee gehouden te worden dat de balans door houtoogst (ook zonder takhout) negatief kan worden op de gepresenteerde bodemtypen.

Magnesium

Magnesium is voor bomen van belang vanwege de aanmaak van bladgroen en voor de fotosynthese. Magnesiumgebrek uit zich in hardgele verkleuring van vaak de toppen van naalden met een scherpe overgang, en bij blad in geelverkleuring tussen de nerven, met uiteindelijk necrose tot gevolg. De Mg-gehalten zijn betrekkelijk laag in stamhout; gemiddeld 0,15 g/kg ds. Variërend van 0,1 g/kg ds bij Douglas en lariks tot ca. 0,3 g/kg ds bij de beuk. Het gemiddelde gehalte van magnesium in takhout is 0,5 g/kg ds. Oogst van hout en top- en takhout blijkt voor magnesium in geen van de situaties tot een negatieve balans te leiden.

Fosfor

Een boom heeft P nodig voor het stofwisselingsproces. Fosfor is een bestanddeel van enzymen en DNA. Fosforgebrek leidt tot kleinere bladeren en naalden, die van donkergroen naar violet kunnen kleuren, en tot een afname van de groei. In stamhout zit betrekkelijk weinig P: gemiddeld 0,07 g/kg ds. Bij de loofhoutsoorten is dat 0,1 g/kg ds en bij de naaldhoutsoorten 0,05-0,06 g/kg ds. In het takhout zijn de gehalten gemiddeld 0,4 g/kg ds en de verschillende boomsoorten wijken daar niet meer dan 20% van af. De aanvoer van P is naar verhouding in veel gevallen klein. Vooral bij de loofbomen wordt bij oogst al snel meer dan de aanvoer afgevoerd. Maar ook bij lariks en grove den, en in mindere mate Douglas en fijnspar, kan de balans door oogst (ook zonder takhout) negatief worden. De negatieve balans is vaak maar klein ten opzichte van de beschikbare voorraad in de bodem (zie figuur 3), zodat er door oogst van hout en biomassa meestal geen tekorten zullen ontstaan. Waar de balans negatief is en de voorraad (te bepalen middels bodemanalyse) klein blijkt te zijn, kan de voorraad met een P-gift betrekkelijk eenvoudig aangevuld worden voor de lange termijn.

1.3 Inhoud van het rapport

Dit rapport beschrijft de achtergrond van de brochure van het adviessysteem voor duurzame houtoogst (versie 1.0; De Jong et al., 2017) op grond van berekeningen van een nutriëntenbalans. Voor een aantal oogstscenario's en combinaties van boomsoort en groeiplaats is bepaald in welke mate de extra oogst van biomassa leidt tot een negatieve balans van de nutriënten calcium (Ca), kalium (K), magnesium (Mg) en fosfor (P). Vervolgens is berekend wat de maximale houtafvoer mag zijn, zodanig dat er geen sprake is van uitputting van een van deze nutriënten.

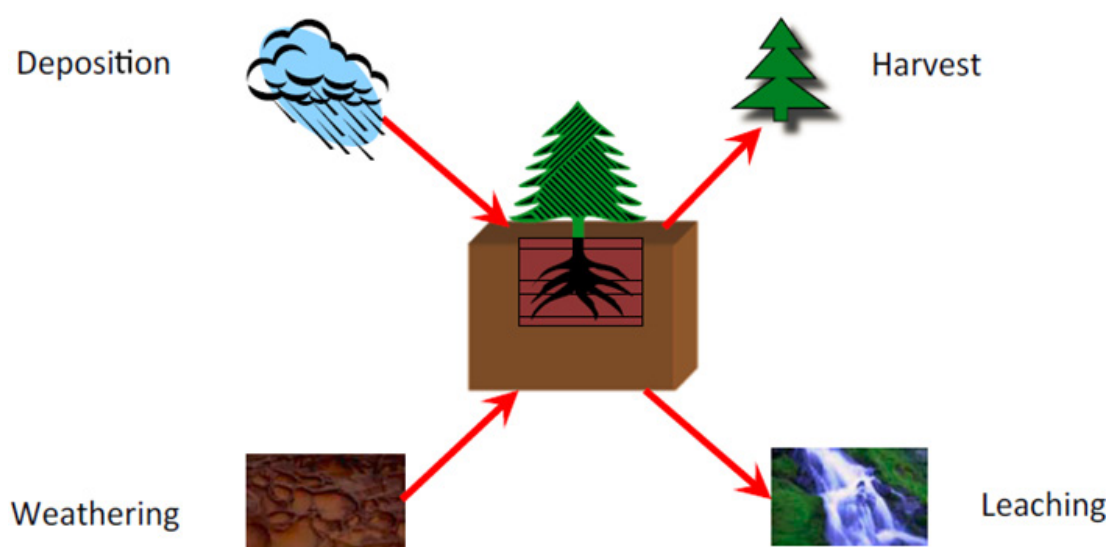
In hoofdstuk 2 wordt de methode besproken om de nutriëntenbalansen te berekenen (2.1), de gebruikte classificatie binnen het adviessysteem in termen van de beschouwde boomsoorten, bodems en regio's (2.2) en de berekeningsmethode en data voor de schatting van (i) de netto afvoer van nutriënten via houtoogst (2.3) en (ii) de netto toevoer van nutriënten via depositie en verwerking, gecorrigeerd voor uitspoeling (2.4). In hoofdstuk 3 worden de resultaten van de berekeningen van de nutriëntenbalansen in bossen gepresenteerd (3.1) en vervolgens hoe die resultaten zijn gebruikt in het adviessysteem voor houtoogst (3.2). In hoofdstuk 4 worden de onzekerheden van het systeem besproken (4.1), de mogelijkheid van mitigerende maatregelen beschreven (4.2) en de verdere ontwikkelingen in het adviessysteem voor houtoogst aangegeven (4.3).

In bijlage 1 is het bemonsteringsprotocol gegeven voor de metingen van nutriënten in hout, waarvan de resultaten zijn gegeven in bijlage 2. In bijlage 3 is de relatie tussen gehalten aan nutriënten in bodem en hout gegeven. In bijlage 4 is een beschrijving gegeven van de bemonstering van ondiep grondwater op achttien locaties en de gehalten aan Ca, K, Mg en P die daarin werden aangetroffen. Ten slotte is in bijlage 5 het adviessysteem gegeven. Dit betreft een kleine update van de tabellen in de brochure op basis van herziene gehalten in hout en nieuwe P-concentraties in grondwater (advieessysteem 1.1). De nieuwe gegevens in de update zijn afkomstig van uitgevoerde bemonsteringen in de winter van 2017/18. Het gaat daarbij om tabellen waarbij voor negen regio's voor zeven boomsoorten per onderscheiden zes geclusterde bodemtypen de maximaal toelaatbare oogst ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{jr}^{-1}$) is gegeven bij een nutriëntenbalans in evenwicht voor twee oogstscenario's: (i) alleen stamhout en (ii) stamhout en takhout.

2 Berekeningswijze en invoergegevens

2.1 De nutriëntenbalansmethode

In het adviessysteem is voor een aantal combinaties van boomsoorten, bodemtypes en regio's de balans van nutriënten in kaart gebracht (zie figuur 1). Door depositie uit lucht en neerslag alsmede door verwerking van bodemdeeltjes komen nutriënten in het systeem beschikbaar voor de groei van bomen. Door uitspoeling verdwijnen er nutriënten. Voorts verdwijnen er nutriënten uit het systeem door oogst van hout. Op basis van de depositie, verwerking en uitspoeling wordt voor de onderscheiden boomsoorten, bodemtypes en regio's aangegeven hoeveel hout (stamhout en/of tak- en tophout) er geoogst kan worden. In het adviessysteem is geen rekening gehouden met aanvoer van nutriënten door kwelstromen of door inundatie van bossen met rivier- of beekwater.



Figuur 1 Aan- en afvoer van nutriënten in bossen (Egnell, 2013).

De kritische afvoer per element (in $\text{kg ha}^{-1} \text{jr}^{-1}$) is berekend volgens:

$$\text{Kritische afvoer} = \text{Depositie} + \text{Verwerking} - \text{Uitspoeling} \quad (1)$$

De kritische houtafvoer (in $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{jr}^{-1}$) is vervolgens berekend door voor het meest beperkende element de kritische afvoer te delen door de elementconcentratie in het afgevoerde hout (in kg m^{-3}):

$$\text{Kritische houtafvoer} = (\text{Depositie} + \text{Verwerking} - \text{Uitspoeling}) / \text{Element-gehalte hout} \quad (2)$$

De wijze waarop de verschillende posten zijn bepaald, is beschreven in paragraaf 2.3 en 2.4.

2.2 Onderscheiden boomsoorten, bodems en regio's binnen het adviessysteem

Bij het geven van een advies voor de maximaal toelaatbare oogst ($m^3 ha^{-1} jr^{-1}$) maken we onderscheid in:

- Boomsoorten (zeven)
- Bodemtypen (zes clusters van bodemtypen op de 1:50.000 bodemkaart)
- Fysisch-geografische regio's (negen)

De zeven onderscheiden boomsoorten zijn:

- Berk
- Beuk
- Eik
- Douglas
- Fijnspar
- Grove den
- Lariks

De zes onderscheiden geaggregeerde clusters van bodemtypen zijn:

- Zand
 - Arm zand (grof, leemarm)
 - Matig arm zand
 - Rijk zand en leem (fijn, leemhoudend)
- Löss
- Klei
- Veen

In tabel 1 is voor de drie onderscheiden zandgronden de relatie gegeven met de bodemtypen op de 1:50.00 bodemkaart (codes).

Tabel 1 De bodemtypen op de 1:50.00-bodemkaart en de onderscheiden gradaties voor mineralogische rijkdom van de zandgronden.

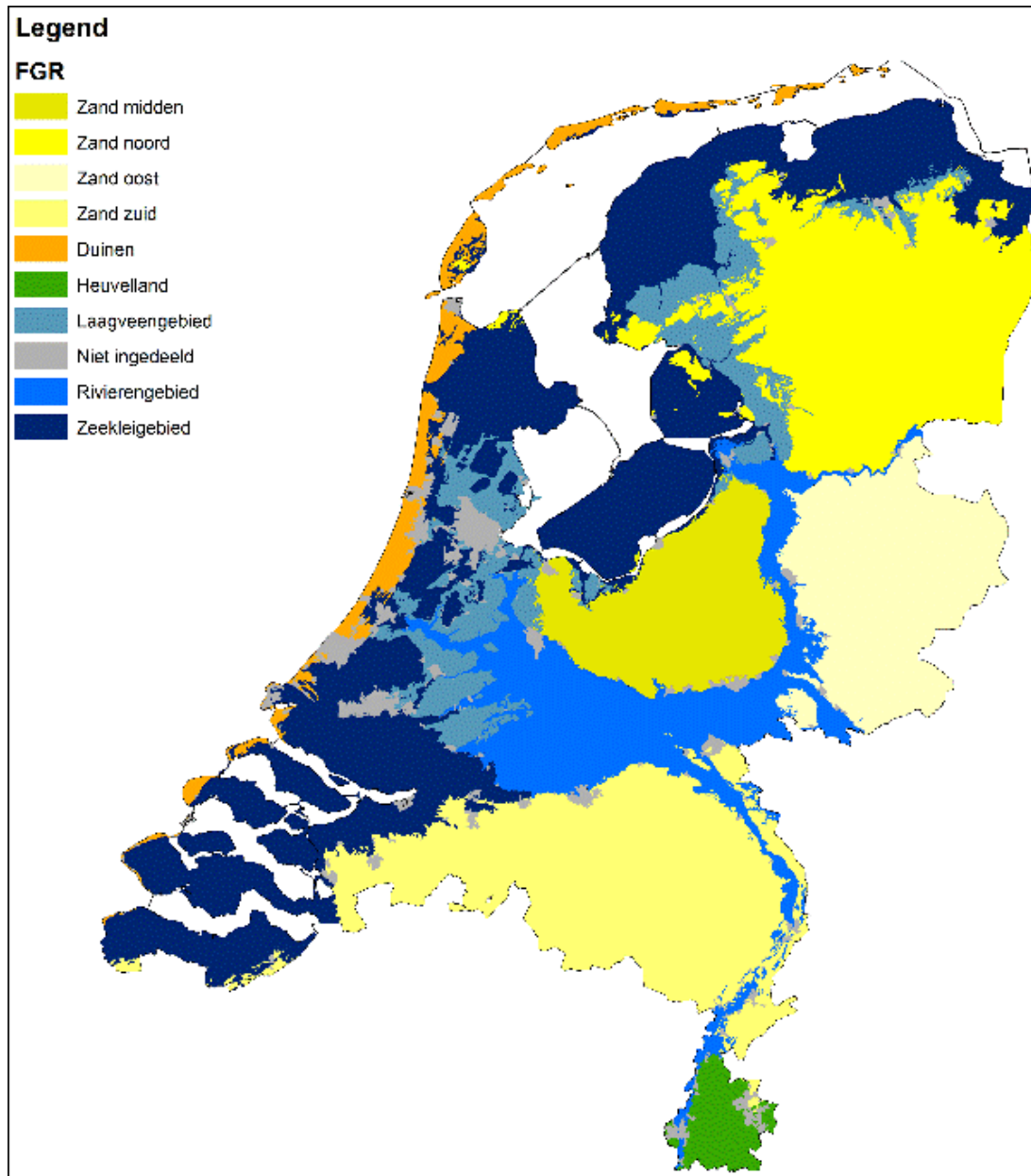
Arm zand	Matig arm zand	Rijk zand en leem	Matig of rijk zand/leem ¹
Hd21	cHd21	bEZ21	EZg21 Lnd6
Hd30	cHn21	bEZ23	EZg23 Lnh6
Hn21	cY21	bEZ30	EZg30 pLn5
Hn30	cZd21	BLb6	Ld5 pZg21
Zd21	Hd23	BLd5	Ld6 pZg23
Zd30	Hn23	BLd6	Ldd5 pZg30
Zn21	pZn21	BLh5	Ldd6 pZn23
Zn30	pZn30	BLh6	Ldh5 Y23
	Y21	BLn5	Ldh6 Y23b
	Zb21	BLn6	Lh5 Zb23
	Zb30	cHd23	Lh6 zEZ23
	Zd23	cHn23	Ln5
	zEZ21	cY23	Ln6
	Zn23	cZd23	Lnd5

¹ Afhankelijk van leemgehalte wordt deze categorie bij matig arm zand of bij rijk zand en leem gerekend.

De negen onderscheiden fysisch-geografische regio's zijn:

1. Heuvelland
2. Hogere Zandgronden Noord
3. Hogere Zandgronden Oost
4. Hogere Zandgronden Midden
5. Hogere Zandgronden Zuid
6. Rivierengebied
7. Laagveengebied
8. Zeekleigebied
9. Duinen

In figuur 2 is een kaartje gegeven van de negen onderscheiden fysisch-geografische regio's.

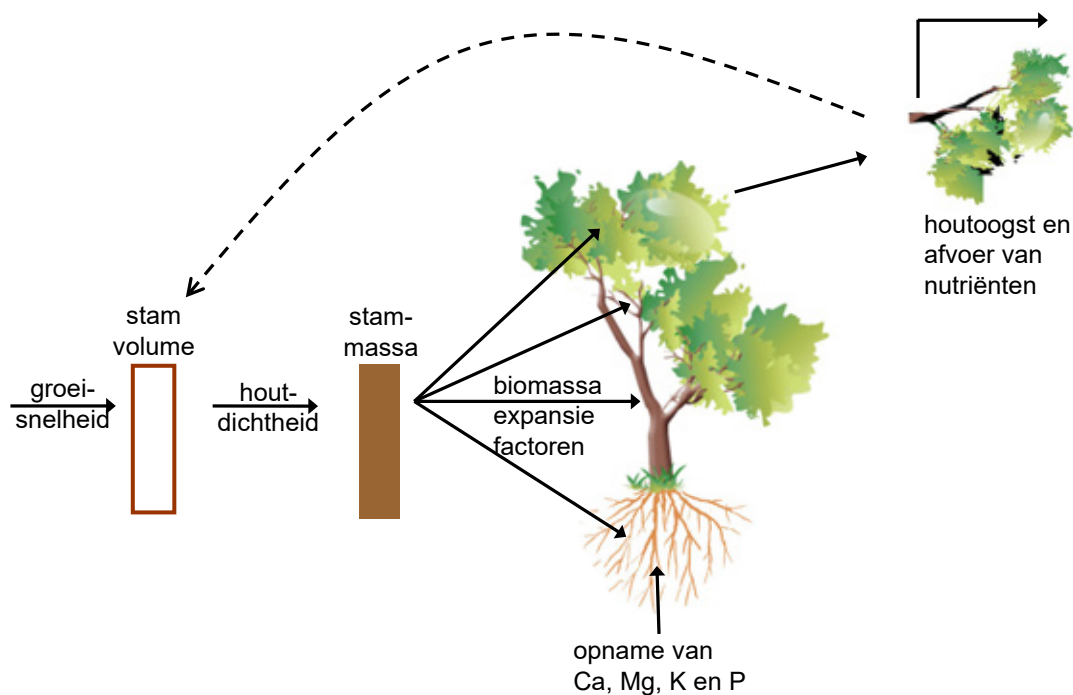


Figuur 2 De negen onderscheiden fysisch-geografische regio's.

2.3 Netto afvoer van nutriënten via houtoogst

2.3.1 Berekeningsmethode

De afvoer van nutriënten via houtoogst is berekend met het model GrowUp (Bonten et al., 2016). GrowUp betreft een boomgroeimodel dat per jaar de opname, vastlegging en afvoer van de nutriënten per boomsoort berekent op basis van de hoeveelheid biomassa en nutriënten in de verschillende biomassacompartimenten (stammen, takken, wortels, bladeren en naalden). In figuur 3 is een schematische weergave van het model gegeven. Met GrowUp is per combinatie van boomsoort, groeiklasse (groeiverwachting) en oogstscenario de netto afvoer van Ca, K, Mg en P bepaald.



Figuur 3 Schematische weergave van het model GrowUp voor de opname en afvoer van nutriënten.

De basis voor de berekeningen van de biomassatoename zijn groeicurves (per boomsoort, groeiklasse en oogst- en dunningsregime) die gebaseerd zijn op de opbrengsttabellen van Jansen et al. (1996). De massa van de stammen wordt hierop gebaseerd door gebruik te maken van het drogestofgewicht per volume. De massa van de takken, blad/naalden en wortels is een afgeleide hiervan en wordt berekend op basis van biomassa-expansiefactoren, afkomstig van Vilén et al. (2005). Ook de oogst van hout (verhouding dunning, eindkap) is gebaseerd op die opbrengsttabellen. Voor dit onderzoek is daarvan alleen de verhouding takken/stamhout en de massa naalden relevant, aangezien van andere biomassa (vooral wortels) wordt aangenomen dat die in het bos achterblijft, waardoor het niet in de berekeningen wordt meegenomen. GrowUp bevat tevens defaultwaarden voor nutriëntgehalten in de biomassacompartimenten op basis van literatuuronderzoek. Deze zijn voor de meegenomen boomsoorten echter vervangen door gehalten die in dit onderzoek zijn bepaald (zie paragraaf 2.3.2). De nutriëntgehalten zijn gedurende de gehele omlooptijd constant verondersteld.

De nutriëntafvoeren zijn berekend als de jaargemiddelde afvoer over de omlooptijd van de betreffende boomsoort, zoals gehanteerd door Jansen et al. (1996), maar met een in deze studie gehanteerd maximum van 100 jaar. De omlooptijden uit Jansen et al. (1996) zijn voor beuk 150 jaar, voor eik 120 jaar, voor grove den en Douglas 100 jaar, voor berk 90 jaar en voor es, lariks en fijnspar 80 jaar.

2.3.2 Nutriëntgehalten in stammen en takken

De volgende subparagrafen geven informatie over: (i) de bemonsterde locaties, (ii) de monsternamen en verwerking van schors en hout (kernhout en spinhout) van stammen, grove takken en fijne takken en (iii) de resultaten van berekende nutriëntgehalten in stammen en takken op basis van die gegevens. Meer informatie over de bemonstering en de werkwijze voor het berekenen van nutriëntgehalten in stammen, op basis van gehalten in schors, spinhout en kernhout, en in takken, op basis van gehalten in schors, grove takken en fijne takken, is gegeven in respectievelijk bijlage 1 en 2.

2.3.2.1 Bemonsterde locaties in de periode 2016-2018

In de periode 2016-2018 heeft onderzoek plaatsgevonden in de regio's Noord-, Midden-, Oost- en Zuid-Nederland naar de concentraties van de onderscheiden nutriënten in de verschillende boomcomponenten die (kunnen) worden afgevoerd (zie tabel 2 voor de monsterlocaties per boomsoort).

Tabel 2 Overzicht van bemonsterde locaties, monsterperiode en boomsoorten.

Regio	Periode	Berk	Beuk	Eik	Douglas	Fijnspar	Grove den	Lariks	Totaal
Noord		3	1	6	1	5	1	6	23
Bosw. Gieten	'17-'18	2		2		2		3	9
Bosw. Hardenberg	'17-'18	1	1	3	1	1	1	1	9
Bosw. Ruinen	'17-'18			1		2		2	5
Midden/Oost		2	6	10	9	9	13	9	58
Bosw. Ugchelen	'16-'17		1	1					2
Landgoed Twickel	'16-'17					1	1	1	3
Bosw. Leersum	'17-'18	2		4			4		10
Landg. Maarsbergen	'16-'17		1	1		1	1		4
Bosw. Montfoort	'16-'17		2	2	1	2	1	2	10
De Hoge Veluwe	'16-'17				1		1		2
Landg. Quadenoord	'16-'17			1	2		1	1	5
Bosw. Amerongen	'16-'17		1		1		1	2	5
Landgoed Tongeren	'16-'17				3	2	2	2	9
Landgoed Den Treek	'16-'17		1	1	1	3	1	1	8
Zuid		6	-	4	2	1	7	3	23
Bosw. Leende	'17-'18	2		2		1	2	2	9
Bosw. Mastbos	'17-'18	4		2	2		5	1	14
Totaal		11	7	20	12	15	21	18	104

Bosw.: Boswachterij; Landg.: Landgoed.

De onderscheiden boomcomponenten zijn stamhout, bij sommige boomsoorten nog onderverdeeld in spinhout en kernhout, schors, dik takhout (onderscheiden in hout en schors) en dun takhout (niet nader onderverdeeld in hout en schors).

De meeste bemonsteringen zijn uitgevoerd in de winter van 2016-2017. De resultaten hiervan zijn verwerkt in de brochure die in 2017 is uitgebracht. In 2016-2017 is berk niet bemonsterd. Voor berk is toen uitgegaan van gegevens uit de literatuur (Jacobsen et al., 2003; Hagen-Thorn et al., 2004), die alleen gehalten geven voor resp. stammen en takhout als geheel. In de winter van 2017-2018 zijn aanvullende bemonsteringen uitgevoerd, waaronder ook aan berk. De resultaten die in deze rapportage zijn weergegeven, wijken daarom iets af van de gegevens die gebruikt zijn in de brochure.

2.3.2.2 Monsternamen en dataverwerking

De gehalten aan nutriënten verschillen sterk tussen de onderscheiden houtige delen of weefsels van een boom. Algemeen is het zo dat de gehalten het grootst zijn in schors, gevolgd door spinhout en het laagst in kernhout. De gehalten in takken zijn vervolgens hoger dan in stammen. De gehalten in bomen of in de onderdelen ervan (stammen, takken) worden sterk bepaald door de massa-verhoudingen waarin de verschillende onderdelen voorkomen.

Monsternamen: Omdat we in deze studie (ook) de relatie wilden onderzoeken tussen nutriëntgehalten in de bodem en in bomen, hebben we zo veel mogelijk de verschillende houtige delen van bomen afzonderlijk bemonsterd, zodat de resultaten zo min mogelijk worden beïnvloed door de verhoudingen waarin de delen voorkomen in stammen, takken of de gehele boom. De bemonstering is daarom gedaan voor de houtige delen (zie bijlage 1 voor de werkwijze):

- schors van stammen (> 10 cm diameter)
- spinhout van stammen (> 10 cm diameter)
- kernhout van stammen (> 10 cm diameter)
- schors van grove takken (2-10 cm diameter)
- hout van grove takken (kernhout + spinhout, in de praktijk vooral spinhout) (2-10 cm diameter)
- hout van fijne takken (< 2 cm diameter)

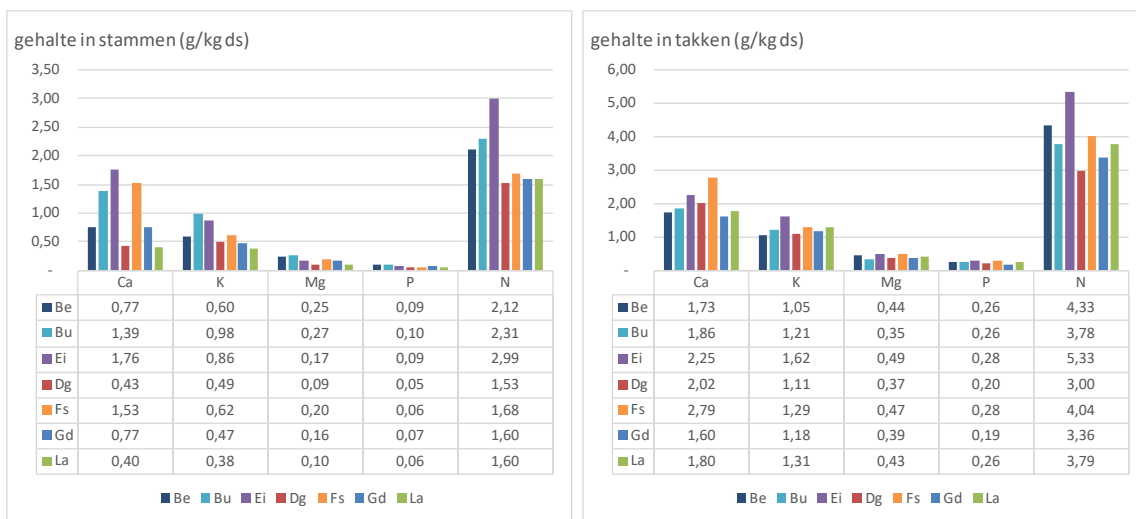
De bepaling van de diverse elementen is uitgevoerd door het lab van Wageningen University & research na magnetrondestructie ($\text{HNO}_3/\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}_2$), m.b.v. ICP-AES. Daarbij is door toevoeging van salpeterzuur en zoutzuur aan een monster de organische stof volledig afgebroken. Het silica skelet wordt niet of slechts voor een klein deel afgebroken. Ontsluiting werd uitgevoerd m.b.v. de magnetron, waarbij de geselecteerde elementen in oplossing zijn gebracht. Nitreuze dampen zijn verwijderd door toevoeging van waterstofperoxide (SWV E1014). Hierna zijn de geselecteerde elementen gemeten met behulp van ICP-AES (volgens SWV E1362).

Dataverwerking: De resultaten van de bemonsteringsanalyses zijn gebruikt om gehalten voor stammen en takken als geheel te berekenen op basis van de massaverhoudingen van de verschillende houtige delen. Daarvoor is de dikte van de houtige delen gemeten bij uiteenlopende stam of takdikte. Daaruit is een relatie bepaald tussen de dikte van stammen of takken en de dikte van de houtige delen ervan. Uit deze relatie zijn de volume- en massaverhoudingen berekend (zie bijlage 2) en zijn de gehalten voor stammen en takken als geheel berekend. Deze waarden zijn in GrowUp ingevoerd om de bijbehorende kritische afvoer te berekenen vervolgens vergelijking 2 (paragraaf 2.1).

2.3.2.1 Resultaten

Nutriëntgehalten totaal in stammen en takken

Op basis van de massaverdeling die volgens de werkwijze in bijlage 2 is berekend, zijn voor stammen (> 10 cm) s, terwijl de gehalten fosfor betrekkelijk laag zijn. Er zijn ook enkele duidelijke verschillen tussen boomsoorten te zien. Zo zijn de gehalten in stammen in eik en beuk vaak duidelijk hoger dan die in de andere boomsoorten, maar voor fijnspar zijn enkele gehalten (Ca, Mg) ook duidelijk hoger dan bij de andere naaldboomsoorten en berk. Bij de takken valt op dat de calciumgehalten het hoogst zijn bij de naaldboomsoort fijnspar, gevolgd door eik. Bij eik zijn daarnaast de gehalten stikstof en kalium gemiddeld hoger dan bij de andere boomsoorten.



Figuur 4 Gemiddelde nutriëntgehalten in stammen (links) en takken (rechts) voor verschillende boomsoorten, in gram per kilogram. Be: Berk; Bu: beuk; Ei eik; Dg: Douglas; Fs fijnspar; Gd grove den; La: lariks.

Verschil nutriëntgehalten ten opzichte van voorgaande studie

In de studie die als basis aan deze studie vooraf is gegaan, zijn voor het berekenen van de afvoer van nutriënten met houtoogst gegevens gebruikt die afkomstig waren van buitenlandse literatuur (Bonten et al., 2015). De gemeten gegevens in de voorliggende studie zijn vergeleken met de voorafgaande literatuurgegevens. Resultaten van de procentuele verschillen voor nutriënten in stamhout en takhout zijn weergegeven in respectievelijk tabel 3 en tabel 4. Het aangegeven percentage is berekend als $((\text{gemeten gehalte} - \text{literatuurgehalte}) / \text{literatuurgehalte}) \times 100$. In die tabellen valt op dat de gehalten zoals die voor deze studie zijn berekend voor de huidige Nederlandse situatie aanzienlijk verschillen dan eerder werd aangenomen op basis van de buitenlandse gegevens.

Tabel 3 Procentueel verschil in gemeten nutriëntgehalten in stamhout in deze studie ten opzichte van de voorgaande studie op basis van literatuurgegevens (Bonten et al., 2015).

Nutriënt	Beuk	Eik	Douglas	Fijnspar	Grove den	Lariks
Ca	1%	-38%	-64%	27%	-22%	-66%
K	-5%	-31%	-32%	-15%	-25%	-47%
Mg	6%	-10%	-53%	2%	-26%	-51%
P	-21%	-44%	-64%	-57%	-47%	-62%
N	71%	62%	30%	43%	51%	35%

Tabel 4 Procentueel verschil in gemeten nutriëntgehalten in takhout in deze studie ten opzichte van de voorgaande studie op basis van literatuurgegevens (Bonten et al., 2015).

Nutriënt	Beuk	Eik	Douglas	Fijnspar	Grove den	Lariks
Ca	-51%	-65%	-31%	-4%	-34%	-39%
K	-23%	-26%	-51%	-43%	-31%	-42%
Mg	5%	-2%	-63%	-53%	-46%	-58%
P	-43%	-52%	-64%	-48%	-45%	-51%
N	-6%	-11%	-34%	-11%	-3%	-16%

De N-gehalten zijn voor stamhout duidelijk hoger dan eerder werd aangenomen (ofwel gemeten in het buitenland), terwijl de gehalten van de overige nutriënten meestal (op enkele combinaties van nutriënt en boomsoort na) juist duidelijk lager zijn. Voor de overige nutriënten is alleen het gehalte calcium bij fijnspar duidelijk hoger dan eerder aangenomen. Vooral de gehalten aan P zijn lager dan eerder werd aangenomen, maar ook andere nutriënten bij specifieke boomsoorten zijn fors lager,

zoals calcium en magnesium bij Douglas en lariks. Het hogere N-gehalte is te verklaren door de relatief grote stikstofbeschikbaarheid in Nederlandse bossen door jarenlange verhoogde depositie. De lagere gehalten aan basische kationen kunnen veroorzaakt zijn door uitspoeling ten gevolge van zure regen. De gemeten gehalten in de bodem zijn dan ook betrekkelijk laag. Ook de P-gehalten in de bodem zijn betrekkelijk laag, terwijl er maar beperkt aanvoer van P is.

Van het takhout valt op dat de gemiddelde gehalten van vrijwel alle nutriënten lager zijn dan in de studie van Bonten et al. (2015) werd aangenomen, ook die van stikstof. Dit is vooral opmerkelijk omdat de gehalten aan stikstof in stammen juist hoger zijn dan in de eerdere studie van Bonten et al. (2015) werd aangenomen. Hier speelt wellicht de verhouding tussen fijne en grove takmassa een rol. In de voorliggende studie is uitgegaan van een beperkt aandeel fijne takmassa. Dit is gedaan omdat ervan uitgegaan wordt dat takken alleen bij eindkap worden geoogst en het aandeel fijne takmassa afneemt naarmate de opstand ouder wordt en de takken ervan daardoor grover worden. Van de referenties die Bonten et al. (2015) hebben gebruikt, is – evenals bij veel bronnen op dit gebied – niet goed duidelijk hoe de bemonstering van de takken is uitgevoerd en vooral welk deel van de takken is bemonsterd.

Nutriënten in naalden

De nutriënten in naalden zijn bepaald op basis van de gegevens die verkregen zijn in het kader van effectgerichte maatregelen in bossen in de periode 1999-2001. In dat kader is een groot aantal naaldmonsters geanalyseerd, die een goed beeld geven van de gemiddelde nutriëntgehalten in de naalden. Alleen van groenblijvende naaldbomen zijn de gehalten van naalden of blad relevant, omdat blad- of naaldverliezende bomen in de winter zonder blad of naalden worden geoogst. In tabel 5 zijn de gehalten van de naalden van de betreffende boomsoorten weergegeven. In tabel 6 is het procentuele verschil weergegeven tussen de gehalten gemeten in Nederland voor bladonderzoek in 1998-2000 (Olsthoorn et al., 2006) en de buitenlandse gegevens die werden gebruikt door Bonten et al. (2015), volgens $((\text{gehalte Olsthoorn} - \text{gehalte Bonten}) / \text{gehalte Bonten}) \times 100$.

Tabel 5 Nutriëntgehalten (g/kg) in naalden op basis van gegevens van bladonderzoek in 1998-2000 (Olsthoorn et al., 2006).

nutriënt	Douglas	Fijnspar	Grove den
Ca	3,53	3,36	2,17
K	6,41	5,85	6,30
Mg	1,35	0,91	0,74
P	1,10	1,40	1,35
N	20,45	18,65	19,70
Aantal monsters	755	366	1706

Daarin is te zien dat de stikstofgehalten in blad van beuk en eik bij Bonten et al. (2015) gemiddeld licht lager zijn dan de Nederlandse gegevens, maar dat ze bij de overige boomsoorten veel hoger zijn. De calciumgehalten zijn veel lager bij de Nederlandse metingen. De gehalten kalium en magnesium zijn bij de Nederlandse gegevens bij de naaldboomsoorten in enkele gevallen duidelijk hoger.

Tabel 6 Procentueel verschil in gemeten nutriëntgehalten in blad of naalden op basis van gegevens van bladonderzoek in Nederland in 1998-2000 (Olsthoorn et al., 2006) ten opzichte van voorgaande studie op basis van literatuurgegevens (Bonten et al., 2015).

Nutriënt	Beuk	Eik	Douglas	Fijnspar	Grove den	Lariks
Ca	-22%	-45%	-40%	-43%	-48%	-36%
K	-12%	-6%	12%	3%	20%	17%
Mg	-4%	-28%	38%	-7%	-16%	49%
P	-8%	-12%	-24%	-4%	2%	-7%
N	-7%	-3%	53%	39%	47%	87%

2.4 Netto toevoer van nutriënten via depositie, verwerking en uitspoeling

Om te voorkomen dat de bodem wordt uitgeput, kan de afvoer van nutriënten door hutoogst worden gecompenseerd door de toevoer van nutriënten via depositie en verwerking, gecorrigeerd voor het verlies ervan door uitspoeling. Van elke van deze fluxen is een schatting gemaakt zoals gegeven in onderstaande paragrafen.

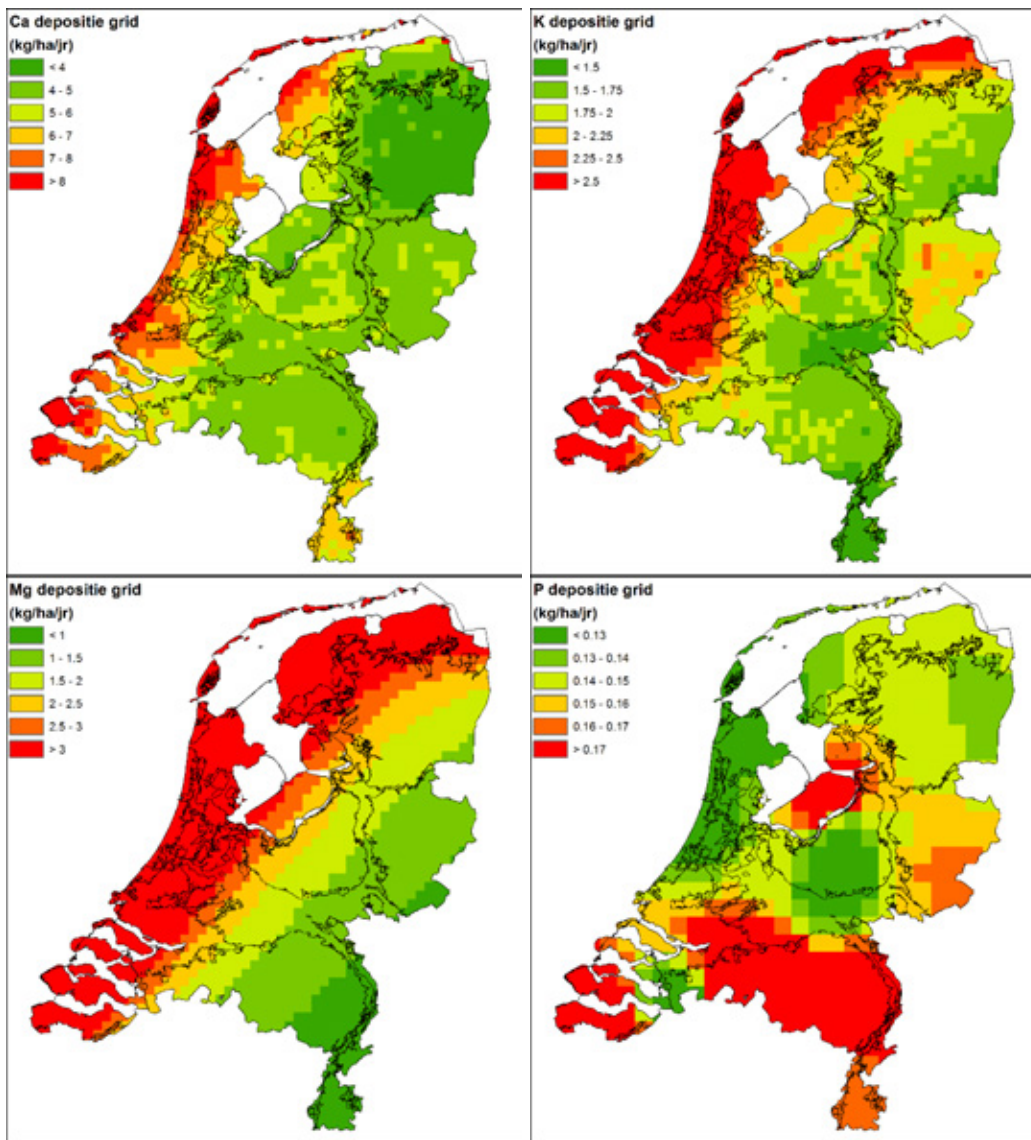
2.4.1 Aanvoer van nutriënten door depositie

Calcium, kalium en magnesium

De ruimtelijk variatie in de totale (som van natte en droge) atmosferische depositie van de basische kationen, Ca, K en Mg, is gebaseerd op een combinatie van metingen (natte depositie) en modelberekeningen (droge depositie) voor de periode 2000 tot en met 2005, zoals beschreven in Van Jaarsveld et al. (2010). De natte depositie van basische kationen die niet van zeezout afkomstig is, is bepaald door de metingen van het Landelijk Meetnet Regenwater (www.lml.rivm.nl/gevalideerd) te corrigeren voor de invloed van zeezout. Als referentie voor zeezout is natrium (Na) gebruikt dat verondersteld wordt geheel van zeewater afkomstig te zijn. De depositie van basische kationen uit zeezout is gebaseerd op een modelberekening die is gevalideerd op meetdata van de natte depositie van Na en luchtconcentraties van chloride (Cl). De droge depositie is berekend door vermenigvuldiging van geschatte basenconcentraties in lucht op basis van regenwatermetingen en een geschatte droge depositiesnelheid op basis van meteorologische gegevens en landgebruik-gegevens. Meer informatie is te vinden in Van Jaarsveld et al. (2010). De resultaten van de gemiddelde depositie in de periode 2000 tot en met 2005 zijn constant verondersteld voor de toekomst. De resultaten die door Van Jaarsveld et al. (2010) zijn gegeven per 5 km x 5 km (zie figuur 5) zijn geaggregeerd naar negen onderscheiden fysisch-geografische regio's (zie figuur 6).

Fosfaat

De totale depositie van fosfor (P) is voor Nederland minder duidelijk in beeld dan voor kationen, omdat de droge depositie ontbreekt. Sinds 1992 zijn echter wel P-concentraties gemeten op zestien meetstations van het RIVM regenwatermeetnet, te weten Beek, Biddinghuizen, Braakman, De Bilt, De Zilk, Eibergen, Gilze-Rijen, Huijbergen, Kollumerwaard, Leiduin, Philippine, Rotterdam, Speuld, Valthermond, Vredepeel, Wageningen, Wieringerwerf en Witteveen.



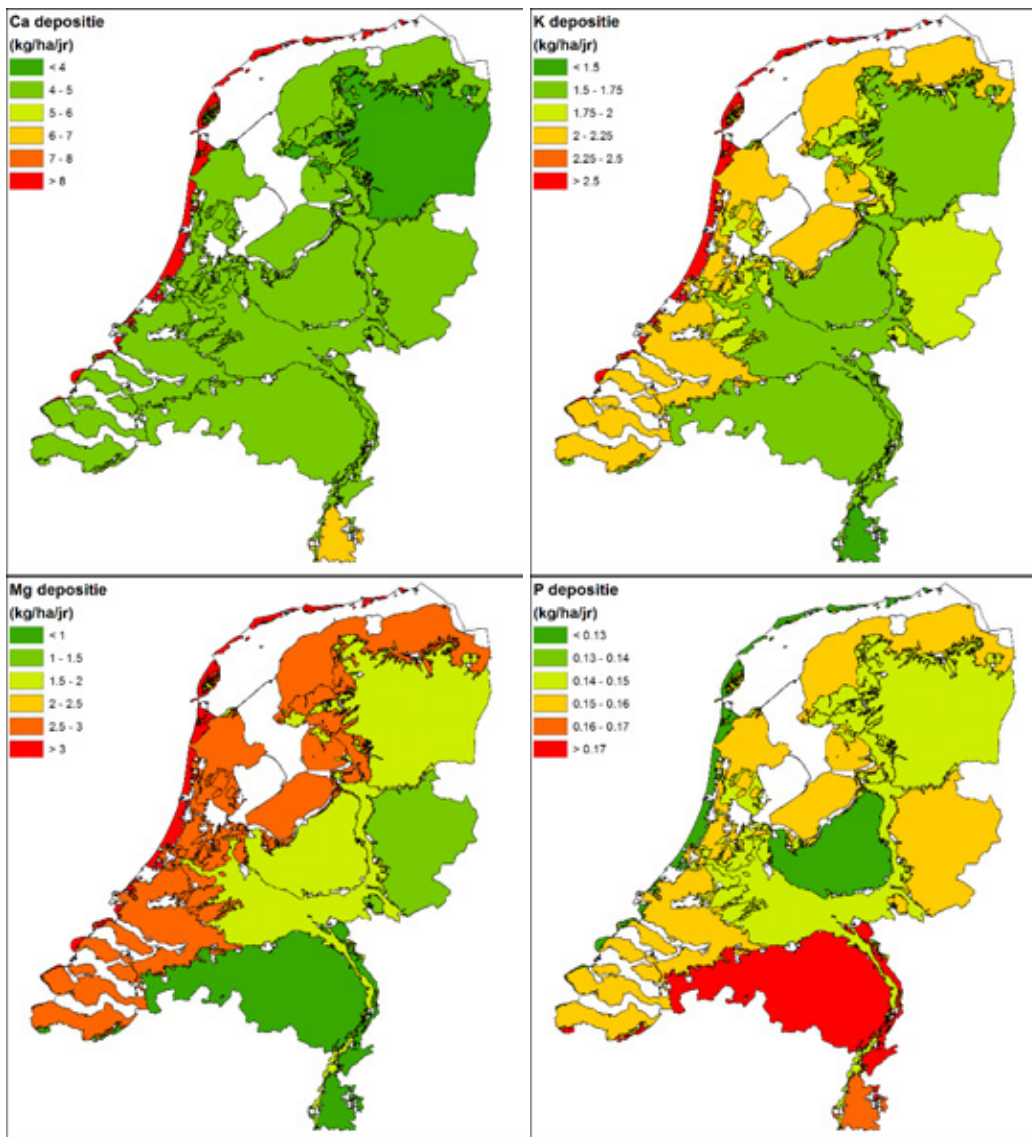
Figuur 5 De totale depositie (in $\text{kg ha}^{-1} \text{jr}^{-1}$) van Ca (linksboven), K (rechtsboven), Mg (linksonder) en P (rechtsonder) per $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$.

Tevens zijn waterhoeveelheden gemeten waaruit de natte depositie is af te leiden door de neerslaghoeveelheid te vermenigvuldigen met de P-concentratie. In het kader van dit adviessysteem is dat voor alle stations over de gehele meetperiode gedaan. Voor de meeste stations is dit echter niet gedurende de gehele periode, omdat er meetstations zijn afgefallen (bv. Eibergen, Huijbergen, Leiduin, Wageningen en Witteveen na 2005 en Beek, Gilze-Rijen, Kollumerwaard en Rotterdam na 2013) of bijgekomen (bv. Philippine na 2005). Verder varieert de temporele resolutie waarmee de P-concentratie in regenwater wordt gemeten van 4 weken, 2 weken of 1 week.

De natte P-depositie van alle meetstations over de periode 1992-2015 blijkt geen trend te vertonen en is gemiddeld ca. $80 \text{ g P ha}^{-1} \text{jr}^{-1}$. Uit literatuurgegevens volgt een gemiddelde ratio voor doorval P-depositie/natte P-depositie van ca. 2.0 met een range van 1.5-3.0 (tabel 7).

Tabel 7 Relatie tussen doorval en bulkdepositie van P op een aantal boslocaties.

Land	Depositie ($\text{g P ha}^{-1} \text{jr}^{-1}$)		Ratio DV/BD	Referentie
	Bulkdepositie	Doorval		
Duitsland	440	730-1460	1.7-3.3	Talkner 2009
Duitsland	245	378	1.5	Kopacek et al. (2009)
Bohemen	201	341-434	1.7-2.2	Kopacek et al. (2011)
Mexico	590	1910	3.2	Runyan et al. (2013)
China	380	690	1.8	Du et al. (2016)



Figuur 6 De totale depositie (in $\text{kg ha}^{-1} \text{jr}^{-1}$) van Ca (linksboven), K (rechtsboven), Mg (linksonder) en P (rechtsonder) opgeschaald naar de negen fysisch-geografische regio's.

Literatuur suggereert dat doorval een overschatting kan opleveren voor de totale P-depositie door P-uitspoeling uit boskronen (Parker, 1983) en daarom lijkt een wat conservatieve gemiddelde waarde van 2, met een range van 1.5-2.5 redelijk. Een gemiddelde waarde van 2 is overeenkomstig de schattingen op wereldschaal door Mahowald et al. (2008) en Vet et al. (2014). Deze ratio is als gemiddelde aangehouden, wat neerkomt op een gemiddelde totale P-depositie van $160 \text{ g P ha}^{-1} \text{jr}^{-1}$.

Op basis van de variatie tussen meetpunten is een totale P-depositie berekend per $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ (figuur 5), die vervolgens is opgeschaald naar de negen onderscheiden fysisch-geografische regio's (figuur 6). In de kaartjes is voor de totale P-depositie een waarde van 2 gebruikt, wat de gebruikte waarde is in de balansberekeningen voor de referentiesituatie. Daarnaast zijn ook berekeningen uitgevoerd met waarden van 1.5 en 2.5 om een indruk te krijgen van het effect van de onzekerheid in P-depositie op de P-balans.

2.4.2 Aanvoer van nutriënten door verwerking

Verwerkingssnelheden voor zes onderscheiden geaggregeerde clusters van bodemtypen, te weten arm zand, matig rijk zand, rijk zand, löss, klei en veen (zie verder), zijn afgeleid op basis van verwerings-experimenten voor zandgronden (De Vries, 1994) en voor löss-, klei- en veengronden (Van der Salm et al., 1998). Verwerking van kationen is afhankelijk van de hoeveelheid verweerbare mineralen in de bodem en neemt toe bij een afname van de pH. Bij het toekennen van verwerking zijn daarom waarden

gebruikt bij een generieke referentie-pH per bodemtype. De uiteindelijke toegekende verwerking is een update van de waarden die gebruikt zijn in Bonten et al. (2015) op basis van (i) een herziene evaluatie van de data in Van der Salm et al. (1998) met daardoor een update voor löss- en kleigronden en (ii) literatuuronderzoek naar verwerkingssnelheden op basis van veldonderzoek en verwerkingsmodellen (Hyman et al., 1998; Klaminder et al., 2011; Yang et al., 2013; Starr et al., 2014; Johnson et al., 2015). De uiteindelijke gebruikte resultaten zijn gegeven in tabel 8.

Tabel 8 Verwerkingssnelheden van kationen voor de verschillende onderscheiden bodems.

Bodemtype	Verwerkingssnelheid (mol. ha ⁻¹ jr ⁻¹)				
	Ca	K	Mg	Na	Totaal
Zand arm	75	50	75	50	250
Zand matig rijk ¹⁾	93	60	173	60	385
Zand rijk	110	70	270	70	520
Löss	325	95	85	95	600
Klei	820	40	400	40	1300
Veen	140	10	70	10	230

1) Hiervoor is het gemiddelde van zand arm en zand rijk gebruikt

Evenals bij depositie geldt ook voor verwerking dat er relatief weinig bekend is van aanvoer van beschikbaar P door verwerking. Newman (1995) geeft op basis van een literatuurstudie een range van 0,04-0,2 kg P ha⁻¹ jr⁻¹ voor Europa. In de balansberekeningen in dit rapport hebben we 0,1 kg P ha⁻¹ yr⁻¹ gebruikt, conform de studie die eerder is uitgevoerd door Bonten et al. (2015).

2.4.3 Afvoer van nutriënten door uitspoeling

De kritische houtafvoer wordt in hoge mate bepaald door de berekening van de uitspoeling van Ca, K, Mg en P en die uitspoeling is zowel onzeker als variabel in de tijd. De uitspoeling van Ca, K, Mg en P is te bepalen door het vermenigvuldigen van een berekend neerslagoverschot, afhankelijk van het bostype, met een schatting van de jaarlijks gemiddelde concentratie in water dat het bodemsysteem verlaat, volgens: Uitspoeling (kg.ha⁻¹ jr⁻¹) = gehalte (mg.l⁻¹) * neerslagoverschot (m³.ha⁻¹ jr⁻¹)/1000. Bij gehalte kun je dan denken aan gehalten van Ca, K, Mg en P in het diepere bodemvocht of het bovenste grondwater, waarbij nog onderscheid te maken is naar de diepte van het grondwater.

2.4.3.1 Uitspoeling van calcium, kalium en magnesium

Bij de uitspoeling van calcium, kalium en magnesium is gekeken naar gehalten in (i) het bodemvocht onder de wortelzone (60-100cm), (ii) de bovenste meter van het grondwater van het Trendmeetnet Verzuring en (iii) metingen in ondiep grondwater. Hieronder worden de verschillende mogelijkheden besproken en overwegingen gegeven waarvoor is gekozen in het adviessysteem.

Berekening op basis van data in bodemvocht en trends in grondwater

Een eerste optie is om jaarlijks gemiddelde concentraties in de bodemoplossing aan de onderzijde van de wortelzone (60-100 cm) te gebruiken. Deze benadering is gebruikt door Bonten et al. (2015). Een ruimtelijk beeld van concentraties in de bodemoplossing aan de onderzijde van de wortelzone (60-100 cm) is mogelijk op basis van metingen beschreven in De Vries en Leeters (2001) voor zandgronden en in Klap et al. (1999) voor löss-, klei- en veengronden (zie o.a. tabel 2.10 in Bonten et al., 2015 voor zandgronden), maar dit betreffen waarden in de maanden april- mei en die kunnen afwijken van een jaarlijks gemiddelde. Een tweede probleem is dat wat Ca, K en Mg betreft de uitspoeling sterk wordt gedreven door de uitspoeling van sulfaat en nitraat. Als de concentraties daarvan afnemen (en daarvan is de laatste jaren sprake met afnemende sulfaat- en stikstofdepositie), nemen de concentraties van Ca, K en Mg ook af. Dat is het geval zolang er een uitwisselbare voorraad aan basen is die de zuurproductie (gekoppeld aan de uitspoeling van sulfaat en nitraat) deels neutraliseert. Dat die koppeling er is, blijkt uit de afnemende trend van Ca, K en Mg in het grondwater, analoog aan de trends in sulfaat en nitraat. Uit de trends in metingen van Ca, K en Mg in de bovenste meter van het grondwater van het Trendmeetnet Verzuring (TMV, Boumans et al., 2014) blijkt dat de concentraties in de periode 1990-2010 met een factor 2.5, 2.1 en 1.5 zijn afgenomen voor respectievelijk Ca, K en Mg (zie ook figuur 2.9 in Bonten et al., 2015).

De gemiddelde resultaten van zowel de ongecorrigeerde als de gecorrigeerde waarden in bodemvocht zijn gegeven in tabel 9. Gebruik van de originele waarden leidt tot een Ca- en Mg-uitspoeling die groter is dan de depositie en in het geval van K zelfs meer dan tweemaal zo groot (De Vries en Jansen, 1994). Dit is mogelijk door een afname van de aanwezige uitwisselbare basenvoorraad in die periode, maar inmiddels zijn deze voorraden nauwelijks meer aanwezig in zandgronden (zie punt 3).

Berekening uitspoeling op basis van data in bovenste grondwater

Een andere optie is om alleen de concentraties te gebruiken van elementen in het bovenste grondwater (de bovenste meter) en dan uit te gaan van een gemiddelde van bv. de laatste tien jaar (periode 2000-2010) waarin nauwelijks sprake meer is van een trend (zie ook figuur 2.9 in Bonten et al., 2015). De gemiddelde resultaten hiervan zijn gegeven in tabel 9. Hieruit blijkt dat gehalten in grondwater in de periode 2000-2010 veelal lager zijn dan in bodemvocht, maar na correctie voor de trend in de periode 1990-2010 zijn ze hoger. Het voordeel van deze methode, boven die van concentraties in het bodemvocht, is dat de waarden een goed jaarlijks gemiddelde geven, maar het nadeel is dat tussen de onderkant van de wortelzone en het bovenste grondwater ook vertering plaatsvindt en daardoor kan de afvoer naar het bovenste grondwater beduidend hoger zijn dan de uitspoeling uit de wortelzone. De hogere concentraties in het grondwater wijzen daarop. Daarom lijkt methode 1 toch beter om te gebruiken wanneer uitspoeling wordt meegenomen in de berekening. Maar nog steeds is die hoog.

Berekening op basis van data in ondiep grondwater

Vanwege de vertering die tussen de onderkant van de wortelzone en het bovenste grondwater kan plaatsvinden, zijn in november 2017 en april 2018 monsters genomen in vier bosgebieden op 18 plekken met relatief ondiep grondwater. Dat is gedaan voor grondwater op ongeveer 1 m onder maaiveld en daarnaast ook voor vier bodemlagen. Het doel hiervan was om een beter inzicht te krijgen in het verlies van nutriënten uit de bovenste bodemlaag die voor bomen relevant is. De beschrijving van de bemonstering van het ondiepe grondwater en de gehalten aan Ca, K, Mg en P die daarin werden aangetroffen, zijn gegeven in bijlage 4. De gemiddelde resultaten van de bemonstering zijn gegeven in tabel 9.

Berekening als fractie van de input op basis van onvermijdbare verliezen

Feitelijk is de uitspoeling van calcium, kalium en magnesium een restterm die gelijk is aan depositie plus vertering minus opname (zie figuur 1) plus een afname van de aanwezige uitwisselbare basenvoorraad. Dat laatste geldt zolang er een uitwisselbare voorraad aan basen is die de zuurproductie (gekoppeld aan de uitspoeling van sulfaat en nitraat) deels neutraliseert. Dat is in de Nederlandse zandgronden feitelijk niet of nauwelijks meer het geval. Uit een herbemonstering van Nederlandse zandgronden in 2015 onder eik blijkt dat in alle opstanden de uitwisselbare basenvoorraad van ca. 10-20% naar ca. 5% is gedaald. Ofwel, daar geldt: uitspoeling is gelijk aan depositie plus vertering minus opname. De uitspoeling is dan gelijk te stellen aan een fractie van de depositie plus vertering en wel in een deel van de winterperiode wanneer er geheel geen sprake is van opname en er dus onvermijdelijke verliezen optreden. Feitelijk is deze benadering het meest direct en aantrekkelijk.

Vergelijking van metingen en berekeningen

In tabel 9 zijn de gemeten gehalten voor Ca, K, Mg en P in het bodemvocht zoals gebruikt door Bonten et al. (2015), in het bovenste grondwater van het Trendmeetnet Verzuring en van het ondiepe grondwater, zoals gemeten in 2017-2018, bij elkaar gezet. Samenvattend is hierin te zien dat de Ca-, K- en Mg-gehalten afnemen richting: bodemvocht ongecorrigeerd > bovenste grondwater > bodemvocht gecorrigeerd > diep grondwater. Voor P nemen de concentraties af van > bovenste grondwater > bodemvocht > diep grondwater.

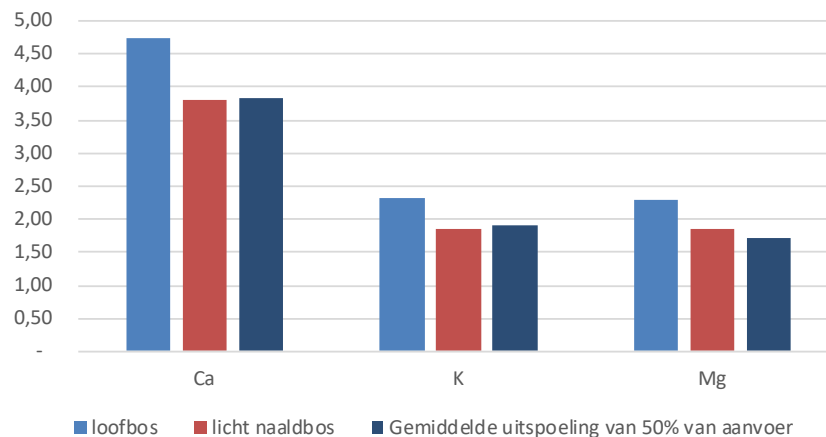
Tabel 9 Gemeten gehalten nutriënten in het bodemvocht zoals gebruikt door Bonten et al. (2015), het bovenste grondwater, zoals gebruikt voor P in adviessysteem 1.0 en het ondiepe grondwater, zoals gebruikt voor P in adviessysteem 1.1.

Type meting	Ca	K	Mg	P
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Methode bodemvocht				
Bonten et al. (zonder correctie) ¹⁾	7,8	3,9	2,9	0,06 ²⁾
Bonten et al. (met correctie)	3,2	2,6	1,3	0,06
Methode bovenste grondwater				
Gemiddelde 2000-2010 ³⁾	3,1	2,1	1,5	0,09
Methode ondiep grondwater				
Gemiddelde meting 2017-2018	2,7	0,9	1,2	0,02
Medianen 2017-2018	1,9	0,9	0,9	0,02
Meting 2017-2018, excl. uitbijters	2,0	0,9	0,9	0,02

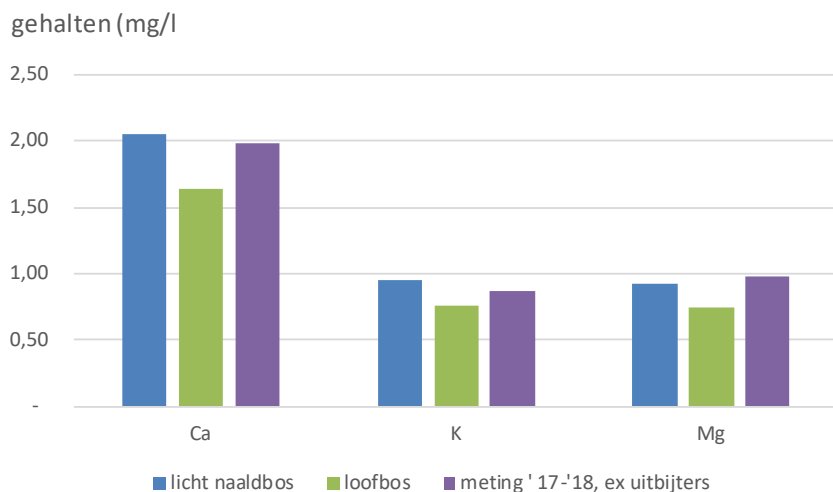
¹⁾ Uit Trendmeetnet Verzuring 1990-2010; ²⁾ Uit 150 bosopstanden; ³⁾ Uit Trendmeetnet Verzuring 2000-2010.

De resultaten van de berekening voor basische kationen (Ca, K en Mg) op basis van het neerslag-overschot en de gemeten gehalten in het ondiepe grondwater onder loofbos en licht naaldbos zijn weergegeven in figuur 7, samen met een geschatte uitspoeling op basis van 50% van de aanvoer voor alle zandregio's bij elkaar. Zwaar naaldbos (Douglas en fijnspar) is buiten beschouwing gelaten, omdat er maar op één locatie ondiep grondwater is bemonsterd onder dicht zwaar naaldbos. In de figuur is te zien dat de berekende Ca-, K- en Mg-uitspoeling op basis van 50% van de aanvoer ervan sterk vergelijkbaar is met de berekening op basis van een vermenigvuldiging van het neerslag-overschot met de gemeten gehalten in het ondiepe grondwater voor licht naaldbos en loofbos. In figuur 8 is weergegeven wat de Ca-, K- en Mg-gehalten gemiddeld zouden moeten zijn geweest bij een uitspoeling op basis van 50% van de aanvoer van nutriënten en een neerslagoverschot dat varieert per bostype. Opnieuw zien we (uiteraard) dat beide methoden voor licht naaldbos en loofbos een vergelijkbaar resultaat opleveren met gemeten gehalten in het ondiepe grondwater.

Uitspoeling (kg/ha/jr)



Figuur 7 Uitspoeling van nutriënten Ca, K en Mg op basis van gemeten gehalten in ondiep grondwater onder loofbos en licht naaldbos en berekend op basis van 50% van de aanvoer (de toegepaste methode van adviessysteem versie 1.0 en 1.1.). De gebruikte aanvoer betreft het gemiddelde van de regio's HZ-Noord, HZ-Oost, HZ-Midden en HZ-Zuid, die verschillen in de hoeveelheid depositie.



Figuur 8 Gehalten van de nutriënten Ca, K en Mg op basis van uitspoeling van 50% van de aanvoer gedeeld door de neerslagoverschotten van loofbos en licht naaldbos (de toegepaste methode van adviessysteem versie 1.0) en op basis van gemeten gehalten in ondiep grondwater (meting '17-'18' excl. uitbijters).

Gegeven de bovenstaande beschouwingen is besloten om te rekenen met een onvermijdelijk verlies van Ca, K en Mg van 50% van de invoer, waarbij tevens de variatie is berekend bij een uitspoelingspercentage van 35 en 65. Daarnaast zijn ook berekeningen uitgevoerd volgens methode 1 en 2 om na te gaan wat het effect daarvan is. In die situatie is de uitspoeling veel groter. Die hogere uitspoeling is echter het gevolg van zure depositie en die uitspoeling zal ook afnemen als de voorraad is uitgeput.

In dit kader is het belangrijk om op te merken dat voor zwaar naaldbos de uitspoeling van Ca, K en Mg mogelijk overschat is door uit te gaan van een aanname dat 50% van de depositie uitspoelt. Dit is gebaseerd op de veronderstelling dat bij een lager neerslagoverschot de concentraties aan nutriënten vergelijkbaar toenemen door 'indamping', maar mogelijk is dat relatief minder en is onder zwaar naaldbos de uitspoeling minder, zoals dat bij P waarschijnlijk het geval is.

2.4.3.2 Uitspoeling van fosfaat

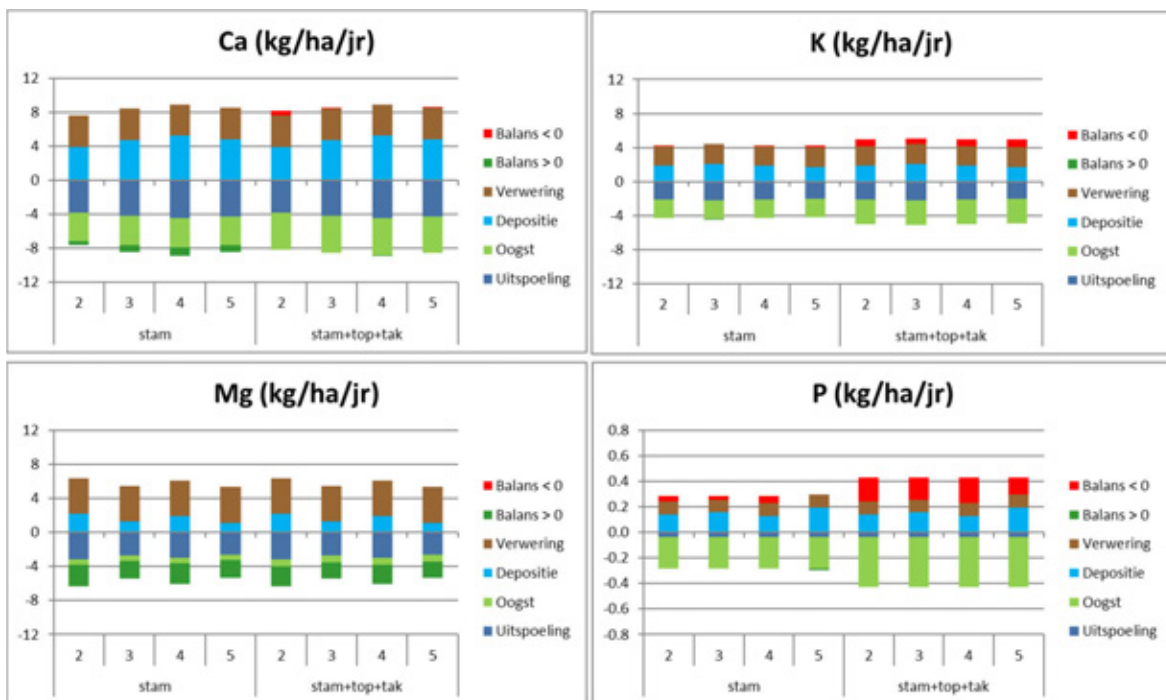
Wat de uitspoeling van P betreft, geldt dat de gemeten concentraties in de bodemoplossing aan de onderzijde van de wortelzone (60-100 cm) wel een redelijk jaargemiddelde geven, omdat P sterk wordt gebufferd. Mediane P-concentraties onder 150 zandgronden zijn 0,06 mg P/l (De Vries & Leeters, 2001). In het bovenste grondwater is de concentratie ca. 50% hoger, nl. 0,09 mg P/l. Deze waarde is gebruikt in adviessysteem 1.0. In adviessysteem 1.1 is voor P echter gebruikgemaakt van de resultaten van de in najaar 2017/voorjaar 2018 uitgevoerde metingen, omdat de concentraties in het ondiepe grondwater beduidend lager waren dan in het diepere grondwater. Hierbij is uitgegaan van een P-concentratie van 0,02 mg P l⁻¹ (betreft gemiddelde van metingen, exclusief de uitbijters) in vergelijking tot 0,09 mg P l⁻¹ (zie tabel 9). Om te komen tot een uitspoeling is deze concentratie vermenigvuldigd met het langjarig gemiddelde neerslagoverschot voor bossen op zandgronden. Hierbij is voor loofbos 250 mm jr⁻¹ gebruikt, voor licht naaldbos 200 mm jr⁻¹ en voor donker naaldbos 100 mm jr⁻¹. Voor fosfor komt de uitspoeling in adviessysteem 1.1 nu veel (4,5 maal) lager uit dan op basis van de eerder toegepaste berekening op basis van bodemvochtmetingen in 150 Nederlandse bosopstanden op droge zandgronden (De Vries en Leeters, 2001).

3 Resultaten

3.1 Nutriëntbalansen in bossen

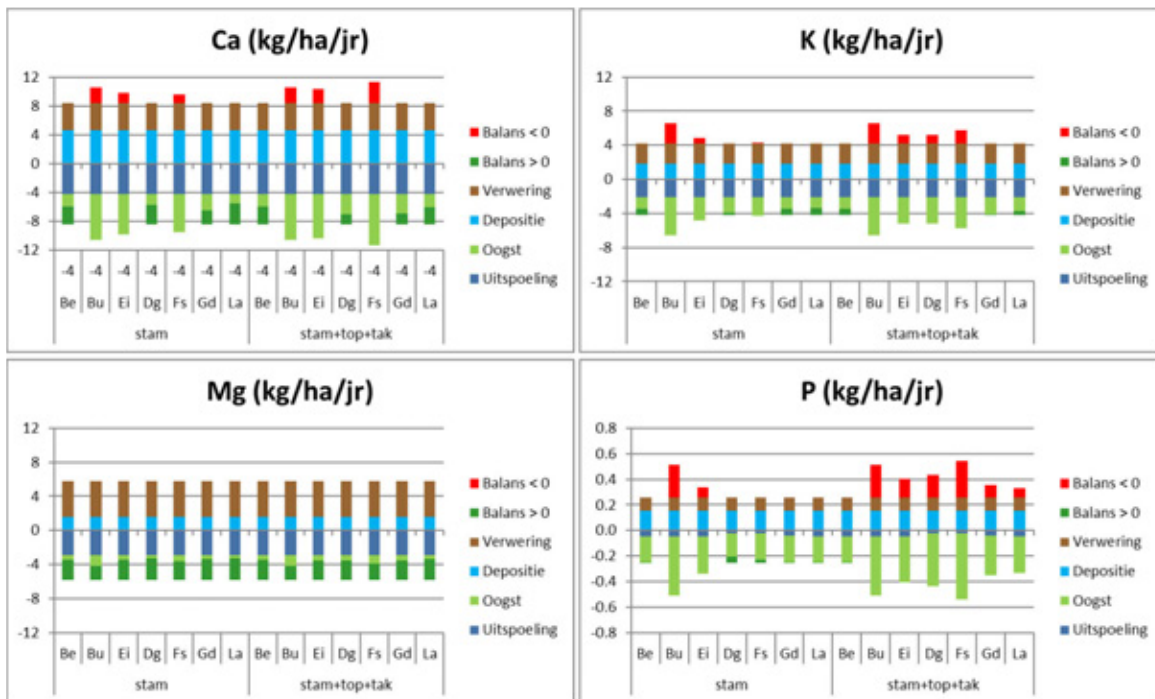
De balansen van de nutriënten Ca, K, Mg en P zijn ten behoeve van het adviessysteem berekend met standaardwaarden voor de depositie, verwerking en uitspoeling van Ca, K, Mg en P. In paragraaf 4.1 worden de onzekerheden van de berekende balansen besproken en wordt aangegeven wat het effect is van een veronderstelde range in depositie, verwerking en uitspoeling van Ca, K, Mg en P.

De berekende Ca-, K-, Mg- en P-balansen worden in deze paragraaf allereerst geïllustreerd aan de hand van resultaten voor alle boomsoorten op alle bodems in de hoge zandgronden in de zandregio's, onderscheiden naar het effect van de vier regio's (figuur 9), zeven boomsoorten (figuur 10) en drie typen zandgronden (figuur 11). De figuren laten aan de positieve kant de invoer zien via depositie en verwerking en aan de negatieve kant de afvoer via oogst en uitspoeling. Daarnaast is er een balans-term die zowel positief als negatief kan zijn. In de figuren staat een negatieve balans (balans <0) op het positieve deel van de y-as (rood), bij de aanvoer. Dit moet gelezen worden als: er is extra aanvoer van Ca, K, Mg of P nodig om de gehalten in de bodem op peil te houden. Het omgekeerde geldt voor de positieve balans (balans >0), die op het negatieve deel van de y-as staat (groen). Dit moet gelezen worden als: er is sprake van een overschot waardoor het gehalte van Ca, K, Mg of P in de bodem toeneemt.



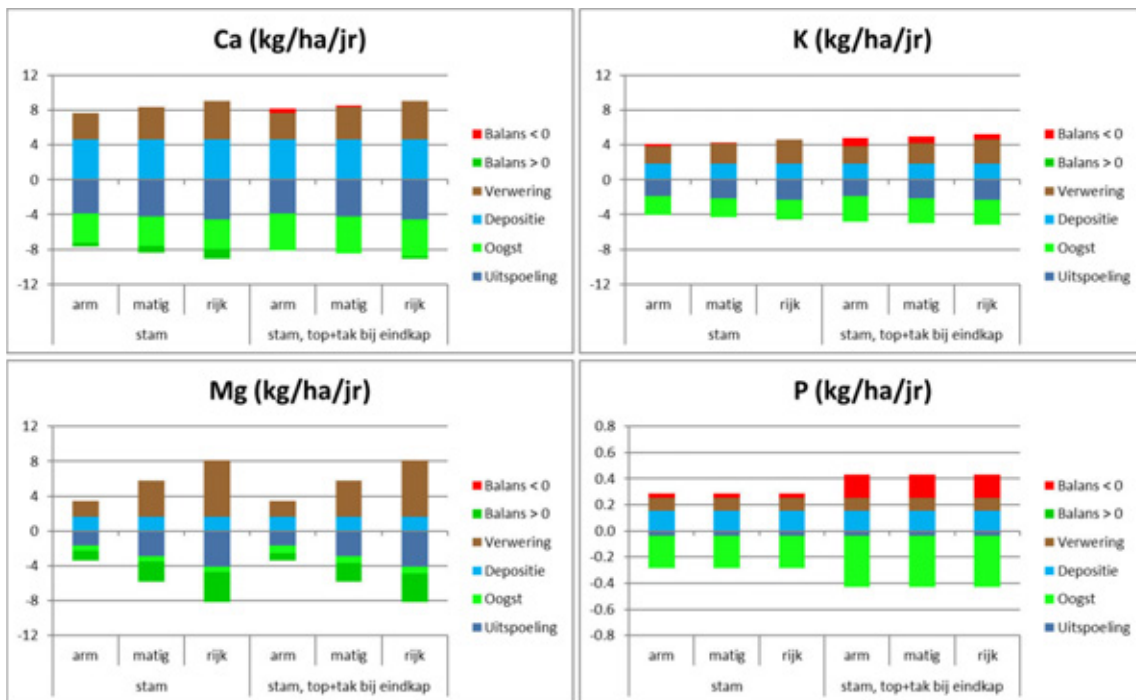
Figuur 9 De berekende Ca-, K-, Mg- en P-balansen gemiddeld voor alle boomsoorten op alle bodems in de hoge zandgronden, onderscheiden naar de vier fysisch-geografische regio's op hoge zandgronden, te weten Noord (2), Oost (3), Midden (4) en Zuid (5).

Uit figuur 9 blijkt dat er voor Mg gemiddeld geen sprake is van een probleem, zowel bij oogsten van stamhout alleen, als van tak- en tophout bij de eindvelling, maar dat dit voor P in vrijwel alle gevallen wel een probleem vormt, waarbij het P-tekort beduidend groter is als tak- en tophout bij de eindvelling wordt meegenomen. In die situatie is er voor K gemiddeld ook een tekort in alle regio's en voor Ca is dit alleen in regio 3 het geval. Bij het verwijderen van uitsluitend stamhout treden gemiddeld geen Ca- of K-tekorten op (figuur 9).



Figuur 10 De berekende Ca-, K-, Mg- en P-balansen voor alle boomsoorten gemiddeld op alle zandbodems in de fysisch-geografische regio's van de hoge zandgronden, onderscheiden naar zeven boomsoorten, te weten Be: Berk; Bu: beuk; Ei eik; Dg: Douglas; Fs: fijnspar; Gd: grove den; La: lariks.

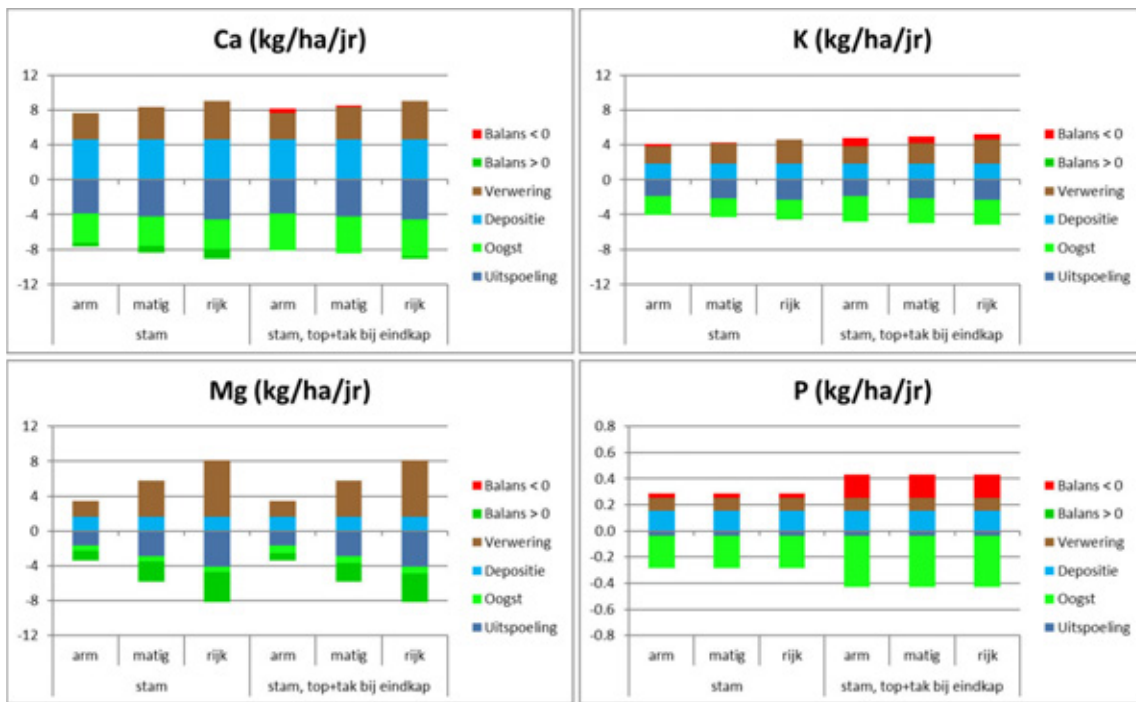
Uit figuur 10 blijkt dat er voor berk, Douglas, grove den en lariks gemiddeld geen sprake is van een probleem, zowel bij het oogsten van stamhout alleen als van tak- en tophout bij de eindvelling, maar dat dit bij beuk, eik en fijnspar wel het geval is. Bij kalium geldt hetzelfde voor grove den en lariks, maar voor berk en Douglas is voor beide oogsmethoden gemiddeld sprake van een K-tekort. Bij P is bij alle boomsoorten sprake van een P-tekort, wat beduidend groter is als tak- en tophout bij de eindvelling worden meegenomen, terwijl dit voor Mg nooit het geval is (figuur 10).



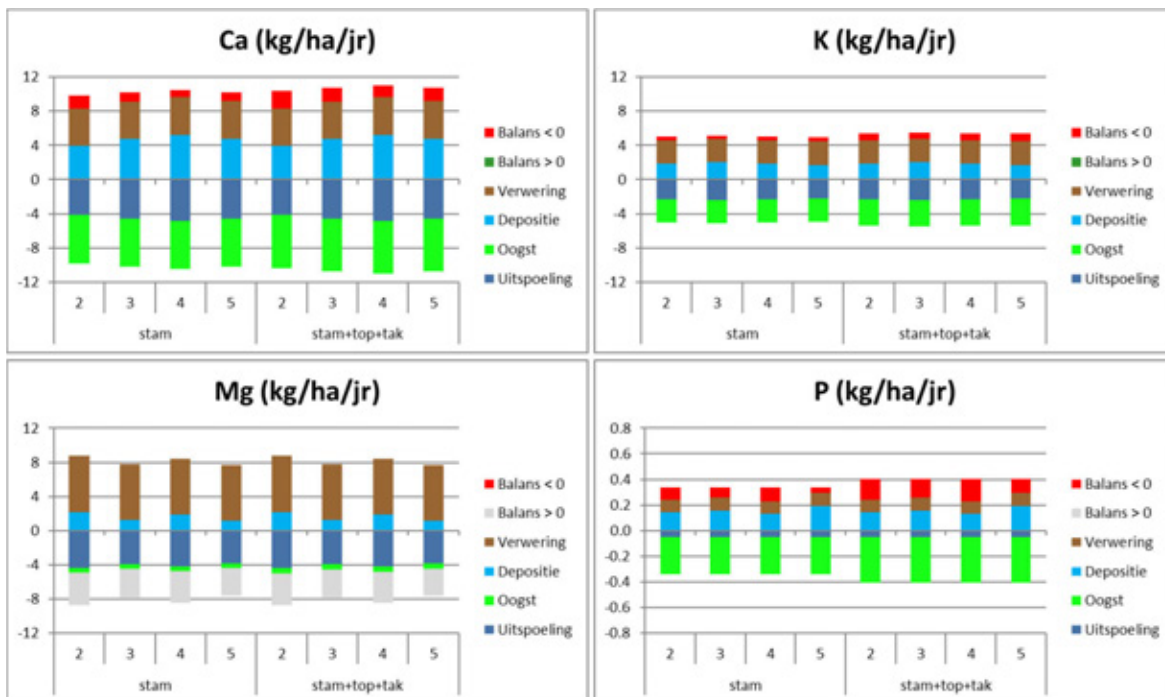
Figuur 11 De berekende Ca-, K-, Mg- en P-balansen gemiddeld voor alle boomsoorten op alle zandbodems in de fysisch-geografische regio's van de hoge zandgronden, onderscheiden naar drie typen zandbodems, te weten arm, matig arm en rijk.

Gemiddeld is voor de bodems geen sprake van een Ca-, K- of Mg-tekort bij het oogsten van stamhout, maar dit is voor K wel het geval bij het oogsten van tak- en tophout bij de eindvelling en bij Ca geldt dit op de arme zandgronden (figuur 11). Bij P is bij alle bodems gemiddeld sprake van een P-tekort, dat beduidend groter is als tak- en tophout bij de eindvelling worden meegenomen, terwijl dit voor Mg nooit het geval is (figuur 11).

In figuur 12 en 13 worden nog twee specifieke voorbeelden getoond, namelijk de balansen voor een grove den op arm zand (figuur 12) en eik op rijk zand (figuur 13) in de vier zandregio's.



Figuur 12 De berekende Ca-, K-, Mg- en P-balansen voor grove den op arm zand (SP), onderscheiden naar de vier fysisch-geografische regio's op de hoge zandgronden Noord (2), Oost (3), Midden (4) en Zuid (5).



Figuur 13 De berekende Ca-, K-, Mg- en P-balansen voor eik op rijk zand, onderscheiden naar de vier fysisch-geografische regio's op de hoge zandgronden Noord (2), Oost (3), Midden (4) en Zuid (5).

Wat opvalt, is dat grove den op arm zand niet of nauwelijks Ca-, K- en Mg-tekorten vertoont, terwijl dit voor eik op rijk zand voor Ca en K wel het geval is. Dit heeft te maken met de hogere vraag van eik, die maar deels door een hogere verwerking uit een rijkere bodem wordt gecompenseerd. Een Mg-tekort treedt voor beide bomen niet op, terwijl dit voor P juist wel het geval is, maar het tekort is beduidend groter bij eik op rijk zand dan bij grove den op arm zand.

3.2 Vertaling van balansresultaten in een houtoogst-adviesstelsel

Het resultaat van de balansberekeningen is in de brochure van het houtoogst-adviesstelsel (De Jong et al., 2017) samengevat door voor verschillende boomsoorten op arme, matig rijke en rijke zandgronden aan te geven wat de effecten zijn bij verschillende combinaties van bodem en oogstniveau, aangegeven in kleurcodes (zie hieronder). In de tabellen is daarbij weergegeven welke nutriënten kunnen toenemen of juist afnemen. Deze uitkomst voor P is niet in de kleurcodes opgenomen, omdat de voorraad van P in bijna alle situaties afneemt (meer afvoer dan aanvoer) en omdat de netto afname in veel gevallen klein is ten opzichte van de beschikbare voorraad in de bodem. P is als letter in de tabellen aangegeven als de voorraad afneemt.

Kleurcode	Betekenis
Donkergroen	Aanvoer nutriënten groter dan de afvoer
Lichtgroen	Aanvoer en afvoer van nutriënten zijn gelijk
Oranje	Afvoer van nutriënten groter dan aanvoer
Grijs	Niet van toepassing (oogstniveau is groter dan bijgroei voor betreffende boomsoort)

Indien er een of meer elementen zijn vermeld, geldt dat er voor deze genoemde elementen sprake is van een afname van de voorraad.

Als voorbeeld zijn enkele velden van de tabellen toegelicht.

Kleurcode	Betekenis
	Voorraad van alle nutriënten kan toenemen.
P	Voorraad van nutriënten Ca, K of Mg kan toenemen. De voorraad P kan afnemen.
	Een of meerdere nutriënten van Ca, K of Mg zijn in balans.
P	Een of meerdere nutriënten van Ca, K of Mg zijn in balans. De voorraad P kan afnemen.
K P	Voorraad van nutriënten K en P kan afnemen. Ca en Mg zijn in balans of kunnen toenemen.

Het **oogstniveau** is daarbij de gemiddelde hoeveelheid oogst van werkhout over de gehele omloop van een opstand, ongeacht de lengte van een omloop. Als een opstand over 80 jaar $640 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ is gegroeid en de volledige bijgroei is geoogst, dan is het oogstniveau $640/80 = 8 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{jr}^{-1}$. Als in diezelfde opstand over de gehele omloop $40 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ van het werkhout als dood hout is achtergebleven en de rest is geoogst, dan is het oogstniveau $(640-40)/80 = 7,5 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{jr}^{-1}$.

Er is gerekend met oogstniveaus van 4 (laag), 7 (gemiddeld) en 11 (hoog) $\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{jr}^{-1}$. Alle oogstniveaus zijn uitgedrukt in volume werkhout (stamhout dikker dan 7 cm). Tak- en top hout worden niet meegenomen in dat getal, ongeacht het wel of niet oogsten daarvan bij de eindkap. Het wordt uiteraard wel meegerekend in de afvoer door oogst. De beheerder moet zelf bepalen wat het oogstniveau in zijn te beoordelen situatie is. In de tabellen worden voor sommige boomsoorten twee en

voor andere boomsoorten drie oogstniveaus gepresenteerd. Uitgangspunt hiervoor zijn de oogstniveaus die in Nederland voor de onderscheiden bodemklassen en boomsoorten kunnen voorkomen. Dit betreft de gemiddelde oogst over de gehele omloop, inclusief eindkap. Er zijn twee varianten gegeven:

1. Alleen oogst stamhout;
2. Oogst stamhout en bij eindkap ook oogst van tak- en tophout, en bij Douglas, grove den en fijnspar met naalden.

De oogstniveaus die in de praktijk in de Nederlandse bossen worden gehaald, wisselen sterk en zijn onder meer afhankelijk van de bijgroei (die vooral wordt bepaald door de boomsoort, de herkomst ervan en de groeiplaats) en de functies/doelen die de boseigenaar aan zijn bos heeft toegekend. De bijgroei van de loofboomsoorten en grove den is gemiddeld duidelijk lager dan die van Douglas, fijnspar of lariks. Bij de eerste groep kan op basis van de cijfers van de bosstatistieken (Schelhaas et al., 2014) gedacht worden aan een gemiddelde (lopende) bijgroei van 4-6 m³ha⁻¹jr⁻¹. De gemiddelde bijgroei over een omloop wijkt echter af van de lopende bijgroei, en is voor het Nederlandse bos (dat dat voor een groot deel in een later fase van de omloop zit) waarschijnlijk hoger dan de lopende bijgroei. In de tabellen is de bijgroei van 11 m³ha⁻¹jr⁻¹ van loofboomsoorten en grove den als niet van toepassing beschouwd en zijn de oogstniveaus van 4 m³ha⁻¹jr⁻¹ en 7 m³ha⁻¹jr⁻¹ daarvoor relevant. De gemiddelde (lopende) bijgroei van lariks is 9 m³ha⁻¹jr⁻¹, van fijnspar 12 m³ha⁻¹jr⁻¹ en van Douglas bijna 14 m³ha⁻¹jr⁻¹. Deze drie meer productieve soorten hebben, meer dan de loofboomsoorten, een productiefunctie, waarbij over de gehele omloop uiteindelijk het belangrijkste deel van de bijgroei geoogst wordt. Voor die soorten zijn daarom vooral de oogstniveaus van 7-11 m³ha⁻¹jr⁻¹ relevant.

Gemiddeld wordt er in het Nederlandse bos overigens slechts 3,4 m³ha⁻¹jr⁻¹ geoogst. Er zijn aanzienlijke verschillen tussen de boomsoorten. Voor opstanden waar lariks, fijnspar en Douglas hoofdboomsoort zijn, is de oogst gemiddeld resp. 5,9, 7,5 en 7,8 m³ha⁻¹jr⁻¹, terwijl het bij berk slechts 1,2 m³ha⁻¹jr⁻¹, bij eik 1,9 m³ha⁻¹jr⁻¹, bij beuk 2,6 m³ha⁻¹jr⁻¹ en bij grove den 3,0 m³ha⁻¹jr⁻¹ is. We zien hier verschillen in oogstniveaus die mede voortkomen uit de functies van het bos. Bij de productieve naaldboomsoorten is de houtproductie meestal belangrijker dan bij de minder productieve loofboomsoorten.

In de tabellen 10-17 zijn voor de regio's Noord-, Oost-, Midden- en Zuid-Nederland de effecten op de voorraden op droge zandgrond weergegeven voor het oogsten van alleen stamhout en voor het oogsten van stamhout en tak- en tophout bij eindkap (adviesstelsel 1.1). Dit zijn herziene tabellen ten opzichte van de uitgebrachte brochure van adviesstelsel 1.0 (De Jong et al., 2017), maar de afwijkingen zijn beperkt. In bijlage 5 zijn deze tabellen eveneens gegeven met daarboven de resultaten voor adviesstelsel 1.0, waardoor de verschillen direct duidelijk zijn.

Tabel 10 Balans bij oogst alleen stamhout in Noord-Nederland.

Grondsoort	Arme zandgronden			Matig arme zandgronden			Rijke zandgronden		
	4	7	11	4	7	11	4	7	11
Berk		K P	nvt		P	nvt	P	P	nvt
Beuk	K P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	Ca K P	P	Ca K P	Ca K P
Eik		Ca K P	nvt		Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt
Douglas			K			K			P
Fijnspar			Ca K			Ca K			Ca P
Grove den		P	nvt		P	nvt	P	P	nvt
Lariks			P			P	P	P	P

Tabel 11 Balans bij oogst stamhout en tak- en tophout bij eindkap in Noord-Nederland.

Grondsoort	Arme zandgronden			Matig arme zandgronden			Rijke zandgronden		
	Oogstniveau 4	7	11	4	7	11	4	7	11
Berk	P	K P	nvt	P	K P	nvt	P	K P	nvt
Beuk	K P	Ca K P	nvt	K P	Ca K P	Ca K P	P	Ca K P	Ca K P
Eik	Ca P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt
Douglas		K P	K P		K P	K P		K P	K P
Fijnspar		Ca K P	Ca K P		Ca K P	Ca K P		Ca P	Ca K P
Grove den		K P	nvt		P	nvt	P	P	nvt
Lariks		P	K P		P	K P	P	P	P

Tabel 12 Balans bij oogst alleen stamhout in Oost-Nederland.

Grondsoort	Arme zandgronden			Matig arme zandgronden			Rijke zandgronden		
	Oogstniveau 4	7	11	4	7	11	4	7	11
Berk		K P	nvt		P	nvt	P	P	nvt
Beuk		Ca K P	nvt		Ca K P	Ca K P	P	Ca K P	Ca K P
Eik		Ca K P	nvt		Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt
Douglas			K						P
Fijnspar			Ca K			Ca K			Ca P
Grove den			nvt			nvt	P	P	nvt
Lariks			P			P	P	P	P

Tabel 13 Balans bij oogst stamhout en bij eindkap tak- en tophout in Oost-Nederland.

Grondsoort	Arme zandgronden			Matig arme zandgronden			Rijke zandgronden		
	Oogstniveau 4	7	11	4	7	11	4	7	11
Berk		K P	nvt		K P	nvt	P	P	nvt
Beuk	K P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	Ca K P	P	Ca K P	Ca K P
Eik	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt
Douglas		K P	K P		K P	K P		P	K P
Fijnspar		Ca K P	Ca K P		Ca P	Ca K P		P	Ca K P
Grove den		P	nvt		P	nvt	P	P	nvt
Lariks		P	K P		P	K P	P	P	P

Tabel 14 Balans bij oogst alleen stamhout in Midden-Nederland.

Grondsoort	Arme zandgronden			Matig arme zandgronden			Rijke zandgronden		
	Oogstniveau 4	7	11	4	7	11	4	7	11
Berk		K P	nvt		P	nvt	P	P	nvt
Beuk	K P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	Ca K P	P	Ca K P	Ca K P
Eik		Ca K P	nvt		Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt
Douglas			K P			K P			P
Fijnspar			Ca K P			Ca K P			Ca P
Grove den		P	nvt		P	nvt	P	P	nvt
Lariks			P			P	P	P	P

Tabel 15 Balans bij oogst stamhout en bij eindkap tak- en tophout in Midden-Nederland.

Grondsoort	Arme zandgronden			Matig arme zandgronden			Rijke zandgronden		
	Oogstniveau 4	7	11	4	7	11	4	7	11
Berk	P	K P	nvt	P	K P	nvt	P	K P	nvt
Beuk	K P	Ca K P	nvt	K P	Ca K P	Ca K P	P	Ca K P	Ca K P
Eik	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt
Douglas		K P	K P		K P	K P	P	K P	K P
Fijnspar		Ca K P	Ca K P		K P	Ca K P	P	P	Ca K P
Grove den		K P	nvt		P	nvt	P	P	nvt
Lariks		P	K P		P	K P	P	P	P

Tabel 16 Balans bij oogst alleen stamhout in Zuid-Nederland.

Grondsoort Oogstniveau (m ³ ha ⁻¹ jr ⁻¹)	Arme zandgronden			Matig arme zandgronden			Rijke zandgronden		
	4	7	11	4	7	11	4	7	11
Berk		K P	nvt		P	nvt	P	P	nvt
Beuk	K	Ca K P	nvt		Ca K P	Ca K P	P	Ca K P	Ca K P
Eik		Ca K P	nvt		Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt
Douglas			K			K			P
Fijnspar			Ca K			Ca K			Ca K P
Grove den			nvt			nvt		P	nvt
Lariks			P			P		P	P

Tabel 17 Balans bij oogst stamhout en bij eindkap tak- en tophout in Zuid-Nederland.

Grondsoort Oogstniveau (m ³ ha ⁻¹ jr ⁻¹)	Arme zandgronden			Matig arme zandgronden			Rijke zandgronden		
	4	7	11	4	7	11	4	7	11
Berk		K P	nvt		K P	nvt	P	K P	nvt
Beuk	K	Ca K P	nvt	K	Ca K P	Ca K P	P	Ca K P	Ca K P
Eik	K	Ca K P	nvt		Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt
Douglas		K P	K P		K P	K P		K P	K P
Fijnspar		Ca K P	Ca K P		K P	Ca K P		P	Ca K P
Grove den		K P	nvt		P	nvt	P	P	nvt
Lariks			K P			K P	P	P	K P

Uit de tabellen blijkt dat bij het oogsten van alleen stamhout voor beuk en eik in veel situaties de voorraad van Ca, K en P kan afnemen. Alleen bij een laag oogstniveau (4 m³ha⁻¹jr⁻¹) is de oogst voor eik voor alle bodems en alle regio's rond het evenwichtsniveau en voor beuk alleen voor rijke zandgronden. Voor fijnspar en Douglas kan de voorraad ervan afnemen bij een matig (7 m³ha⁻¹jr⁻¹) en hoog oogstniveau. Bij het oogsten van stamhout en tak- en tophout bij eindkap kan voor beuk en eik de K-voorraad ook bij lage oogstniveaus afnemen.

Omdat de oogst in bosbeheertypen met natuurfunctie in de SNL beneden de 20% van de bijgroei ligt, is hier ook aandacht aan besteed. Uitgaande van een bijgroei in bosbeheertypen met natuurfunctie in het Subsiestelsel Natuur en Landschap van 7,5 m³ha⁻¹jr⁻¹, betekent een oogst van 20% van de bijgroei een maximale oogst van 1,5 m³ha⁻¹jr⁻¹. Bij dit oogstniveau is geen afname van de voorraad nutriënten verwacht. Daarvoor dient de oogst wel enigermate gelijkmatig over het perceel te worden uitgevoerd. Als er pleksgewijs veel geoogst wordt, kan ook pleksgewijs de voorraad afnemen.

Opvallend is dat in geen van de beschouwde situaties een negatieve balans van Mg optreedt. Verder zijn er enkele opvallende verschillen tussen de regio's.

De verschillen ten opzichte van adviessysteem 1.0 betreffen met name de P-voorraad, die in versie 1.1 in mindere mate een beperkende rol speelt dan in versie 1.0. Daarnaast is er voor Ca voor berk in geen enkele situatie meer sprake van een afname van de voorraad. Voor eik daarentegen laten de nieuwe resultaten zien dat bij het oogsten van stamhout en tak- en tophout in Zuid-Nederland ook sprake is van een afname in de K-voorraad bij het lage oogstniveau.

4 Discussie en conclusies

4.1 Onzekerheden

Onzekerheid in onderdelen van de nutriëntenbalans

Onderstaande tabel geeft in kwalitatieve zin aan wat de geschatte onzekerheden zijn in de verschillende balanstermen en doet suggesties voor onderzoek om die onzekerheden te verminderen (zie ook paragraaf 4.4).

Tabel 18 *Kwalitatieve inschattingen van de onzekerheden in balanstermen op lokale schaal en onderzoeksmethoden om die onzekerheid te verminderen (+ zeker, +/- redelijk zeker, – onzeker en -- is zeer onzeker). Geschatte afwijkingen van de referentiewaarde zijn daarbij <15%, 15-30%, 30-50% en >50%¹⁾.*

Term	Ca, K, Mg	P	Onderzoek
Oogst	+	+	Verdere meting en analyse Ca, K, Mg en P in vellingen (stammen/takken) en relateren aan beschikbaarheid.
Depositie	+/-	+/-	Meting van met name P-depositie om de ratio totaaldepositie versus bulkdepositie beter in te schatten.
Verwerking	-	--	Ca, K, Mg: ensemble-schatting op basis van verschillende beschikbare methodes. P: inschatten via silica/basenverwerking: totaalanalyse bodem.
Uitspoeling	-	--	Verdere metingen van Ca-, K-, Mg- en P-concentraties in ondiep grondwater.

¹⁾ Het gemiddelde \pm de opgegeven range \approx 95% betrouwbaarheidsinterval. Ofwel: gemiddelde - (range (%)/100 \times gemiddelde) \approx 2,5-percentiel en gemiddelde + (range (%)/100 \times gemiddelde) \approx 97,5-percentiel.

In het algemeen zijn de onzekerheden in de balanstermen redelijk beperkt voor afvoer en depositie en groot tot zeer groot voor verwerking en uitspoeling, met name van P. De onzekerheid in de oogst is relatief klein (<15%) voor alle elementen. Gehalten in stammen en takken zijn relatief 'makkelijk' te meten door het nemen van houtmonsters. Dit in tegenstelling tot verwerking en uitspoeling en deels de depositie (met name de droge depositie). Wel is het aantal metingen in stamhout en takhout nog relatief gering en de extrapolatie van metingen in kernhout, spinhout en schors op verschillende hoogten naar de gehele boom (zie bijlage 2) leidt ook tot onzekerheden. Maar in vergelijking met de overige posten is die toch relatief klein.

De onzekerheid in de depositie is matig (15-30%), waarbij de onzekerheid in de P-depositie groter is dan in de basendepositie. Dit komt deels omdat basendepositie op meer locaties wordt gemeten, maar voornamelijk omdat het aandeel droge P-depositie onzeker is, wat de gemaakte schatting van de totale depositie wat onzekerder maakt. De onzekerheidsbijdrage van depositie aan de balans is sterk afhankelijk van de regio. Zo is deze voor P en Ca in de regio zuid relatief groot en voor de basen relatief groot in de kustregio's.

De onzekerheid in de basenverwerking is relatief groot (30-50%), maar voor P is deze groot (>50%). Ten aanzien van basenverwerking is er vrij veel onderzoek verricht, zowel in Nederland als internationaal, en in het algemeen zijn de resultaten voor zand- en leemgronden redelijk eenduidig wat de orde van grootte betreft. De toegekende range in verwerking van 250-600 mol_c ha⁻¹ jr⁻¹ op basis van verwerking- experimenten voor zandgronden komt overeen met literatuurgegevens op basis van veldonderzoek en verweringsmodellen (Hyman et al., 1998; Klaminder et al., 2011; Yang et al., 2013; Starr et al., 2014; Johnson et al., 2015). Er is echter discussie of de huidige verwerkingssnelheid niet veel hoger is door de zeer lage pH. Zo hebben Bergsma et al. (2016) op basis van mineralendepletie in de bovengrond in een periode van 75 jaar de recente verwerking geschat voor een zandgrond op de

Veluwe. Zij vonden een verlies aan basen in die periode van $95 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1}$ voor een laag van 30 cm, wat neerkomt op een jaarlijkse verwerking van $1300 \text{ mol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$. Dat is 2,5 maal zo hoog als de gebruikte verwerkingssnelheid van een rijke zandgrond in het adviessysteem (zie tabel 8). De gemeten concentraties aan basen in ondiep grondwater geven echter geen aanleiding om van deze hoge verwerkingssnelheden uit te gaan.

Ten aanzien van P-verwerking daarentegen is er nauwelijks literatuur beschikbaar, wat de gemaakte schatting erg onzeker maakt. Newman (1995) geeft op basis van een literatuurstudie een range van $0,04\text{-}0,2 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ voor Europa. Verwerking draagt relatief veel bij aan de balans, waardoor de onzekerheidsbijdrage van de verwerking aan de balans groot is.

De grootste onzekerheid is de mate van uitspoeling. Voor de basen is deze onzekerheid relatief groot (30-50%) en voor P zelfs groot (>50%). Daarnaast is het zo dat de uitspoeling vooral voor de basische kationen een relatief grote bijdrage levert aan de totale balans, vergelijkbaar met de bijdrage van oogst.

Invloed van onzekerheden op nutriëntenbalansen

In figuur 14 is het effect van de onzekerheid in de depositie, verwerking en uitspoeling op de balansen van basen (Ca, K en Mg) en P voor grove den op arm zand geïllustreerd door te rekenen met twee varianten, te weten ongevoelig en gevoelig, zoals aangegeven in tabel 19.

Tabel 19 *Kwantitatieve inschattingen van de onzekerheden in balanstermen op regionale schaal zoals gebruikt in de gevoeligheidsanalyse.*

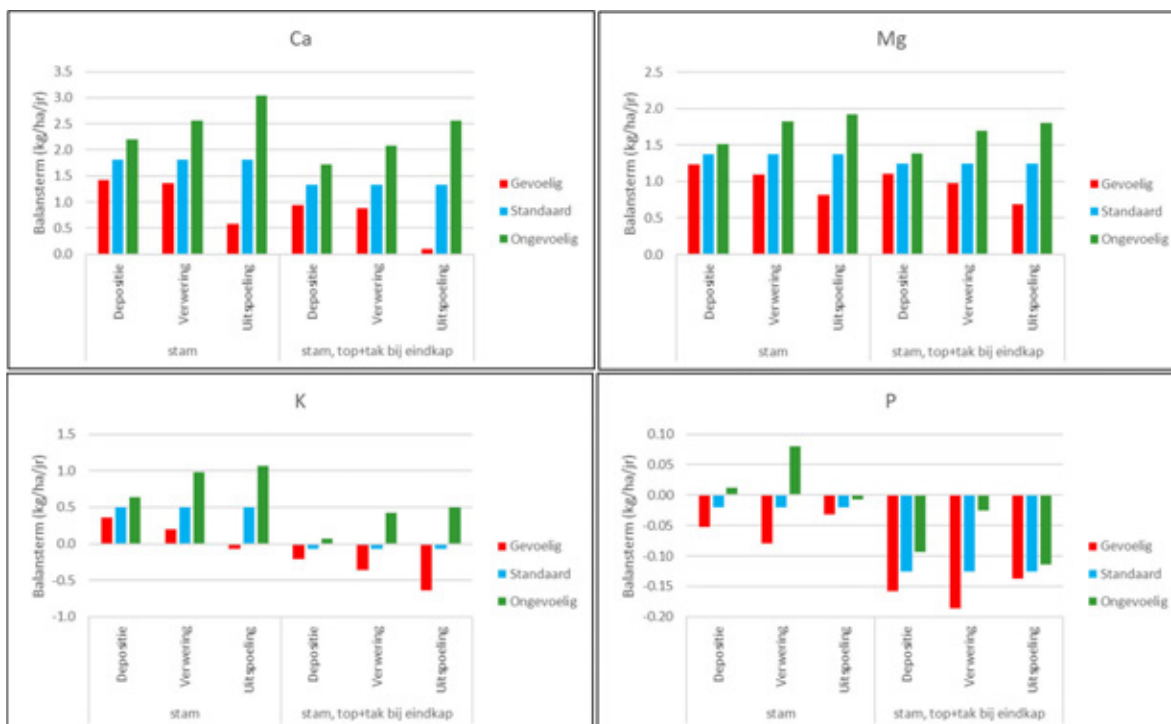
Term	Element	Ongevoelig	Gevoelig
Depositie¹	Basen	+15%	-15%
	Fosfaat	+25%	-25%
Verwerking²	Basen	+50%	-30%
	Fosfaat	+100%	-60%
Uitspoeling³	Basen	-30%	+30%
	Fosfaat	-50%	+100%

¹ De totale P-depositie is voor de standaardsituatie geschat op tweemaal de bulk P-depositie met een variatie van 2,5 (ongevoelig) tot 1,5 (gevoelig) maal de bulk P-depositie op basis van de doorval/bulkdepositie-data in tabel 7. Dit komt neer op een toename en afname van 25%. Voor basen wordt de betrouwbaarheid iets hoger ingeschat.

² In de balansberekeningen in dit rapport hebben we $0,1 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ gebruikt. Newman (1995) geeft op basis van een literatuurstudie een range van $0,04\text{-}0,2 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ voor Europa, wat neerkomt op een toename van 100% (ongevoelig) en een afname van 60% (gevoelig). Voor basen wordt de betrouwbaarheid tweemaal hoger ingeschat.

³ De standaard Ca-, K- en Mg-uitspoeling is op 50% van de invoer gezet en voor gevoelig en ongevoelig is respectievelijk 65% en 35% van de invoer gebruikt. Dat komt neer op een afname en toename van 30%. Uit de analyses van concentraties in ondiep grondwater volgde voor basen een hoger variatie die eerder richting de 50% gaat, waarmee de aanname van 30% een onderschatting lijkt te zijn. Voor fosfaat is de betrouwbaarheid ingeschat op basis van een range in ondiep grondwater van $0,01\text{-}0,04 \text{ mg P l}^{-1}$, met een gebruikte standaardwaarde van $0,02 \text{ mg P l}^{-1}$. Dit resulteert in een variatie van -50% en +100%.

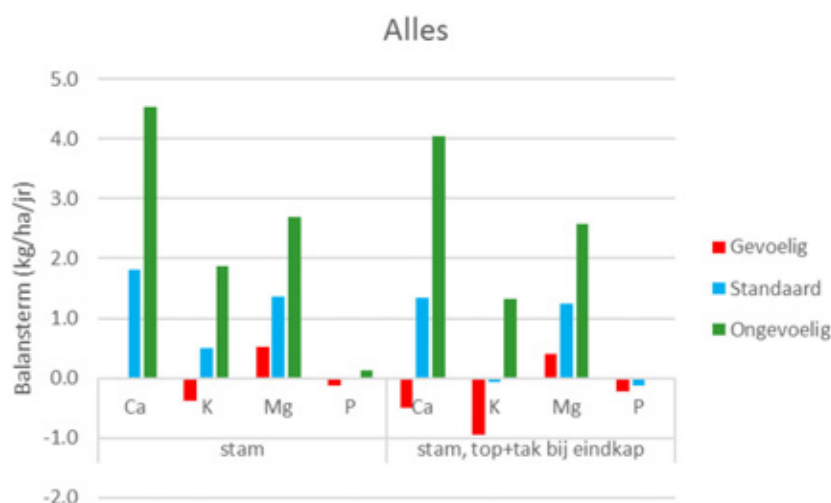
De resultaten laten zien dat het effect van de gevoeligheidsinstelling voor de basenbalans het grootst is voor de uitspoeling, gevolgd door verwerking en dan depositie. Dit hangt deels samen met de veronderstelde grotere onzekerheid in uitspoeling en verwerking ten opzichte van depositie (zie tabel 19) en deels met de gemiddeld grotere uitspoeling dan verwerking. Bij P is het effect van de onzekerheid in verwerking het grootst op de balans, gevolgd door depositie en dan door uitspoeling. Dit laatste heeft te maken met de relatief lage P-uitspoeling waardoor het effect van de grote onzekerheid erin toch beperkt is. Relatief gezien heeft de gevoeligheidsinstelling voor uitspoeling het grootste effect voor de K-balans. Bij uitsluitend stamafvoer is de positieve balans voor de instelling ongevoelig en ca. tweemaal ($1,0 \text{ kg K ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$) zo groot als voor de standaardinstelling ($0,5 \text{ kg K ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$); de instelling gevoelig resulteert zelfs in een negatieve balans ($-0,1 \text{ kg K ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$). Bij de afvoer van stam plus top- en takhout is het relatieve effect nog groter.



Figuur 14 De balansen voor grove den op arm zand bij de standaard-, gevoelige en ongevoelige instellingen voor depositie, verwerking en uitspoeling afzonderlijk (zie tabel 19).

Voor Ca en Mg is voor de ongevoelige instelling de balans respectievelijk ca. anderhalf tot tweemaal zo groot als voor de standaardinstelling en omgekeerd ca. anderhalf tot tweemaal zo klein voor de gevoelige instelling. De effecten van de gevoeligheidsinstelling zijn voor het verwijderen van alleen stamhout en van stam plus top- en takhout redelijk vergelijkbaar. Voor P is het effect het grootst bij alleen stamafvoer, omdat hier de balans omslaat van negatief naar positief in geval van depositie en verwerking bij de instelling ongevoelig.

De balansen voor grove den op arm zand bij de standaard-, gevoelige en ongevoelige instellingen voor depositie, verwerking en uitspoeling tezamen (figuur 15) laten zien dat bij uitsluitend gevoelige instellingen er bij Ca, K en P sprake is van een negatieve balans, met name bij verwijderen van stamhout plus top- en takhout, terwijl ook in die situatie dit bij Mg niet het geval is. Bij de ongevoelige instellingen is sprake van ruime overschotten, met uitzondering van P.



Figuur 15 De balansen voor grove den op arm zand bij de standaard-, gevoelige en ongevoelige instellingen voor depositie, verwerking en uitspoeling tezamen (zie tabel 19).

4.2 Mitigerende maatregelen

Om de nadelige effecten van houtoogst te beperken, kunnen maatregelen getroffen worden om de nutriëntenbalans positief te beïnvloeden. De belangrijkste maatregelen worden hieronder besproken.

Nutriënten toedienen

De belangrijkste maatregel daarvan is het toedienen van een gerichte bemesting. In het verleden is bij aanleg of verjonging van bos in veel gevallen bemesting toegepast. Dit is momenteel geen gangbare praktijk meer. Het effect van nutriëntengiften is op korte termijn niet altijd zichtbaar. Nutriëntengiften kunnen het best gezien worden als een aanvulling van de voorraad op de langere termijn. Daarbij dient voor Ca, K en Mg geen gebruik te worden gemaakt van kalk of dolomiet, omdat de werking hiervan veel te snel is. Dit kan negatieve effecten hebben op de ondergroei (door snelle verhoging van de pH: verlaging van de zuurgraad, verhoogde stikstofmineralisatie en verminderde P-beschikbaarheid) en verhoogde uitspoeling. Het is belangrijk om dan te werken met zeer langzaam werkende bemestingsproducten (die geen stikstof bevatten), zoals steenmeel. Een eenmalige mestgift van Ca, K en Mg is immers alleen zinvol als deze gedurende vele jaren effect heeft. Daarbij dient wel te worden bedacht dat enerzijds de werking hiervan heel langzaam is en anderzijds dat mogelijke langjarige neveneffecten op de bodembiologie niet zijn onderzocht.

Bij het toepassen van P-bemesting is er niet of nauwelijks sprake van negatieve bijeffecten. Het wordt goed gebonden in de bodem en heeft geen effect op de zuurgraad van de bodem. Daarnaast is een relatief lage gift genoeg om de balans op peil te houden. In de meeste bodems is de beschikbare voorraad P in relatie tot de P-afvoer gedurende één omloop groot. Dit hoeft niet overal het geval te zijn, maar dit kan worden gecontroleerd door een bodemanalyse uit te voeren voor P. Bij bemesting met P zou ook gedacht kunnen worden aan vaste dierlijke mest, zodat daarmee een deel van het P-overschot in Nederland zou kunnen worden toegepast of aan P die uit die mest wordt terugwonnen.¹

Bij het toedienen van steenmeel zijn de kosten relevant. Een indicatie van de kosten voor de aanschaf van steenmeel is ca. € 175 per ton Lurgi en ca. € 350 per ton Eifelgold (kosten in rekening gebracht bij een lopend project naar de effecten van steenmeel op de nutriëntenhuishouding in bodem en bomen in het Mastbos en de Hoge Veluwe). In tabel 20 is aangegeven hoeveel Ca, K Mg en P per ton product wordt gegeven, uitgaande van de gehalten aan Ca, K Mg en P in Lurgi en Eifelgold. De samenstelling van de producten is gebaseerd op de steenmelen die gebruikt zijn op bovengenoemde boslocaties (De Vries et al., 2017).

Tabel 20 Berekende gemiddelde toevoer per ton Lurgi en Eifelgold.

Steenmeel	Samenstelling (mmol/kg)				Toevoer bij 1 ton (kg)			
	Ca	K	Mg	P	Ca	K	Mg	P
Lurgi	249	347	164	20	10	14	4	0,6
Eifelgold	358	632	756	64	14	25	18	2

Bij het oogsten van top- en takhout wordt gemiddeld voor alle boomsoorten op alle bodems in de hoge zandgronden ca. 4,0 kg Ca ha⁻¹ jr⁻¹, 3,0 kg K ha⁻¹ jr⁻¹, 1,0 kg Mg ha⁻¹ jr⁻¹ en ca. 0,4 kg P ha⁻¹ jr⁻¹ in houtoogst afgevoerd (zie figuur 9). Om voor één hectare de nutriënten aan te vullen die afgevoerd worden met houtoogst, is dus ca. 0,4 ton Lurgi of 0,2 ton Eifelgold nodig, wat neerkomt op een bedrag van 70 euro per hectare per jaar. Een kleinere gift per jaar is natuurlijk ook mogelijk; zonder oogst is er namelijk een overschot uit depositie + verwerking - uitspoeling.

¹ Daarbij moet wel worden bedacht dat dit slechts een marginale bijdrage levert aan de reductie van het P-overschot door mest. Bij oogsten van top- en takhout wordt gemiddeld voor alle boomsoorten op alle bodems in de hoge zandgronden ca. 0,40 kg P ha⁻¹ jr⁻¹ in houtoogst afgevoerd (zie figuur 9). Als je dit gemiddeld jaarlijks zou toevoegen, zou je, uitgaande van ca. 360.000 hectare bos, jaarlijks 144.000 kg P toevoegen ofwel ca. 0,14 kton P. De jaarlijkse P-productie via dierlijke mest is ca. 70 kton P. De P-vraag vanuit bossen is dus marginaal en is op geen enkele wijze een oplossing voor het mestprobleem.

Het ligt voor de hand om, bij een eventuele toediening van steenmeel, te werken met een gift voor een lange periode, wellicht eens per omloop. Hierbij kan gedacht worden aan 10 ton per hectare, wat voldoende is voor 25 resp. 50 jaar compensatie voor afvoer door houtoogst. De kosten hiervan bedragen dan 1.750 resp. 3.500 euro per hectare voor de aanschaf van Lurgi resp. Eifelgold, waarbij met Eifelgold duidelijk meer nutriënten zijn aangevuld. Daarbij komen de kosten voor het uitstrooien, die onder voldoende toegankelijke omstandigheden 310 euro/ha bedragen, en een toeslag van 20% voor kort transport, planning en organisatie. In totaal bedragen de kosten dan voor Lurgi ca. 2500 euro per hectare en voor Eifelgold ca. 4500 euro per hectare. Dit zijn aanzienlijke bedragen voor de bosbouwsector en het is daarom niet de verwachting dat dit gangbare praktijk zal worden. Wellicht is het een maatregel die in specifieke situaties kan worden toegepast, bijvoorbeeld bij bijzondere natuurwaarden.

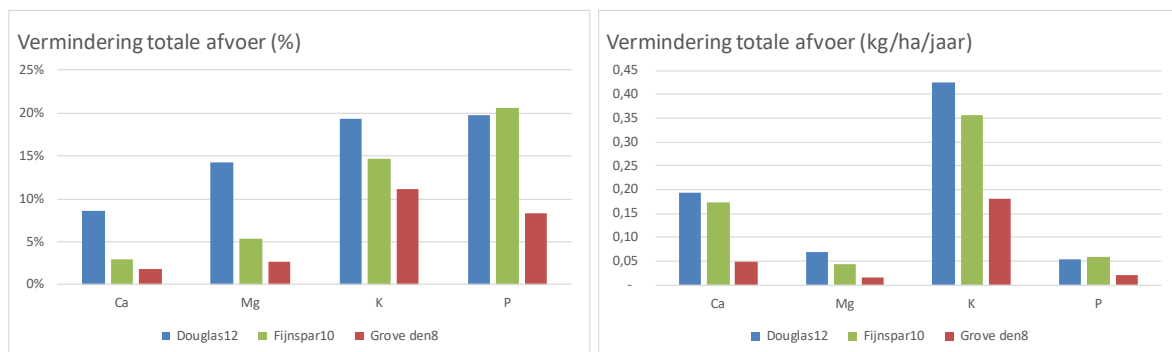
Takken eerst vier tot zes maanden laten liggen

De takken eerst ca. 4-6 maanden laten liggen alvorens ze af te voeren, heeft tot gevolg dat een deel van de nutriënten Ca, K, Mg en P uit naalden (dit geldt ook voor bladeren, maar die worden in de scenario's niet afgevoerd) en takken weer vrijkomt en wordt toegevoegd aan de bodem. In die periode valt 25-45% van de naalden af (Lehtikangas, 1991) en daarnaast valt een deel van de naalden nog af bij het laden. Wat wel bedacht moet worden, is dat deze toevoer alleen op perceelniveau plaatsvindt, indien het takhout verspreid over het perceel blijft liggen. Indien het direct of snel na de oogst van het stamhout op rillen wordt gezet, vindt de uitspoeling alleen plaats naar die delen van het bosperceel. De takken moeten bij voorkeur dus verspreid in het bos achtergelaten worden om lokale uitspoeling door overschot aan nutriënten te voorkomen. Dit heeft echter als nadeel dat dit logistiek minder aantrekkelijk is en ook problemen kan geven met verjonging.

De percentages die in een periode van 4-6 maanden vrijkomen, variëren per element en zijn als volgt in te schatten:

- Ca komt beperkt (<20%) vrij uit naalden en nauwelijks uit takken (Palviainen et al., 2004; Staaf en Berg, 1982).
- Mg komt eveneens beperkt (<20%) vrij uit naalden (Staaf en Berg, 1982) en waarschijnlijk nauwelijks uit takken, vergelijkbaar met Ca, maar daarvoor zijn geen gegevens gevonden.
- K komt voor ~40-80% vrij uit naalden en voor ~30-40% vrij uit takken (Palviainen, 2004).
- P komt nauwelijks vrij uit naalden en takken (Staaf en Berg, 1982).

In figuur 16 is het effect van de maatregel voor enkele situaties weergegeven, gemiddeld voor een omloop. Daaruit blijkt dat de maatregel vooral voor K en P bij Douglas en fijnspar en in mindere mate voor grove den redelijk effectief is. Dit komt vooral door het verlies van naalden, die bij Douglas en fijnspar betrekkelijk veel nutriënten bevatten, en door de uitspoeling van K.

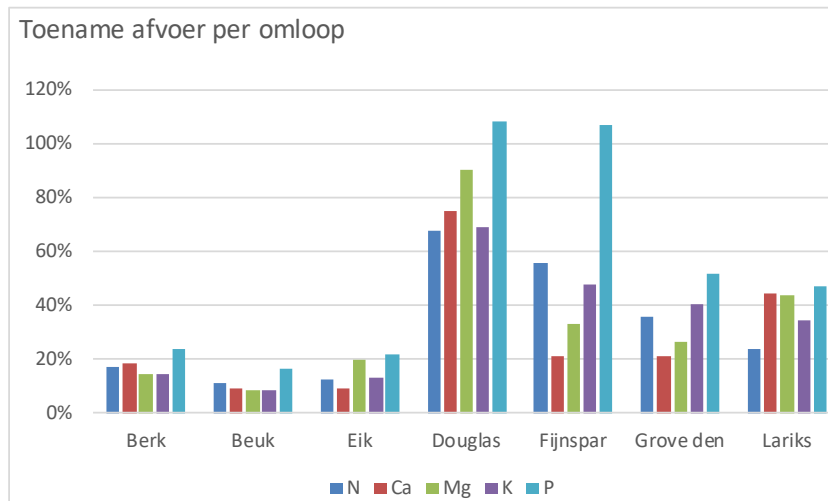


Figuur 16 Voorbeeldberekeningen van het effect van het laten liggen van het takhout op de afvoer van Ca, Mg, K en P, gemiddeld over een hele omloop, voor Douglas, groeiklasse 12, fijnspar, groeiklasse 10 en grove den, groeiklasse 8. Er is gerekend met 35% verlies van de naalden, 5% uitspoeling van Ca, Mg en P en 35% K uit takken en met 15% uitspoeling van Ca, Mg en P en 60% K uit naalden.

Minder (niet de gehele bijgroei) oogsten

Een voor de hand liggende maatregel om de afvoer van nutriënten te beperken, is het verminderen van de oogst. Daarbij komt doorgaans als eerste het achterlaten van het takhout (wat in veel gevallen al de gangbare praktijk is) in aanmerking. Bij oogst kan in gevallen van afnemende voorraden, naast het achterlaten van tak- en tophout, ook gedacht worden aan het achterlaten van minder waardevolle delen van de oogst, zoals de dunnere bomen en kromme en takkige stammen.

In figuur 17 is aangegeven hoeveel extra nutriënten er gemiddeld over een omloop afgevoerd kunnen worden door het oogsten van takhout bij eindkap ten opzichte van oogst van alleen stamhout. De toename is hoog bij Douglas en bij fijnspar voor P (60-120%), laag voor berk, beuk en eik (<25%) en gemiddeld voor grove den en lariks (20-50%). Feitelijk is het adviessysteem mede bedoeld om vast te stellen of het acceptabel is om naast stamhout ook top en takhout af te voeren.



Figuur 17 Indicatie van de toename van de afvoer van nutriënten door oogst van takhout bij eindkap (en naalden) ten opzichte van de oogst van alleen stamhout, gemiddeld over een omloop.

Langere omloop hanteren

Het uitstellen van eindvellingen kan iets bijdragen, doordat:

1. jong bos meer nutriënten vastlegt dan oud bos. Jong bos groeit doorgaans sneller dan oud bos (de gemiddelde bijgroei neemt op latere leeftijd af), maar bij jong bos bestaat de bijgroei ook uit relatief veel schors en spinthout, terwijl het bij oud bos vooral uit kernhout bestaat, met lagere nutriëntgehalten.
2. er na de eindvelling gedurende enkele jaren meer uitspoeling optreedt. Dit geldt in mindere mate voor schermkap en in grotere mate voor kaalkap. Door eindvelling uit te stellen, treedt dit effect gemiddeld minder vaak op.
3. de oogst van takhout – indien van toepassing – gemiddeld per jaar minder nutriënten afvoert. Op latere leeftijd neemt de hoeveelheid takhout die in potentie bij een eindvelling afgevoerd kan worden niet evenredig met de leeftijd toe. De totale hoeveelheid nutriënten die gemiddeld per jaar over de omloop kan worden afgevoerd, neemt af.

De effectiviteit van de maatregel is moeilijk als geheel te beoordelen. Voor het derde punt geldt dat deze vooral relatief effectief is bij combinaties van boomsoorten en nutriënten waarbij door het oogsten van takhout de afvoer met een groot percentage toeneemt (zie figuur 17: alle nutriënten bij Douglas en P bij fijnspar).

Aanpassing houtoogstmethode

Depositie invangen: de hoeveelheid depositie die een bos invangt, wordt medebepaald door de ruwheid van het kronendak: een ruw kronendak (afwisseling van hoge en lagere bomen, open plekken, dus veel randlengte) is gunstig voor het invangen van depositie. Ook is er verschil tussen boomsoorten. De Schrijver et al. (2007) vinden bijvoorbeeld dat naaldbomen duidelijk meer depositie

invangen dan loofbomen. Bij kaalkap wordt de droge depositie sterk verlaagd en is het daarom van belang om de boomloze periode te beperken. Dit kan door geen kaalkap toe te passen en bij houtoogst een deel van de bomen te laten staan (schermkap), waardoor de depositie tijdens en na de kap minder sterk wordt verlaagd. Hoe groot dit effect is, is echter nog onduidelijk. Op het moment van schrijven van dit rapport loopt er een PhD-onderzoek waarin dit effect wordt onderzocht.

Uitspoeling beperken: bij kaalkap ontstaat er tijdelijk een groter neerslagoverschot (meer water dat naar het grondwater zakt) op een moment dat bomen weinig of geen nutriënten opnemen. Daarnaast wordt de bodem veelal verstoord, wat tot extra mineralisatie van organische stof leidt. Hierdoor is er direct na een kaalkap doorgaans een verhoogde uitspoeling van nutriënten. Weis et al. (2006) vinden bijvoorbeeld dat in de eerste 4,5 jaar na kaalkap er ca. 5 keer meer stikstof uitspoelt vergeleken met schermkap, en een verhoogde uitspoeling geldt ook voor basische nutriënten. Ook Katzensteiner (2003) vindt bij een kaalkap, maar ook tijdens de regeneratie van het bos erna, een duidelijk hogere uitspoeling van nutriënten. Het heeft daarom een positief effect op de nutriëntenbalans om de boomloze periode te beperken. Dit kan door geen kaalkap toe te passen en/of na kaalkap of schermkap te zorgen dat er zo snel mogelijk weer verjonging is die uitspoeling beperkt. Voor de Nederlandse bossen en voor de nutriënten Ca, Mg, K en P zijn echter geen duidelijke gegevens gevonden om deze maatregelen te kunnen kwantificeren.

4.3 Aanbevelingen

Hieronder staat een aantal aanbevelingen m.b.t. de verdere ontwikkelingen van het adviessysteem houtoogst. Dit betreft allereerst de verhoging van kennis (data) over de nutriëntenbalans. Als de onzekerheid over de verschillende componenten van die balans wordt verminderd, kan het adviesstelsel tot beter onderbouwde adviezen komen met betrekking tot de veilige houtoogst. Dat kan leiden tot hogere houtoogstadviezen, omdat nu in de regel gekozen is voor voorzichtige aannames. Daarnaast betreft dit betere kennis over de effecten van mitigerende maatregelen.

Betere kennis over de nutriëntenbalans

De componenten van de nutriëntenbalans zijn aanvoer door depositie en verwerking van moeder-materiaal en afvoer door uitspoeling en oogst van hout en biomassa. Er zijn nog behoorlijk grote onzekerheden in deze componenten. De belangrijkste zijn verwerking en uitspoeling (zie sectie 4.1), maar ook de droge depositie van P is behoorlijk onzeker. Daarnaast is meer inzicht in de houtafvoer, wat met management te beïnvloeden is, nog steeds zinvol. Samenvattend geldt:

1. Droge depositie van P: daar is nu geen aanvullend onderzoek nodig. Een lopend promotie-onderzoek bij Wageningen Universiteit kan namelijk op termijn inzicht bieden in de verhouding doorval en bulkdepositie voor fosfaat in Nederland.
2. Verwerking: er is discussie of de huidige de snelheid van verwerking niet beduidend hoger is dan nu wordt aangenomen door de lage pH van de bodems (Bergsma et al., 2016). In het adviessysteem zijn verwerkingssnelheden gebruikt waarbij voor pH is gecorrigeerd, maar mogelijk is dit niet voldoende. Hoge verwerking zou enerzijds kunnen leiden tot een hogere beschikbaarheid op de korte termijn, maar anderzijds op de lange termijn kunnen leiden tot een veel lagere beschikbaarheid, omdat het moeder-materiaal op een gegeven moment is uitgeput. Informatie over de recente verwerkingssnelheid kan worden verkregen door middel van herbemonstering van bodems die in de vijftiger tot negentiger jaren al zijn bemonsterd en waarvan een totaalanalyse van basen bekend is. Het vergelijken van die totale voorraden kan meer duidelijkheid brengen over de vraag hoe snel de huidige verwerking gaat.
3. Uitspoeling: er zit een belangrijke onzekerheid in de uitspoeling, wat volgt uit de grote variatie in Ca-, K-, Mg- en P-concentraties in ondiep grondwater op achttien locaties, waarvan de bemonsteringen in de winter van 2017/18 zijn uitgevoerd. Dat geldt ook voor de aanname die is gedaan dat gemiddeld 50% van de basische nutriënten uitspoelt, hoewel de data aangeven dat die aanname redelijk is. Het is echter wenselijk de uitspoeling beter te onderbouwen door vaker en op meer plaatsen de bemonsteren.
4. Houtafvoer: er is een aantal bemonsteringen uitgevoerd van de nutriëntgehalten van de verschillende bovengrondse boomcomponenten (stamhout, kernhout, spinthout; schors, grof en fijn takhout) van zeven boomsoorten (Douglas, fijnspar, grove den, lariks, eik, beuk, berk). Het is wenselijk om

aanvullend metingen uit te voeren om te komen tot statistisch betrouwbaardere gemiddelde of mediane waarden. Vooral omdat van enkele soorten (o.a. beuk, berk) een beperkt aantal monsters is genomen of omdat van sommige componenten de variatie in gemeten gehalten groot is.

Betere kennis over effecten mitigerende maatregelen

Bosbeheerders kunnen verschillende keuzes maken indien ze op de arme zandgronden meer hout en biomassa willen produceren:

- Boomsoortenkeuze
- Menging (boomsoorten, leeftijdsklasse)
- Mitigerende maatregelen, waaronder:
 - aanvullende bemesting, zoals steenmeeladditie, al dan niet na bodembemonstering;
 - wijze van kap (gericht op de instandhouding van het bossysteem (geen grote kapvlaktes), schermpjes, en/of gericht op het creëren van meer randen voor hogere depositie.

Een andere belangrijke factor is de rol van het bodemleven in het bos op de mogelijkheid van bomen om nutriënten op te nemen. Bij het nemen van mitigerende maatregelen zou hier een relatie moeten worden gelegd.

Om praktijkdata voor de lange termijn te verkrijgen, is het wenselijk om te starten met een aantal voorbeeldbedrijven. Op deze bedrijven kunnen de verschillende wijzen van omgaan met oogst, verjonging en bodembeheer worden gedemonstreerd. Hier worden de bodem, groei, verjonging en oogst gemonitord op kleinschalige, naast elkaar gelegen beheermethoden. Resultaten kunnen worden gebruikt voor het op termijn aanscherpen van het adviessysteem en als communicatiemiddel met de sector. Bij de voorbeeldbedrijven kan ook de koppeling worden gelegd met klimaatslim bosbeheer, waarvoor van belang zijn de C-vastlegging in bodem en biomassa alsook de C-balans in de keten van de houtverwerking en de verwerking van houtige biomassa.

4.4 Conclusies

Resultaten van de Adviessystemen

Er is een adviessysteem 1.0 opgesteld op basis van de beschikbare gegevens medio 2017. Aanvullende bemonsteringen in 2017/2018 hebben geleid tot een lichtelijk genuanceerd beeld ten aanzien van adviessysteem 1.0. Omdat de wijzigingen niet groot zijn, is er in overleg met de begeleidingscommissie voor gekozen om geen nieuwe brochure met het adviessysteem 1.1 uit te brengen. In dit rapport zijn de tabellen van adviessysteem 1.0 en adviessysteem 1.1 beide opgenomen in bijlage 5. In hoofdstuk 3 is alleen de laatste versie van adviessysteem 1.1 gegeven.

Uit de resultaten van het adviessysteem blijkt dat bij het oogsten van alleen stamhout voor beuk en eik de balans voor Ca, K en P in veel situaties de voorraad kan afnemen. Alleen bij een laag oogstniveau ($4 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{jr}^{-1}$) is de oogst voor eik voor alle bodems en alle regio's rond het evenwichtsniveau en voor beuk alleen voor rijke zandgronden. Voor fijnspar en Douglas kan de voorraad ervan afnemen bij een matig ($7 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{jr}^{-1}$) en hoog oogstniveau ($11 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{jr}^{-1}$). Bij het oogsten van stamhout en tak- en tophout bij eindkap kan voor beuk en eik de K-voorraad ook bij lage oogstniveaus afnemen. Opvallend is dat in geen van de beschouwde situaties een negatieve balans van Mg optreedt.

De verschillen ten opzichte van adviessysteem 1.0 betreffen met name de P-voorraad, die in versie 1.1 in mindere mate een beperkende rol speelt dan in versie 1.0. De in veel gevallen gevonden negatieve balans van P is ook minder van belang dan de gevonden negatieve balansen bij Ca en K. Voor P is in de meeste bospercelen, anders dan voor Ca en K, een grote hoeveelheid P aanwezig, waarbij vergeleken de gevonden kleine negatieve balansen in het niet vallen. Daarnaast is er in adviessysteem 1.1 voor Ca voor berk in geen enkele situatie meer sprake van een afname van de voorraad. Voor eik daarentegen laten de nieuwe resultaten zien dat bij het oogsten van stamhout en tak- en tophout in Zuid-Nederland ook sprake is van afname in de K-voorraad bij het lage oogstniveau.

Om het adviessysteem te verbeteren, is er met name behoefte aan aanvullende data, met name met betrekking tot de verwerking en uitspoeling van nutriënten.

Effectiviteit van maatregelen

Met name met betrekking tot de mitigerende maatregelen ontbreekt nog veel kennis. In dit rapport is een zo goed mogelijk overzicht gegeven van mogelijke mitigerende maatregelen. De effectiviteit van maatregelen kan als volgt worden samengevat:

- Nutriënten toedienen is effectief, maar de methodiek van toediening is van belang in verband met het optreden van mogelijk ongewenste neveneffecten. P wordt sterk gebonden kan gemakkelijk zonder bijwerking worden toegediend. Het geven van een P-gift, indien de P-voorraad onvoldoende is, is een goede en kosteneffectieve mogelijkheid. Bij Ca, K en Mg is het beter om langzaam verwerkende meststoffen te gebruiken, zoals steenmeel, omdat het pH-verhogende effect van bv. kalk een hogere afbraak tot gevolg heeft met negatieve effecten op biodiversiteit en uitspoeling. Dit is echter een dure methode die alleen nog in pilots wordt toegepast.
- Takken eerst een halfjaar laten liggen leidt tot een redelijke afname in de afvoer van K en P (tot 20%) en in beperkte mate van Mg en Ca. Voor Douglas is de maatregel ook voor Ca en Mg redelijk effectief (relatief veel naaldmassa t.o.v. takmassa). Logistiek is de maatregel minder aantrekkelijk, omdat de oogst van stamhout en takhout op verschillende momenten plaatsvindt, waardoor bijvoorbeeld ook twee keer schade aan boswegen ontstaat.
- Het achterlaten van takhout is met name effectief bij Douglas en bij fijnspar voor P (ca. 40-60% minder afvoer), terwijl de effecten relatief beperkt zijn voor berk, beuk en eik (<20% minder afvoer) en gemiddeld voor grove den en lariks (ca. 15-30% minder afvoer).
- Langere omloop hanteren en uitspoeling beperken door kaalkap te vermijden en verjonging snel op gang te brengen, lijken beide beperkt effectief. Het is echter lastig om deze maatregel te kwantificeren.
- Depositie invangen, o.a. door bij eindkap een deel van de bomen te laten staan, heeft als nadeel dat ook de invang van stikstof wordt verhoogd en daarmee ook de uitspoeling van basen toeneemt, hoewel dit effect bij een zeer lage basenbezetting mee kan vallen.

Ervaring op goed gemonitorde voorbeeldbedrijven, waar verschillende mitigerende maatregelen worden uitgevoerd, kan helpen om tot een betere onderbouwing van de effectiviteit van deze maatregelen te komen.

Literatuur

- Actieplan Bos en Hout, 2016. Algemene Vereniging Inlands Hout, BRBS Recycling, Branche Vereniging Organische Reststoffen, Form International, HVC Groep, Koninklijke Vereniging van Nederlandse Houtondernemingen, Koninklijke Vereniging van Nederlandse Papier- en Kartonfabrieken, Nationaal Bossenfonds, Nederlandse Branchevereniging voor de Timmerindustrie, Nederlandse Emballage- en Palletindustrievereniging, Platform Bio-Energie, Staatsbosbeheer, Stichting EcoBouw Nederland, Stichting Nationale Boomfeestdag, Stichting Natuur & Milieu, Stichting Probos, Trees for All, Unie van Bosgroepen, Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren, Ministerie van Economische Zaken, Alterra, oktober 2016, Rotterdam.
- André, F., M. Jonard, Q. Ponette, 2010. Biomass and nutrient content of sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) and beech (*Fagus sylvatica* L.) stem and branches in a mixed stand in southern Belgium. *Science of the Total Environment*, 408, 2285 – 2294.
- Bergsma, H., J. Vogels, M. Weijters, R. Bobbink, A. Jansen en L. Krul, 2016. Tandrot in de bodem. Hoeveel biodiversiteit kan de huidige minerale bodem nog ondersteunen? *Bodem* 24, 27-29.
- Bonten, L.T.C., R.J. Bijlsma, S.P.J. van Delft, J.J. de Jong, J.H. Spijker en W. de Vries, 2015. Houtoogst en bodemvruchtbaarheid. Een modelstudie naar duurzaamheid van houtoogst op Nederlandse bosgroeiplaatsen. Alterra-rapport 2618. Alterra Wageningen UR, Wageningen, 78 pp.
- Bonten, L.T.C., G.J. Reinds en M. Posch, 2016. A model to calculate effects of atmospheric deposition on soil acidification, eutrophication and carbon sequestration. *Environ. Model. Softw.* 79, 75-84.
- Boumans, L., E.J.W. Wattel-Koekkoek & E. van der Swaluw, 2014. Veranderingen in regen- en grondwaterkwaliteit als gevolg van atmosferische emissiereducties: Verzuring en vermisting 1989-2010. RIVM-Rapport 680720005.
- Christophe, C., G. Kirchen, L. Saint-André, P. Redon en M. Turpault, 2017. Relationship between soil nutritive resources and the growth and mineral nutrition of a beech (*Fagus sylvatica*) stand along a soil sequence. *Catena*, 155, p. 156 – 169.
- De Jong, J.J., H. Kros, J.H. Spijker & W. de Vries, 2017. Houtoogst in relatie tot nutriëntenvoorraden in bossen op droge zandgronden. VBNE. Druk Flyeralarm.
- De Schrijver, A., G. Geudens, L. Augusto, J. Staelens, J. Mertens, K. Wuyts, L. Gielis en K. Verheyen, 2007. The effect of forest type on throughfall deposition and seepage flux: a review. *Oecologia*, 153, 663 – 674
- De Vries, W., 1994. Soil response to acid deposition at different regional scales; Field and laboratory data, critical loads and model predictions. PhD Thesis, Wageningen University, Wageningen, 487 pp.
- De Vries, W. de & P.C. Jansen, 1994. Effects of acid deposition on 150 forest stands in The Netherlands. Input output budgets for sulphur, nitrogen, base cations and aluminium. Wageningen, DLO- Staring Centrum. Rapport 69.3, 60 pp.
- De Vries, W. en E.E.J.M. Leeters, 2001. Chemical composition of the humus layer, mineral soil and soil solution of 150 forest stands in the Netherlands in 1990. Alterra rapport 424.1, 113 pp.
- De Vries, W., M. Weijters, A. de Jong, R. de Waal, P. Bolhuis, J. Bloem, A. van den Burg, G.-J. van Duinen, R.-J. Bijlsma en R. Bobbink, 2017. Herstel van loofbossen op droge zandgronden. Doorgaande verzuring van droge zandgronden onder loofbossen en herstel mogelijkheden door steenmeeltoediening. Interne voortgangsrapportage.
- Dietz, P. von, 1975. Dichte und Rindengehalt von Industrieholz. *HOLZ als Roh- und Werkstoff*, 33, 135 - 141.
- Du, E., W. de Vries, W. Han, X. Liu, Z. Yan and Y. Jiang, 2016. Imbalanced phosphorus and nitrogen deposition in China's forests. *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 8571–8579.
- Egnell, G., 2013. Forest biomass for energy and sustainable management of forest soils – waht do we need to know? In: Helmisaari, H_S. & E. Vanguelova, *Proceedings of the Workshop W6.1 Forest bioenergy and soil sustainability at EUROSIL Congress 2nd to 6th July 2012*. Bari. Italië.
- Energieakkoord voor duurzame groei 2013. Sociaal-Economische Raad. September 2013.

- Fonweban, J, B. Gardiner, E. Macdonald en D. Auty, 2011. Taper functions for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) in Northern Britain. In: *Forestry*, 84 (1), 49-60.
- Forest Products Laboratory, 1957. Shrinking and swelling of wood in use. Information Reviewed and Reaffirmed. Forest Service U. S. Department of Agriculture. Wisconsin.
- Geneta, A., H. Wernsdörfer, M. Jonard, H. Pretzsch, M. Rauch, Q. Ponettec, C. Nysg, A. Legout, J. Rangerg, P. Vallet en L. Saint-André, 2011. Ontogeny partly explains the apparent heterogeneity of published biomass equations for *Fagus sylvatica* in central Europe. *Forest Ecology and Management*, 261, 1188 – 1202.
- Grote, R., 2002. Foliage and Branch Biomass Estimation of Coniferous and Deciduous Tree Species. *Silva Fennica*, 36, 4, 779 - 788.
- 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, 489 - 498.
- Haygreen, J.G. en J.L. Bowyer, 1982. Forest products and wood science. An introduction. Ames, The Iowa State University Press, 495 p.
- Husmann, K., S. Rumpf en J. Nagel, 2018. Biomass functions and nutrient contents of European beech, oak, sycamore maple and ash and their meaning for the biomass supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 172, 4044 - 4056.
- Hyman, M.E., C.E. Johnson, S.W. Bailey, J.W. Hornbeck and R.H. April, 1998. Chemical weathering and cation loss in a base-poor watershed. *GSA Bulletin*: 85-95
- Jacobsen, C., P. Rademacher, H. Meesenburg & K.J. Meiwes, 2003. Gehalte chemischer Elemente in Baumkompartimenten – Literaturstudie und Datensammlung. Niedersächsische Forstliche Forschungs- und Versuchsanstalt, Göttingen.
- Jansen, J.J., J. Sevenster & P.J. Faber, 1996. Opbrengsttabellen voor belangrijke boomsoorten in Nederland. Wageningen, IBN-DLO. IBN rapport 221.
- Johnson, J., J. Aherne en T. Cummins, 2015. Base cation budgets under residue removal in temperate maritime plantation forests. *Forest Ecol Manag* 343, 144-156.
- Katzensteiner, K., 2003. Effects of harvesting on nutrient leaching in a Norway spruce (*Picea abies* Karst.) ecosystem on a Lithic Leptosol in the Northern Limestone Alps. *Plant and Soil*, 250, 59 – 73.
- Klaminder, J., R.W. Lucas, M.N. Futter, K.H. Bishop, S.J. Kohler, G. Egnell en H. Laudon, 2011. Silicate mineral weathering rate estimates: Are they precise enough to be useful when predicting the recovery of nutrient pools after harvesting? *Forest Ecol Manag* 261 (1), 1-9.
- Klap, J.M., W. de Vries en E.E.J.M. Leeters, 1999. Effects of acid atmospheric deposition on the chemical composition of loess, clay and peat soils under forest in the Netherlands. Wageningen, SC-DLO. Report 97.
- Kopáček, J., Turek, J., Hejzlar, J. and Šantrůčková, H., 2009. Canopy leaching of nutrients and metals in a mountain spruce forest. *Atmospheric Environment* 43, 5443-5453.
- Kopáček, J., Turek, J., Hejzlar, J and P. Porcal, 2011. Bulk deposition and throughfall fluxes of elements in the Bohemian forest (Central Europe) from 1998-2009. *Boreal Environment research* 16, 495-508.
- Lehtikangas, P., 1991. Avverkningsrester i hyggeshögar - avbarrning och bränslekvalitet. Del 1. (Logging residue in piles - needle loss and fuel quality). Sveriges Lantbruksuniversitet. Inst. för Virkeslära. Rapport No. 223, 33 p.
- Mahowald, N., T.D. Jickells, A.R. Baker, P. Artaxo, C.R. Benitez-Nelson, G. Bergametti, T.C. Bond, Y. Chen, D.D. Cohen, B. Herut, N. Kubilay, R. Losno, C. Luo, W. Maenhaut, K.A. McGee, G.S. Okin, R.L. Siefert en S. Tsukuda, 2008. Global distribution of atmospheric phosphorus sources, concentrations and deposition rates, and anthropogenic impacts. *Glob. Biogeochem. Cycles* 22 (GB4026), 1-19.
- Miles, P.D. en W.B. Smith, 2009. Specific gravity and other properties of wood and bark for 156 tree species found in North America. Res. Note NRS-38., U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station, 35 p.
- Newman, E.I., 1995. Phosphorus inputs to terrestrial ecosystems. *Journal of Ecology* 83, 713-726.
- Olsthoorn, A.F.M., C.A. van de Berg en J.J. de Guijter, 2006. Evaluatie van bemesting en bekalking in bossen en de ontwikkeling in onbehandelde bossen. Evaluatie effectgerichte maatregelen (EGM) in multifunctionele bossen. Deelrapport A1.1, Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1337.1, 39 p.

-
- Palviainen, M., L. Finer, A.M. 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, 123 - 136.
- Parker G.G., 1983. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. *Adv Ecol Res* 13:57-133
- Rodríguez, F., I. Lizarralde en F. Bravo, 2015. Comparison of stem taper equations for eight major tree species in the Spanish Plateau. *Forest Systems*, 24, 3, 13 p.
- Runyan, C.W., P. D'Odorico, K.L. Vandecar, R. Das, B. Schmoor and D. Lawrence, 2013. Positive feedbacks between phosphorus deposition and forest canopy trapping, evidence from Southern Mexico. *Journal of geophysical research: Biogeosciences* 118, 1521-1531.
- Schelhaas, M.J., A.P.P.M. Clercx, W.P. Daamen, J.F. Oldenburger, G. Velema, P. Schnitger, H. Schoonderwoerd & H. Kramer, 2014. Zesde Nederlandse Bosinventarisatie: methoden en basisresultaten. Wageningen, Alterra Wageningen UR.
- Staaf, H. en B. Berg, 1982. Accumulation and release of plant nutrients in decomposing Scots pine needle litter. Long-term decomposition in a Scots pine forest II. *Can. J. Bot.* 60: p. 1561 - 1568.
- Starr, M., A.J. Lindroos en L. Ukonmaanaho, 2014. Weathering release rates of base cations from soils within a boreal forested catchment: variation and comparison to deposition, litterfall and leaching fluxes. *Environ Earth Sci* 72 (12), 5101-5111.
- Svoboda, M., K. Matějka en J. Kopáček, 2006. Biomass and element pools of selected spruce trees in the catchments of Plešné and Čertovo Lakes in the Šumava Mts. *Journal of forest science*, 52, 10, 482 - 495.
- Talkner, 2009. Dynamics of phosphorus in soils and of nutrients in canopies. of deciduous beech forests differing in tree species diversity. Dissertation Georg-August-Universität Göttingen, 71 pp.
- Van der Salm, C., L. Köhlerberg en W. de Vries, 1998. Assessment of weathering rates in Dutch loess and river-clay soils at pH 3.5, using laboratory experiments. *Geoderma* 85 (1), 41-62.
- Van Jaarsveld, H., G.J. Reinds, A. van Hinsberg and M. van Esbroek, 2010. Depositie van basische kationen in Nederland. PBL rapport M00093/01/VZ.
- Vet, R., R.S. Artz, S. Carou, M. Shaw, C. Ro, W. Aas, A. Baker, C. Van Bowersox, F. Dentener, C. Galy-Lacaux, A. Hou, J.J. Pienaar, R. Gillett, M. Forti, S. Gromov, H. Hara, T. Khodzher, N.M. Mahowald, S. Nickovic, P.S.P. Rao, N.W. Reid, 2014. A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus. *Atmospheric Environment* 93, 3-100
- Vilén, T., J. Meyer, E. Thürig en M. Lindner, 2005. Improved regional and national level estimates of the carbon stock and stock change of tree biomass for six European countries, (Deliverable 6.1). Improved national estimates of the carbon stock and stock change of the forest soils for six European countries (Deliverable 6.2). CarboInvent Project. European Forest Institute, Joensuu, Finland, 31 pp.
- Weis, W., V. Rotter en A. Göttlein, 2006. Water and element fluxes during the regeneration of Norway spruce with European beech: Effects of shelterwood-cut and clear-cut. *Forest Ecology and Management*, 224, 304 - 317.
- Yang, J.L., G.L. Zhang, L.M. Huang and P.C. Brookes, 2013. Estimating soil acidification rate at watershed scale based on the stoichiometric relations between silicon and base cations. *Chemical Geology* 337-338: 30-37.

Websites

www.lml.rivm.nl/gevalideerd: Landelijk meetnet regenwater

www.wood-database.com

Bijlage 1 Bemonsteringsprotocol voor metingen van nutriënten in hout

Afhankelijk van de boomsoort zijn verschillende onderdelen bemonsterd, afhankelijk van het al dan niet kunnen onderscheiden van kern- en spinhout. In tabel B1.1 zijn de te nemen monsters weergegeven. De monsters van hout bestaan steeds uit drie submonsters, die monsters van bodem uit tien submonsters. Er is zo veel mogelijk bemonsterd na de oogst, als het takhout op de grond lag. In enkele gevallen (bv. op locaties waar ook grondwater werd bemonsterd) zijn voor de bemonstering takken uit de boom gezaagd (zie figuur 3).

Tabel B2.1 Overzicht van de genomen houtmonsters in verschillende compartimenten per boomsoort.

	Stamhout > 10 cm			Grof takhout 2 - 10 cm		Fijn takhout < 2 cm	Bodem		
	kern hout	spint hout	kern + spint	kern + spint	schors	totaal	strooisel	0 - 10 cm	10 - 30 cm
grove den	x	X		x	x	x	x	x	x
Fijnspar			x	x	x	x	x	x	x
Douglas	x	X		x	x	x	x	x	x
Lariks	x	X		x	x	x	x	x	x
Eik	x	X		x	x	x	x	x	x
Beuk			x	x	x	x	x	x	x

Stamhout > 10 cm

Submonsters zijn als volgt genomen:

Hout

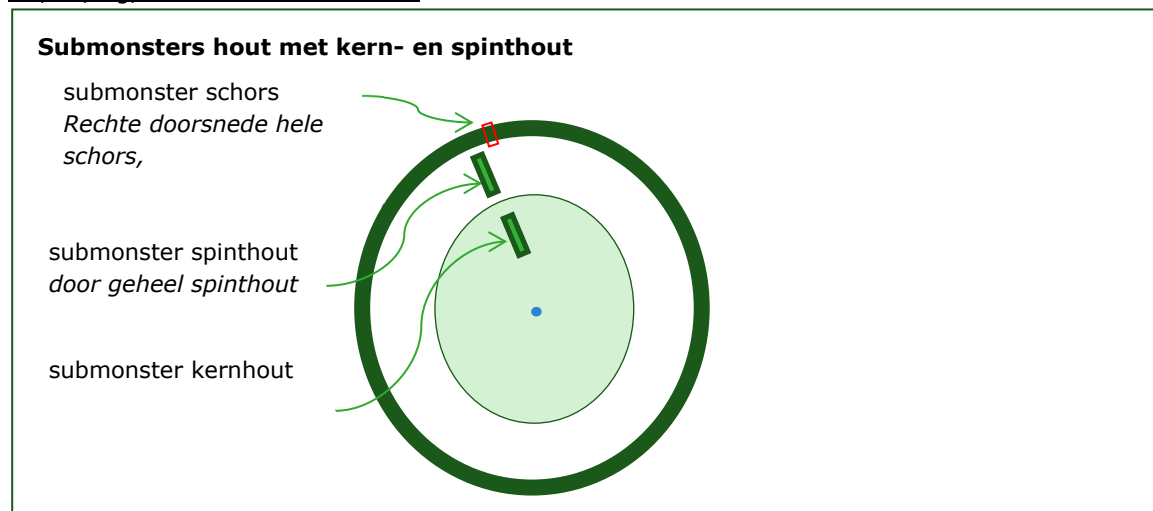
- Met aanwasboor: haaks op de schors boren, zo diep mogelijk. Stukjes spinhout en kernhout (Gd, La, Dg, Ei) scheiden. Iets marge nemen, dus grens tussen beide stukjes verwijderen.
- Eventueel haaks op het zaagvlak boren voor kern- en spinhout.

Steeds proberen in het middel van de houtsoort (spint/kern) te monstern.

Schors

Met een mes, hiep of iets dergelijks stukje van de hele doorsnede van de schors nemen, ca. 1 cm x 1 cm x dikte. Eventueel met aanwasboor enkele stukjes uitboren.

Gd, La, Dg, Ei methode aanwasboor



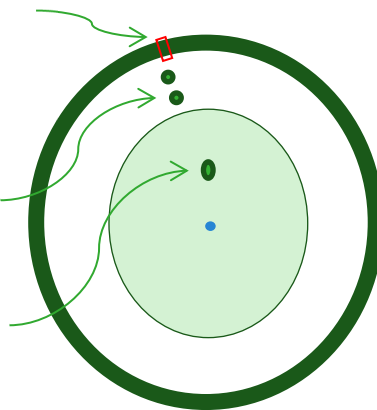
Gd, La, Dg, Ei methode aanwasboor haaks

Submonsters hout met kern- en spinthout

submonster schors
Rechte doorsnede hele schors

submonster spinthout
op 1/3^{de} en 2/3^{de} dikte spinthout

submonster kernhout
Halverwege dikte kernhout

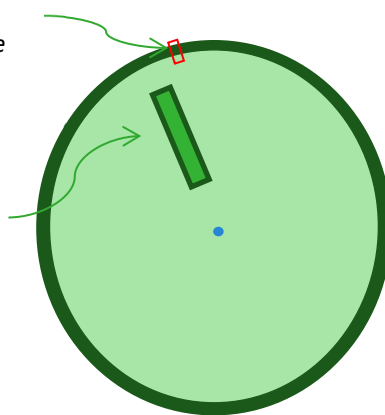


Bu, Fs methode aanwasboor

Submonsters hout met kern+spinhout

submonster schors
Rechte doorsnede hele schors

submonster kern+spinhout
Enkele cm, halverwege dikte



Grof takhout 2-10 cm

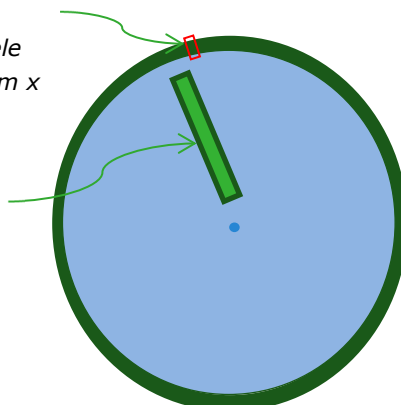
De monsternamen van grof takhout is vergelijkbaar met die van stamhout van beuk en fijnspar: er wordt geen onderscheid gemaakt tussen kern- en spinthout. Er kan voor worden gekozen om met een hiep of mes stukken van de gehele doorsnede te nemen. Bij voorkeur werd bemonsterd bij een takdikte van ca. 5-7 cm.

Methode aanwasboor

Submonsters grof takhout

submonster schors
Rechte doorsnede hele schors, ca. 1cm x 1cm x dikte

submonster hout takhout
(kern+spinhout)
Halverwege dikte spinthout

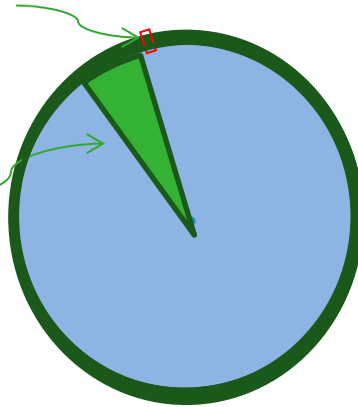


Methode hiep

Submonsters grof takhout

submonster schors
Rechte doorsnede hele schors, ca. 1cm x 1cm x dikte

submonster hout grof takhout
(kern+spinhout)



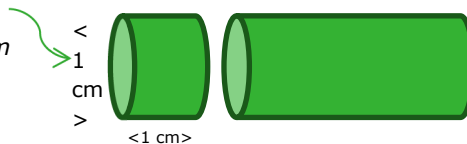
Fijn takhout < 2 cm

Voor fijn takhout werd met een snoeischaar stukjes met een diameter van ca. 1 cm geknipt.

Submonsters hout van de gehele doorsnedes

submonster fijn hout
Rechte doorsnede hele tak, ca. 1cm x dikte

Bij voorkeur bij ca. 1 cm dikte afknippen



Bodem

Monsters te nemen met bv. een guts (bij sommigen bekend als 'Dr. Pürckhauer's Soil Sample Drill')

Monsters van de volgende bodemlagen:

- strooisel
- 0-10 cm
- 10-30 cm

Tien submonsters per monster (bodemlaag)

- Steeds ca. 5 m uit elkaar
- Monsters te nemen op ongestoorde plekken (niet op rijpad, opengewerkte plekken etc.)



Figuur B1.1 Takken zagen voor monstername

Bijlage 2 Methoden en data voor het schatten van nutriëntgehalten in hout

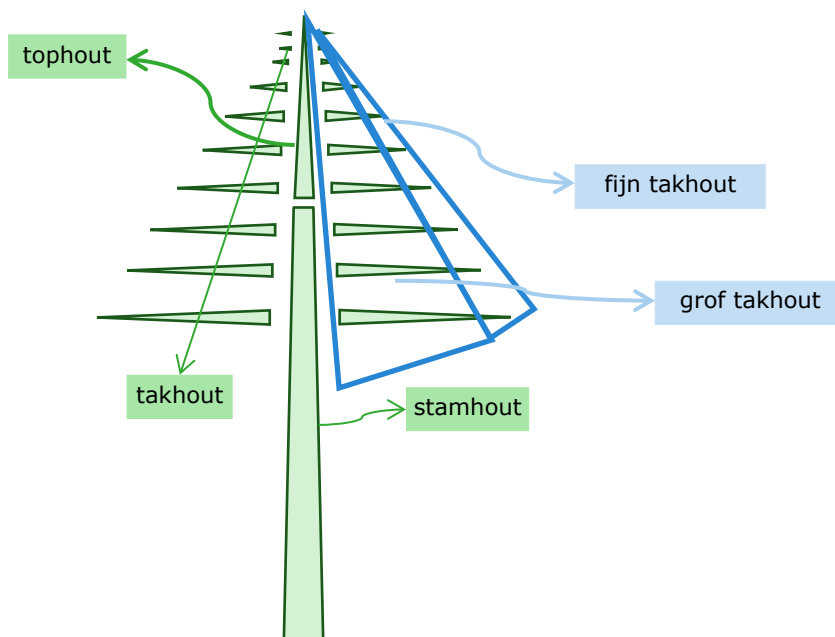
1 Berekeningsmethode

Om de maximale oogst – uitgedrukt in kuub vers rond stamhout – te bepalen, moet een gemiddeld gehalte aan nutriënten per kuub vers (rond)stamhout berekend worden. De basis daarvoor zijn de nutriëntgehalten die met de bemonstering van onderdelen van bomen zijn bepaald.

De nutriëntgehalten zijn in gram nutriënt per kg droge stof bepaald per onderdeel, om de resultaten van de bemonstering niet te laten beïnvloeden door de verhoudingen waarin de onderdelen zijn bemonsterd (zie ook figuur B2.1):

- Stamhout: werkhout, in de regel < 10 cm dik
 - Stamhout zonder schors
 - Kernhout
 - Spinhout
 - Schors stamhout
- Takhout (top- en takhout)
 - Grof takhout: delen van de takken van 2 tot (in de regel) 10 cm dik
 - Hout grove takken zonder schors: kern- en spinhout
 - Schors grove takken
 - Fijn takhout: delen van de takken van < 2 cm dik

Het model GrowUp heeft gemiddelde gehalten per boomsoort nodig van stammen en takken in gram per kilogram, en daarnaast de drogestofmassa per kuub vers stamhout. Voor stamhout en takhout moet daarom een weging gemaakt worden van de hoeveelheid nutriënten per onderdeel naar een gemiddeld gehalte nutriënten voor stammen (c_{stam}) en takken (c_{tak}). Die berekening is hieronder beschreven.



Figuur B2.1 Weergave van werkhout, top hout en takhout. Werkhout + top hout is spilhout.

Stamhout: Voor stamhout moet – om een gemiddeld gehalte nutriënten voor stammen te bepalen – een weging gemaakt worden van de hoeveelheid nutriënten per onderdeel. Die weging is uitgevoerd met de volgende formule:

$$c_{stam} = \frac{V_{kh} \cdot sw_{kh} \cdot c_{kh} + V_{sh} \cdot sw_{sh} \cdot c_{sh} + V_{sch} \cdot (1 - L) \cdot sw_{sch} \cdot c_{sch}}{V_{kh} \cdot sw_{kh} + V_{sh} \cdot sw_{sh} + V_{sch} \cdot (1 - L) \cdot sw_{sch}}$$

Met V_{kh} , V_{sh} en V_{sch} zijn de volumes (m^3 vers hout), sw_{kh} , sw_{sh} en sw_{sch} de dichtheden ($kg\ m^{-3}$ droog hout) en c_{stam} , c_{kh} , c_{sh} en c_{sch} de element gehalten ($g\ kg^{-1}$ droog hout) van respectievelijk stamhout (totaal met schors), kernhout, spinhout en schors. L is de lege ruimte (engels: void) van het in het veld gemeten volume schors.

De gehalten per drogestofgewicht zijn omgerekend naar gehalten per volume vers hout volgens de volgende formules:

$$sw_{stam} = \frac{V_{kh} \cdot sw_{kh} + V_{sh} \cdot sw_{sh} + V_{sch} \cdot (1 - L) \cdot sw_{sch}}{V_{kh} + V_{sh} + V_{sch} \cdot (1 - L)}$$

$$sw_{stam.vers} = (1 - krimp) \cdot sw_{stam.droog}$$

Takhout: De gemiddelde gehalten van nutriënten in het totale takhout (c_{tak}) zijn berekend volgens:

$$c_{tak} = m\%_{tak.grof} \cdot c_{tak.grof} + m\%_{tak.fijn} \cdot c_{tak.fijn}$$

Met $m\%_{tak.grof}$ en $m\%_{tak.fijn}$ zijn de massa-aandelen (%) en $c_{tak.grof}$ en $c_{tak.fijn}$ de element gehalten ($g\ kg^{-1}$) van respectievelijk grove takmassa en fijne takken.

De gemiddelde gehalten van nutriënten in het grove takhout ($c_{tak.grof}$) zijn berekend volgens:

$$c_{tak.grof} = \frac{V\%_{th} \cdot sw_{th} \cdot c_{th} + V\%_{ts} \cdot sw_{ts} \cdot c_{ts}}{V\%_{th} \cdot sw_{th} + V\%_{ts} \cdot sw_{ts}}$$

Met $V\%_{th}$ en $V\%_{ts}$ zijn de volume-aandelen (%), sw_{th} en sw_{ts} de dichtheden ($kg\ m^{-3}$) en c_{th} en c_{ts} de elementgehalten ($g\ kg^{-1}$) van respectievelijk grof takhout en schors van grove takken. Voor de weging van massa's van grove en fijne takken is gebruikgemaakt van literatuurgegevens.

In het onderstaande wordt verder ingegaan op de volumeverdeling en de massaverdeling van organen van het stamhout (2), takhout (3) en de gehalten aan nutriënten per orgaan (4).

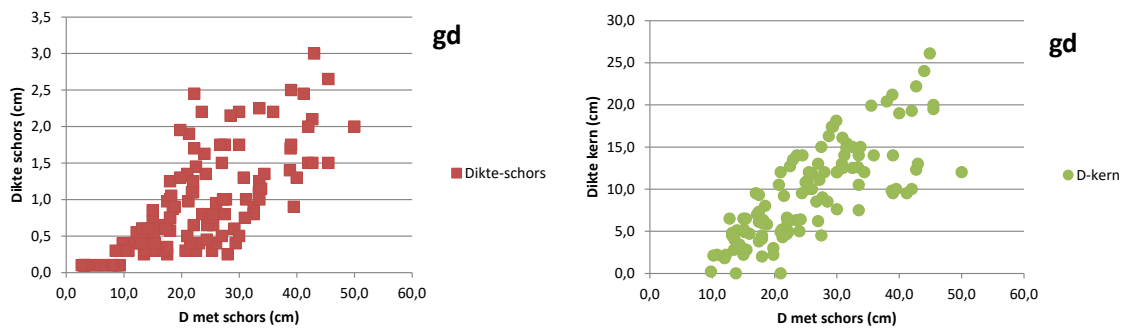
2 Volume en massaverdelingen van organen van stamhout

Volume per orgaan van stamhout

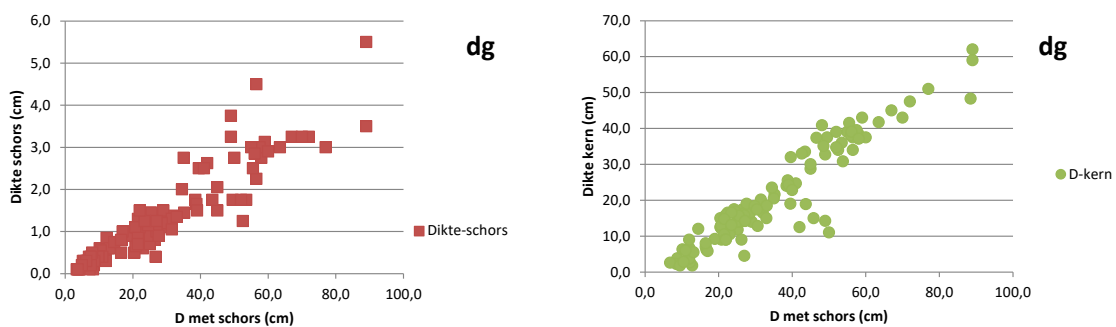
De verhouding van de volumes van schors, stamhout zonder schors, spint- en kernhout varieert, afhankelijk van de dikte van een stamsegment. Dit blijkt onder andere uit de gegevens die Miles et al. (2009) hebben gepubliceerd over het aandeel schors in relatie tot de diameter van stamdelen. Om de volumeverhoudingen per stamsegment te bepalen, zijn daarom metingen verricht aan stamdelen. De metingen zijn verricht bij verschillende partijen hout met verschillende diameters. Daarbij zijn de diameters met en zonder schors en de diameter van het kernhout bepaald.

De meetgegevens zijn gebruikt voor het bepalen van de relatie tussen de diameter van een stam(segment) en de dikte van de verschillende organen. In figuur B2.2 en figuur B2.3 zijn voorbeelden gegeven voor grove den en Douglas. De relaties zijn weergegeven in tabel B2.1. De relatie tussen stamdikte en dikte of diameter van de organen is gecombineerd met het verloop van de dikte van een stam op basis van stamvormfuncties (zie hieronder). Deze stamvormfuncties zijn toegepast op de oogstvolumes (met gegevens DBH en boomhoogtes) volgens de gebruikelijke opbrengsttabellen (Jansen et al., 1996) om te bepalen hoeveel hout van verschillende diktes over een omloop wordt geoogst, en om daarmee de gemiddelde (volume)verdeling van de organen over de

totale oogst te bepalen. Voor berk waren onvoldoende gegevens beschikbaar. Voor die soort is daarom uitgegaan van een algemeen gemiddeld percentage schors van 12,6% op basis van Dietz (1975).



Figuur B2.2 Relatie tussen diameter van een stamdeel en de dikte van de schors (links) en de diameter van de kern (rechts) voor grove den.



Figuur B2.3 Relatie tussen diameter van een stamdeel en de dikte van de schor resp. diameter van de kern, voor Douglas.

Tabel B2.1 Relatie tussen diameter met schors (D) en diameter zonder schors (D_z) en de diameter van het kernhout (D_k).

boomsoort	Diameter zonder schors		Diameter kernhout	
gd	$D_z = 0,0463D - 0,1464$	$R^2 = 0,533$	$D_k = 0,4583D - 1,7592$	$R^2 = 0,8548$
dg	$D_z = 0,0496D - 0,1055$	$R^2 = 0,567$	$D_k = 0,6948D - 3,2731$	$R^2 = 0,8878$
fs	$D_z = 0,0235D + 0,0854$	$R^2 = 0,7697$		
la	$D_z = 0,0445D - 0,0104$	$R^2 = 0,751$	$D_k = 0,8606D - 2,8171$	$R^2 = 0,9876$
ei	$D_z = 0,0563D - 0,0993$	$R^2 = 0,7589$	$D_k = 0,813D - 2,7593$	$R^2 = 0,9713$
bu	$D_z = 0,0104D + 0,103$	$R^2 = 0,7321$		

Stamvormfuncties en volumeverdelingen per orgaan van stamhout

De volumeverhoudingen van een totale stam worden bepaald door het verloop van de diameter van een stam. Voor het bepalen van de volumeverdeling is daarom gebruikgemaakt van stamvormfuncties (taperfuncties). Met deze functies kan de diameter van een stam op een gegeven hoogte van de boom bepaald worden. In de literatuur zijn vele varianten van deze functies te vinden, sommige eenvoudig, sommige zeer complex, en de parametrisatie verschilt afhankelijk van plek tot plek en van boomsoort tot boomsoort. Welke vormfunctie het beste is voor de Nederlandse bomen is niet bekend, omdat er geen gegevens bekend zijn van gemiddelde stamvormen per boomsoort. Het belang van de exacte parametrisatie is voor dit onderzoek echter beperkt; een afwijking in de parametrisatie heeft een relatief klein effect op de berekende diameter op een gegeven hoogte, die weer een beperkt effect heeft op de verdeling van de organen. En dat laatste heeft weer een beperkt effect op de gemiddelde gehalten aan nutriënten.

De vormfuncties van de bomen in deze studie zijn overgenomen van Fonweban et al. (2011), omdat met die functies met voorhanden zijnde variabelen (boomhoogte, DBH) met een vrij eenvoudige formule de stamvorm bepaald kan worden. Zij publiceerden vormfuncties die de diameter van een stam bij een gegeven boomhoogte en DBH als functie van de hoogte geven:

$$d = DBH \cdot x^{(a_0 + a_1(z-1) + a_2(\exp^{(a_3 \cdot z)})} \text{ (in cm)}$$

Met daarin:

$$x = (ht - h)/(ht - 1,3)$$

$$z = h/ht$$

ht = boomhoogte (in m)

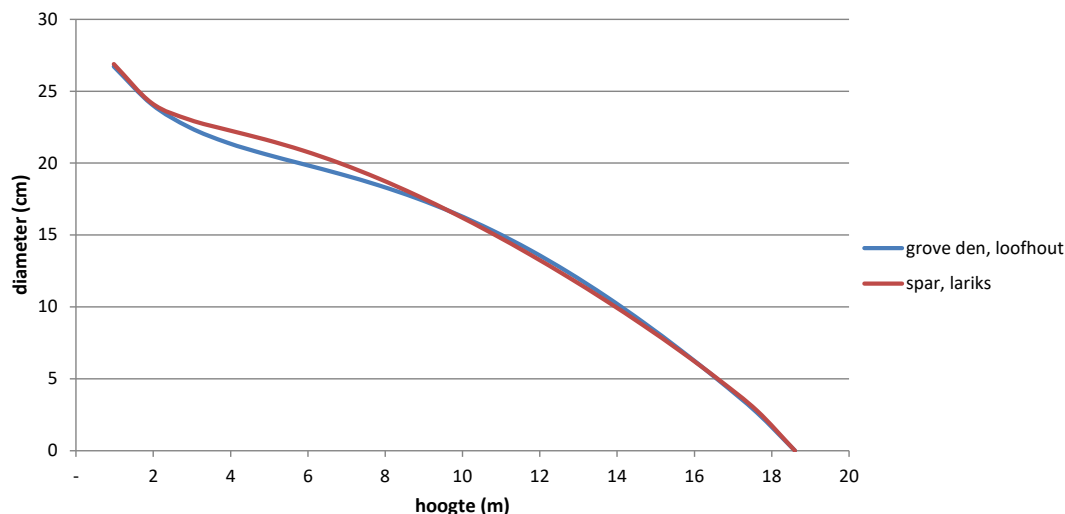
h = hoogte op ingegeven punt (in m)

Fonweban et al. (2011) hebben parameters a_0 t/m a_3 bepaald voor grove den en sitkaspar. Deze lijken ook voor andere boomsoorten de stamvorm vrij goed te beschrijven (vergeleken met bv. Rodríguez et al., 2015). Voor loofhout is uitgegaan van de parameters die Fonweban et al. (2011) berekenden voor grove den. Voor fijnspar, Douglas en lariks is uitgegaan van de parameters voor sitkaspar. De parameters die in deze studie zijn gebruikt zijn weergegeven in tabel B2.2.

Tabel B2.2 Parameters voor de stamvormberekening.

	parameters			
	a0	a1	a2	a3
Grove den, loofhout	0,812	0,6257	2,5258	-5,5031
Douglas, fijnspar, lariks	0,7906	0,2954	3,5997	-11,7161

In figuur B2.4 zijn de vormfuncties als voorbeeld grafisch weergegeven voor $ht=18,6$ en $DBH = 25,7$. Daaruit blijkt dat de verschillen tussen de twee functies relatief klein zijn. De stamvormfuncties en de diameterafhankelijke verdeling van de organen zijn toegepast op de oogst uit dunningen en eindkap, zoals die is aangegeven in de opbrengsttabellen van Janssen et al. (1996). Daarbij is per boomsoort de tabel van de groeiklasse gebruikt die het dichtst bij de mediane bijgroei ligt volgens de gegevens van de zesde Nederlandse bosinventarisatie (Schelhaas et al., 2014). De resultaten zijn weergegeven in tabel B2.3.



Figuur B2.4 Voorbeeld voor gebruikte stamvormen, bij $ht=18,6$ m en $DBH = 25,7$ cm.

Tabel B2.3 Volumeverdeling van organen van stamhout, gemiddeld over de oogst van een omloop.

Boomsort	Spint	Kern	Schors	Spint + kern
Grove den	76%	11%	14%	86%
Douglas	55%	28%	17%	83%
Fijnspar			11%	89%
Lariks	36%	47%	17%	83%
Eik	35%	46%	19%	81%
Beuk			6%	94%
Berk			13%	87%

Massaverdeling van organen van stamhout

De gehalten nutriënten in het hout zijn uitgedrukt in massa nutriënten per drogestofmassa hout (g per kg). In de bosbouwpraktijk is het echter gangbaar om te rekenen met volumes (vers) hout. De belangrijkste opbrengsttabellen drukken groei en oogst uit in volumes, en in ons adviessysteem geven we ook te oogsten volumes aan. Daarom dienen de drogestofmassa's omgerekend te worden naar volumes. Dit gebeurt met het soortelijk gewicht.

Soortelijk gewicht van hout wordt veelal weergegeven als droog gewicht per droog volume. In deze studie zijn de soortelijke (droog)gewichten van het spint- en kernhout gebruikt van www.wood-database.com, en voor schors zijn ze afkomstig van Miles et al. (2009) en Dietz, 1975.

Om drogestofgewicht per droog volume om te rekenen naar droge stof per vers volume, wordt gecorrigeerd voor de krimp van het volume bij het drogen van hout. Deze krimppercentages zijn weergegeven in tabel B2.5 en zijn afkomstig van Miles et al. (2009), Forest Products Laboratory (1957) en www.wood-database.com.

Voor het bepalen van de massa schors per volume vers rondhout is daarnaast ook nog een correctie nodig voor het percentage lege ruimte dat in het als rondhout gemeten volume zit. Deze percentages zijn eveneens weergegeven in tabel B2.4 en zijn afkomstig van Miles et al. (2009). Voor fijnspar werd geen waarde gevonden. De schors van fijnspar is duidelijk minder ruw dan die van de andere naaldhoutsoorten of eik, maar ruwer dan die van beuk, en komt meer overeen met die van bijvoorbeeld es (13-23%) of Amerikaanse eik (11-20%) (Haygreen en Bowyer, 1982). Voor fijnspar is daarom uitgegaan van 15%.

Tabel B2.4 Eigenschappen van hout op basis van [wood-database.com](http://www.wood-database.com), Miles et al. (2009) en Dietz (1975).

Boomsort	soortelijk gewicht		Krimp (%)	Schors leeg % (void)	Soortelijk gewicht droge stof per vers rond volume (kg ds/m3 vers rondhout)
	droge stof per droog volume (kg ds/m3 droog)				
t	spint en kern	schors			totaal
Grove den	550	352	13%	27%	444
Douglas	510	375	12%	27%	413
Fijnspar	405	391	13%	15%*	346
Lariks	538	342	13%	27%	425
Eik	675	480	13%	25%	542
Beuk	710	625	18%	5%	576
Berk	640	562	16%	23%	517

*: geen data: schatting, midden tussen soorten met grove schors en gladde schors.

De uiteindelijk berekende massaverdeling van de organen van stamhout is gegeven in tabel B2.5. Vergelijking van de resultaten met de gegeven volumeverdeling in tabel B2.3 laat zien dat qua massa het kern- en spinthout enkele procenten hoger is dan het volumen terwijl voor schors het omgekeerde geldt.

Tabel B2.5 Massaverdeling van organen van stamhout.

Boomsoort	Spint	Kern	Schors	Stamhout zonder schors (Spint + kern)
Grove den	81%	12%	7%	93%
Douglas	59%	31%	10%	90%
Fijnspar			9%	91%
Lariks	40%	51%	9%	91%
Eik	38%	49%	13%	87%
Beuk			5%	95%
Berk			9%	91%

3 Volume en massaverdelingen van organen van tak- en tophout

Evenals voor stamhout moet voor takhout een weging gemaakt worden tussen de verschillende onderdelen naar een gemiddeld gehalte nutriënten voor takken (C_{tak}).

Grof takhout

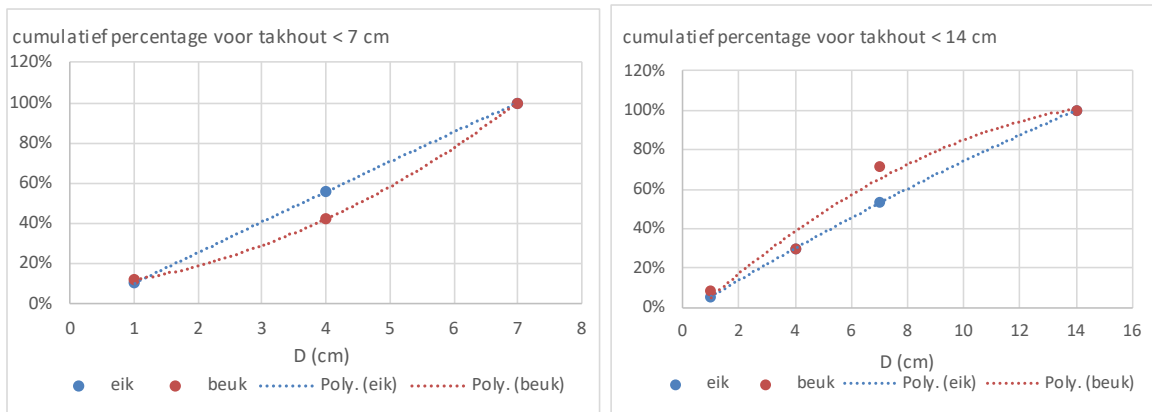
Voor grof takhout is een weging gemaakt van de massa's van hout zonder schors (spint- en kern) en schors. Dit is op dezelfde wijze gebeurd als bij stamhout, met als verschil dat er voor de schors van grove takken niet is gerekend met de factor voor lege ruimte (void), omdat bij het meten van de dikte van de schors steeds de daadwerkelijke laagdikte is gemeten zonder de oneffenheden (leegtes). De volume-aandelen zijn berekend op basis van gemiddelden van in het veld gemeten diktes van takken en schors bij monsternamen en bij aanvullende metingen en zijn weergegeven in tabel B2.6. Voor de soortelijke gewichten van takhout en schors per boomsoort is gerekend met dezelfde soortelijke gewichten zoals gebruikt voor stamhout en schors van stammen.

Tabel B2.6 Volumeverdeling van organen van grof takhout.

Boomsoort	Schors	Spint + kern
Grove den	8%	92%
Douglas	15%	85%
Fijnspar	11%	89%
Lariks	15%	85%
Eik	19%	81%
Beuk	10%	90%
Berk	10%	90%

Weging van grove en fijne takken

Voor de weging van massa's van grove en fijne takken is gebruikgemaakt van literatuurgegevens van André et al. (2010; eik en beuk), Genet et al. (2011; beuk), Christophe et al. (2017; beuk), Husman et al. (2018, beuk, eik), Svoboda et al. (2006; fijnspar) en Grote (2002; fijnspar, beuk). Deze hebben voor verschillende boomsoorten de hoeveelheden biomassa bepaald voor takhout van verschillende diameters. Uit de gegevens van deze auteurs blijkt dat de procentuele verdeling van de biomassa sterk afhankelijk is van de leeftijd van de opstand. Voor het bepalen van het aandeel aan fijne takken is een inschatting gemaakt van de fractie < 2 cm tegen het eind van de omloop, aangezien er in het adviessysteem van uitgegaan wordt dat de oogst van takhout alleen bij de eindvelling plaatsvindt. De verschillende onderzoeken hanteren echter verschillende grenzen tussen verschillende grofheden van het takhout. Het is daarom niet mogelijk om de fractie fijn takhout rechtstreeks af te leiden. Op basis van de gegevens van André et al. (2010) is inzicht verkregen in de (cumulatieve) verdeling van biomassa van takken bij verschillende diktes (figuur B2.5).



Figuur B2.5 Cumulatief aandeel van de biomassa van fijne tot grove takken aan totaal takhout bij verschillende grensdiameters op basis van data uit André et al. (2010).

Er lijkt hier een redelijk rechtlijnig verband te zijn tussen de aftopdiameter en het massa-aandeel, vooral bij eik. Afhankelijk van maximale dikte van het takhout bedraagt het aandeel fijn takhout (< 2 cm) van het totale takhout bij André et al. (2010) naar schatting ca. 14-26% voor eik en 17-19% voor beuk, afhankelijk ook van de maximale takdikte. Husman et al. (2018) komen voor eik op 20% en voor beuk op 15% van de takmassa voor (fijne) takken < 1 cm. Gezien het verband tussen takdikte en cumulatieve massa (figuur B3.1) is de fractie < 2 cm wellicht het dubbele daarvan.

De gegevens uit de literatuur zijn weergegeven in tabel B2.7. Daarbij is ook aangegeven wat het geschatte aandeel van massa van takhout < 2 cm is.

Tabel B2.7 Massa-aandeel fijne takken van totaal takken, en daarbij het geschatte deel takhout < 2 cm, op basis van een rechtlijnig verband tussen takdikte en cumulatief massa-aandeel. Twijg betreft hier het 'bebladerde' deel van de takken.

Bron	Boomsort	Diameteregrens fijn takhout conform auteurs (cm)	Deel biomassa fijne takken/totaal takken volgens auteurs (%)	Geschat deel fijne takken bij grens van < 2 cm (%)
André et al. (2010)	Eik	< 1	5 - 10	14 - 26
André et al. (2010)	Beuk	< 1	8 - 12	17 - 29
Genet et al. (2011)	Beuk	< 4	22 - 44	11 - 22
Christophe et al. (2017)	Beuk (rel. jong)	< 4	49 - 68	25 - 34
Husman et al. (2018)	Eik	< 1	20	40
Husman et al. (2018)	Beuk	< 1	15	30
Grote (2002)	Beuk	'twijg'	35	> 35
Grote (2002)	Fijnspar	'twijg'	26	> 26
Svoboda et al. (2006)	Fijnspar	< 0,5	14 - 21	> 40

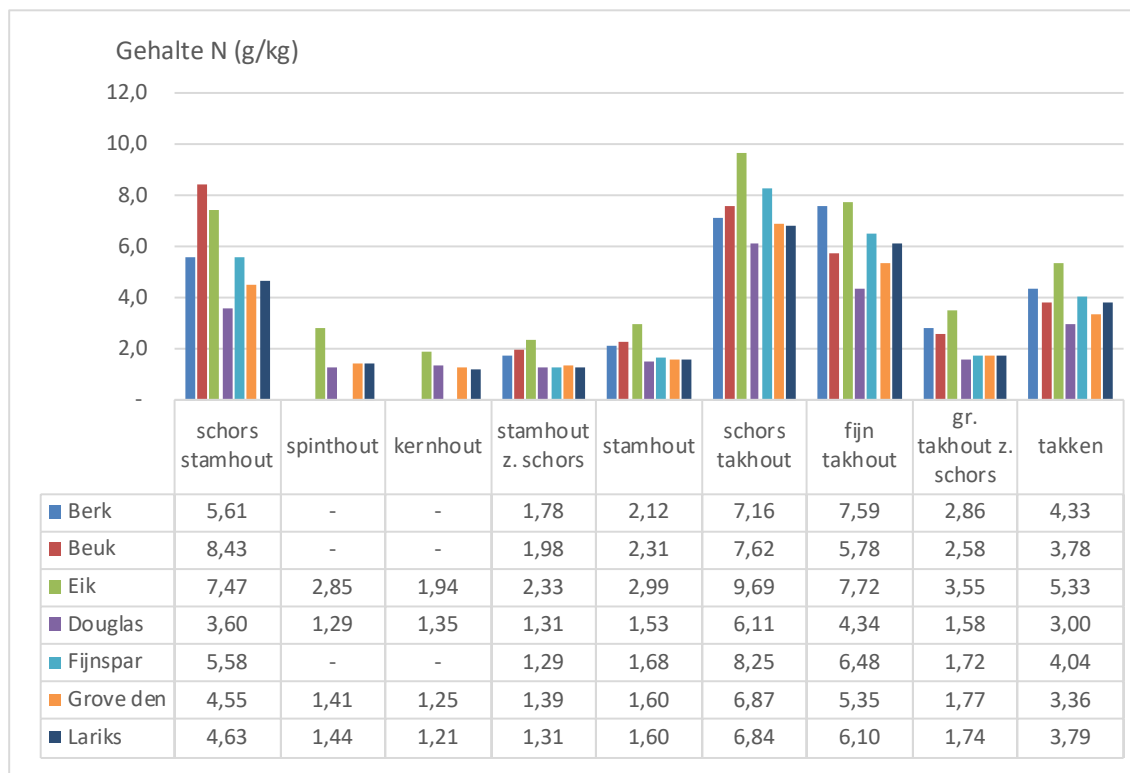
Genet et al. (2011) komen voor beuk voor de fractie takmassa < 4 cm dik op 22-44%. Op basis van het bovenstaande wordt de voorzichtige aanname gemaakt dat het fijne takhout voor loofbomen voor 25% meeweegt in de totale takmassa. Svoboda et al. (2006) komen voor fijnspar voor de fractie < 0,5 cm al op 14-21%, en ook Grote (2002) lijkt voor het fijne takhout van fijnspar aanzienlijk hoger uit te komen dan de fractie fijne takken bij loofhout, aangezien de fractie twijgen (naalddragend hout) al 26% is. Mogelijk speelt hier een rol dat voor veel naalddhout het takhout in het algemeen minder dik is dan bij loofbomen als eik en beuk, die breed uitgroeiende kronen kunnen hebben. De fractie takmassa < 2 cm dik zal naar schatting bij naalddhout aanzienlijk groter zijn dan bij eik en beuk. Op basis van het bovenstaande wordt de voorzichtige aanname gemaakt dat het fijne takhout voor naaldbomen voor 40% meeweegt in de totale takmassa. In tabel B2.8 zijn de gehanteerde fracties/wegingen weergegeven.

Tabel B2.8 Massaverdeling van grof takhout en fijn takhout.

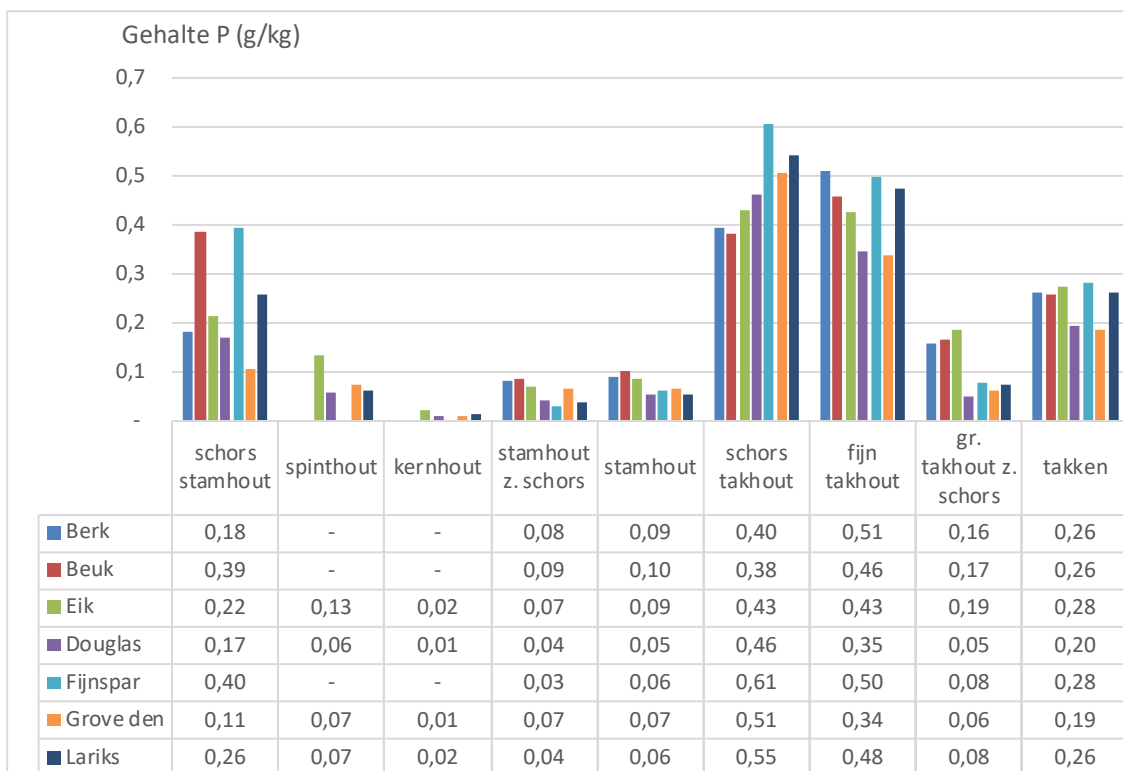
Boom soort	Grof takhout	Fijn takhout
Grove den	60%	40%
Douglas	60%	40%
Fijnspar	60%	40%
Lariks	60%	40%
Eik	75%	25%
Beuk	75%	25%
Berk	75%	25%

Nutriëntgehalten per orgaan

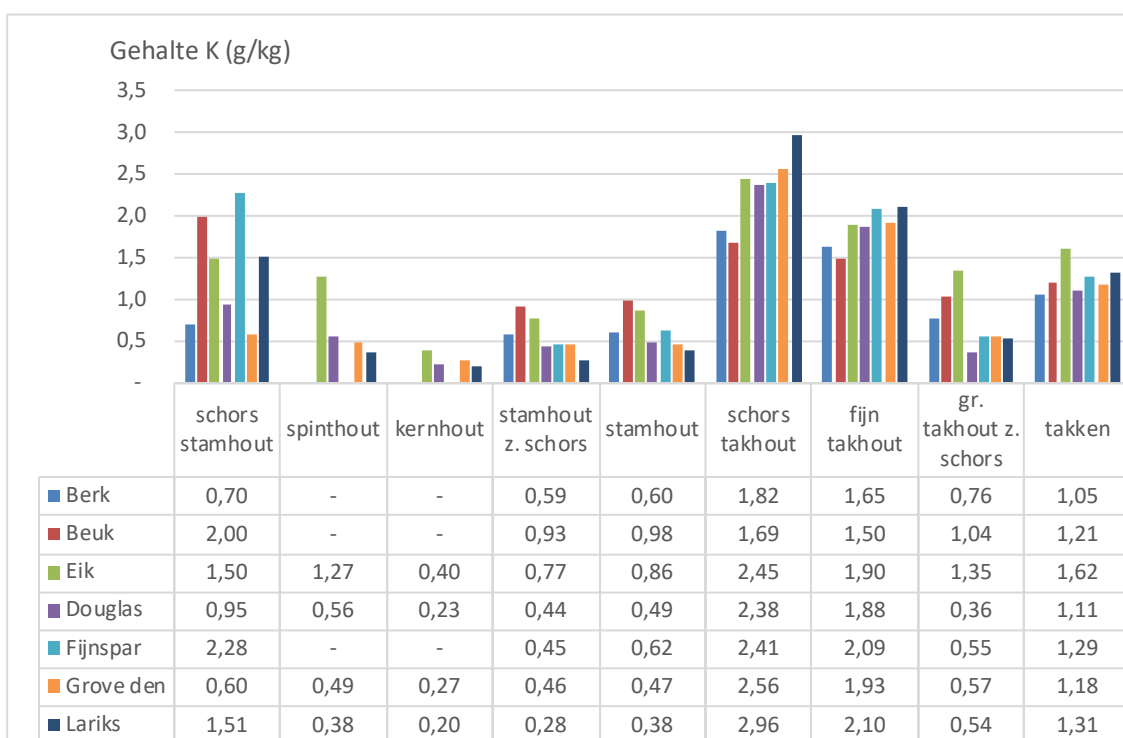
In de onderstaande figuren zijn de resultaten van de lab-analyses weergegeven van de nutriëntgehalten in de organen van stammen (schors stamhout, stamhout zonder schors, kernhout, spinhout) en takken (schors, fijn takhout, grof takhout zonder schors) en daarbij zijn ook de gewogen gemiddelde gehalten van nutriënten in stammen en takken weergegeven. Er zijn opvallende verschillen te zien tussen de verschillende boomsoorten, houtige delen en nutriënten. Voor schors (van stammen) geldt bijvoorbeeld dat de gehalten bij eik, beuk en fijnspar duidelijk hoger zijn dan bij de andere soorten. Calcium is bij deze boomsoorten in schors ook in hogere gehalten aanwezig dan stikstof. Bij het spinhout en kernhout valt op dat de gehalten aan stikstof bij eik hoger zijn dan bij de andere boomsoorten. Overigens zijn de gehalten stikstof bij eik ook hoog in de andere houtige delen, vergeleken met de andere boomsoorten. Helaas kan geen vergelijking gemaakt worden met spint- en kernhout van beuk en berk afzonderlijk. Gezien de stikstofgehalten in hout (spint + kern) van deze twee soorten, lijken de gehalten in eik wel hoger te zijn, maar niet fors hoger. Wat verder opvalt, is dat bij grove den de calcium- en magnesiumgehalten in kernhout hoger zijn dan in spinhout, terwijl dat bij de andere combinaties van boomsoorten en nutriënten andersom of in enkele gevallen gelijk is. Voor stammen als geheel zijn de gehalten van het grootste deel van de nutriënten bij loofboomsoorten hoger dan bij naaldhoutsoorten. Bij schors takhout valt op dat de calciumgehalten bij beuk, eik en vooral fijnspar hoger zijn dan bij de andere boomsoorten (evenals schors stamhout). Bij beuk en berk zijn de kaliumgehalten lager dan bij de overige boomsoorten.



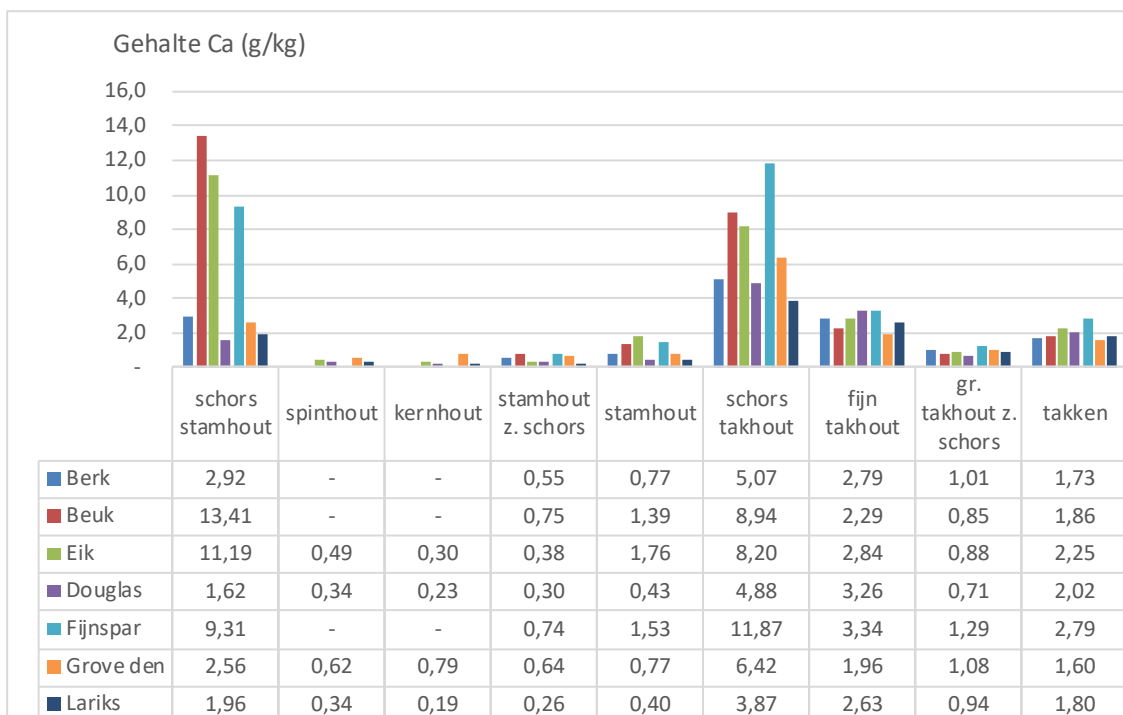
Figuur B2.6 Gemiddelde stikstofgehalten zoals gemeten in organen van stammen (schors stamhout, kernhout, spinhout, stamhout zonder schors) en takken (schors takhout, fijn takhout, grof takhout zonder schors) en zoals berekend voor totaal stammen en takken.



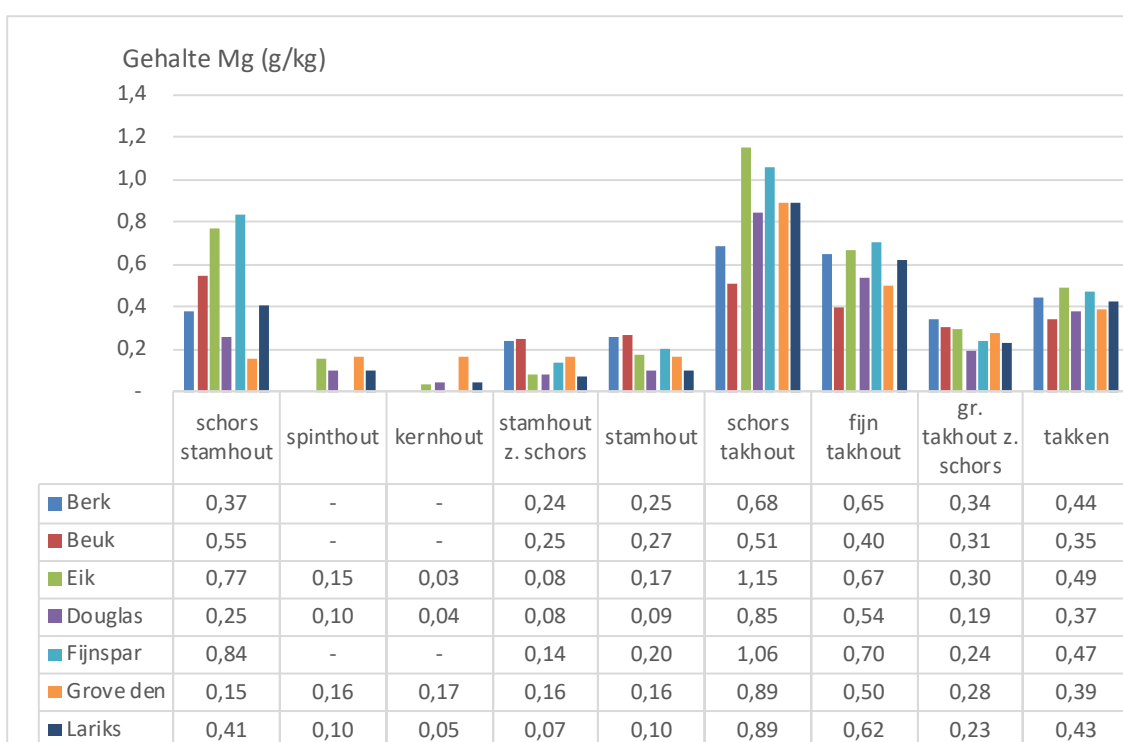
Figuur B2.7 Gemiddelde fosforgehalten zoals gemeten in organen van stammen (schors stamhout, kernhout, spinhout, stamhout zonder schors) en takken (schors takhout, fijn takhout, grof takhout zonder schors) en zoals berekend voor totaal stammen en takken.



Figuur B2.8 Gemiddelde kaliumgehalten zoals gemeten in organen van stammen (schors stamhout, kernhout, spinhout, stamhout zonder schors) en takken (schors takhout, fijn takhout, grof takhout zonder schors) en zoals berekend voor totaal stammen en takken.



Figuur B2.9 Gemiddelde calciumgehalten zoals gemeten in organen van stammen (schors stamhout, kernhout, spinthout, stamhout zonder schors) en takken (schors takhout, fijn takhout, grof takhout zonder schors) en zoals berekend voor totaal stammen en takken.



Figuur B2.10 Gemiddelde magnesiumgehalten zoals gemeten in organen van stammen (schors stamhout, kernhout, spinthout, stamhout zonder schors) en takken (schors takhout, fijn takhout, grof takhout zonder schors) en zoals berekend voor totaal stammen en takken.

Bijlage 3 Verband tussen nutriënt-gehalten in bodem en hout

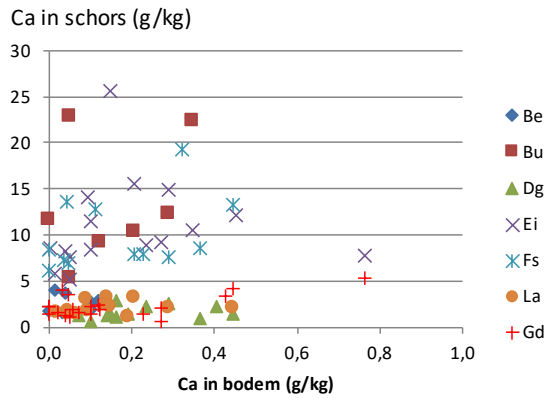
In de voorgaande paragraaf is gebleken dat de nutriëntgehalten in het hout in Nederland af lijken te wijken van die in het buitenland. De eigenschappen van de bodem kunnen daarin een verklarende rol spelen. De monsters van bodem en hout zijn mede daarom op verschillende bodemtypen genomen. Tabel B3.1 geeft de verdeling van monsters over de bodemtypen. Daarbij dient bedacht te worden dat er op een locatie met een (meng)monster voor bodem meerdere boomsoorten bemonsterd kunnen zijn.

Er is onderzocht of de gemeten gehalten aan nutriënten in de bodem een verband hebben met de gemeten gehalten in het hout. In figuur B3.1 t/m figuur B3.6 zijn enkele voorbeelden gegeven van de relaties tussen de gemeten gehalten in de bovenste 30 cm van de bodem en die in schors van stammen, spinhout van stammen, fijne takken en grove takken. Er is geen duidelijk verband gevonden worden tussen de gehalten in bodem en hout.

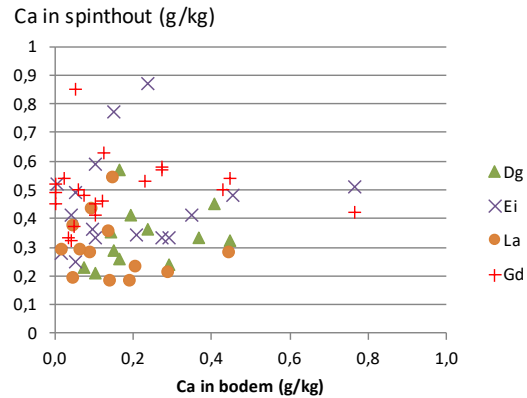
Ook is er gekeken of de nutriëntgehalten tussen de arme, matig rijke en rijke bodems van elkaar verschillen (figuur B3.7 t/m figuur B3.10). Aan de ene kant zijn de verschillen hiertussen statistisch niet significant doordat de variatie aan gehalten betrekkelijk groot blijkt te zijn. Daarnaast blijkt ook dat de gemiddelde gehalten per boomsoort, boomonderdeel en nutriënt niet steeds in een bepaalde richting af te wijken; bij sommige combinaties zijn de gehalten op een matige of rijke bodem gemiddeld hoger dan in een op een arme, bij andere combinaties is dit andersom. Vaak zijn de verschillen tussen de gemiddelden betrekkelijk klein.

Tabel B3.1 Aantal monsters per combinatie van boomsoort en bodem. Y30 en zEZ30 zijn hier bij matig ingedeeld, hoewel die – als ze lemig zijn – tot de rijke bodems behoren.

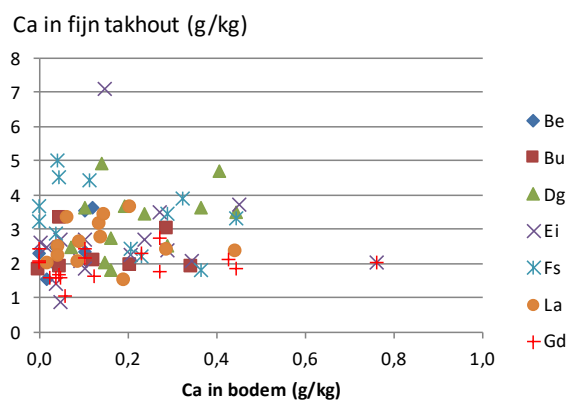
bodemklasse en -type	Boomsoort							Totaal
	Berk	Beuk	Douglas	Eik	Fijnspar	Grove den	Lariks	
Arm	7	2	6	12	7	11	11	56
Hd21	1	1	1	2	1	1	1	8
Hd30			1			1		2
Hn21	3		2	4	5	5	8	27
Zd21	1			3		2	1	7
Zn21	2	1	2	3	1	2	1	12
Matig	4	5	5	8	7	9	6	44
cHn21	2			2		2		6
cZd31							1	1
Hd23						1		1
Hn23					1	1		2
Hn23x	1			1				2
Y21		2	1	2	1	2	1	9
Y30		3	2	3	3	2	3	16
zEZ21			1		1			2
zEZ30			1				1	2
zWp	1				1	1		3
Rijk			1		1	1	1	4
Y23			1		1	1	1	4
Totaal	11	7	12	20	15	21	18	104



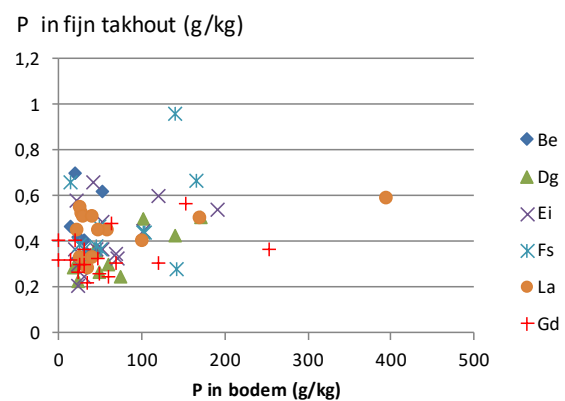
Figuur B3.1 Verband tussen de gehalten van calcium in de bodem (0-30 cm) en in schors van stammen.



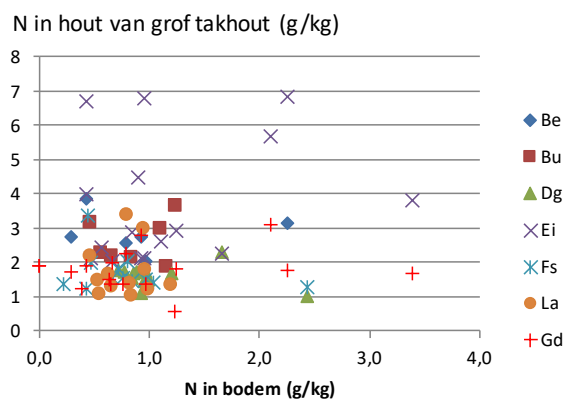
Figuur B3.2 Verband tussen de gehalten van calcium in de bodem (0-30 cm) en in spinthout.



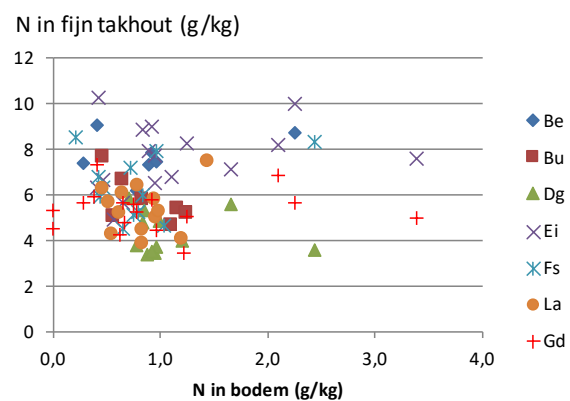
Figuur B3.3 Verband tussen de gehalten van calcium in de bodem (0-30 cm) en in fijne takken.



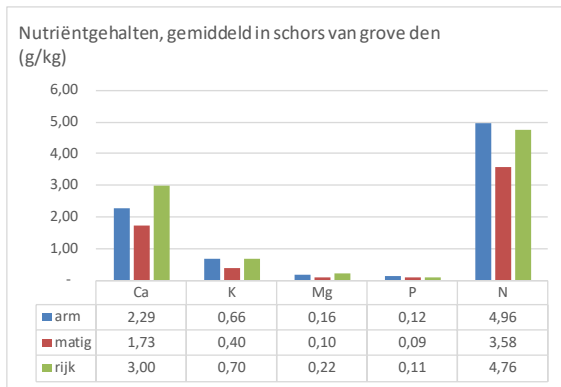
Figuur B3.4 Verband tussen de gehalten van fosfor in de bodem (0-30 cm) en in fijne takken.



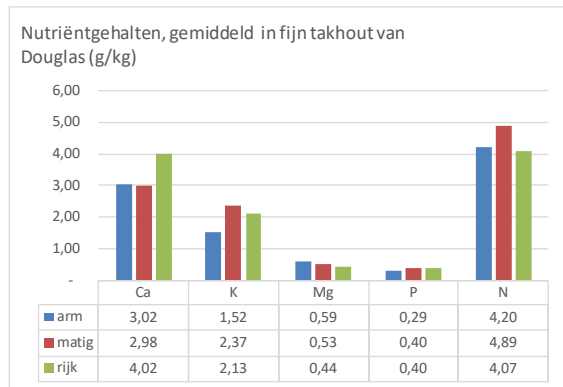
Figuur B3.5 Verband tussen de gehalten van stikstof in de bodem (0-30 cm) en in hout van grove takken.



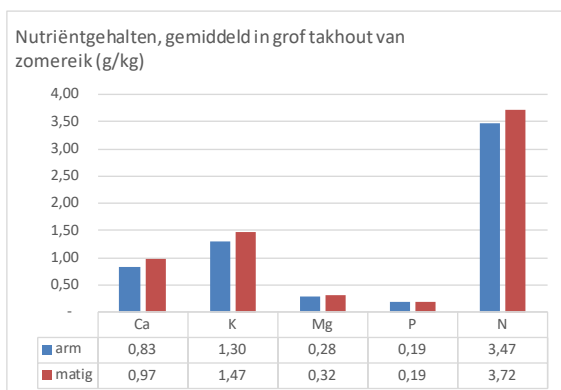
Figuur B3.6 Verband tussen de gehalten van stikstof in de bodem (0-30 cm) en in fijne takken.



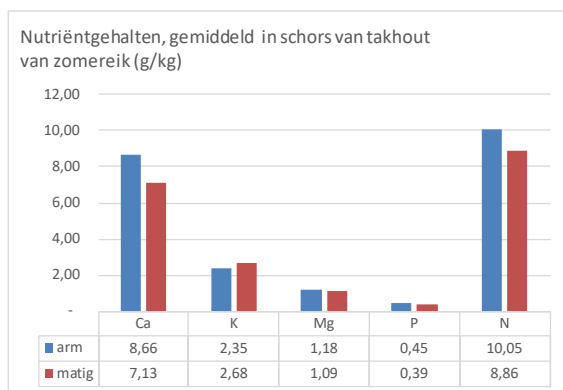
Figuur B3.7 Nutriëntgehalten, gemiddeld in schors van grove den voor arme, matig rijke en (een) rijke bodem.



Figuur B3.8 Nutriëntgehalten, gemiddeld in fijn takhout van Douglas voor arme, matig rijke en (een) rijke bodem.



Figuur B3.9 Nutriëntgehalten, gemiddeld in grof takhout van eik voor arme en matig rijke bodem.



Figuur B3.10 Nutriëntgehalten, gemiddeld in schors van grof takhout van eik voor arme en matig rijke bodem.

Bijlage 4 Bemonstering ondiep grondwater

In november 2017 en april 2018 zijn in vier bosgebieden (Leersum, Mastbos Breda, Ruinen en Hardenberg) op achttien plekken (zie tabel B4.1) met relatief ondiep grondwater monsters genomen van grondwater op ongeveer 1 m onder maaiveld. Daarbij zijn in het najaar van 2017 ook monsters genomen van vier bodemlagen. Het doel hiervan was om een beter inzicht te krijgen in het verlies van nutriënten uit de bovenste bodemlaag die voor bomen relevant is. In het najaar van 2017 is op alle meetpunten steeds één watermonster genomen en in het voorjaar van 2018 zijn op ieder punt steeds drie monsters genomen op enkele meters van elkaar. Dit is gedaan om meer inzicht te krijgen in de ruimtelijke variatie in de gehalten.

Tabel B4.1 Boomsoort en bodem van de bemonsterde bosgebieden.

Bosgebied	Hoofd boomsoort	bodemcode kaart 1:50.000	Klasse rijkdom	Detail-bodemkaart boswachterij	Bodemomschrijving detailkaart
Leersum1	grove den	Zn21	arm	bZ51vd	stuifzand, overstoven, zeer en matig humusarm matigfijn zand veen
Leersum2	eik	Hn21	arm	bZ51pd	stuifzand, overstoven, matig en zeer humusarm matigfijn zand leemarm
Leersum3	grove den	Hn21	arm	bZ51pd	stuifzand, overstoven, matig en zeer humusarm matigfijn zand leemarm
Leersum4	grove den	cHn21	matig	cZ51vd	stuifzand, overstoven, matig humusarm en matig humeus fijn zand veen
Mastbos1	Douglas	Hn21	arm	tZn34	Goordeerd, zwak en sterk lemig fijnzand
Mastbos2	grove den	cHn21	matig	tZn34	Goordeerd, zwak en sterk lemig fijnzand
Mastbos3	Am. eik	Hn21	arm	vWp	Moerpodzol, zanddek met minerale eerdlaag op moerige tussenlaag
Mastbos4	berk	Hn21	arm	Hn42	Veldpodzol, leemarm en zwak lemig, zeer en matig fijn zand
Mastbos5	Jap. lariks	Hn21	arm	tZn34	Goordeerd, zwak en sterk lemig fijnzand
Mastbos6	grove den	zWp/Hn21	arm	Hn34	veldpodzol, zwak en sterk lemig fijnzand
Ruinen1	fijnspar	Hn21	arm	Hn43x	Veldpodzol met keileem, zwak lemig zeer en matig fijn zand, <30 cm bovengrond
Ruinen3	Am. eik	Hn21	arm	Hn43x	Veldpodzol met keileem, zwak lemig zeer en matig fijn zand, <30 cm bovengrond
Hardenberg1	eik	Zd21	arm	Z42 / bZ51z	bZ51z: dekzand zonder podzolprofiel, zeer en matig humusarm, matig fijn zand leemarm
Hardenberg2	eik	Zn21	arm	Z42	Afgestoven vaaggrond, zeer en matig fijn, leemarm en zwak lemig
Hardenberg3	beuk	Zn21	arm	Z42	Afgestoven vaaggrond, zeer en matig fijn, leemarm en zwak lemig
Hardenberg4	Douglas	Zn21	arm	vWp / Hd51	moerpodzol / haarpodzol matig fijn zand, leemarm
Hardenberg5	grove den	Zn21	arm	bZ51	stuifzand, matig fijn zand, leemarm en zwak lemig, zeer en matig humusarm

De monsternamen zijn als volgt uitgevoerd: met een edelmanboor is een boring uitgevoerd tot iets onder het grondwaterniveau. Vervolgens is het grondwaterpeil opgemeten met een klokje bevestigd aan een meetlint. Daarna is er een pvc-buis met filter (0,45 micron poriën) geplaatst, waarna het meetpunt ten minste een uur met rust is gelaten. Vervolgens is grondwater opgezogen (figuur B4.1). Er werd gezogen totdat er helder water aangezogen werd, en pas daarna werd het opgezogen water daadwerkelijk afgenomen.

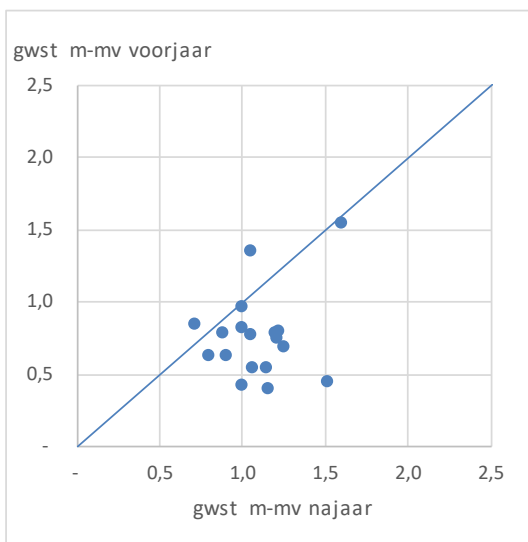


Figuur B4.1 Opzuigen van grondwater.

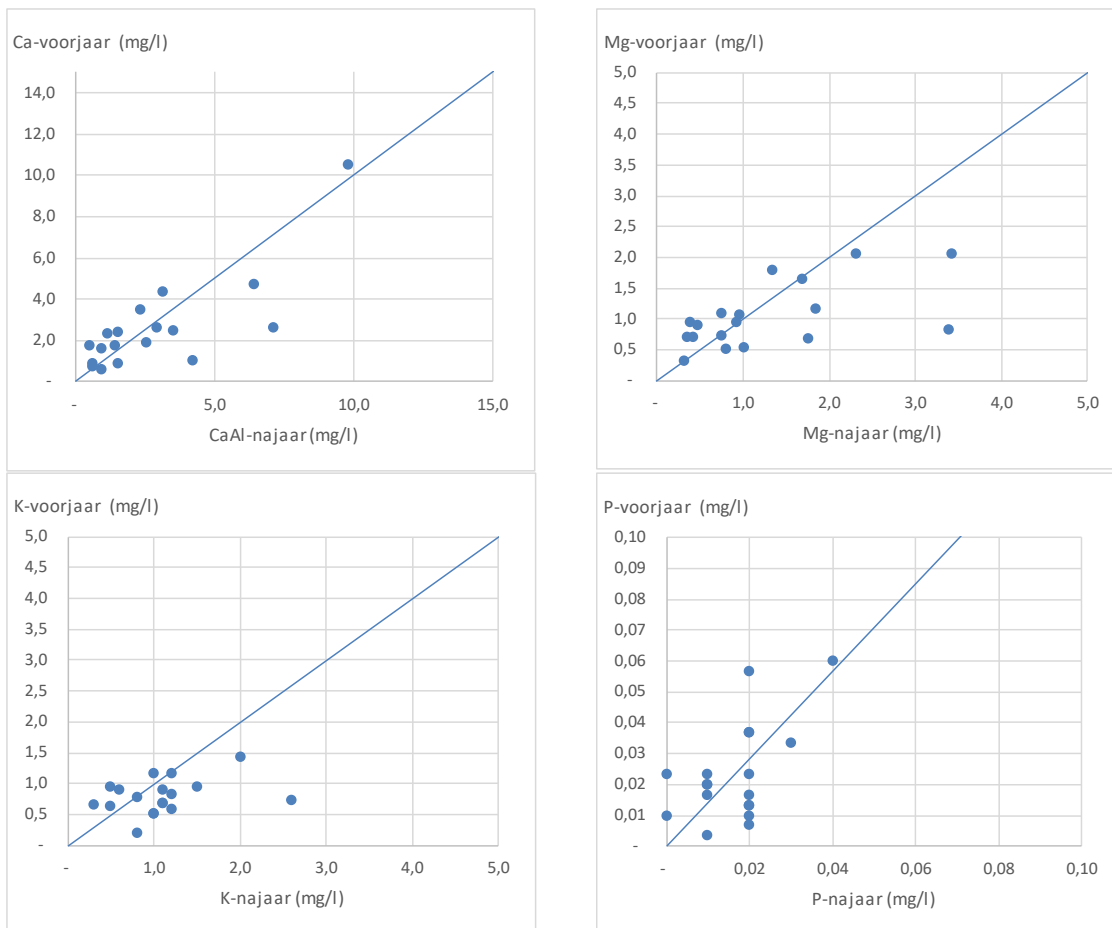
Voor de bodemonsters zijn van de strooisellaag en de lagen van 0-10 cm en 10-30 cm onder maaiveld steeds 10 submonsters genomen die samen per laag een mengmonster vormen. Op ca. 0,8 m diepte is steeds een monster genomen van het boorgat dat gemaakt is voor het nemen van het grondwatermonster.

De monsters zijn in het lab van Wageningen University & Research aangezuurd tot 0,14 M HNO₃ voor het bepalen van de metalen en P en S. Daarna zijn de gehalten van de verschillende elementen in de oplossingen bepaald door middel van meting met de ICP-AES (Varian Vista).

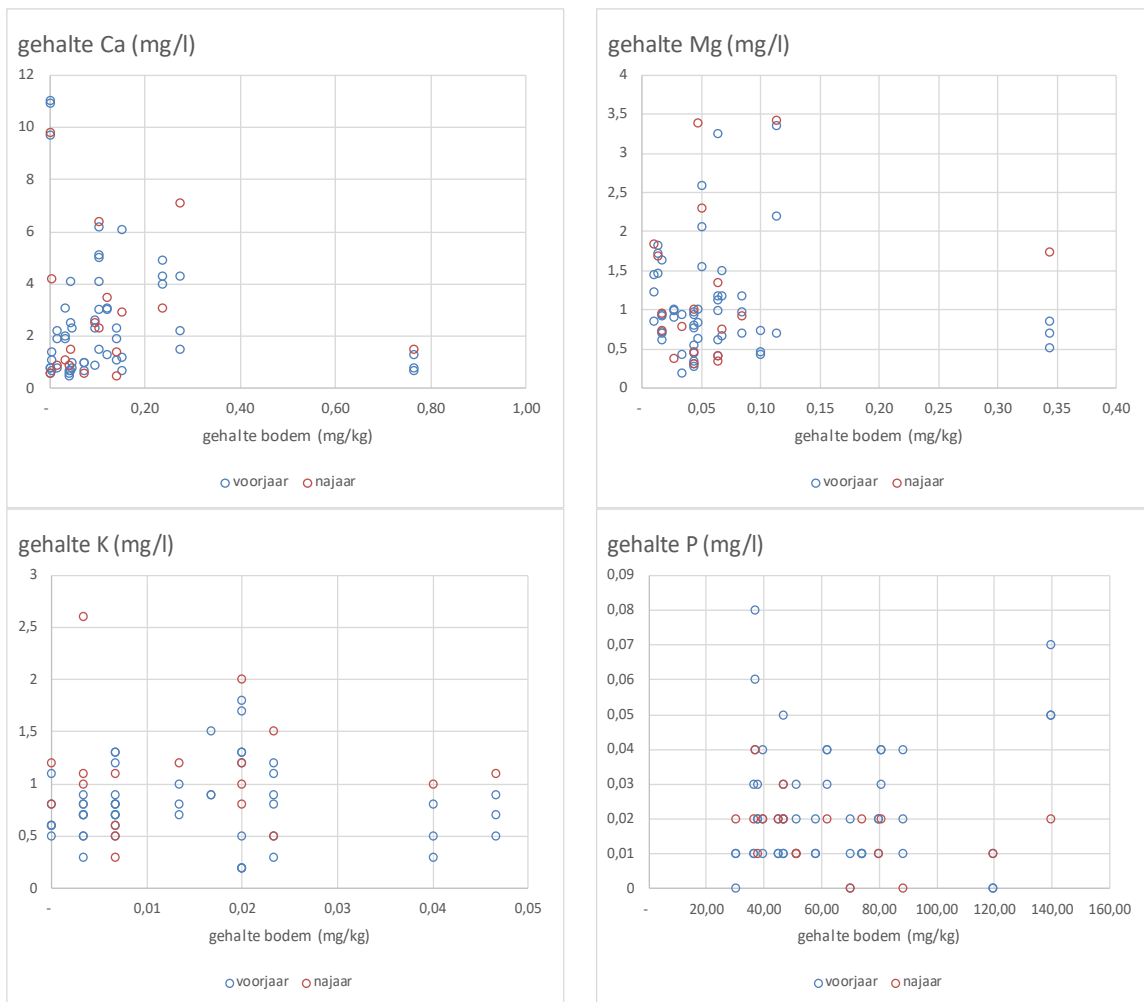
De grondwatermonsters zijn in het najaar op een diepte van rond 1,1 m onder maaiveld genomen, maar in het voorjaar was de grondwaterstand op diverse locaties minder diep: 0,8 m onder maaiveld (figuur B4.2). In het algemeen waren de verschillen tussen de gemiddelde gehalten in het najaar en voorjaar betrekkelijk klein. Een uitzondering is het gehalte kalium, dat in het voorjaar duidelijk lager (-26%) was dan in het najaar (figuur B4.3). Er werd ook geen verband gevonden tussen de gehalten in de bovenste 30 cm van de bodem en die in het grondwater (figuur B4.4). De figuur laat echter wel zien dat de spreiding in gemeten gehalten – ook op een locatie – aanzienlijk kunnen zijn. Dit onderstreept het belang van het nemen van een groot aantal monsters om betrouwbare uitspraken te kunnen doen.



Figuur B4.2 Grondwater in het najaar en het voorjaar op de achttien bemonsterde locaties, in meters onder maaiveld.



Figuur B4.3 Gehalten Ca, K, Mg en P in het grondwater in het najaar en het voorjaar op de achttien bemonsterde locaties.



Figuur B4.4 Gehalten Ca, K, Mg en P in het grondwater in het voorjaar en najaar en de gewogen gemiddelde gehalten van de bodem van 0-30 cm onder maaiveld, voor achttien bemonsterde locaties.

Bijlage 5 Het adviessysteem

In deze bijlage staan zowel de tabellen uit adviessysteem 1.0 zoals opgenomen in de brochure als de tabellen op basis van de herziene gehalten in hout en de nieuwe P-concentraties in grondwater (adviesstelsel 1.1). In de tabellen wordt per toelaatbare oogstniveau ($m^3 ha^{-1} jr^{-1}$) aangegeven of er een beperking is van Ca, K, Mg en/of P (tussen haakjes wordt het element benoemd dat de limiterende afvoer is) bij een nutriëntenbalans in evenwicht voor twee oogstscenario's: (i) alleen stamhout en (ii) stamhout en takhout bij dunning en eindvelling. De huidige afvoer wordt niet opgegeven, maar is veelal bekend bij de beheerder.

Noord-Nederland

Tabel B5.1 Balans bij oogst alleen stamhout in Noord-Nederland.

Grondsoort	Arme zandgronden			Matig arme zandgronden			Rijke zandgronden		
	4	7	11	4	7	11	4	7	11
Berk	P	Ca K P	nvt	P	Ca P	nvt	P	P	nvt
Beuk	K P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	Ca K P	P	Ca K P	Ca K P
Eik	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt
Douglas			K P			K P			K P
Fijnspar		Ca	Ca K P			Ca K P			Ca P
Grove den		P	nvt		P	nvt		P	nvt
Lariks	P	P	P	P	P	P	P	P	P

Nieuw:

Grondsoort	Arme zandgronden			Matig arme zandgronden			Rijke zandgronden		
	4	7	11	4	7	11	4	7	11
Berk		K P	nvt		P	nvt		P	nvt
Beuk	K P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	Ca K P	P	Ca K P	Ca K P
Eik		Ca K P	nvt		Ca K P	nvt		Ca K P	nvt
Douglas			K			K			P
Fijnspar			Ca K			Ca K			Ca P
Grove den		P	nvt		P	nvt		P	nvt
Lariks			P			P			P

Tabel B5.2 Balans bij oogst stamhout en tak- en top hout bij eindkap in Noord-Nederland.

Grondsoort	Arme zandgronden			Matig arme zandgronden			Rijke zandgronden		
	4	7	11	4	7	11	4	7	11
Berk	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt
Beuk	K P	Ca K P	nvt	K P	Ca K P	Ca K P	P	Ca K P	Ca K P
Eik	Ca P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt
Douglas	P	K P	Ca K P	P	K P	Ca K P	P	K P	K P
Fijnspar	P	Ca K P	Ca K P	P	Ca K P	Ca K P	P	Ca P	Ca K P
Grove den	P	K P	nvt	P	P	nvt	P	P	nvt
Lariks	P	P	K P	P	P	K P	P	P	K P

Nieuw:

Grondsoort	Arme zandgronden			Matig arme zandgronden			Rijke zandgronden		
	4	7	11	4	7	11	4	7	11
Berk	P	K P	nvt	P	K P	nvt	P	K P	nvt
Beuk	K P	Ca K P	nvt	K P	Ca K P	Ca K P	P	Ca K P	Ca K P
Eik	Ca P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt
Douglas		K P	K P		K P	K P		K P	K P
Fijnspar		Ca K P	Ca K P		Ca K P	Ca K P		Ca P	Ca K P
Grove den		K P	nvt		P	nvt		P	nvt
Lariks		P	K P		P	K P		P	P

Oost-Nederland

Tabel B5.3 Balans bij oogst alleen stamhout in Oost-Nederland.

Grondsoort Oogstniveau (m ⁻³ ha ⁻¹ jr ⁻¹)	Arme zandgronden			Matig arme zandgronden			Rijke zandgronden		
	4	7	11	4	7	11	4	7	11
Berk	P	Ca K P	nvt	P	P	nvt	P	P	nvt
Beuk	K P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	Ca K P	P	Ca K P	Ca K P
Eik	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt
Douglas			K P			K P			K P
Fijnspar			Ca K P			Ca P			Ca P
Grove den		P	nvt		P	nvt		P	nvt
Lariks		P	P		P	P		P	P

Nieuw:

Grondsoort Oogstniveau	Arme zandgronden			Matig arme zandgronden			Rijke zandgronden		
	4	7	11	4	7	11	4	7	11
Berk		K P	nvt		P	nvt	P	P	nvt
Beuk		Ca K P	nvt		Ca K P	Ca K P		Ca K P	Ca K P
Eik		Ca K P	nvt		Ca K P	nvt		Ca K P	nvt
Douglas			K						
Fijnspar			Ca K			Ca K			Ca
Grove den			nvt			nvt			nvt
Lariks			P			P			P

Tabel B5.4 Balans bij oogst stamhout en bij eindkap tak- en tophout in Oost-Nederland.

Grondsoort Oogstniveau (m ⁻³ ha ⁻¹ jr ⁻¹)	Arme zandgronden			Matig arme zandgronden			Rijke zandgronden		
	4	7	11	4	7	11	4	7	11
Berk	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt
Beuk	K P	Ca K P	nvt	K P	Ca K P	Ca K P	P	Ca K P	Ca K P
Eik	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt
Douglas	P	K P	Ca K P	P	K P	K P	P	K P	K P
Fijnspar		Ca K P	Ca K P		Ca P	Ca K P		Ca P	Ca K P
Grove den	P	P	nvt	P	P	nvt	P	P	nvt
Lariks	P	P	K P	P	P	K P	P	P	P

Nieuw:

Grondsoort Oogstniveau	Arme zandgronden			Matig arme zandgronden			Rijke zandgronden		
	4	7	11	4	7	11	4	7	11
Berk		K P	nvt		K P	nvt		P	nvt
Beuk	K P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	Ca K P	P	Ca K P	Ca K P
Eik	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt
Douglas		K P	K P		K P	K P		P	K P
Fijnspar		Ca K P	Ca K P		Ca P	Ca K P		P	Ca K P
Grove den		P	nvt		P	nvt		P	nvt
Lariks		P	K P		P	K P		P	P

Midden-Nederland

Tabel B5.5 Balans bij oogst alleen stamhout in Midden-Nederland.

Grondsoort Oogstniveau (m ⁻³ ha ⁻¹ jr ⁻¹)	Arme zandgronden			Matig arme zandgronden			Rijke zandgronden		
	4	7	11	4	7	11	4	7	11
Berk	P	Ca K P	nvt	P	P	nvt	P	P	nvt
Beuk	K P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	Ca K P	P	Ca K P	Ca K P
Eik	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt
Douglas		P	K P		P	K P		P	K P
Fijnspar			Ca K P			Ca K P			Ca P
Grove den	P	P	nvt	P	P	nvt	P	P	nvt
Lariks	P	P	P	P	P	P	P	P	P

Nieuw:

Grondsoort Oogstniveau	Arme zandgronden			Matig arme zandgronden			Rijke zandgronden		
	4	7	11	4	7	11	4	7	11
Berk		K P	nvt		P	nvt		P	nvt
Beuk	K P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	Ca K P	P	Ca K P	Ca K P
Eik		Ca K P	nvt		Ca K P	nvt		Ca K P	nvt
Douglas			K P			K P			P
Fijnspar			Ca K P			Ca K P			Ca P
Grove den		P	nvt		P	nvt		P	nvt
Lariks			P			P			P

Tabel B5.6 Balans bij oogst stamhout en bij eindkap tak- en tophout in Midden-Nederland.

Grondsoort Oogstniveau (m ⁻³ ha ⁻¹ jr ⁻¹)	Arme zandgronden			Matig arme zandgronden			Rijke zandgronden		
	4	7	11	4	7	11	4	7	11
Berk	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt
Beuk	K P	Ca K P	nvt	K P	Ca K P	Ca K P	P	Ca K P	Ca K P
Eik	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt
Douglas	P	K P	K P	P	K P	K P	P	K P	K P
Fijnspar	P	Ca K P	Ca K P	P	Ca K P	Ca K P	P	P	Ca K P
Grove den	P	K P	nvt	P	P	nvt	P	P	nvt
Lariks	P	P	K P	P	P	K P	P	P	K P

Nieuw:

Grondsoort Oogstniveau	Arme zandgronden			Matig arme zandgronden			Rijke zandgronden		
	4	7	11	4	7	11	4	7	11
Berk	P	K P	nvt	P	K P	nvt	P	K P	nvt
Beuk	K P	Ca K P	nvt	K P	Ca K P	Ca K P	P	Ca K P	Ca K P
Eik	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt
Douglas		K P	K P		K P	K P		K P	K P
Fijnspar		Ca K P	Ca K P		K P	Ca K P		P	Ca K P
Grove den		K P	nvt		P	nvt		P	nvt
Lariks		P	K P		P	K P		P	P

Zuid-Nederland

Tabel B5.7 Balans bij oogst alleen stamhout in Zuid-Nederland.

Grondsoort Oogstniveau (m ⁻³ ha ⁻¹ jr ⁻¹)	Arme zandgronden			Matig arme zandgronden			Rijke zandgronden		
	4	7	11	4	7	11	4	7	11
Berk	P	Ca K P	nvt	P	P	nvt	P	P	nvt
Beuk	K P	Ca K P	nvt	K P	Ca K P	Ca K P	P	Ca K P	Ca K P
Eik	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt
Douglas			K P			K P			K P
Fijnspar			Ca K			Ca K			Ca
Grove den		P	nvt		P	nvt		P	nvt
Lariks		P	P		P	P		P	P

Nieuw:

Grondsoort Oogstniveau (m ⁻³ ha ⁻¹ jr ⁻¹)	Arme zandgronden			Matig arme zandgronden			Rijke zandgronden		
	4	7	11	4	7	11	4	7	11
Berk		K P	nvt		P	nvt		P	nvt
Beuk	K	Ca K P	nvt		Ca K P	Ca K P		Ca K P	Ca K P
Eik		Ca K P	nvt		Ca K P	nvt		Ca K P	nvt
Douglas			K			K			
Fijnspar			Ca K			Ca K			Ca K
Grove den			nvt			nvt			nvt
Lariks			P			P			P

Tabel B5.8 Balans bij oogst stamhout en bij eindkap tak- en tophout in Zuid-Nederland.

Grondsoort Oogstniveau (m ⁻³ ha ⁻¹ jr ⁻¹)	Arme zandgronden			Matig arme zandgronden			Rijke zandgronden		
	4	7	11	4	7	11	4	7	11
Berk	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt
Beuk	K P	Ca K P	nvt	K P	Ca K P	Ca K P	K P	Ca K P	Ca K P
Eik	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt
Douglas		K P	K P		K P	K P		K P	K P
Fijnspar		Ca K P	Ca K P		Ca K P	Ca K P		Ca P	Ca K P
Grove den	P	K P	nvt	P	P	nvt	P	P	nvt
Lariks	P	P	K P	P	P	K P	P	P	K P

Nieuw:

Grondsoort Oogstniveau (m ⁻³ ha ⁻¹ jr ⁻¹)	Arme zandgronden			Matig arme zandgronden			Rijke zandgronden		
	4	7	11	4	7	11	4	7	11
Berk		K P	nvt		K P	nvt	P	K P	nvt
Beuk	K	Ca K P	nvt	K	Ca K P	Ca K P	P	Ca K P	Ca K P
Eik	K	Ca K P	nvt		Ca K P	nvt	P	Ca K P	nvt
Douglas		K P	K P		K P	K P		K P	K P
Fijnspar		Ca K P	Ca K P		K P	Ca K P		P	Ca K P
Grove den		K P	nvt		P	nvt	P	P	nvt
Lariks			K P			K P	P	P	K P

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

Wageningen Environmental Research
Rapport 2923
ISSN 1566-7197

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 5.000 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.



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



Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AB Wageningen
T 317 48 07 00
www.wur.nl/environmental-research

Rapport 2923
ISSN 1566-7197

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 5.000 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

