

SimForTree

Een beleidsondersteunend computermodel voor duurzaam bosbeheer gebaseerd op ecofysiologische analyse en simulatie van boomontwikkeling.

Eindrapport van de activiteiten over de periode 2007-2010

Uitvoerend onderzoeksconsortium

Universiteit Antwerpen, Departement Biologie, Onderzoeksgroep Planten- en Vegetatie-ecologie, Universiteitsplein 1, 2610 Wilrijk. T: 03/265.2256 – fax: 03/265.2271. Prof. Reinhart Ceulemans, *coördinator en contact*.

Universiteit Gent, Faculteit Bioingenieurswetenschappen, Vakgroep Bos- en Waterbeheer, Coupure Links 653, 9000 Gent. Prof. Joris Van Acker.

Katholieke Universiteit Leuven, Departement Aard- en Omgevingswetenschappen, Onderzoeksgroep Ecologie en Beheer van Bossen, Celestijnenlaan 200^E, 3001 Leuven. Prof. Bart Muys.

Datum: 28 februari 2011

Gedrukt op 200 ex.

Citeren als:

Kint V., Deckmyn G., Campioli M., Vansteenkiste D., Aertsen W., Bequet R., Van Acker J., Muys B., Ceulemans R. (2011). Een beleidsondersteunend computermodel voor duurzaam bosbeheer gebaseerd op ecofysiologische analyse en simulatie van boomontwikkeling. Eindrapport SimForTree project #060032, IWT-SBO.

Woord vooraf

Bij de redactie van dit eindrapport hebben de uitvoerende projectpartners er voor geopteerd om een toegankelijk, vlot leesbaar document te maken dat bruikbaar is voor de potentiële eindgebruikers, met name de verschillende actoren in de sectoren van boseducatie, bosbeheer, landschapsplanning, en andere. Dit eindrapport kan vrij van de website van het project worden afgeladen en gelezen door alle mogelijke geïnteresseerden, met of zonder specifieke achtergrond in het betrokken vakgebied. Doorheen het rapport wordt op verschillende plaatsen verwezen naar meer gespecialiseerde documenten, doorgaans annexen of vakpublicaties, waarin methodes en resultaten meer in detail worden beschreven en besproken. Deze documenten worden enkel op digitale wijze ter beschikking gesteld, hetzij via de website, hetzij op aanvraag bij de auteurs.

De uitvoerende projectpartners wensen uitdrukkelijk hun dank te betuigen aan alle personen en instanties die de uitvoering van het project mee hebben ondersteund, d.w.z. alle leden van de gebruikerscommissie; de regiobeheerders en boswachters van het Agentschap voor Natuur en Bos voor de toestemming tot metingen en voor de geleverde expertkennis; het KMI en het KNMI voor de ter beschikking gestelde klimaatgegevens; alle technische en administratieve medewerkers van de drie uitvoerende onderzoeksgroepen in Antwerpen, Gent en Leuven.

Uitvoerend onderzoek consortium

Universiteit Antwerpen, Departement Biologie, Onderzoeksgroep Planten- en Vegetatie-ecologie, Universiteitsplein 1, 2610 Wilrijk. Tel.: 03/265.2256 – fax: 03/265.2271. Prof. Reinhart Ceulemans, coördinator en contact.

Universiteit Gent, Faculteit Bioingenieurswetenschappen, Vakgroep Bos- en Waterbeheer, Coupure Links 653, 9000 Gent. Prof. Joris Van Acker.

Katholieke Universiteit Leuven, Departement Aard- en Omgevingswetenschappen, Onderzoeksgroep Ecologie en Beheer van Bossen, Celestijnenlaan 200^E, 3001 Leuven. Prof. Bart Muys.

Wijze van citeren: Kint V., Deckmyn G., Campioli M., Vansteenkiste D., Aertsen W., Bequet R., Van Acker J., Muys B., Ceulemans R. (2011). Een beleidsondersteunend computermodel voor duurzaam bosbeheer gebaseerd op ecofysiologische analyse en simulatie van boomontwikkeling. Eindrapport SimForTree project #060032, IWT-SBO.

1. Inleiding

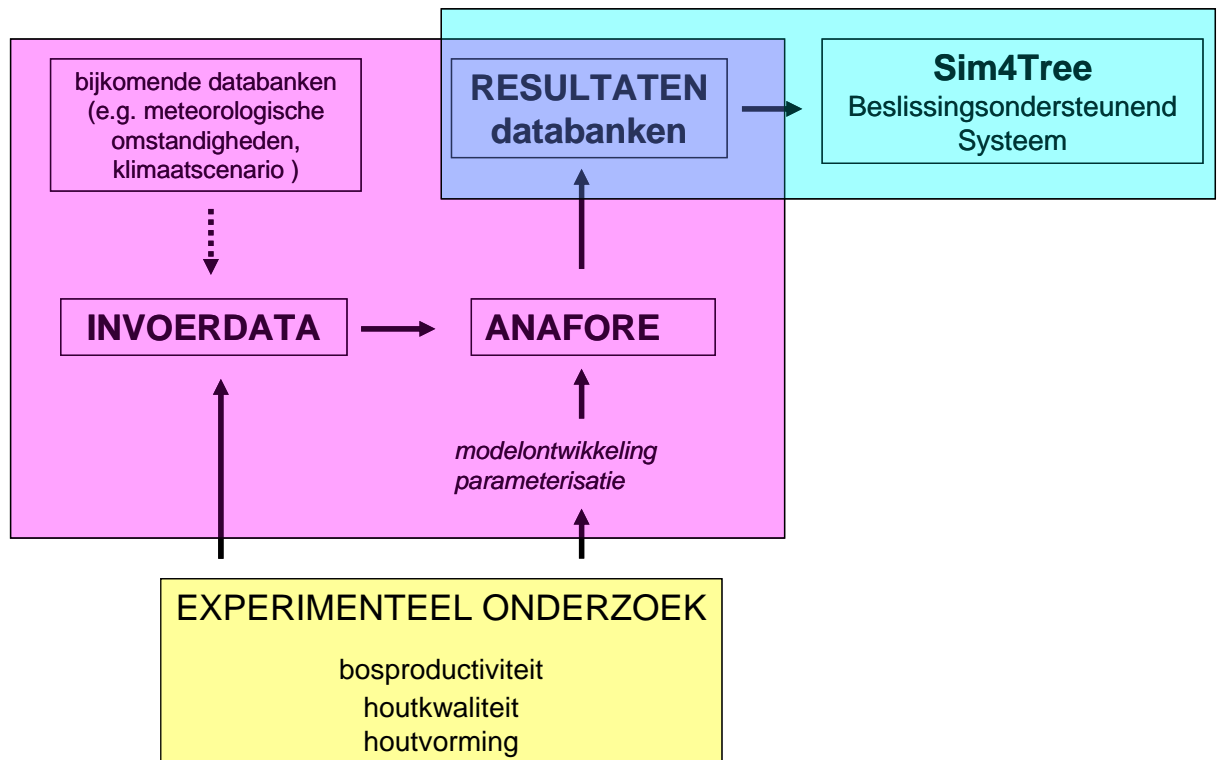
Van oudsher haalt de mens hout uit het bos, voor heel uiteenlopende doelstellingen. Denk maar aan brandhout, heel lang de belangrijkste energiebron in Europa, en nu nog in heel wat streken in de wereld. Maar ook stevige balken, planken, papier, allerlei plaatmaterialen (MDF, spaanplaat, OSB, multiplex) en andere gespecialiseerde materialen worden gemaakt van dezelfde hernieuwbare basisgrondstof: hout, afkomstig uit beheerde bossen. En tegelijk is houtproductie nooit de enige doelstelling in een bos: andere ecosysteemdiensten zoals recreatie, landschapswaarde, biodiversiteit en CO₂-opslag worden in rekening gebracht. Duurzaam bosbeheer streeft er ook vandaag naar om hout te produceren, rekening houdend met het brede gamma aan maatschappelijke behoeftes. Een basispeiler van duurzaam gebruik is natuurlijk dat gemiddeld genomen niet méér hout uit een bos mag verwijderd worden dan er bijgroeit.

De bosbouwsector in Vlaanderen wordt vandaag geconfronteerd met grote onzekerheden. Hoeveel hout zal het Vlaamse bos van de toekomst nog produceren, en van welke soorten en kwaliteit? Op welke manier kunnen het beheer en het beleid dit beïnvloeden? Hoe zullen onze bossen reageren op klimaatverandering? Gezien de lange productietijden in het bos, hebben dergelijke vragen betrekking op een tijdhorizont van minstens een eeuw. Bovendien kan niet zomaar aangenomen worden dat waarnemingen uit het verleden ook geldig blijven voor de toekomstige bosontwikkeling. Zowel bosbeheerders als beleidsmakers hebben dus nood aan gespecialiseerde instrumenten die hen helpen om – althans indicatief – deze vragen te beantwoorden.

Het SimForTree project werd gerealiseerd door een gecoördineerde samenwerking tussen de Universiteiten van Antwerpen, Gent en Leuven. Het belangrijkste resultaat van het SimForTree project is een prototype van een werkinstrument ('Sim4Tree'), gebaseerd op een volledig procesgestuurd model ('ANAFORÉ') dat de groei van bosbomen in Vlaanderen op een realistische wijze simuleert (Figuur 1). Het Sim4Tree systeem werd in de eerste plaats gecreëerd om zowel socio-economische als ecologische gevolgen van veranderende milieu-omstandigheden (o.a. door klimaatverandering, milieuvervuiling) en specifieke beheer- en beleidskeuzes realistisch te kunnen inschatten. Om dit systeem te bouwen was echter eveneens een uitgebreide veldcampagne met terreinobservaties noodzakelijk. In dit rapport worden de belangrijkste bevindingen van zowel de observationele (§2) als de simulatiestudies (§3 en §4) beknopt samengevat.

Het Sim4Tree systeem maakt gebruik van het ANAFORÉ model dat in het verleden aan de Universiteit van Antwerpen werd ontwikkeld. ANAFORÉ is een ecofysiologisch bosontwikkelingsmodel waarin de processen van groei en houtvorming in groot detail worden gesimuleerd (cf. §3). Het model is volledig mechanistisch, wat wil zeggen dat de groei van bomen op dynamische wijze gestuurd wordt uitgaande van bodem- en klimaatsgegevens. Daardoor kan het ook effecten van klimaatverandering en wijzigende standplaats of beheer

simuleren, in tegenstelling tot bijvoorbeeld klassieke opbrengsttabellen. Voor het SimForTree project werd ingezoomd op drie belangrijke boomsoorten, die samen ongeveer de helft van het staande volume in het Vlaamse bos vertegenwoordigen: zomereik, grove den en beuk. Daarnaast werd ANAFORE ook geparameteriseerd voor populier. Andere boomsoorten werden enkel door middel van opbrengsttabellen toegevoegd aan het uiteindelijke werkinstrument.



Figuur 1. Schematische weergave van het SimForTree onderzoeksproject.

2. Observatieel onderzoek

Elk model staat of valt met de wetenschappelijke basis waarop het gebouwd is. Daarom werd in het SimForTree project van bij de start veel aandacht gegeven aan het verder ontrafelen van enkele wetenschappelijke vraagstukken, specifiek voor de situatie in Vlaanderen. Daartoe werd een uitgebreid meetnet van onderzoeksplots aangeduid en opgemeten (cf. annex 1), en werden op basis van deze gegevens een aantal empirische modellen ontwikkeld. Daarbij werd ingezoomd op drie van de belangrijkste boomsoorten in Vlaanderen, waarvoor ook het ANAFORE model ontwikkeld werd: zomereik, grove den en beuk. Populier (ook een ANAFORE soort) werd niet verder observationeel onderzocht, aangezien omtrent deze soort voldoende relevante informatie in de literatuur beschikbaar was. De resultaten van dit wetenschappelijk onderzoek werden mede gebruikt om het ANAFORE model te sturen en te valideren (cf. §3).

De empirische modellering binnen SimForTree heeft gefocust op twee belangrijke aspecten van de groei van bosbomen:

- (1) De productiviteit van volwassen bestanden, met daarbij aandacht voor enerzijds de geïntegreerde productiviteit over de ganse opstandsleeftijd (site index) en anderzijds de seizoenale sturing van productiviteit via de bladoppervlakte-index (of 'leaf area index', afgekort LAI).
- (2) De houtkwaliteit van bosbomen, met zowel aandacht voor bepalende factoren in de jeugdfase en in de volwassen boomfase en het proces van houtvorming bij individuele bomen.

2.1. Productiviteit van volwassen zomereik, beuk en grove den

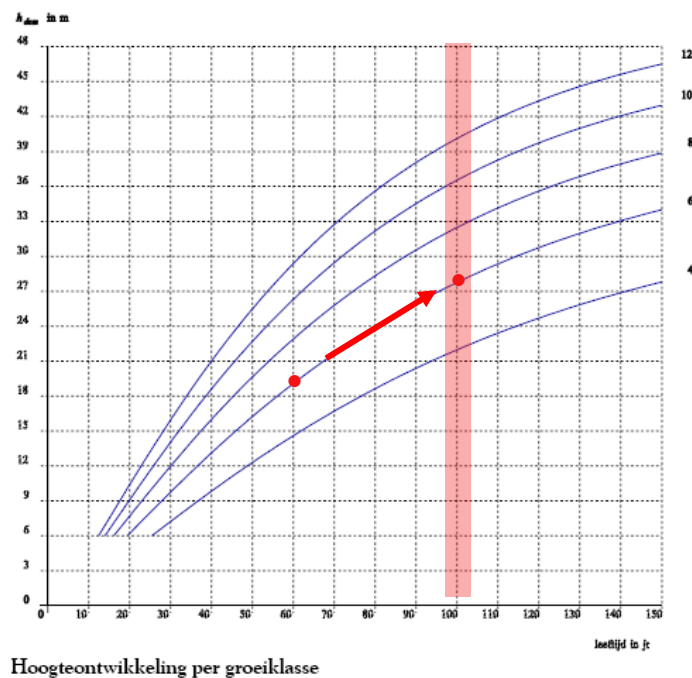
De productiviteit van een bos, of anders gezegd de hoeveelheid hout dat een bos voortbrengt in een bepaald tijdspanne, is sterk afhankelijk van verscheidene factoren zoals de aanwezige boomsoorten en de kwaliteit van de groeiplaats. De groeiplaats (ook standplaats genoemd) van een bomenpopulatie omvat het geheel van milieufactoren dat bepalend is voor het bestaan, de samenstelling, de ontwikkeling en de groei van het bos. Dit begrip omvat bijgevolg alle componenten van het abiotische (klimaat, topografie, bodem, historisch landgebruik) en biotische (vegetatie, bodemfauna) milieu die invloed uitoefenen op de ontwikkeling van het bos. Een veel gebruikte maat om de groeiplaatskwaliteit te karakteriseren is de 'boniteit' (of ook de Engelse term 'site index'), die de dominante hoogte van een bosopstand weerspiegelt bij een bepaalde referentieleeftijd. Het is immers meermaals aangetoond dat de ontwikkeling van de dominante hoogte van een bosopstand grotendeels onafhankelijk is van het gevoerde beheer, maar wel varieert met de kwaliteit van de groeiplaats. De boniteit is dus een soort overkoepelende indicator van de houtproductiecapaciteit van een bos.

Productiviteit wordt grotendeels bepaald door de capaciteit van bomen om aan fotosynthese te doen via hun bladeren. Dit is ook het proces dat door ANAFORE gesimuleerd wordt om boomgroei te bepalen. Daarom werd in dit onderzoeksluik ook uitgebreid aandacht gegeven aan de bladoppervlakte-index (LAI) en aan de processen die deze LAI bepalen en doen variëren doorheen het groeiseizoen.

2.1.1. Boniteit

De boniteit duidt de kwaliteit van de groeiplaats voor een bepaalde boomsoort aan en wordt bepaald op basis van de dominante hoogte die deze soort bereikt (of zal bereiken) op een bepaalde referentieleeftijd. De keuze van deze referentieleeftijd hangt af van de soort en de plaats waar deze voorkomt, maar ligt meestal dicht bij de bedrijfstijd. De dominante hoogte, of de gemiddelde hoogte van de 100 hoogste bomen per ha, hangt weinig of niet af van de opstandsdichtheid, en dus het gevoerde beheer, waardoor deze maat beter geschikt is om de groeiplaatskwaliteit weer te geven dan bijvoorbeeld de gemiddelde omtrek, de gemiddelde hoogte of het volume. Het gebruik van de boniteit als maat voor groeiplaatskwaliteit is dus gebaseerd op twee aannames: (1) de hoogtegroeï is afhankelijk van de groeiplaatskwaliteit en onafhankelijk van onderlinge competitie, en (2) de hoogtegroeï kent een vast tijdsverloop en zal een maximum bereiken dat afhangt van de groeiplaatskwaliteit. De meest courante manier om de boniteit van een bestand te bepalen, is door de opgemeten dominante boomhoogte en leeftijd van een gelijkjarige opstand uit te zetten op bestaande hoogtegroeïcurven en op basis van deze curven de dominante hoogte op de referentieleeftijd af te lezen (Figuur 2).

BEUK
Fagus sylvatica L.
Nederland; Jansen, 1996



Figuur 2. Groeicurven van dominante hoogte van beuk bij verschillende groeiklassen (Jansen et al., 1996)¹. Op deze figuur wordt aangegeven hoe de observatie van een dominante hoogte van 19 m in een 60-jarige beukenopstand tot het aflezen van een boniteit (dominante hoogte op 100-jarige leeftijd) van ongeveer 28 m leidt.

¹ Jansen, J.J., Sevenster, J. & Faber, P.J. (1996). Opbrengsttabellen voor belangrijke boomsoorten in Nederland. IBN-DLO Wageningen, Nederland; 240pp.

In bepaalde gevallen is het echter niet mogelijk de boniteit van een groeiplaats rechtstreeks te meten: in geval van gemengde of ongelijkjarige bestanden, in geval van bebossing van onbebost land, of bij omvorming naar andere boomsoorten. Voor dergelijke situaties is het nodig empirische modellen te bouwen die de boniteit schatten aan de hand van relevante omgevingsvariabelen die wel steeds op te meten zijn. Zulke relaties bieden ook een ecologisch inzicht in de factoren die de productiviteit bepalen.

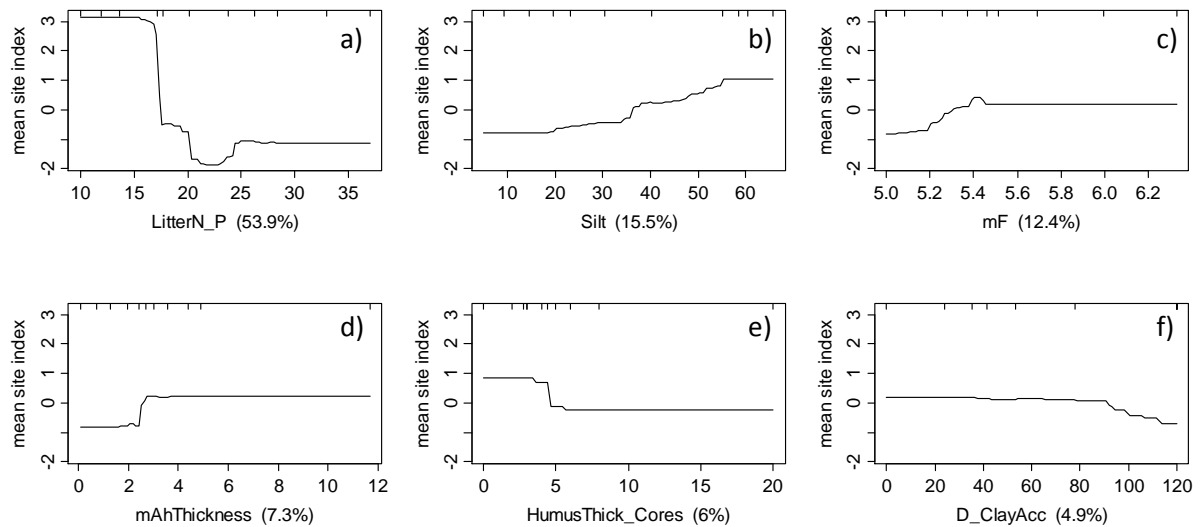
In het SimForTree project werd – op basis van een proefopzet van 186 onderzoeksplots in volwassen bestanden (Figuur 3 en annex 1) – nagegaan welke ecologische factoren in sterke mate de groeiplaatskwaliteit van zomereik, beuk en grove den in Vlaanderen karakteriseren. Een vergelijkend onderzoek toonde aan dat voor het modelleren van boniteit in uiteenlopende bosesystemen de beste resultaten steeds bekomen werden met een innovatieve statistische techniek: ‘boosted regression trees’ (voor meer details cf. Aerts et al., 2010 en 2011, beide opgenomen in annex 2). De resultaten voor Vlaanderen zijn beschreven in Aerts et al. (submitted; cf. annex 2).



Figuur 3. Een volwassen onderzoeksplot van zomereik met bladvalnetten. (foto K.U.Leuven)

In Vlaanderen bleken vooral de bodemtextuur en de stikstofconcentraties in de bladeren in belangrijke mate de groeiplaatskwaliteit voor elk van de drie soorten weer te geven. Zomereik en beuk kennen een graduele stijging in productiviteit naarmate er een grotere leemfractie in de bodem voorkomt (zie Figuur 4b voor beuk). Ook grove den kent een hogere productiviteit bij een hogere leemfractie, maar hier treedt het effect meer abrupt op bij een drempelwaarde van ongeveer 10%, wat aantoonde dat een minimum hoeveelheid leem zeer voordelig is maar bijkomende toename de productiviteit niet verder de hoogte in stuurt. Dat de leemfractie een belangrijke variabele is voor de bepaling van de groeiplaatskwaliteit van deze drie soorten is niet zo verwonderlijk. Bodems met een hoge leemfractie houden namelijk een optimaal evenwicht tussen watervasthouding enerzijds (probleem in zandgronden) en waterbeschikbaarheid anderzijds (probleem in kleigronden). Bovendien levert leem meer

stockageruimte voor opneembare mineralen (zogenaamde uitwisselbare plaatsen) noodzakelijk voor de optimale groei van bomen.



Figuur 4. Responscurves voor boniteit van beuk: (a) N:P verhouding in de bladval, (b) leemfractie in de minerale bodem (0-30cm) in %, (c) gemiddelde vochtgetal op basis van de vegetatie, (d) gemiddelde dikte van de Ah laag van de minerale bodem in cm, (e) gemiddelde dikte van de humuslaag in cm en (f) gemiddelde diepte van een klei-aanrijdingslaag in de minerale bodem. De cijfers (in %) naast de predictoren duiden op hun relatieve bijdrage binnen het model. De streepjes bovenaan de figuren tonen de verdeling van de meetwaarden in decielen. (uit Aerts et al., submitted)

De stikstofconcentratie in de bladval is een meer verrassende variabele in de groeiplaatskarakterisering. Zomereik en grove den vertonen verhoogde stikstofconcentraties in de bladval op minder productieve groeiplaatsen, terwijl bij beuk een verhoogde stikstof/fosfor verhouding (N:P) wordt waargenomen op de minst productieve groeistandplaatsen. Ongebalanceerde nutriëntenopname ten gevolge van verhoogde stikstofdepositie (dit is stikstofvervuiling uit de lucht die voornamelijk met de neerslag op het bos terecht komt) of minder efficiënte retranslocatie van nutriënten (dit is de terugstroom van voedingsstoffen uit de bladeren naar de houtachtige plantendelen net voor de bladval) zouden mogelijke verklaringen zijn voor deze vaststellingen.

Hoewel zomereik en beuk duidelijke verschillen vertonen in productiviteit op bepaalde groeiplaatsen, behalen zij hun hoogste productiviteit op min of meer gelijkaardige groeiplaatsen. Alleen wat de nutriëntenvoorkeur betreft werd een verschil vastgesteld. Beuk is duidelijk gevoelig voor fosfortekort terwijl zomereik eerder een gevoeligheid voor een ongebalanceerde nutriëntenopname weerspiegelt. Grove den is opmerkelijk minder veeleisend wat water- en nutriëntenbeschikbaarheid betreft dan zomereik en beuk.

Omdat het verzamelen van geschikte omgevingsvariabelen vaak een tijdrovende en kostelijke bezigheid is, werd eveneens nagegaan of de groeiplaatskwaliteit op basis van onrechtstreekse voorspellingsvariabelen, zoals vegetatie- en humuskenmerken, met een gelijkaardige accuraatheid kan voorspeld worden als met behulp van de net vernoemde rechtstreekse voorspellingsvariabelen, zoals bodemchemische en -fysische eigenschappen. Humus en

vegetatiekenmerken zijn vaak een weerspiegeling van de ecologische omstandigheden die op een bepaalde plaats heersen en zijn bovendien over het algemeen snel en relatief goedkoop te verzamelen. Bodemkenmerken op hun beurt hebben dan weer het voordeel dat ze juist beschrijven wat de nutriënten- en waterbeschikbaarheid is voor deze bomen. De resultaten tonen dat in Vlaanderen iets betere inschattingen van de groeiplaats kunnen gemaakt worden op basis van bodemkenmerken dan op basis van humus en vegetatie.

2.1.2. Leaf Area Index

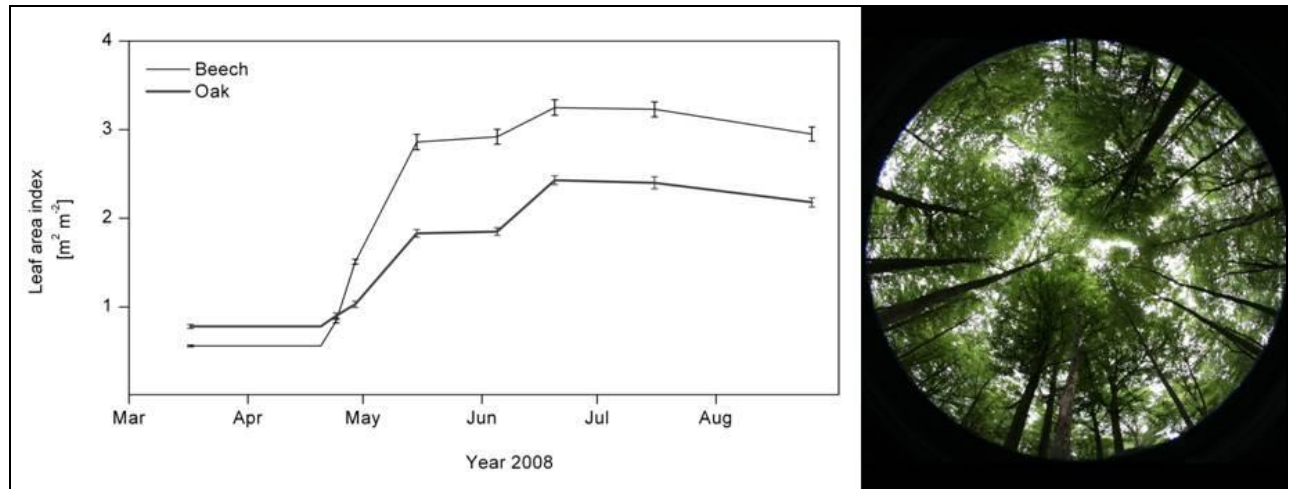
De bladoppervlakte-index (LAI) is een belangrijke indicator van de onderschepping van straling en neerslag en van de totale fotosynthetisch actieve oppervlakte van een boom of een opstand, vandaar dus zijn potentiële groei. Daarom werd in het kader van het onderzoeksproject ook specifieke aandacht geschonken aan metingen van de LAI in verschillende bossen. Een beter begrip van de veranderingen in LAI en van de verschillen tussen diverse bossen, leidt ook tot een betere integratie en kwantificering in het simulatiemodel ANAFORE.

Per soort werden 10 volwassen onderzoeksplots uitgekozen uit het SimForTree meetnet, gespreid over alle productiviteitsklassen. Bladoppervlakte-index werd gemeten aan de hand van hemisferische foto's (Figuur 5). In bestanden van beuk en zomereik gebeurde dat tijdens het hele groeiseizoen 2008, met een twee- tot driewekelijkse frequentie. In bestanden van grove den werd slechts op één moment een meting uitgevoerd, omstreeks het moment van maximale LAI. Voor- of nadien werd ook een wintermeting uitgevoerd op dezelfde locaties om een bladloze vegetatie-index te bepalen. Op basis van de waargenomen LAI-waarden en LAI-ontwikkeling doorheen het jaar kunnen de gesimuleerde LAI-waarden van het ANAFORE-model gecorrigeerd worden. De gegevens werden verder gebruikt om de ecologische relatie tussen opstands-LAI en omgevingsfactoren (meteorologische, bodem- en bestandsvariabelen) te onderzoeken.

Tenslotte werden ook LAI metingen uitgevoerd in telkens 30 jonge onderzoeksplots van beuk en zomereik, gespreid over drie ontwikkelingsklassen. Deze metingen werden vier keer uitgevoerd tussen 2008 en 2009. Dit levert informatie over bladoppervlakte-index, bladerloze vegetatie-index en takstructuur van jonge bomen, die kan vergeleken worden met de data van volwassen bestanden.

De resultaten toonden aan dat zowel groeiplaats, bosstructuur als klimaat een significante invloed hebben op de maximale LAI binnen een bepaald bestand. Er werd een hogere variabiliteit in maximale LAI vastgesteld tussen soorten dan binnen een soort. Een gedetailleerde studie liet ook toe het seizoenale verloop van de LAI bij beuk en zomereik te visualiseren (Figuur 5). Verschillende externe variabelen (zoals temperatuur en instraling, maar ook stamtal en grondvlak) hadden een duidelijke invloed op dit LAI verloop. Uiteraard spelen ook de takstructuur en kroonarchitectuur een belangrijke rol in de LAI bepaling, een rol die aan de hand van jonge beuken en zomereiken werd gekwantificeerd. Binnen bosbestanden werd bovendien steeds een grote ruimtelijke variabiliteit (tot 25%) vastgesteld, die metingen van de LAI vaak complex kunnen maken. Aan de hand van de opgedane kennis werd een voorstel uitgewerkt voor een efficiënt meet- en bemonsteringsprotocol voor hemisferische foto's in

bosbestanden van beuk en zomereik in Vlaanderen. Gedetailleerde informatie is te vinden in de verschillende publicaties van Bequet et al. (Annex 2).



Figuur 5. Links: seizoenale verloop van de LAI in Vlaamse beukenbestanden en eikenbestanden in 2008. Rechts: een voorbeeld van een hemisferische foto die gebruikt wordt om de LAI te bepalen.

2.2. Houtkwaliteit van zomereik, beuk en grove den

Eigenlijk is alle hout van goede kwaliteit. Als je het maar voor de juiste toepassing gebruikt. Toch bestaat er een soort hiërarchie waarin geogste stammen worden onderverdeeld. De ‘beste’ stamstukken moeten voldoen aan heel strenge normen, bijvoorbeeld omtrent dikte, rechtheid, takkigheid, groeisnelheid, waardoor ze bruikbaar worden om verzaagd of zelfs versneden te worden (Figuur 6). We gebruiken dat hout typisch in meubelen en constructies. Hout dat niet aan die hoge kwaliteitsnormen voldoet, kan wel nog een hoge toegevoegde waarde krijgen dank zij de gespecialiseerde verwerkende industrie.

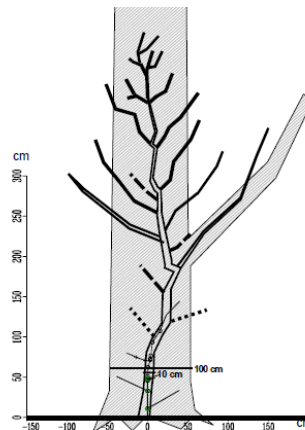


Figuur 6. De ‘beste’ stamstukken moeten voldoen aan heel wat strenge normen, bijvoorbeeld omtrent dikte, rechtheid, takkigheid, groeisnelheid, waardoor ze bruikbaar worden om verzaagd of zelfs versneden te worden. (foto UGent)

Het produceren van stammen van de beste kwaliteit vereist niet alleen aangepaste groeiplaatsen, maar ook heel wat vakmanschap. In SimForTree werd voor het eerst nagegaan en gemodelleerd welke ecologische en bosbouwkundige factoren de houtkwaliteit van zomereik, beuk en grove den in Vlaanderen bepalen. Het onderzoek heeft zich toegespitst op twee aspecten van houtkwaliteit waarvan onvoldoende relevante informatie voorhanden was. Enerzijds de ontwikkeling van takkigheid in jonge opstanden van zomereik en beuk – met name het snel bereiken van een takvrije stamlengte is van belang om naderhand voldoende noestvrij hout te kunnen produceren (§2.2.1). En anderzijds de houtstructuur en houtvorming bij zomereik, beuk en grove den (§2.2.2). Boombiologische en houttechnische eigenschappen werden bestudeerd via jaarringanalyses, kwantitatief houtanatomische analyses en structuurafhankelijke metingen van houteigenschappen (densiteit, vochtgehalte). Houtkwaliteit wordt namelijk intrinsiek door de boom- en de houtstructuur bepaald en door het belang ervan voor de industriële toepassing. De houtstructuur is karakteristiek voor elke boomsoort, hangt af van de positie binnen de boom, en vertoont variaties binnen en tussen jaren die toelaten om afleidingen te maken over de geschiktheid van het hout voor diverse gebruikstoepassingen.

2.2.1. Takkigheid in jonge opstanden van zomereik en beuk

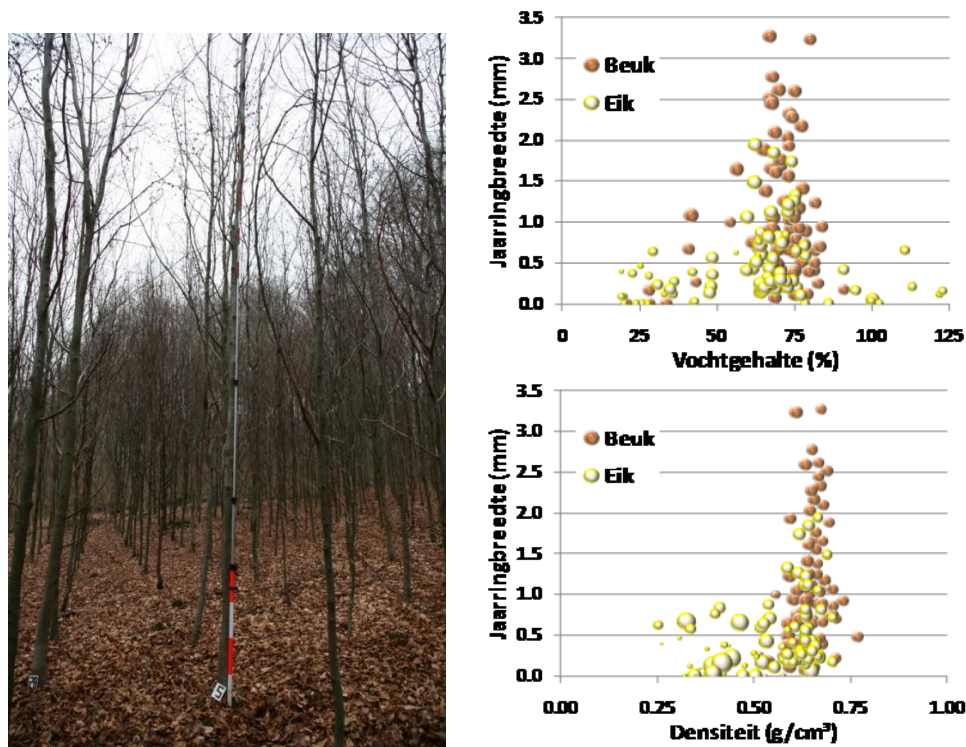
Hout groeit op hout (Figuur 7). Als bomen jong zijn, groeien ze snel in de hoogte en bouwen zo een kroon uit die over de hele stamlengte zit. Maar takken groeien niet mee naar omhoog: die blijven zitten waar ze ooit ontstonden. Naarmate bomen ouder worden, is het dus belangrijk dat de takken op het onderste stamstuk afsterven en afvallen, zodat het hout dat nadien gevormd wordt (de mantel) geen ingroeïende takken heeft – dat leidt immers tot noesten in het hout, wat nefast is voor de sterkte en kwaliteit. Gelukkig gebeurt dat proces deels vanzelf: de natuurlijke stamreiniging. Maar wat hulp van een bosbeheerder kan het wel versnellen en verbeteren.



Figuur 7. Hout groeit op hout. De takken die op het onderste stamstuk blijven zitten, worden overgroeïd door een mantel van hout. Daardoor ontstaan noesten in het hout als het verzaagd wordt. (uit Weinreich 2000)²

² Weinreich A. (2000). Qualitätsentwicklung junger Eichen in Bestandeslücken. Ph.D. thesis Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, Duitsland; 235pp.

Dit luik van het SimForTree onderzoek werd gevoerd in 60 onderzoeksplots in jonge bestanden van zomereik en van beuk (Figuur 8 en annex 1), allen gelegen in het Bellevuebos en het Zoniënwoud. Er werd voor elke soort zorgvuldig gezocht naar onderzoeksplots op gelijkaardige groeiplaatsen en met vergelijkbare genetische achtergrond, zodat de resultaten zo weinig mogelijk door deze factoren beïnvloed worden. Ook werd in geen van de onderzoeksplots al gedund of gesnoeid. Een kwantitatieve analyse van takmonsters werd eveneens uitgevoerd. In de takmonsters van juveniele beuken en eiken werden jaarringbreedtes opgemeten langs twee tegenoverliggende stralen. In deze monsters werden ook het vochtgehalte en de densiteit gravimetrisch bepaald. Deze parameters zijn indicatief voor de vitaliteitstoestand van een tak en dus nuttig voor de bepaling van dode, kwijnende of levende takken. In de grafieken rechts in Figuur 8 is de gemiddelde jaarringbreedte uitgezet tegenover de densiteit (in g/cm^3) en het relatieve houtvochtgehalte (in %) gemeten in de onderste takken van jonge eiken en beuken. De grootte van de cirkels is proportioneel aan het relatieve houtvochtgehalte (bovenste grafiek) en aan de densiteit (onderste grafiek). Naarmate de jaarringbreedte in een tak afneemt daalt de densiteit, vooral in zomereik, minder snel in beuk. Deze correlatie is typisch voor ringporige soorten als eik, aangezien dan het relatieve laathoutaandeel daalt, maar het kan ook op biologische houtdegradatie wijzen. Parallel daarmee daalt het relatieve houtvochtgehalte, wat kan verwacht worden in takken met verminderde fysiologische activiteit. In sommige (bijna) dode eikentakken neemt het relatieve houtvochtgehalte echter toe. Ook dit kan verklaard worden door structuurveranderingen die gepaard gaan met afnemende takvitaliteit.



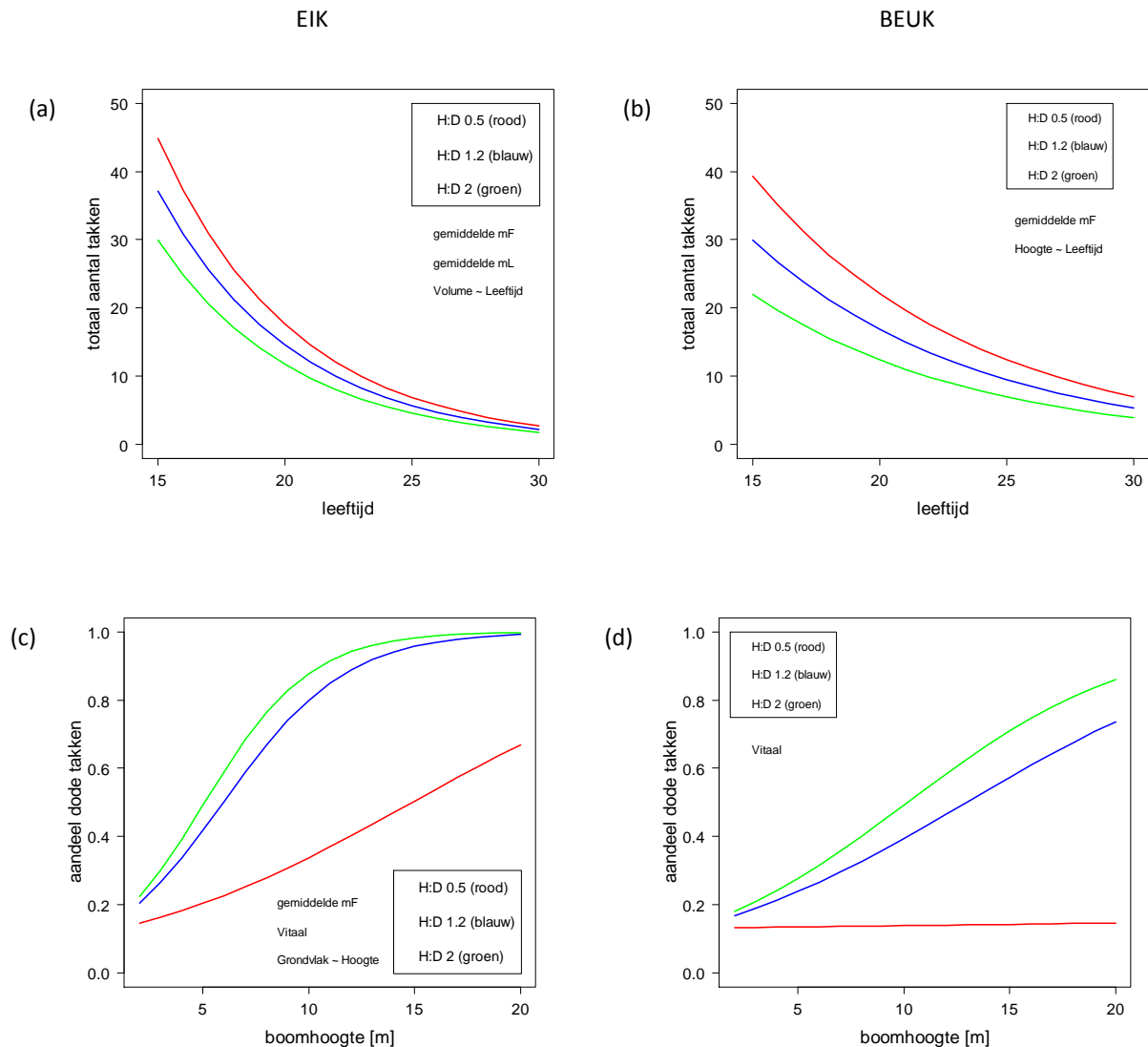
Figuur 8. Links: een jonge beukenplot waarin detailmetingen van takkigheid werden uitgevoerd. (foto K.U.Leuven) – Rechts: waargenomen veranderingen in relatief houtvochtgehalte (in %, grafiek rechtsboven) en densiteit (in g/cm^3 , grafiek rechtsonder) in takken van jonge eiken en beuken naarmate de takaanwas en de takvitaliteit (jaarringbreedte in mm) afneemt.

Op basis van deze gegevens ontwikkelden we empirische modellen voor het aantal takken, het aandeel dode takken, de taksterfte, de takdikte en de takhoek. Alle details over de gebruikte methodes zijn samengevat in de publicatie van Kint et al. (2010), die ook opgenomen is in annex 2.

Natuurlijke stamreiniging gebeurt doordat takken onderaan de stam geleidelijk aan overschaduwd worden en daardoor eerst afsterven en later afvallen. De ontwikkelde modellen tonen een opvallend verschillend temperament van eik en beuk op het vlak van natuurlijke stamreiniging. Beide soorten houden gelijke tred wat betreft de afname van het totaal aantal takken met de leeftijd (Figuur 9a en 9b), maar bij eik zijn het vooral dode takken die lang aan de stam blijven hangen, terwijl bij beuk de takken langer blijven leven, maar eenmaal afgestorven ook sneller afvallen (Figuur 9c en 9d).

Een belangrijk resultaat van dit onderzoek is dat de natuurlijke stamreiniging van beide soorten wel degelijk kan beïnvloed worden door het bosbeheer. Dat proces gebeurt namelijk sneller bij bomen die meer competitie ondervinden van hun burens (zie bvb. het effect van de hoogte/diameter (H:D) verhouding in Figuur 9), in opstanden die dichter werden aangeplant en wellicht ook op de iets vochtigere groeiplaatsen. De huidige tendens naar het aanplanten van bomen in breed plantverband om budgettaire redenen is dus geen goede zaak vanuit het oogpunt van productie van kwalitatieve stammen – tenzij wordt opgesnoeid, maar dat kost ook. Een beter alternatief is het aanplanten in dicht plantverband in groepen, zodat niet méér plantgoed nodig is maar wel betere kwaliteit kan verwacht worden. Een modelsimulatie toont aan dat met een plantverband van 1 meter op 1 meter het aantal takken op de onderste 6 meter van een 15 meter hoge boom afneemt met 24% voor eik en 33% voor beuk in vergelijking met een courant plantverband van 2 meter op 2 meter. Bovendien neemt in dezelfde omstandigheden het aandeel dode takken bij beuk toe met 30%, wat zoals gezegd bij deze soort nauw samen gaat met het afvallen van takken.

Behalve dit soort maatregelen die een invloed hebben op de hele bosopstand, kan ook het selectief wegnemen van individuele bomen met te hoge concurrentiekracht de toekomstige houtkwaliteit ten goede komen. Dit soort bomen ('wolven') heeft typisch een verhouding tussen hoogte (in meter) en diameter (in centimeter) die beduidend lager ligt dan 1. Ze hebben zelf een slechte kwaliteit (veel en vooral levende takken tot op late leeftijd), en bovendien kunnen ze de competitie te hoog doen oplopen voor hun burens die daardoor groeiverlies lijden of zelfs afsterven. Te veel bomen weghalen is dan weer nefast, omdat daardoor de opstandsdichtheid en concurrentie te sterk kunnen dalen wat dan weer takkigheid in de hand werkt.



Figuur 9. Modellen voor totaal aantal takken (a en b) en aandeel dode takken (c en d) bij eik (links) en beuk (rechts), in functie van de boomontwikkeling. De verschillende curves duiden diverse niveaus van competitie (en hieruit volgende H:D hoogte tot diameter verhouding) aan. (uit Kint et al. 2010)

Het onderzoek kon ook bevestigen dat takken van beide soorten later afsterven naarmate ze hoger op de stam zitten en dikker zijn. Een vijf centimeter dikke tak op zes meter hoogte zal bij eik pas sterven als de boom ruim 15 meter hoog is, en nadien dus nog lang aan de stam blijven hangen. Een zelfde tak bij beuk zal zelfs nog leven bij bomen van 20 meter hoog. Het is dus goede bosbouwpraktijk om de takdikte te gebruiken als selectiecriteria bij het aanduiden van toekomstbomen in jonge opstanden.

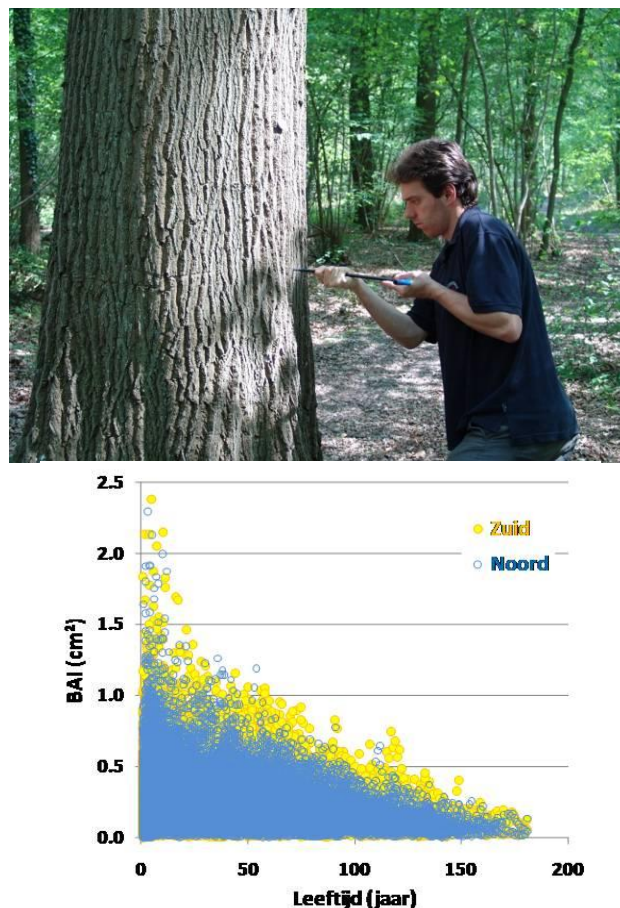
2.2.2. Houtkwaliteitsevaluatie via bestudering van houtvorming en houtstructuur

De analyses spitsten zich toe op de structuur en de eigenschappen van het stamhout van de geselecteerde volwassen modelbomen. Parallel met de toepassing van klassieke meetmethodes (vb. LINTAB lijstafel, §2.2.2.1) werd volop ingezet op de ontwikkeling van geavanceerde innovatieve methodes om houtstructuur en houteigenschappen op diverse schaalniveaus te

kwantificeren, *in casu* sterk geautomatiseerde procedures die gebaseerd zijn op computer-tomografische technieken (CT-scanning, §2.2.2.3 en annex 4). Tevens werd aan de hand van een *tilting*-experiment met jonge boompjes in potten een methode ontwikkeld om de houtvorming op intrajaarringniveau periodisch te monitoren en kwantificeren (annex 5). Dit complementaire experimentele werk was gericht op het verzamelen van essentiële data voor parameterisatie van het mechanistische model ANAFORE. De gekwantificeerde parameters werden geïncorporeerd in de input database van ANAFORE en gekoppeld aan groeiplaats- en bestandsvariabelen.

2.2.2.1. Jaarringanalyses: klassieke methodes

Van de geselecteerde volwassen modelbomen van eik (76), beuk (105) en grove den (55) werden met de Presslerboor stalen genomen (Figuur 10) voor jaarringanalyses met behulp van een LINTAB opstelling (cf. annexen 1 en 3). In eiken en dennen werden vroeghout- en laathoutbreedtes geregistreerd, in beuken werden enkel jaarringbreedtes opgemeten, telkens langs noord (N) en zuid (Z) stralen (472 stralen in totaal). Deze metingen werden nauwkeurig gesynchroniseerd. In alle boorspanen van eik en den werden ook het aantal spinthout- en kernhoutringen gekwantificeerd.

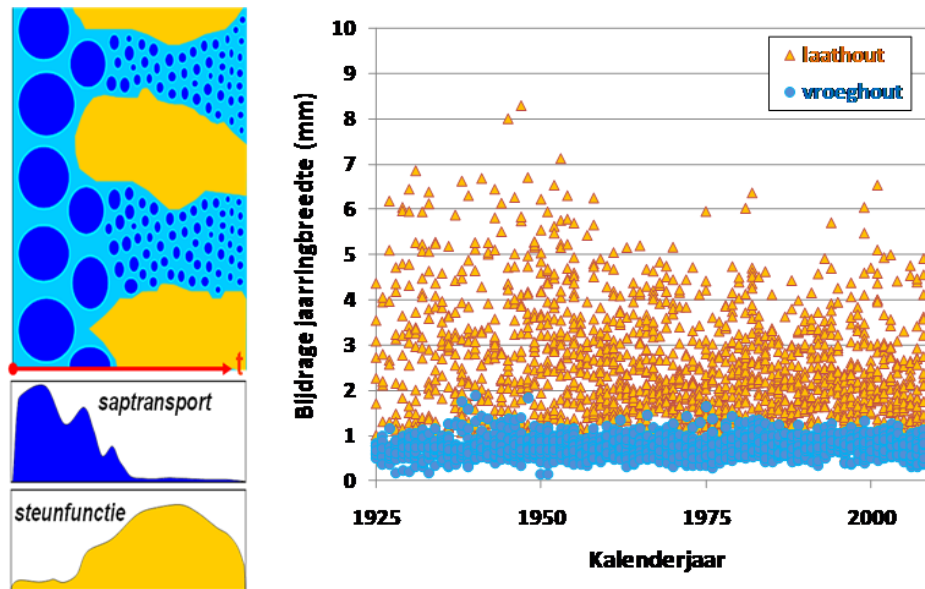


Figuur 10. Links: Radiale stamboring in een eik (foto UGent). Rechts: Met behulp van de jaarringbreedtes gemeten in elk boorspaan kan o.a. de jaarlijkse aanwas van het grondvlak (BAI in cm²) berekend worden en kan men het aantal jaarringen tellen voor een leeftijdsbepaling van elke boom.

Met de gegevens van jaarringbreedte, vroeghout- en laathoutbreedte, en spint- en kernhoutbreedte kon de interne houtkwaliteit van elke volwassen modelboom gekarakteriseerd worden. Kleine verschillen tussen breedtes in N- en Z-stralen, zwakke leeftijdstrends, gelijkmatige jaarringbreedtes en stabiele vroeghout-laathoutverhoudingen werden vooropgesteld als intrinsiek positieve kwaliteitskenmerken. Voorts werden hoge kernhoutaandelen in eiken en dennen als wenselijk beschouwd in esthetische toepassingen en in gebruiksomstandigheden waarbij de natuurlijke duurzaamheid van het houtproduct op de proef gesteld wordt. Er werd aangenomen dat hoge laathoutaandelen indicatief zijn voor hogere mechanische sterkte (voor constructietoepassingen), calorische inhoud (voor energietoepassingen) en/of koolstofgehalte (voor koolstofopslag). Interannuele variaties in jaarringbreedte (en vroeghout- en laathoutbreedte) geven ook een indicatie over het functioneren van een boom in zijn groeimilieu. Houtvorming, het functioneren van hout in bomen en de resulterende houtkwaliteit zijn leeftijdsafhankelijk en worden gestuurd door complexe soorteigen reacties op variaties in klimaat, groeiplaatseigenschappen, opstandstructuur en beheersingrepen (dunningen bvb.). De vorming van jaarringen verloopt ook in nauwe samenhang met de jaarlijkse ontwikkeling van het bladerdek en de cambiale activiteit. Relevante externe en interne invloedsparameters werden in kaart gebracht voor alle 236 onderzoeksplots verspreid over Vlaanderen en via modellering gelinkt aan de voornoemde (afgeleide) houtkwaliteitscriteria (bvb. zie §2.2.2.2 en §5.1). De ontwikkelde modellen laten toe om desgewenst houtkwaliteit op regionaal niveau te karteren en ook te simuleren in functie van gewijzigde sets van inputvariabelen en/of alternatieve klimaatscenario's.

2.2.2.2. Case: morfologische kenmerken in volwassen bestanden van zomereik

Aan zomereik worden bijzonder strenge normen voor houtkwaliteit opgelegd. Niet enkel de takkigheid, die vooral in de jeugd bepaald wordt, maar ook heel wat morfologische kenmerken van het hout zelf zijn van belang. Zomereik is een ringporige houtsoort (Figuur 11, links), wat betekent dat elk jaar in het voorjaar vroeghout met grote vaten wordt gevormd (voor watertransport) gevolgd door laathout met veel kleinere vaten en houtvezels (voor stevigheid). Een snel groeiende eik zal relatief gezien méér laathout vormen en daardoor dichter en moeilijker bewerkbaar hout produceren. Ook de gelijkmatigheid van de groei door de jaren heen, en de verhouding tussen het duurzame kernhout centraal in de stam en het niet bruikbare spinthout net onder de schors zijn belangrijke kenmerken van houtkwaliteit bij eik. In figuur 11 (rechts) blijkt dat de vroeghoutbreedte in jaarringen van volwassen zomereik relatief constant blijft, en de variaties in jaarringbreedte hoofdzakelijk te wijten zijn aan schommelingen in laathoutbreedte.

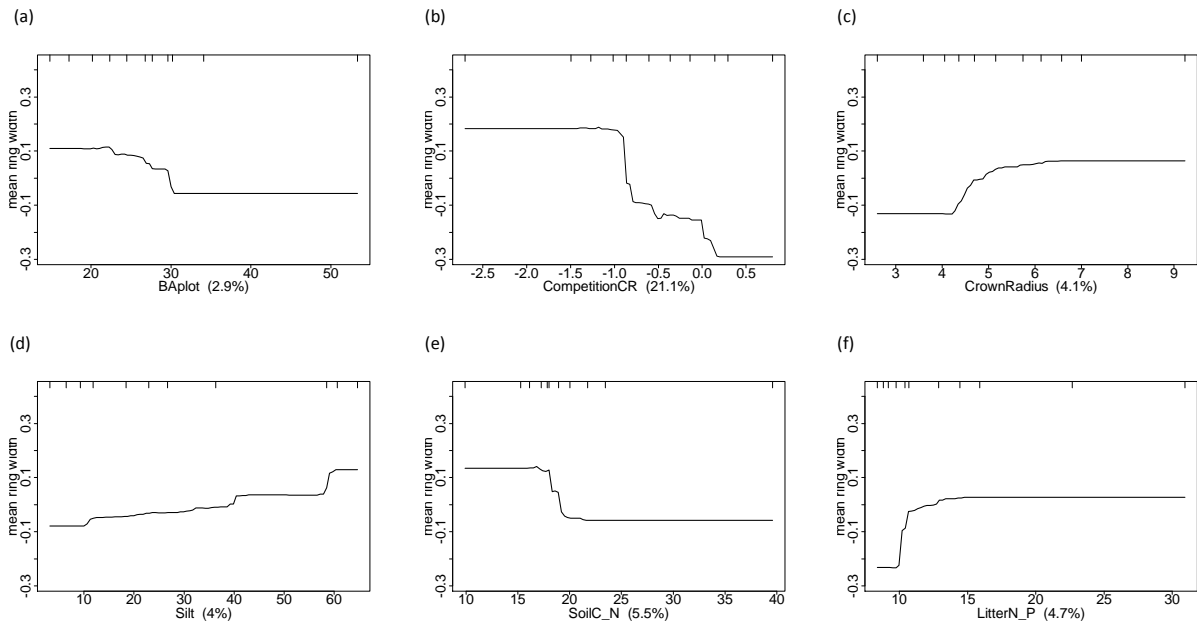


Figuur 11. Links: Zomereik is een ringporige houtsoort. In het voorjaar wordt vroeghout gevormd (met grote vaten voor watertransport) gevolgd door laathout (met veel dichters weefsel voor stevigheid). Rechts: Variatie van de breedte van vroeghout en laathout in alle modelbomen van Zomereik (Z-straal) in de periode 1925-2008 (illustratie UGent).

Eén van de doelstellingen van het SimForTree project was om inzicht te verwerven in de ecologische factoren die de interne morfologische kenmerken van eikenhout bepalen. Hiervoor werd gebruik gemaakt van 76 proefvlakken met volwassen zomereik, verspreid over het volledige productiviteitsgamma van de soort binnen Vlaanderen (Figuur 3 en annex 1).

We gebruikten een innovatieve techniek ('boosted regression trees'; cf §2.1.1) om een reeks inzichtelijke modellen te bouwen voor de gemiddelde vroeghout-, laathout- en jaarringbreedte en voor de verhouding van kernhout tot spinthout. Bij de verklarende variabelen werd vooreerst telkens de boomleeftijd in rekening gebracht, en werd vervolgens gekeken naar de mogelijk invloeden van de bosstructuur en van de groeiplaats. Alle details over de gebruikte methodes zijn samengevat in de publicatie van Kint et al. (submitted a), die ook opgenomen is in annex 2. Figuur 12 toont een selectie van responscurves van gemiddelde jaarringbreedte.

De jaarringbreedte wordt voornamelijk beïnvloed door de bosstructuur (en dus door het historisch beheer en de bosdynamiek), met een belang van 35 tot 56% in de modellen. Het sterke effect van bosstructuur is enigszins verrassend, omdat alle onderzochte eiken in gelijkaardig beheerde bossen liggen van gelijkjarig en homogeen hooghout. Toch blijkt dat bij de lichtbehoevende zomereik relatief kleine verschillen in kroonontwikkeling en competitie kunnen leiden tot duidelijke verschillen in gemiddelde jaarringbreedte van bomen. Een groeivermindering wordt waargenomen in opstanden met grondvlak boven 20 m² per hectare (Figuur 12a) of bij stijgende krooncompetitie van individuele bomen (Figuur 12b). Omgekeerd leiden brede (meer dan 4 meter straal; Figuur 12c) en diepe kronen (meer dan de halve boomhoogte) evenals meer groeirimte tot duidelijk hogere groei.



Figuur 12. Selectie van responscurves van gemiddelde jaarringbreedte van zomereik: (a) grondvlak in m^2/ha , (b) krooncompetitie-index, (c) gemiddelde kroonstraal in m, (d) leemfractie in de minerale bodem (0-30cm) in %, (e) C:N verhouding van de minerale bodem (0-30 cm) en (f) N:P verhouding in de bladval. De cijfers (in %) naast de voorspellingsvariabelen duiden op hun relatieve bijdrage binnen het model. De streepjes bovenaan de plots tonen de verdeling van de meetwaarden in decielen. (uit Kint et al., submitted a)

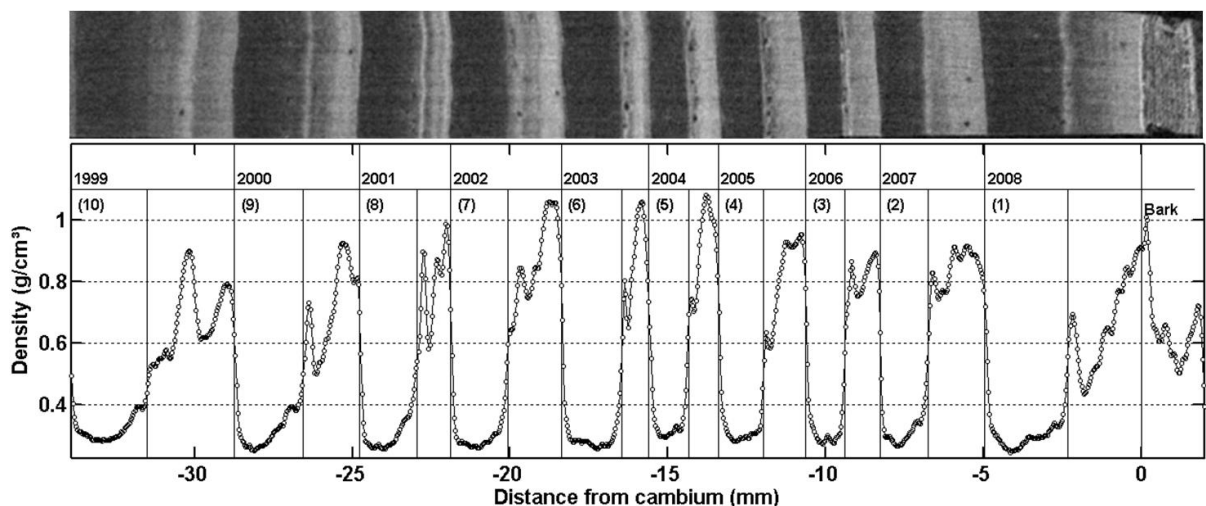
Daarnaast is ook de groeiplaatskwaliteit een belangrijke verklarende factor voor de gemiddelde jaarringbreedte van zomereik, met een belang van 30 tot 46% in de modellen. De groei stijgt nagenoeg lineair met het leemgehalte van de bodem (Figuur 12d). Er is een duidelijke en abrupte groeivermindering vanaf C:N waarden in de minerale bodem (0-30 cm) hoger dan 18 (Figuur 12e), en een meer geleidelijke groeivermindering bij bodemzuurtegraad vanaf het aluminiumbufferbereik ($pH-CaCl_2 < 3.6$). Dit komt ongeveer overeen met de overgang tussen mull en moder humus. Positieve effecten op de groei zijn er bij hoge concentraties van plantbeschikbaar fosfor in de bodem. Ook bomen met een hoog gehalte Fe, Mg, Ca en K en een laag gehalte Al in de bladval groeien gemiddeld beter. Waterbeschikbaarheid in de bodem is verrassend geen echt belangrijke factor voor de groei van de onderzochte bomen, wat deels kan te wijten zijn aan het feit dat zomereik doorgaans niet op ongeschikte groeiplaatsen wordt aangeplant en het groeiverminderende effect van droogte en waterstagnatie daardoor niet duidelijk tot uiting komt in de geselecteerde proefvlakken. Tenslotte werd een consistente groeivermindering waargenomen bij bomen met een lage N:P verhouding in de bladval (Figuur 12f), en kon aangetoond worden dat dit specifiek optreedt bij bomen met een vroege bladval. Het gaat hierbij dus vermoedelijk om een onrechtstreeks effect van specifieke milieufactoren die leiden tot een herhaalde vroege bladval.

De empirische modellen voor kernhoutaandeel zijn een stuk moeilijker te interpreteren en hebben ook een lagere verklarende capaciteit dan de modellen voor jaarringbreedte. Kernhout lijkt voor een belangrijk deel beïnvloed door de concentratie van plantbeschikbaar fosfor in de

bodem. Daarnaast zullen ook bomen met beter ontwikkelde kronen duidelijk sneller verkernen en relatief méér kernhout dan spinhout vormen.

2.2.2.3. Houtanalyse via 3D-computer-tomografie en microdensitometrie (Nanowood)

Met de data van jaarringbreedte, vroeghout- en laathoutbreedte, en spint- en kernhoutbreedte kon de interne houtkwaliteit gekarakteriseerd worden, en kregen we inzicht in de stamgroei van elke volwassen modelboom. De variaties in structuur binnenin een jaarring geven echter ook een indicatie over het functioneren van een boom in zijn groeimilieu en ze laten toe de interne invloedsfactoren die houtkwaliteit bepalen te bestuderen. Houtvorming, het ecofysiologisch en biomechanisch functioneren van hout in bomen en de resulterende houtkwaliteit zijn leeftijdsafhankelijk en worden gestuurd door soortspecifieke, complexe responsen op variaties in klimaat, standplaatseigenschappen, bosbestandstructuur en beheersingrepen (dunningen bvb.). De vorming van jaarringen verloopt ook in nauwe samenhang met de jaarlijkse ontwikkeling van het fotosynthetische systeem (bladeren, cf. §2.1.2.) en de cambiale activiteit. Om de processen die houtvorming sturen beter te begrijpen werden bijkomende detailstudies opgezet waarin kwantitatief houtanatomische kenmerken werden gekwantificeerd (vb. vatdiameters in eik), periodisch spinhoutmonsters werden genomen of anatomische merkers werden geïnduceerd (cf. trekhoutmarkers in het potproef *tilting* experiment, annex 5) in relatie tot fenologische en klimatologische observaties. De kwantificering van een aantal houtanatomische en chemische kenmerken in deze kleinschalige monsters diende te gebeuren d.m.v. aangepaste hoge-resolutie technieken die op punt werden gesteld in de loop van de laatste twee projectjaren, o.a. gebruik makende van de CT-scanning apparatuur van partner UGent. De methodes ontwikkeld voor deze bijkomende detailanalyses en de resultaten ervan kunnen aangewend worden om de mechanistische groeimodellen verder te verfijnen in het kader van natrajecten.

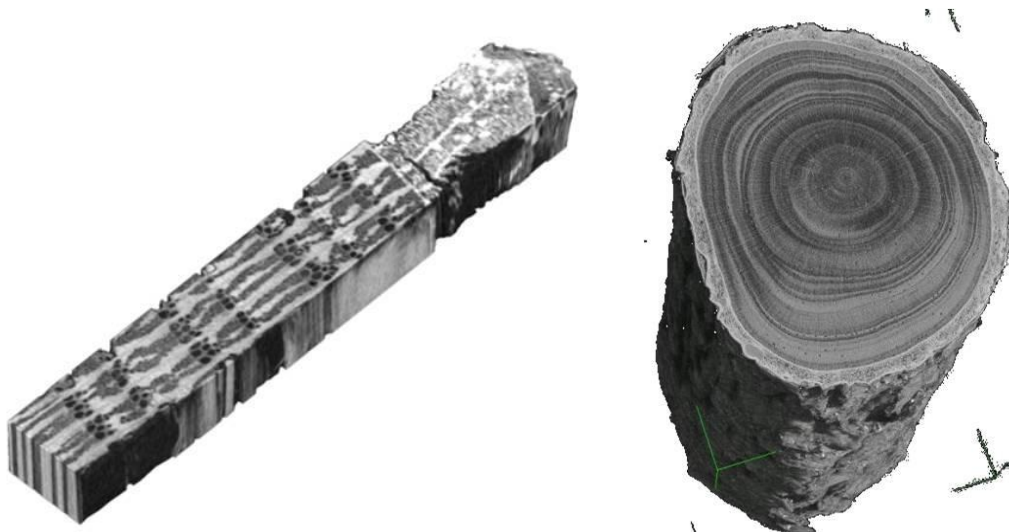


Figuur 13: Voorbeeld van een hoge resolutie ($36.5 \mu\text{m}$) microdensitometrisch profiel (in g/cm^3) langsheen een radiale sequentie van een tiental jaarringen in het spint van een grove den. Per jaarring is het ringnummer en het kalenderjaar afgebeeld.

Om de werkelijke dichtheitsverdeling in boorspanen en objecten met diverse vormen en dimensies te kunnen kwantificeren werd een geautomatiseerde procedure ontwikkeld met

behulp van de CT-scanninginstallatie van partner UGent (cf. annex 4). In Figuur 13 is een voorbeeld van een radiaal microdensitometrisch profiel van grove den weergegeven met een duidelijke opeenvolging van vroeghout- en laathoutzones, met respectievelijk lage en hoge densiteiten. De methode werd toegepast om de gemiddelde densiteit van jaarringen en vroeghout/laathoutzones te kwantificeren in tientallen modelbomen van eik, den en beuk. De jaarringbreedtes (en breedtes van vroeghout en laathout) bepaald m.b.v. de LINTAB-opstelling werden gebruikt om de breedtes gekwantificeerd aan de hand van de microdensitometrische profielen te valideren. Houtdensiteit geeft, naast jaarringparameters, een krachtig criterium om houtkwaliteit te evalueren.

Op jaarringniveau geven microdensitometrische profielen ook de intraseizoenale respons weer op korte termijn variaties van het klimaat. De koppeling van microdensitometrische profieldata aan klimaatsgegevens op dag- of uurniveau alsook aan de inzichten verworven in het kader van detailstudies (cf. *tilting*-potproef, annex 5) laat toe fenologische tijdstippen in het groeiseizoen te dateren waardoor, retrospectief, langere tijdsseries geanalyseerd kunnen worden. Radiale microdensitometrische profielen correleren doorgaans sterk met boorweerstandprofielen geregistreerd door een Resistograph (De Ridder et al., 2011). Dit opent perspectieven voor evaluatie van de houtkwaliteit op stam aan de hand van (gecalibreerde) boorweerstandsmetingen. De CT-opnames bekomen met de speciaal ontworpen helix-scanning procedure laten ook toe de structuurvariaties van de boorspanen in 3D te kwalitatief bestuderen en de anatomische invloed op microdensitometrische variaties kwantitatief te analyseren. In Figuur 14 (links) is een gereconstrueerd stukje boorspaan van zomereik afgebeeld waarin diverse weefseltypes kunnen worden onderscheiden: vaten, vezels, tracheiden en schors. Met Nanowood kunnen ook voorwerpen met andere vormen en dimensies ingescand worden, zoals geïllustreerd door een CT-scan van een stukje stam van grove den afgebeeld in Figuur 14 (rechts).



Figuur 14: 3D-rendering van een stukje boorspaan van zomereik (links) en van een stukje stam van een jonge grove den (rechts) toont hout, schors, jaarringen en verschillende weefseltypes.

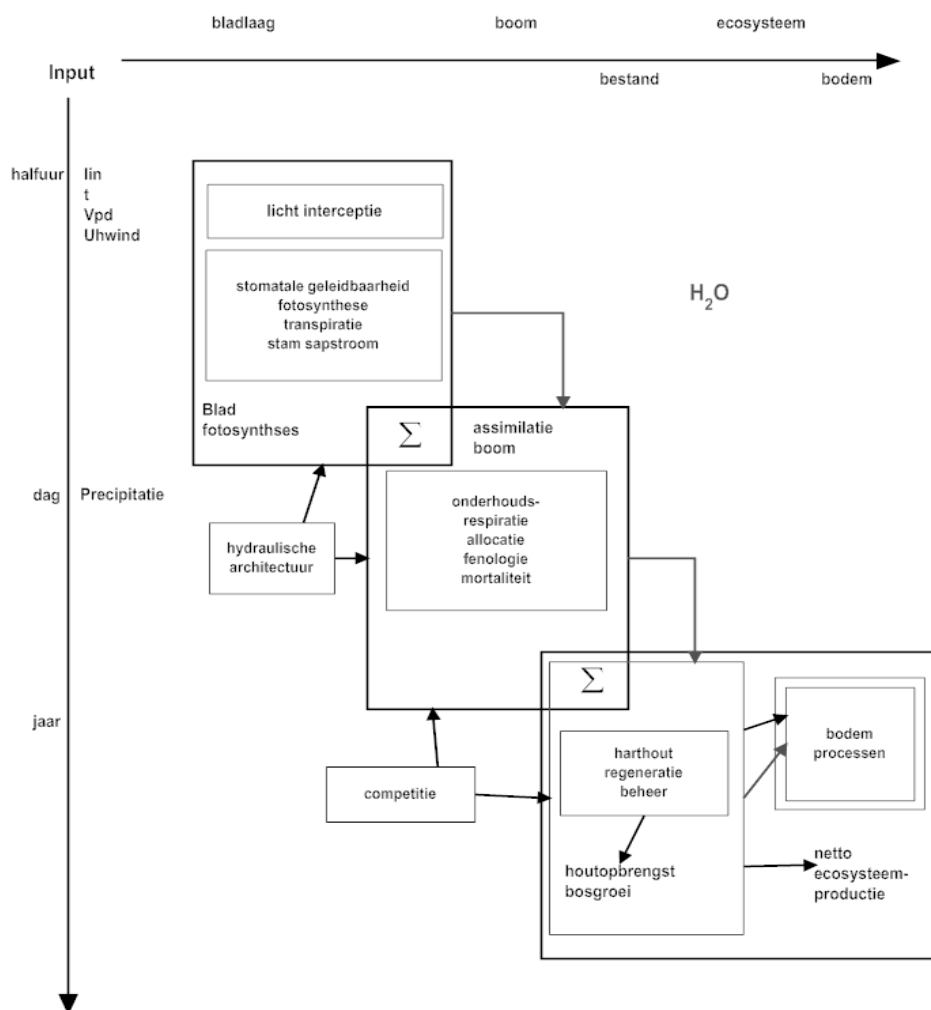
3. Modelontwikkeling ANAFORE

3.1. Algemene principes van het ANAFORE model

Het mechanistisch bosmodel ANAFORE is in ontwikkeling sinds 1998 en wordt volledig beschreven in Deckmyn et al. (2008). De belangrijkste kenmerken van dit proces-gestuurde groeimodel zijn (Figuur 15) de volgende.

- Ruimtelijke schaal
 - Simulatie op bestandsniveau, waarbij een bestand homogeen of gemengd, gelijkjarig of ongelijkjarig kan zijn
- Assimilatie en productie
 - De fotosynthese en transpiratieprocessen worden halfuurlijks berekend (op basis van klimaatsgegevens) waarbij de vegetatie onderverdeeld wordt in lagen (typisch 1 m) met een onderscheid tussen zon- en schaduwbladeren per bladlaag.
 - Groei en allocatie van alle koolstof (C) en stikstof (N) pools worden dagelijks berekend met als sturende processen fotosynthese (bomen en ondergroei), verdamping (bodem), transpiratie (bomen en ondergroei) en respiratie (bodem en biomassa).
- Houtvorming en- kwaliteit
 - Houtvorming van vezels, vaten, parenchym- en steunweefsel wordt gesimuleerd.
 - Kroonontwikkeling en vertakking worden dynamisch gesimuleerd in functie van de onderlinge competitie.
- Bodem
 - Het ANAFORE model omvat een gedetailleerd bodemmodel waarbij C en N-inhoud van de bodem (onderverdeeld in bodemlagen met verschillende C-pools afhankelijk van de degradatiesnelheid) dagelijks wordt berekend met een actieve rol van bodemorganismen.
- Toepassingsmogelijkheden
 - Aangezien de sturende processen (fotosynthese, transpiratie en respiratie) afhankelijk zijn van de omgevingstemperatuur en het CO₂ gehalte kan het model gebruikt worden om de gevolgen van globale klimaatsveranderingen te simuleren.

Voor het SimForTree project werden nog een aantal verbeteringen aangebracht aan het ANAFORE model: (i) Verbeterde simulatie van vertakking op basis van de experimentele gegevens; (ii) Verbeterde simulatie van de fenologie (knopontwikkeling, vroeghout/laathout ontwikkeling, LAI ontwikkeling) op basis van de verzamelde gegevens; (iii) Verbeterde simulatie van de waterhuishouding, op basis van de gevonden relaties; (iv) Validatie van de simulatie van Global Change effecten a.h.v. groeiringsanalyse; (v) Verbeterd geheugengebruik van het model (om de loopsnelheid te verhogen)



Figuur 15. Schematisch overzicht van de structuur van het ANAFORE model incl. de temporele en spatiale schaalniveaus.

3.2. Datasets

De invoerdata (parameters) nodig voor het ANAFORE model kunnen in vier grote categorieën ingedeeld worden: (i) soortspecifieke kenmerken, (ii) klimaatsgegevens (temperatuur, straling, neerslag, wind, CO₂-gehalte en N-depositie), (iii) bodemgegevens (fysische kenmerken textuur en structuur, initiële C-pools, waterbeschikbaarheid) en (iv) beheer.

(i) Aangezien een aantal van de soortspecifieke parameters moeilijk meetbaar is, werd in eerste instantie een dataset opgesteld uit literatuurgegevens, die daarna werd aangepast aan de Vlaamse situatie door middel van bayesiaanse parameterisatieprocedure (zie §3.3). ANAFORE is momenteel geparameteriseerd voor zomereik, beuk, grove den en cultuurpopulier.

(ii) Meteorologische data van 28 stations van het Koninklijk Meteorologisch Instituut (KMI) en het Nederlands meteorologisch instituut (KNMI), die het hele Vlaamse grondgebied en de grensgebieden omvatten werden gebruikt. Een compilatie van minimum en maximum temperatuur, neerslag, luchtvochtigheid, invallende straling en gemiddelde windsnelheid voor

de periode 1860-2008 voor drie meteorologische gebieden (Kust - Centraal Vlaanderen - Kempen) werd berekend.

Globale jaarlijkse CO₂ concentraties waren afkomstig van historische metingen op ijsboringen in Antarctica (voor periode voor 1958) en van atmosfeer (na 1958). Totale jaarlijkse N depositie voor Vlaanderen werd gereconstrueerd uitgaande van een constante depositie van 4 kg N ha⁻¹ y⁻¹ tot 1940, een lineaire toename tot 1990 en een stabilisatie op de huidige waarde van 40 kg N ha⁻¹ y⁻¹ na 1990.

In SimForTree gebruikten we tevens drie klimaatsscenario's om het toekomstige klimaat te berekenen: (1) geen globale klimaatsverandering, (2) intermediaire klimaatsverandering, (3) sterke klimaatsverandering. Voor elk van deze scenario's werden maandwaarden van de nodige invoergegevens berekend voor de komende 160 jaren. Voor het scenario 1 werd hiervoor uitgegaan van de gemiddelde waarden van het huidige klimaat. Scenario's 2 en 3 zijn gebaseerd op de IPCC rapporten nl. "B family" (global development sustainable and environmental friendly) en "A family" (global development rapid but unsustainable and not environmental oriented) scenario's. We konden hier gebruik maken van de regionale scenario's voor neerslag en temperatuur die door het KMI werden opgesteld ten behoeve van het INBO (nl. de studie "Berekening van klimaatsscenario's voor Vlaanderen", besteknr. INBO.FD.2007.5 van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek).

(iii) Bodemdata van de metingen binnen het SimForTree project werden gesynthetiseerd tot 36 bodemtypes voor Vlaanderen (zie annex 6).

(iv) Wat betreft de gesimuleerde beheerstrategieën werd een brede waaier aan opties opgenomen, variërend van courant toegepast beheer tot beheerstrategieën die in de toekomst overwogen zouden kunnen worden (zie annex 6).

3.3. Bayesiaanse parameterisatie van het model voor Vlaanderen

Eén van de grootste uitdagingen van het SimForTree project was de ontwikkeling van één parameterset (per soort) die onder alle omstandigheden (dus uiteenlopende bodem-, klimaats- en beheersopties) een goed resultaat oplevert. Dit is een fundamentele doorbraak aangezien in het verleden steeds de parameterisaties werden aangepast aan lokale omstandigheden. Dit laat echter niet toe om omstandigheden waarover geen data bestaan (toekomstig klimaat of vernieuwend beheer) te simuleren. Om tot een generische parameterisatie voor Vlaanderen te komen pasten we een bayesiaanse parameterisatie toe.

Bayesiaanse statistiek laat toe om inputparameters die niet rechtstreeks (of enkel met een grote onzekerheid) gemeten kunnen worden te schatten (optimaliseren) aan de hand van calibratiegegevens (metingen). Het grote verschil met een traditionele optimalisatie voor specifieke sites (waarin immers ook een input parameterset wordt berekend die de best mogelijke fit geeft met een validatiedataset), is dat de bayesiaanse procedure rekening houdt met de onzekerheid op de validatiedata, en dat de uitkomst niet één 'beste' parameterset is, maar een distributie voor elke parameter. Hierdoor wordt het ook mogelijk om op een objectieve manier een onzekerheidsinterval te berekenen op de modeluitkomsten. Dit is een

erg belangrijk onderscheid met veel bestaande modellen, die immers met een hoge correlatie (r^2) proberen aan te tonen dat het model 'goed' werkt, terwijl de onzekerheid op de gemodelleerde resultaten erg groot kan zijn. De gebruikte procedure werd reeds toegepast om de parameterisatie voor bodemkoolstofmodellering (Deckmyn et al., submitted) en voor beuk in Slovenië te verbeteren (Deckmyn et al., 2009), alsook voor de parameterisatie van de bladfenologie (Fu et al., 2011). Voor het SimForTree project werden de beschikbare metingen (hoogte, ringbreedte, densiteit, vroeghout/laathout, bodem karakteristieken, LAI) van een aantal onderzochte bestanden van de drie boomsoorten gebruikt (enkel de bestanden waarvan voldoende beheersgegevens in het verleden voorhanden waren). Voor populier kon gebruik gemaakt worden van meetgegevens van het INBO met betrekking tot acht plantages die opgevolgd werden van 1971 tot/met 2000.

Hoewel bayesiaanse parameterisatie de laatste jaren in opmars is, is de toepassing op de grote schaal van SimForTree uniek. De optimalisatie verliep niet vlekkeloos en diende een aantal malen herhaald te worden. Voor populier, den en beuk bleken uiteindelijk 40.000 tot 100.000 simulaties nodig om tot een stabiel resultaat te komen. Voor eik bleek uiteindelijk dat de gekozen bestanden niet voldoende verschilden om een correcte parameterisatie onder alle omstandigheden te verkrijgen. Daarom werd beslist bijkomende data toe te voegen en de procedure opnieuw te laten lopen voor 10.000 simulaties.

4. Beslissingondersteuning voor het Vlaamse bosbeleid en -beheer

Het SimForTree project heeft gewerkt aan enkele instrumenten die beheerders en beleidsmakers kunnen helpen om hun keuzes te maken aangaande duurzaam en multifunctioneel bosbeheer: beslissingondersteunende systemen die de lange-termijn ontwikkeling van bossen kunnen simuleren bij wijzigend beheer en klimaat, en die resultaten onderling en doorheen de tijd kunnen vergelijken. De drie beslissingondersteunende systemen die vanuit het SimForTree project ter beschikking worden gesteld zijn prototypes, waarmee alternatieve beheerkeuzes over een lange termijn kunnen doorgerekend worden, rekening houdend met groeiplaats en klimaatwijziging. De resultaten laten toe om in te schatten welk van de alternatieven het beste scoort op één of meer criteria aangaande houtproductie, biodiversiteit, koolstofopslag en diverse ecosysteemdiensten.

De drie systemen hebben elk een eigen resolutie en doelstelling, en een diverse vorm van gebruiksvriendelijkheid. De motor is in de drie gevallen steeds ANAFORE, het ecofysiologisch bosontwikkelingsmodel ontwikkeld door de Universiteit van Antwerpen (cf. §3). De drie systemen verschillen enkel in de verpakking, en de extra functionaliteit die toegevoegd werd. Ze worden hier in dalende mate van gebruiksvriendelijkheid en in stijgende mate van complexiteit kort voorgesteld.

4.1. Systeem S1

Systeem 1 (S1), ook aangeduid met de naam “Sim4Tree”, is eigenlijk een gigantische databank met een groot aantal vooraf uitgevoerde runs van ANAFORE, voor verschillende soorten, bodemtypes, klimaatzones, klimaatscenario's en beheerscenario's. De runs hebben een ruimtelijke resolutie van 1 hectare en een tijdsverloop van 2010 tot 2160 in stappen van 10 jaar. Omdat ANAFORE momenteel enkel ontwikkeld is voor vier soorten (eik, beuk, grove den, populier), werden voor alle andere belangrijke bosbouwsoorten gegevens uit gepubliceerde opbrengsttabellen aan de databank toegevoegd. Deze databank wordt ontsloten door een grafische interface die de gebruiker toelaat om zelf zijn bos samen te stellen (of eventueel gebruik te maken van een vooraf ingevoerde ruwe bossamenstelling voor Vlaanderen) en beheerkeuzes te maken. Alles is beperkt tot een vooraf vastgelegd aantal discrete klassen (bvb 3 klimaatzones, 36 bodemtypes, 8 beheerscenario's voor grove den, enz.), maar het is wel mogelijk tijdens de looptijd van de simulatie omvormingen tussen soorten en beheerscenario's uit te voeren. Het systeem genereert samenvattende output op niveau van het hele bos met betrekking tot geogst stamvolume en takbiomassa, staande voorraad, gemiddelde kroonbedekking, koolstoffracties en gemiddelde houtdichtheid doorheen de tijd – eventueel opgesplitst per soort of diameterklasse. Daarnaast kan op niveau van de individuele 1 hectare-pixels ook een meer uitgebreide output opgevraagd worden. Deze omvat o.a. een reeks variabelen m.b.t. houtkwaliteit, bosstructuur, biodiversiteit, diverse ecosysteemdiensten en bodemkenmerken.

S1 is typisch bedoeld voor grote bosgebieden van meerdere honderden hectares, om de grote lijnen van mogelijke gevolgen van beleidskeuzes in te schatten. Het levert dus minder gedetailleerde output dan de systemen S2 en S3, maar voegt extra functionaliteit toe in de vorm van een gebruikersinterface, de combinatie met bestaande gegevens voor soorten die niet door ANAFORE worden gesimuleerd, de mogelijkheid om als gebruiker een eigen virtueel bos samen te stellen -al dan niet gebaseerd op bestaande inventarisgegevens- en om diverse beheer- en omvormingsscenario's te definiëren.

4.2. Systeem S2

Systeem S2 haalt een veel groter detailniveau, met een resolutie van 1 are en tijdstappen van 1 jaar en minder (tot zelfs 10-dagelijks). Het principe is verder gelijkaardig als bij S1, maar met meer mogelijkheden van beheer, zodat dit systeem zich kan lenen tot het doorrekenen van beheerkeuzes op bestandsniveau. Aangezien hier de mogelijkheid wordt geboden om ook andere dan de in S1 voorgeprogrammeerde beheersopties/bodemopties te gebruiken, wordt op dit niveau eerst een databank aangemaakt op basis van de keuzes van de gebruiker. Het systeem draait dus in real-time, en is niet langer gebaseerd op vooraf doorgerekende runs. Er is geen eigen grafische interface voorzien, maar de gebruiker kan wel terugvallen op de inherente functionaliteit van de databanksoftware waarin het systeem wordt beheerd (PostgreSQL 9.0). Er is echter geen functionaliteit voorzien voor andere soorten dan zomereik, beuk, grove den en populier. Een gebruiker kan ook geen eigen virtueel bos samenstellen, of complexe omvormingsregels definiëren.

4.3. Systeem S3

Systeem S3, tenslotte, is een verbeterde en vooral eenvoudiger te gebruiken versie van het ANAFORE model, waarmee de gebruiker aan alle knoppen van het model kan draaien en dus de hoogste graad van detail (zowel naar input als naar output) kan bekomen. Dit systeem heeft voornamelijk een wetenschappelijke functie. Het bevat bovendien een parameterisatie module die toelaat de nodige parameters voor simulatie van een soort af te leiden uit groeidata.

Het design en de uitwerking van de prototypes gebeurde steeds in nauw overleg met een groep vakspecialisten uit de brede beheer- en beleidwereld in Vlaanderen. De prototypes kunnen op vraag voorgesteld en ingezet worden. De verdere ontwikkeling van de prototypes tot operationele en breed beschikbare systemen kan overwogen worden op vraag van potentiële gebruikers.

5. Case study: groeitrends ten gevolge van klimaatverandering

Productiviteit, houtkwaliteit en houtvorming zijn onderhevig aan klimatologische omstandigheden, en net die kunnen grondig wijzigen in de loop van de tijd. Juist door de lange groeiperiodes van bosbomen valt het te verwachten dat groeifluctuaties zullen optreden ten gevolge van klimaatswijzigingen. In het SimForTree project konden twee pistes bewandeld worden om daar beter inzicht in te krijgen. Enerzijds kon op basis van de uitgebreide dataset uit het SimForTree meetnet gekeken worden naar de groei van bomen in het verleden, en hoe die groei is gewijzigd ten gevolge van veranderingen in klimaat, CO₂, N depositie en andere wijzigende omgevingsfactoren doorheen de 20^e eeuw (§5.1). Anderzijds kunnen door het ANAFORE model simulaties worden uitgevoerd om toekomstige ontwikkelingen te voorspellen (§5.2). Beide analyses geven complementaire inzichten.

5.1. Observationale analyse van Global Change effecten

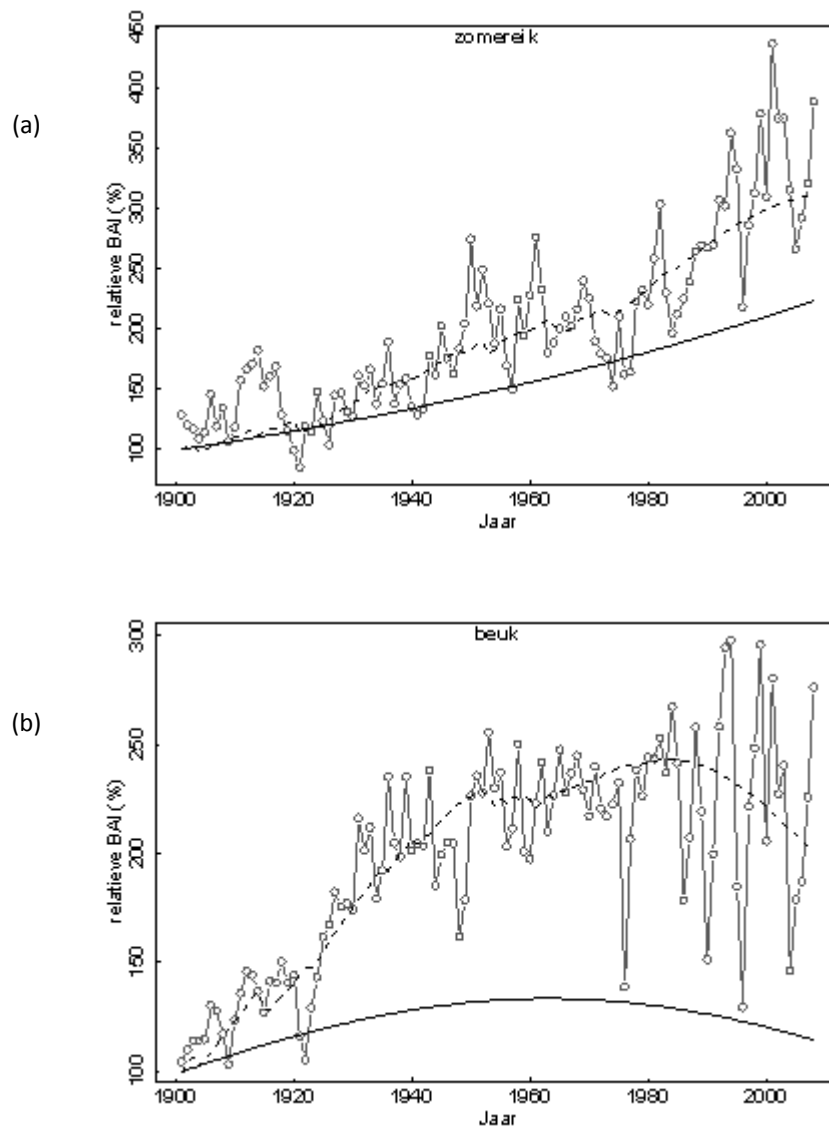
Bomen slaan jaarlijks heel wat informatie op in hun groeiringen. In ons gematigd zeeklimaat leert de jaarringbreedte ons iets over de specifieke groeicondities van dat jaar. In SimForTree werden alle opgemeten volwassen modelbomen van zomereik, beuk en grove den aangeboord in 2008, en werden alle jaarringbreedtes opgemeten (Figuur 10 en annex 1). Het was dus mogelijk voor elke soort een empirisch groeimodel op te maken voor de 20^e eeuw en de diverse mogelijke componenten van die groei te onderzoeken.

We bouwden opeenvolgend drie 'mixed linear models' voor de jaarlijkse groei van het grondvlak van een individuele boom ('basal area increment' of BAI). Een eerste model beschrijft de groei van individuele bomen doorheen de tijd en in functie van gekende groeiplaatskenmerken (bvb boniteit) en structuurkenmerken (bvb competitie). Een tweede model voegt aan het eerste een nieuwe component toe, namelijk een functie van het jaartal van de groei. De bedoeling hiervan is om na te gaan of er een (curvi)lineaire groeitrend kan waargenomen worden doorheen de tijd. In een derde model wordt dan geprobeerd om die trend, indien aanwezig, te verklaren met klimatologische variabelen. Alle details over de gebruikte methodes zijn samengevat in de publicatie van Kint et al. (submitted b), die ook opgenomen is in annex 2.

Model 1: Voor elke soort bleek de groeicurve van BAI best benaderd te worden door een kwadratische term van de leeftijd of diameter. De groei van bomen neemt aanvankelijk een hele tijd toe, maar de groeitoename wordt lager met de leeftijd. Bovendien wordt de groei negatief bijgesteld voor bomen die veel competitie ondervinden. Bij zomereik en beuk is er ook een positief effect van de standplaatskwaliteit. Heel wat lokale verschillen in groei tussen individuele bomen, bvb ten gevolge van uiteenlopende N deposities of verschillend historisch beheer, worden opgevangen door een 'random' component van het model.

Model 2: De duidelijkste groeitrend wordt waargenomen voor zomereik. De groei van zomereik is doorheen de 20^e eeuw lineair toegenomen, waardoor de groei van een boom in 2008 meer dan dubbel zo hoog ligt dan die van een identieke boom in 1901. Ook voor beuk wordt een duidelijke trend waargenomen, met een aanvankelijke stijging van de groei met ruim 30%

tussen 1901 en het begin van de jaren 1960, en een geleidelijke groeifname sindsdien. Het netto groeiverschil voor beuk tussen 1901 en 2008 bedraagt nog 15%. Beide groeitrends zijn weergegeven in Figuur 16 (volle lijn). De stippellijnen in de figuur geven de gemiddelde groeitrends weer voor de opgemeten bomen; het verschil tussen de beide groeitrends is te wijten aan de stijgende gemiddelde leeftijd van de opgemeten bomen doorheen de tijd.



Figuur 16. Gemodelleerd patroon van grondvlakgroei (BAI) voor zomereik en beuk, met model 2 en met 1901 als referentie (100%). Stippellijn: voorspelde BAI met gemiddelde waarden van boomleeftijd en klimaat per jaar, met op de achtergrond de gemiddelde waargenomen BAI per jaar. Volle lijn: voorspelde BAI van een individuele boom met identieke kenmerken doorheen de tijd (de waarden uit 1901 dienen als basis). (uit Kint et al., submitted b)

Voor grove den werd geen significante groeitrend waargenomen. Dat kan op het eerste zicht vreemd lijken, voornamelijk omdat in Europa al veelvuldig werd aangetoond dat grove den wel degelijk een groeitoename kende in de 20^e eeuw ten gevolge van stijgende N depositie. De aard van de groeitrend die we hier onderzoeken is echter verschillend: doordat hij specifiek aan een

groeidatum verbonden is (en dus gelijk is voor alle bomen), is de hier waargenomen trend enkel te verklaren met omgevingsfactoren die over heel Vlaanderen op dezelfde wijze zijn veranderd – wat uitdrukkelijk niet het geval is voor de lokaal sterk uiteenlopende N deposities.

Model 3: De waargenomen groeitrends voor zomereik en beuk blijken volledig te worden verklaard door klimaatwijzigingen in de 20^e eeuw. Bij zomereik is dat in eerste orde de stijgende trend in de temperatuur in het groeiseizoen, in combinatie met een doorgaans goede waterbeschikbaarheid. De dalende groeitrend bij beuk sinds 1960 is dan weer gerelateerd aan de eveneens sterk dalende trend in relatieve luchtvochtigheid in de zomer over dezelfde periode en deels versterkt door toenemend watertekort in de bodem.

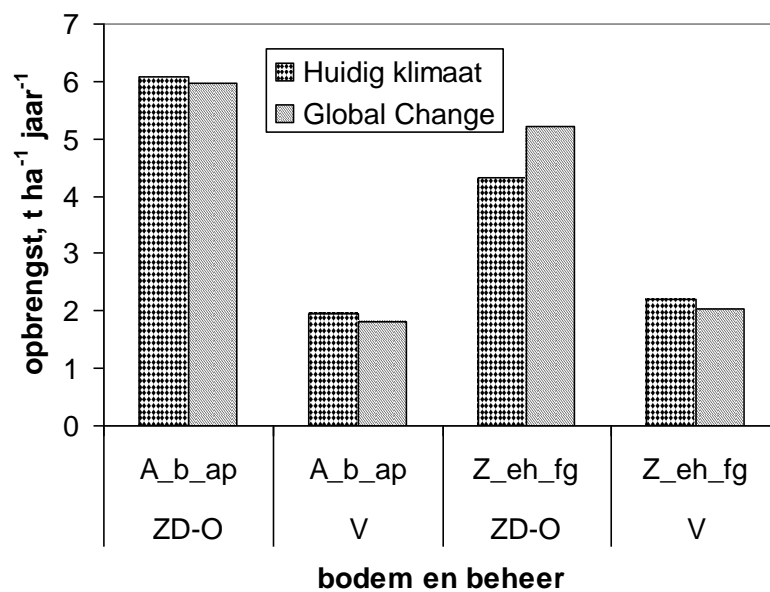
Deze modellen geven een duidelijke relatie aan tussen groei en klimaat in de 20^e eeuw. Met enige voorzichtigheid kunnen ze ook gebruikt worden om vooruit te kijken naar mogelijke effecten van toekomstige klimaatverandering. Het KMI voorziet voor Vlaanderen een verdere toename van de temperatuur en een verschuiving van de neerslag naar de wintermaanden. De toekomst van zomereik ziet er in dit scenario, en volgens onze empirische modellen, positief uit, met stijgende groei zolang de bodemwaterbeschikbaarheid (vooral dan in het voorjaar) goed blijft. Helemaal anders is het verhaal voor beuk. Het valt te verwachten dat een meer frequente en sterkere zomerdroogte de groei van beuk verder negatief zal beïnvloeden. Bovendien is de negatieve groeitrend waargenomen in alle onderzoeksplots, onafhankelijk van de bodemkwaliteit, zodat het door sommigen aangenomen temperende effect van de standplaats eerder gering lijkt. Voor grove den werd een positief effect van temperatuur in het voorjaar en een negatief effect van temperatuur in de zomer gemodelleerd, waardoor het netto effect op de groei in de toekomst onduidelijk blijft. Op basis van de literatuur wordt toch eerder een dalende groeitrend voor grove den verwacht. Een overzicht van verwachte klimaatveranderingen op productiviteit en biogeochemische processen voor bossen in België wordt verder uitgediept in de publicatie van Campioli et al. (2011, cf annex 2).

5.2. Mechanistische simulatie van Global Change effecten op bossen

Naast een analyse van de observationele data, kunnen de simulatiedata van het ANAFORE model gebruikt worden. Mechanistische of proces-gebaseerde modellen trachten de belangrijkste processen te beschrijven die een dynamisch systeem (bvb een bosesysteem) aandrijven. Dergelijke modellen zijn meestal niet-lineair en produceren vaak erg complexe dynamische resultaten. Indien het mechanistisch model de relevante processen correct incorporeert, dan kan het model vrij correcte inschattingen maken van de dynamiek van het systeem over een brede waaier van nieuwe parameters en ongekende condities. Aangezien de S1 databank relatief weinig details bevat, wordt bij deze analyse uitgegaan van data uit de gedetailleerde en sterk gestoffeerde S2 databank. Voor elke soort kan een groeisimulatie uitgevoerd worden voor de komende 100 jaar, uitgaande van diverse klimaatscenario's. Bij wijze van voorbeeld bekijken we de resultaten voor eik en populier, onder scenario's van niet gewijzigd klimaat en van sterke klimaatverandering (IPCC type A).

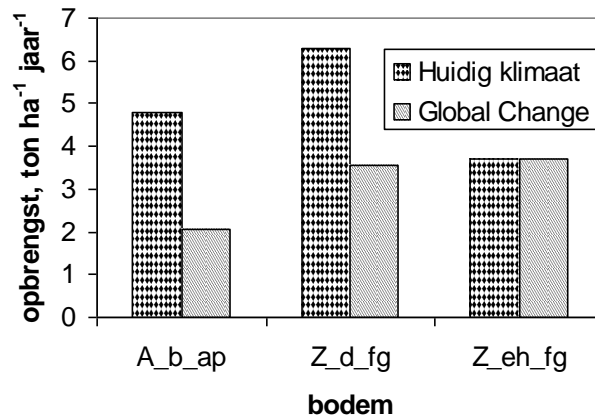
De observationele resultaten geven voor de 20^e eeuw een positieve groeitrend weer voor zomereik op alle onderzochte standplaatsen (cf. §5.1). Er wordt aangenomen dat deze trend ook in de 21^e eeuw behouden blijft, op voorwaarde dat de waterbeschikbaarheid in het voorjaar

voldoende hoog blijft. Het ANAFORE model geeft meer duidelijkheid over de standplaatsen waar aan deze voorwaarde niet voldaan wordt omwille van de voorspelde toename aan droogteperiodes in het IPCC scenario (Figuur 17). Vooral op goed gedraineerde leembodems zou de groei eerder afgeremd worden bij toenemende droogtestress. Op de voor zomereik vandaag minder gunstige natte zandbodems daarentegen geven de simulaties een toegenomen productiviteit weer als gevolg van een verbeterde waterhuishouding. Naast veranderingen in totale productiviteit blijkt ook de houtkwaliteit onderhevig aan klimaatverandering.



Figuur 17. Opbrengst van eik onder huidig klimaat en onder global change omstandigheden op verschillende bodems en bij een verschillend beheer (ZD-O = van zeer dicht naar open, V=vrijstaand).

Voor populier, een sterk waterbehoevende soort, lopen de resultaten verder uiteen naargelang de bodem (Figuur 18): op betere bodems blijkt de toegenomen zomerdroogte nefast voor de groei. Ook hier vinden we echter dat op minder gunstige bodems een lichte toename in productiviteit nog mogelijk is. Uit deze resultaten blijkt enerzijds dat de simulaties interessante resultaten opleveren betreffende mogelijke gevolgen van klimaatverandering, maar dat er anderzijds toch nog nood is aan betere parameterisaties.



Figuur 18. Opbrengst van populier onder huidig klimaat en onder global change omstandigheden op verschillende bodems (A_b_ap = leembodem, Z_d_fg = zandbodem).

6. Besluit

Via het SimForTree project kon een prototype van een beleidsondersteunend werkinstrument ("Sim4Tree") ontwikkeld worden dat dienstig kan zijn bij toekomstig beheer en behoud van bossen in Vlaanderen. In tegenstelling tot andere beleidsondersteunende modellen wordt Sim4Tree onderbouwd door een mechanistisch proces-gebaseerd simulatiemodel. In de periode van het SimForTree project werden heel wat experimentele gegevens verzameld op een representatief en wel overwogen netwerk van experimentele plots in Vlaanderen. Deze gegevens werden in het model geïncorporeerd of dienden als calibratieparameters. De simulaties die werden uitgevoerd laten verhopen dat het ontwikkelde ondersteunende instrument heel wat mogelijkheden heeft naar relevante toepassingen van multi-functioneel beheer. Zonder twijfel is er nog heel wat werk aan de winkel om het model optimaal te kunnen inzetten voor bosbeheer in Vlaanderen, maar een gunstige aanzet werd met dit project zeker gegeven.

Bibliografie van SimForTree

- Aertsens, W., Kint, V., Van Orshoven, J., Özkan, K. & Muys, B. (2010). Comparison and ranking of different modelling techniques for prediction of site index in Mediterranean mountain forests. *Ecological Modelling*, 221, 1119-1130.
- Aertsens, W., Kint, V., Van Orshoven, J. & Muys, B. (2011). Evaluation of modelling techniques for forest site productivity prediction in contrasting ecoregions using Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis (SMAA). *Environmental Modelling and Software*, in druk.
- Aertsens, W., Kint, V., De Vos, B., Deckers, J., Van Orshoven, J. & Muys, B. (submitted). Comparison of direct and indirect environmental predictors for modelling forest site productivity in temperate lowland.
- Bequet, R., Kint, V., Campioli, M., Vansteenkiste, D., Muys, B. & Ceulemans, R. (2011). Influence of stand, site and meteorological variables on the maximum Leaf Area Index of beech, oak and Scots pine. *European Journal of Forest research*, in druk.
- Bequet, R., Campioli, M., Kint, V., Vansteenkiste, D., Muys, B. & Ceulemans, R. (submitted). Leaf area index development in temperate oak and beech forests is driven by stand characteristics and weather conditions.
- Bequet, R., Campioli, M., Kint, V., Muys, B., Bogaert, J. & Ceulemans, R. (submitted). Spatial variability of leaf area index in homogeneous forests relates to local variation in tree characteristics.
- Campioli, M., Vincke, C., Jonard, M., Kint, V., Demarée, G. & Ponette, Q. (2011). Current status and predicted impact of climate change on forest production and biogeochemistry in the temperate oceanic European zone – Review and prospective for Belgium as a case study. *Journal of Forest Research*, in druk.
- Campioli, M., Gielen, B., Granier, A., Verstraeten, A., Neirynek, J. & Janssens, I.A. (submitted). Carbon allocation to biomass production of leaves, fruits and woody organs at seasonal and annual scale in a deciduous- and evergreen temperate forest.
- Deckmyn, G., Verbeeck, H., Op de Beeck, M., Vansteenkiste, D., Steppe, K. & Ceulemans, R. (2008). ANAFORE: a stand-scale process-based forest model that includes wood tissue development and labile carbon storage in trees. *Ecological Modeling*, 215, 345-368.
- Deckmyn, G., Mali, B., Kraigher, H., Torelli, N., Op de Beeck, M. & Ceulemans R. (2009). Using the process-based stand model ANAFORE including Bayesian optimisation to predict wood quality and quantity and their uncertainty in Slovenian beech. *Silva Fennica*, 43, 523-534.
- Deckmyn, G., Campioli, M., Muys, B. & Kraigher, H. (submitted). Simulating C and N cycles in forest soils: including the active role of micro-organisms in the ANAFORE forest model.
- De Ridder, M., Van den Bulcke, J., Vansteenkiste, D., Van Loo, D., Dierick, M., Masschaele, B., De Witte, Y., Mannes, D., Lehmann, E., Beeckman, H., Van Hooebeke, L. & Van Acker, J. (2011). High-resolution proxies for wood density variations in *Terminalia superba*. *Annals of Botany* (doi:10.1093/aob/mcq224), 10 pp.

-
- Fu, Y.S.H., Campioli, M., Demarée, G., Deckmyn, A., Hamdi, R., Janssens, I.A. & Deckmyn, G. (2011). Success and failure of the unified tree budburst model with Bayesian calibration. *International Journal of Biometeorology*, in druk
 - Kint, V., Lasch, P., Lindner, M. & Muys, B. (2009). Multipurpose conversion management of Scots pine towards mixed oak-birch stands – a long term simulation approach. *Forest Ecology and Management*, 257, 199-214.
 - Kint, V., Hein, S., Campioli, M. & Muys, B. (2010). Modelling self-pruning and branch attributes for young *Quercus robur* L. and *Fagus sylvatica* L. trees. *Forest Ecology and Management*, 260, 2023-2034.
 - Kint, V., Vansteenkiste, D., Aertsen, W., De Vos, B., Bequet, R., Van Acker, J. & Muys, B. (submitted a). Forest structure and soil trophic condition determine internal stem morphology of Pedunculate oak – a modelling approach using Boosted Regression Trees.
 - Kint, V., Aertsen, W., Campioli, M., Vansteenkiste, D., Delcloo, A. & Muys, B. (submitted b). Radial growth change of temperate tree species in response to altered regional climate: a mixed model approach.
 - Mäkelä, M., Grace, J.C., Deckmyn, G., Kantola, A. & Campioli, M. (2010). Simulating wood quality in forest management models. *Forest Systems*, 19, 48-68.
 - Muys, B., Hynynen, J., Palahi, M., Lexer, M.J., Fabrika, M., Pretzsch, H., Gillet, F., Briceño, E., Nabuurs, G.J. & Kint, V. (2010). Simulation tools for decision support to adaptive forest management in Europe. *Forest Systems*, 19, 86-99.
 - Op de Beeck, M., Löw, M., Deckmyn, G. & Ceulemans, R. (2010). A comparison of photosynthesis-dependent stomatal models using twig cuvette field data for adult beech (*Fagus sylvatica* L.). *Agricultural and Forest Meteorology* 150, 531-540.
 - Van Orshoven, J., Kint, V., Wijffels, A., Estrella, R., Bencsik, G., Vanegas, P., Muys, B., Cattrysse, D. & Dondeyne, S. (2011). Upgrading geographic information systems to spatio-temporal decision support systems. *Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resource Sciences*, in press.

Lijst van annexen (online beschikbaar op www.simfortree.be)

- Annex 1 – SimForTree Meetnet
- Annex 2 – Publicaties
- Annex 3 – Voorstelling boorcampagne
- Annex 4 – Voorstelling Nanowood
- Annex 5 – Voorstelling tilting experiment
- Annex 6 – Voorstelling ANAFORE
- Annex 7 – Link van de verschillende databanken en modellen