



Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen
Academiejaar 2011 – 2012

Bioenergetische karakterisering van tropische houtsoorten

Tom De Mil

Promotor: Prof. dr. ir. Joris Van Acker

Tutor: Dr. ir. Jan Van den Bulcke

Masterproef voorgedragen tot het behalen van de graad van
Master in de bio-ingenieurswetenschappen: Bos- en natuurbeheer

Auteursrecht

De auteur en de promotor geven de toelating deze scriptie voor consultatie beschikbaar te stellen en delen ervan te kopiëren voor persoonlijk gebruik.

Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting uitdrukkelijk de bron te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze scriptie.

Gent, 8 juni 2012

De promotor,

De auteur,

Prof. dr. ir. Joris VAN ACKER

Tom De Mil

Woord vooraf

Deze masterproef zou nooit zijn verwezenlijkt zonder de steun, de hulp en het deskundig advies van een aantal personen.

Eerst en vooral wil ik Prof. Dr. Ir. Joris Van Acker bedanken voor het promotorschap, de suggesties en inzichten.

Aan mijn begeleider Dr. Ir. Jan Van den Bulcke wil ik mijn dank betuigen voor de geweldige begeleiding en aanmoedigingen gedurende de gehele onderzoeksperiode.

Ik heb de kans gekregen om veldwerk in Suriname te verrichten. Bij deze gaat mijn dank uit naar houtexpert Leon Comvalius, de enthousiaste boomexpert Frits Van Troon, David Van Roy (Greenheart NV) en de bedrijfsleiders van de bezochte houtzagerijen. Dorothy Traag en alle medewerkers van het Nationaal Herbarium bedank ik voor alle faciliteiten.

Bedankt aan Suriname, om mij een momentopname te schenken van de weelderige biodiversiteit die heerst in zijn wouden.

Iedereen van het Laboratorium Houttechnologie heeft telkens een moment vrijgemaakt om mij op een uiterst vriendelijke manier te helpen. Nele Defoirdt dank ik voor het herlezen van mijn thesis en de bijhorende tips. Stijn Willen dank ik voor het verzagen van mijn houtstalen en de praktische hulp. Rik De Rycke krijgt mijn dank voor de begeleiding en de goede sfeer bij het uitvoeren van de proeven. Houtexpert Piet De Keyser vermeld ik voor het enthousiast aanreiken van extra stalen en de tips. Verder dank ik Wannes Hubau en Imke De Windt, die mijn talloze praktische vragen hebben beantwoord.

Ook Güray Yildiz en andere medewerkers van de vakgroep biosysteemtechniek worden vermeld voor de hulp bij de apparatuur.

Jean Gérard maakte het mogelijk om resultaten te vergelijken met deze van de CIRAD databank.

Met dank aan Hans Van Lommel voor de uitstekende samenwerking bij de raakvlakken van onze thesissen.

Tot slot wil ik mijn familie en in het bijzonder mijn ouders, bedanken. Zonder hun jarenlange steun zou ik deze opleiding niet kunnen volgen hebben.

Abstract

The overall aim of this dissertation was to examine the potential energetical valorization of sawmill residues from tropical areas, specifically Suriname.

The objectives were threefold: to provide fundamental knowledge on the studied timber species, to investigate whether state-of-the-art proxies like X-ray computed tomography (X-CT) and Near Infrared Hyperspectral Imaging (NIRhi) are good proxies to obtain this knowledge in a fast and non-destructive manner, and finally to use this information to make statements about the variability in traits between and inside species and its implications to a potential valorization. Variables like wood density, Higher Heating Value (HHV), ash content and extractive content were determined by classical methods and assessed. In order to link structural traits with some ecological aspects of the tree itself, radial trends in wood density were coupled to life-history strategy and growth of the tree. However, these classical methods often involve tedious procedures.

A significant relation was found between extractive content and HHV ($R^2 = 0.53$). No relations were found between wood density, ash content and HHV (R^2 respectively 0.00 and 0.39). Further investigation with a bigger dataset and more species could give more statements about these relations. Knowledge of the lignin and carbohydrate content (which was not investigated here) could influence these relations. X-CT was used as a proxy for wood density measurements. Statistical tests showed no significant differences between both methods, so X-CT is an appropriate method for densitometric measurements. Moreover, this technique is able to generate data at a high spatial resolution.

A proof of concept study was made on the use of NIRhi for the prediction of wood density and HHV. This system was built and optimized to obtain good quality hyperspectral data which were used to construct models based on Projection to Latent Structures (PLS). On the one hand it was shown that constructing models based on different species did not give adequate model quality. On the other hand, if a model was constructed based on only one species, its radial variation (in wood density and HHV) was well predicted. This means that the diversity of different components (extractives) has a great influence on the model. By using only species, this factor is held constant. This study illustrates that NIRhi is a suitable technique for predicting HHV when models are constructed for each species apart. Further investigation with lignin and cellulose concentrations could further explore the potential of NIRhi.

The results showed a significant variability in HHV which could, next to moisture content, have its practical implications for valorization. Wood density is also a very important parameter for the wood industry. When energy was expressed in volumetric terms, it indicated that the high variability in wood density of the investigated timber species, was more important than the subtle differences in HHV (which is expressed in gravimetric terms).

Inhoudsopgave

1	Introductie.....	1
1.1	Bio-energie in globale context.....	1
1.2	Bosbouw en energie.....	2
1.3	Suriname.....	4
1.3.1	Casestudie verwerkingsindustrie Suriname	6
1.4	Onderzoekshypothesen.....	8
2	Literatuurstudie.....	10
2.1	Thermochemische conversie van houtige biomassa	10
2.1.1	Directe verbranding.....	10
2.1.2	Alternatieve thermochemische routes	10
2.1.3	Verbrandingsparameters.....	11
2.2	Structurele eigenschappen (volumege­wicht)	14
2.2.1	Verschillen tussen soorten	14
2.2.2	Verschillen binnen soorten.....	14
2.2.3	Link tussen HHV en volumege­wicht	15
2.3	Chemische eigenschappen	15
2.3.1	Minerale componenten (asgehalte).....	15
2.3.2	Extractieven	16
2.3.3	Lignine	17
2.3.4	Cellulose en hemicellulose	18
2.3.5	Link tussen chemische eigenschappen en calorische waarde	18
2.4	Proxy's voor structurele en chemische eigenschappen	19
2.4.1	X-stralen tomografie.....	19
2.4.2	Near-infrared beeldvorming.....	19
3	Materiaal en methoden	21
3.1	Staalname.....	21
3.2	Volumege­wichtsbepaling	22
3.3	Bepaling calorische waarde en asgehalte	23
3.3.1	Bomcalorimeter.....	23
3.3.2	Moffeloven	24
3.4	Chemische analyse	24
3.4.1	Extractiefbepaling.....	24

3.5	X-stralen tomografie.....	25
3.6	Near-infrared beeldvorming.....	26
3.6.1	Herschaling	27
3.6.2	Voorverwerking	29
3.6.3	PLS (Projectie op Latente Structuren) regressie.....	29
4	Resultaten en bespreking.....	31
4.1	Volumegewicht.....	31
4.2	HHV.....	33
4.3	Link tussen volumegewicht en HHV	36
4.4	Ethanol-tolueen oplosbare fractie	37
4.5	Asgehalte	37
4.6	Link tussen chemie en HHV	38
4.6.1	Extractiegehalte en HHV	38
4.6.2	Asgehalte en HHV.....	40
4.7	Analyses op basis van hoge-resolutie methodes	40
4.7.1	X-CT.....	40
4.7.2	NIRhi	44
4.8	Implicaties voor valorisatie	50
4.8.1	Verbrandingswaarde	50
4.8.2	Volumegewicht.....	51
5	Conclusie	55
6	Literatuurlijst	56
	Bijlage	1
	Bijlage 1: Informatie staalname	1
	Bijlage 2: Schema positionering	3
	Bijlage 3: NIRhi optimalisatie.....	4
	Bijlage 4: Statistische output HHV.....	5
	Bijlage 5: Beschikbare chemische en calorische gegevens	8
	Bijlage 6: X-CT beelden	10
	Bijlage 7: NIR profielen.....	12
	Bijlage 8: Output van PLS-software	14

1 Introductie

1.1 Bio-energie in globale context

De globale redenen om over te gaan tot meer efficiënte en groenere energiesystemen zijn klimaatsverandering, stijgende prijzen van fossiele brandstof en het behouden van een zekere energievoorraad (Tomaselli 2007).

Bio-energie is een optie om op korte en middellange termijn fossiele brandstof te vervangen en klimaatsopwarming tegen te gaan. Vooral in Europa zijn veel activiteiten en programma's gestart om bio-energie te stimuleren (Vamvuka 2011). De Europa 20-20 doelstellingen stellen dat tegen 2020, 20% van het energieverbruik op Europees niveau dient afkomstig te zijn van duurzame bronnen. Ook wordt verwacht dat tegen 2020 in Europa het gebruik van hout voor energie deze van het gebruik als materiaal zal overstijgen (Mantau et al. 2010).

Traditionele bio-energie is als volgt gedefinieerd door de Food and Agricultural Organization (FAO): "Ongeraffineerde brandstoffen als brandhout, houtskool, voederresiduen en dierlijke resten, die gebruikt worden om te koken en te verwarmen" (Tomaselli 2007). In vele ontwikkelingslanden blijft het nog steeds de primaire energiebron. Zo stijgt in Afrika de consumptie van hout als energiedrager nog steeds, wat voornamelijk te wijten is aan populatiegroei. In andere zich ontwikkelende regio's daalt de nationale consumptie van deze traditionele brandstof. Grootste oorzaken zijn urbanisatie en inkomensstijging (FAO 2008). In bepaalde ontwikkelingslanden is beleid inzake hernieuwbare energie enkel gestuurd op vloeibare brandstoffen (ethanol en biodiesel), zonder de traditionele bosgerelateerde bio-energie te beschouwen. Het begrip biobrandstof kent verschillende definities, in sommige definities ervan slaan ze enkel op vloeistoffen (Eisentraut 2010), terwijl door anderen biobrandstof ook ruimer bekeken wordt (houtskool, brandhout etc.) (Tomaselli 2007), wat in het kader van deze thesis aan de orde is.

Moderne energiebronnen (i.e. de zogenaamde "secundaire biobrandstoffen" naar Dragone et al. (2010)) kunnen verder als volgt ingedeeld worden:

Eerste generatie biobrandstoffen

Dit zijn biobrandstoffen die reeds in aanzienlijke hoeveelheden op de markt verkrijgbaar zijn. Typische voorbeelden zijn ethanol vervaardigd uit suikerriet en maïs, biodiesel en puur plantaardige olie. De grondstoffen voor deze brandstoffen zijn zetmeel, suikers en olieachtige vruchten of dierlijke vetten. Vele van deze worden eveneens gebruikt als voeding en voeder (Eisentraut 2010).

Tweede generatie biobrandstoffen

De tweede generatie omvat brandstoffen geproduceerd uit cellulose, hemicellulose of lignine. Ze kunnen vermengd worden met conventionele brandstoffen voor gebruik in bestaande interne verbrandingsmotoren, welke verdeeld kunnen worden via de bestaande infrastructuur. Een andere toepassing is het gebruik in licht aangepaste voertuigen met interne verbrandingsmotoren. Voorbeelden zijn ethanol op basis van cellulose, alsook Fischer-Tropsch brandstoffen.

De twee voornaamste conversieroutes voor tweede generatie biobrandstoffen zijn (Eisentraut 2010):

- Biochemische route
- Thermochemische route

Bij nog geavanceerdere technieken (met micro-algen en dergelijke) wordt gesproken van **derde generatie biobrandstoffen** (Dragone et al. 2010).

Door onvoldoende eigen financiële middelen en beleidsondersteuning, alsook de prioriteit om een verbeterde basis-energievoorraad te genereren (i.e. minder schadelijke brandstoffen, elektrificatie van rurale streken etc.) zullen de meeste ontwikkelingslanden echter weinig onderzoek kunnen verrichten naar tweede generatie brandstoffen. Het merendeel van het onderzoek zal bijgevolg liggen bij de OESO-landen. Buitenlandse investeringen (vb. Clean Development Mechanism) bieden echter perspectieven (Eisentraut 2010).

Een mogelijkheid voor ontwikkelingslanden is de export van de grondstoffen naar OESO landen waar ze vervolgens tot 2^{de} generatie biobrandstoffen kunnen worden omgezet. Op termijn, stelt de International Energy Agency (IEA), zou de grondstof ("feedstock") een aanzet geven tot de latere productie van tweede generatie brandstoffen ter plaatse, als lokale infrastructuur, expertise en cultivering geoptimaliseerd worden. Wetenschappelijke samenwerking is eveneens een optie (Eisentraut 2010).

Een kritische beschouwing op de mogelijkheden voorgesteld door de internationale organisaties (IEA, FAO) is gegeven door Kuchler (2010), die stelt dat huidige ontwikkelingen net niet voor duurzame systemen zorgen in de tropen, maar eerder een middel zijn om de energieconsumptie te kunnen voortzetten ten koste van maatschappelijke en ecologische gevolgen in ontwikkelingslanden. Deze beschouwing richtte zich vooral op Brazilië en de grootschalige activiteiten voor ethanolproductie, niet op het gebruik van residuen.

De implementatie van bio-energie systemen bezit zowel voordelen als nadelen. Voordelen zijn ondermeer diversificatie van huishoudelijke energievoorraad en landbouwproducten, samen met ontwikkeling van infrastructuur en meer inkomsten uit residuen. Nadelen hiervan zijn eventuele stijging in voedselprijzen en de teloorgang van duurzame productie. Ook is het zo dat bepaalde ontwikkelingslanden grote oppervlaktes aan gedegradeerd land hebben. Aldus zal in de eerste decennia in deze landen geen competitie optreden. Gebruik van residuen uit de landbouw/bosbouw kan de oppervlakte voor energiegewassen sterk doen dalen. Een belangrijke opmerking hierbij is dat de integriteit van de bodem en het ecosysteem hieronder niet mag lijden (Tomaselli 2007).

Dit werk beoogt echter vooral de rechtstreekse aanwending van bosbouwresiduen voor energieopwekking (i.e. als zogenaamde primaire biobrandstof (Dragone et al. 2010)).

1.2 Bosbouw en energie

De IEA stelt dat de totale hoeveelheid residuen afkomstig van rondhoutproductie en verwerking zo'n 500 miljoen ton droge massa omvat. Het meeste hiervan wordt gegenereerd in Azië, gevolgd door Amerika en Europa. Tegen 2030 voorspelt de IEA een stijging tot 0.7 Gton droge massa aan residuen. Als 10 % van deze residuen gebruikt zou worden voor tweede generatie biobrandstoffen, dan is dit goed voor de helft van de geprojecteerde vraag naar biobrandstoffen in 2030 (Eisentraut 2010). De cijfers wijzen op een niet-verwaarloosbaar belang van bosbouw voor de energiesector.

Bowyer et al. (2003) geven specifiek vanuit de bosbouw vijf potentiële bronnen van hout-gerelateerde biomassa voor energieopwekking:

- Rondhout
- Zagerijresiduen
- Oogstresiduen
- Huishoudelijk en industriële afvalstromen (papier, karton, spoorwegdwarsliggers etc.)
- Korte omloophout

Rondhout en zagerijresiduen zijn klassiek de grondstof van de verwerkingsindustrie (vb: voor spaan- en vezelplaatproductie) (Bowyer et al. 2003; Tomaselli 2007). Oogstresiduen zijn eveneens technisch geschikt voor materiaaltoepassingen, maar hoge schorspercentages, bodem en verontreinigingen maken dit materiaal beter geschikt voor energieproductie. Papier wordt gerecycleerd (Bowyer et al. 2003).

In deze context zijn vooral oogstresten en residuen uit de zagerijen van belang (FAO 1990). Oogstresten zijn afkomstig van de kroon, dunningsproducten en resten van de ruiming die normaal achterblijven in het bos. Zagerijresiduen bestaan uit schavelingen, schors, zaagmeel etc. (Bowyer et al. 2003). Oogstresiduen zijn enerzijds een bron van energie, anderzijds ook een bron van nutriënten en bezitten belangrijke beschermingsfuncties. Het gebruik van residuen uit de houtverwerkende industrie kan een win-win situatie creëren voor de bosbouwsector en de energiesector, zonder in te boeten aan biodiversiteit en voedselveiligheid. Bovendien dienen ontwikkelingslanden met een hoog aanbod aan hout als grondstof prioriteit te geven aan gevestigde technologieën met lage investeringen en weinig risico's (Tomaselli 2007).

Volgens een Braziliaanse studie blijkt dat exploitatie van natuurlijk (beheerd) bos 80-90% residuen genereert, en dat het eindproduct slechts een klein aandeel is van de initiële grondstof. Het merendeel van de residuen is afkomstig van de kronen en allerhande oogstresten. Het rondhout dat de verwerkingsindustrie binnenkomt genereert op zijn beurt nogmaals 50% restproducten. In sommige gevallen worden deze residuen gehanteerd voor verbranding (Tomaselli 2007). Deze studie werd uitgevoerd in het Amazonegebied, maar is tevens geldig voor het bos in Suriname. Plantages genereren minder residuen omwille van meer gecontroleerde omstandigheden.

Algemeen wordt in ontwikkelingslanden weinig gebruikt gemaakt van het energiepotentieel van houtresiduen. Redenen hiervoor zijn te hoge investeringskosten en het minimaal gebruik van houtdrogers (FAO 1990).

De 2:1 verhouding van de input van zagerijen tot het eindproduct volgens Tomaselli (2007) zijn in lijn met deze van FAO (1990) en Eisentraut (2010), alsook de ervaringen van lokale houtbedrijven in Suriname (persoonlijke communicatie zagerijhouders). De oogstresiduen zijn een factor hoger dan deze uit de verwerkingsindustrie. Met geschikte infrastructuur zouden oogstresiduen verzameld kunnen worden voor valorisatie. Echter dienen economische/technische haalbaarheid alsook duurzaamheid in rekening gebracht te worden (Tomaselli 2007). Aldus kunnen in de praktijk niet alle residuen aangewend worden omwille van de grote ruimtelijke verspreiding en technische beperkingen, ecosysteemdiensten en ander gebruik (Eisentraut 2010).

Zagerijresiduen zijn een meer geschikte bron omwille van hun beschikbaarheid op de zagerij zelf, bovendien zijn ze vaak reeds gedeeltelijk gedroogd (Bowyer et al. 2003).

De valorisatie van residuen heeft naast de economische voordelen eveneens voordelen voor het milieu. In een opiniestuk van Europees milieuagentschap (EEA) staat dat bio-energieplantages geen extra mitigerend effect uitoefenen op het klimaat (EEA 2011). De reden hiervoor is dat een alternatief gebruik van deze oppervlakte (vb. bos) wel koolstof vastlegt, in plaats van een status quo. Enkel gebruik van zgn. koolstofoverschotten of extra productie draagt bij tot een verlaging van broeikasgassen.

Residuen uit zagerijen zijn overschotten vermits ze sowieso ontbinden en CO₂ vrijstellen als ze niet gebruikt worden. Op deze manier is de valorisatie gerechtvaardigd, vooropgesteld dat ze op een duurzame manier wordt uitgevoerd.

1.3 Suriname

Suriname ligt aan de Atlantische oceaan en is begrensd door Guyana, Frans Guyana en Brazilië respectievelijk in het westen, oosten en het zuiden (Werger 2011). Gelegen tussen 2° en 7° boven de evenaar, heerst er een typisch warm en vochtig tropisch klimaat met gemiddelde temperaturen tussen 25°C - 27.5°C in het noorden en 23°C - 25°C in de zuidelijke regio. Suriname kent twee regenseizoenen: een langer regenseizoen tussen mei en juli (250-400mm/maand), gevolgd door een korter regenseizoen van november tot januari (150-200mm/maand) (McSweeney et al. 2003).

Het geschatte bevolkingsaantal van Suriname in 2010 bedroeg 560.157 (CIA 2012). Op de UNDP ontwikkelingsindex staat Suriname op de 104^{de} plaats, en hoort aldus bij de categorie: medium human development (UNDP 2011). Suriname is bewoond door een meertalige multi-etnische bevolking afkomstig van Afrika, Azië, Europa en Amerika. Oost-Indiërs (Hindoestanen) omvatten de grootste groep, respectievelijk gevolgd door Creolen, Javanen, Marons en kleinere aantallen Indianen, Chinezen en Europeanen. Omwille van deze diversiteit zijn ook veel talen aanwezig (St-Hilaire 2001). Ondanks dat Nederlands de officiële taal is, wordt Sranan het meeste gesproken in Suriname (Hallen 2000). De meeste houtsoorten hebben dan ook lokale namen, en er is wat verwarring rond exact wetenschappelijke benamingen.

Het land is verdeeld in een bergachtige zone en een kustzone. Het zuidelijk gelegen hoogland maakt ruwweg 80 % uit van de landoppervlakte en maakt deel uit van het pre-Cambrische Guyanaschild. Aan de noordelijke rand van dit schild bevindt zich de kustzone gaande van jonge kustvlaktes aan de Atlantische oceaan, tot meer landinwaarts de oude kustvlaktes en uiteindelijk een savannegordel ("Zanderij formatie") (Werger 2011).

De geschatte totale bosoppervlakte bedraagt 14.8 miljoen ha (SBB 2011). De verschillende bostypes worden als volgt onderscheiden (Blaser et al. 2011):

- Hoog droogland bos - 13.3 miljoen ha
- Hoog savannebos of droog altijdgroen bos - 132.000 ha
- Laag savannebos - 18.000 ha
- Mangrovebos - 100.000 ha à 115.000 ha
- Moerasbos - 468.000 ha
- Bergkambos - 35.000 ha

Suriname heeft geen bevolkings- en migratiedruk die tot ontbossing geleid heeft zoals in vele andere landen (Blaser et al. 2011). Naast de lage bevolkingscijfers, zijn een gebrek aan wegeninfrastructuur in het binnenland en de geringe conversiedruk tot landbouw ook belangrijke parameters voor het bosbehoud (Werger 2011). Tot 1980 was bauxietmijnbouw de enige mijnactiviteit op bebost land. Later kende gouddelving een start waarbij het totaal verlies aan bosoppervlakte door goudmijnbouw 90.000 ha bedraagt, waaronder 30.000 ha het laatste decennium (Blaser et al. 2011).

Een geschatte 10-20% van de (commerciële) houtproductie is niet geregistreerd. Meer dan 600 boomsoorten zijn beschreven. Qua gebruik is er de laatste drie decennia een verschuiving in de boomsoortenkeuze voor industrieel rondhout. Een belangrijke reden hiervoor was de beperkte toegang tot de productiebossen in het binnenland tijdens de burgeroorlog (1986-1993) (Blaser et al. 2011).

De totale rondhoutproductie in Suriname bedroeg in 2010 247.377m³, waarvan het belangrijkste aandeel bestond uit zaag- en schilhout (SBB 2011). In Suriname wordt een belasting opgelegd per concessie en per m³ gevelde hout. Vermits weinig onderscheid gemaakt wordt in taksniveau naargelang de vermarktbaarheid van soorten, is er weinig stimulans vanuit de houtsector om de zogenaamde Lesser-Used Species (LUS) te valoriseren. De taks per concessie is heel laag, waardoor concessies momenteel eerder in bezit genomen worden voor speculatie dan voor productie. Op overheidsniveau is een revisie van dit systeem aan de gang (Blaser et al. 2011).

CELOS beheersysteem

Het Celos beheersysteem (CELOS Management System, CMS) is in de jaren 80 ontwikkeld en heeft als doel op duurzame basis kwaliteitshout te produceren in Suriname. Het achterliggend principe geldt dat oogst niet enkel staat voor duurzame productie ("sustained yield"), maar dat eveneens rekening gehouden wordt met ecologische principes, technische en economische haalbaarheid, alsook sociale dimensies. Het is een polycyclisch beheersysteem dat onderverdeeld wordt in het CELOS Silvicultural System (CSS) en het CELOS Harvesting System (CHS). Het CSS omvat bosbouwkundige aspecten, terwijl het CHS de exploitatiemethodiek uiteenzet. Het geheel omvat een planningprocedure waarbij een kapcyclus van 25 jaar gehanteerd wordt. Een beheereenheid (25.000 ha) wordt ingedeeld in compartimenten van 200 ha waarvan er 5 jaarlijks gekapt worden. Het bosbouwkundig systeem beïnvloedt het natuurlijk systeem door competitie in het kronendak te beïnvloeden t.b.v. commerciële soorten, alsook soorten die potentie hebben om in de toekomst commercieel te worden (Werger 2011).

Het behoud van de nutriëntencyclus bij exploitatie past in het kader van het CELOS systeem. Dit geldt vooral voor de oogstresiduen, niet zozeer voor de zagerijresiduen. Een op hout gebaseerde bio-energiesector dient namelijk ontwikkeld te worden uitgaande van duurzaam bosbeheer (ITTO 2008).

Een synergie tussen de bosbouwindustrie en de energiesector zou het bosbeheer kunnen versterken en de risico's verminderen. Bovendien zorgt ze idealiter voor een daling van de broeikasgassen.

1.3.1 Casestudie verwerkingsindustrie Suriname

Naast de lage rondhoutproductie zijn er bovendien veel houtresiduen aanwezig in de Surinaamse zagerijen. Dit wordt gezien als een groot probleem qua efficiëntie (persoonlijke communicatie zagerijhouders) (Figuur 1). Socio-economische condities belemmeren de valorisatie hiervan, zowel voor plaatmaterialen als voor energie. Minderwaardige sortimenten blijven vaak op het zagerijterrein liggen, af en toe worden deze gebruikt voor lokale toepassingen. Eveneens wordt het afvalhout verbrand zonder de nuttige warmte te gebruiken (Figuur 2). De conservatieve houding van lokale energiemaatschappijen wordt ook als oorzaak aangekaart.



Figuur 1: Zagerijresiduen en minderwaardige sortimenten in basralocuszagerij NAMORA Houtonderneming NV



Figuur 2: Open verbranding van zagerijresiduen in de Suma Lumber Company zagerij (Greenheart NV)

De residuen variëren in hoeveelheid naargelang de verzaagde commerciële soorten. Houtsoorten als ingipipa (*Couratari* sp.), kopi (*Goupia glabra*), gronfolo (*Qualea* sp.) en wana (*Sextonia rubra*) creëren een hoog rendement en aldus minder residuen. Basralocus (*Dicorynia guianensis*) en groenhart (*Tabebuia* sp.) genereren daarentegen wel veel residuen, omwille van de hoge kwaliteitseisen die

gesteld zijn voor export. Naast de bovenvermelde theoretische rendementen, wordt soms slechts 20% rendement bekomen, omwille van hartrot en andere defecten (persoonlijke communicatie bedrijfsleider Ansoe NV). Voornamelijk hartrot wordt aanzien als een groot probleem. Veel zagerijen verzagen een ruim gamma aan soorten, waardoor de restproducten vaak niet uniform zijn en uit verschillende houtsoorten bestaan. Belangrijke relatieve verschillen tussen houtsoorten kunnen een invloed uitoefenen op verbrandingswaarde.

1.4 Onderzoekshypothesen

Voorliggende thesis tracht de energetische valorisatie van zagerijresiduen uit tropische streken te begroten, meer specifiek uit Suriname. Deze valorisatie is niet alleen afhankelijk van procesparameters van verbranding, maar ook van eigenschappen van de houtmaterie zelf. In dit werk wordt vooral de focus gelegd op het tweede aspect, waarbij relaties zullen gelegd worden met chemische en structurele eigenschappen. Structurele en chemische karakterisering van de houtmassa laat toe een beter inzicht te krijgen in tropische houtsoorten waarover totnogtoe weinig bekend is. Structuureigenschappen zullen bestudeerd worden op boomniveau en de daaraan gekoppelde groei en overlevingsstrategie. Variaties tussen houtsoorten en binnen de houtsoort (van kern naar spint) komen hierbij aan bod. Beide niveaus bieden zowel fundamentele (i.e. ecologisch en fysisch-chemische) kennis, alsook praktische informatie voor een potentiële energiewinning uit restproducten. Chemische eigenschappen zullen enkel tussen soorten bekeken worden.

Vooreerst zal de karakterisering gebeuren via conventionele methodes (volumegewichts- en asgehaltebepaling, chemische analyse en bomcalorimetrie). Met deze informatie zullen verbanden nagegaan worden tussen eigenschappen van het materiaal en de verbrandingswaarde.

De conventionele methodes om volumegewicht te bepalen zijn echter destructief en tijdrovend (De Ridder et al. 2011; Hein et al. 2009), wat eveneens geldt voor chemische analysebepaling via zogenaamde “wet analysis” (Carrier et al. 2011; Sluiter et al. 2010; Thumm et al. 2010).

Om die reden worden de data verkregen met state-of-the-art technieken zoals X-stralen tomografie (X-CT) en Near-Infrared hyperspectral imaging (NIRhi) als proxies voorgesteld. Deze genereren namelijk op een niet-destructieve manier high-throughput analyses. Om het volumegewicht op een snelle manier te bepalen wordt X-CT aangewend, zoals gebruikt voor structurele (De Ridder et al. 2011) en anatomische toepassingen (Van den Bulcke et al. 2009). De geschiktheid van X-CT als proxy om de onderzochte houtsoorten structureel te karakteriseren zal statistisch onderzocht worden. Bovendien zorgt deze techniek voor een snelle visuele inspectie van het onderzochte houtvolume, om zo eventuele bijzonderheden op te merken.

NIRhi wordt als nieuwe methode voorgesteld om op een snelle manier informatie te verkrijgen over structurele en vooral chemische eigenschappen. Een belangrijke onderzoeksvraag is of deze recente ontwikkeling geschikt is om ruimtelijk expliciete en gedetailleerde informatie te genereren. Het doel is om eigenschappen van het hout via modelbouw in kaart te brengen en deze te linken aan de verbrandingswaarde. De modellen worden geconstrueerd met behulp van Projectie tot Latente Structuren (PLS). Uiteraard dienen deze modellen gekalibreerd te worden op basis van conventionele methodes. NIRhi is echter nog niet geoptimaliseerd, en huidig onderzoek zal daarom gericht zijn op verkenning van de mogelijkheden en ontwikkeling van methodiek.

Concreet wordt gezocht naar:

- de link tussen structurele/chemische parameters en verbrandingswaarde op basis van conventionele methodes
- de mogelijkheid om proxies te gebruiken voor deze parameters om op een snelle manier gegevens te verkrijgen die meer ruimtelijk expliciete informatie genereren
- significante verschillen in verbrandingswaarde binnen en tussen de verschillende soorten teneinde een mogelijke valorisatie te kunnen begroten

In de literatuurstudie zal eerst een toelichting gegeven worden over de conversie van biomassa naar energie, daarna zullen parameters met betrekking tot structuur en chemische eigenschappen besproken worden. Reeds beschikbare literatuurbronnen in dezelfde onderzoeksdomeinen worden kort toegelicht en kritisch besproken. Nadien zal in de sectie “Materiaal en Methoden” de werkwijze uiteengezet worden, met focus op de ontwikkeling van NIRhi en de geassocieerde technische randvoorwaarden. De sectie “Resultaten en Discussie” bevat de kwalitatieve en kwantitatieve bevindingen. Vervolgens worden deze bevindingen vertaald naar een globale conclusie.

2 Literatuurstudie

In deze sectie wordt vertrokken van verbrandingsprincipes van de voornaamste conversieroutes. Ook zullen algemene verbrandingsparameters besproken worden. Daarna zal de focus liggen op de houtmaterie zelf, zijn componenten en de ontstaanswijze. Daarna zal worden getracht de link te leggen met verbranding op basis van de huidige inzichten in het domein.

2.1 Thermochemische conversie van houtige biomassa

2.1.1 Directe verbranding

De meest gangbare methode om hout om te zetten in energie is rechtstreekse verbranding. De eerste fase bij het verbrandingsproces is waterverdamping. Daarna vindt een vervluchtiging plaats van volatiele componenten (100°C tot 600°C). Ongeveer 75 à 85% van de houtmaterie kan vervluchtigen. Vervolgens oxideert de koolstof en worden de brandbare vluchtige gassen verbrand (Bowyer et al. 2003).

De volgende paragrafen in deze sectie zijn (tenzij anders vermeld) gebaseerd op Brown (2011).

Het verbrandingsproces op zich is een complex fenomeen waarbij gekoppelde massa- en warmtetransfer simultaan optreden met chemische reacties en materiële stroming. De eigenschappen van de biomassa zelf beïnvloeden sterk de eigenschappen van het verbrandingsproces. De reactiecondities (zoals zuurstoftoevoer) zijn eveneens belangrijk. De efficiëntie van de conversiereactie en de energie-inhoud van de biomassa zelf bepalen de hoeveelheid vrijgekomen warmte. Het grootste deel van vrijgekomen energie is afkomstig van het organisch materiaal ingebouwd via fotosynthese. Het anorganisch gedeelte van de biomassa is belangrijk voor het ontwerp en werking van een verbrandingssysteem: mineralen kunnen zorgen voor afzettingen in een verbrandingsinstallatie.

In tegenstelling tot andere biochemische/thermochemische conversies, is directe verbranding niet selectief op vlak van biomassa-input. In essentie wordt alles omgezet tot H₂O en CO₂ samen met andere componenten, naargelang de procesefficiëntie en aard van de biomassa.

Biomassa heeft een hoog zuurstofgehalte (30-40%) vergeleken met fossiele brandstoffen. De hoofdcomponent is koolstof (30-60%, afhankelijk van het asgehalte). Stikstof, zwavel en chloor komen in mindere mate voor, maar zijn belangrijk bij de vorming van schadelijke emissies en de eerder vermelde afzettingen.

De gemiddelde verhoudingen van koolstof, zuurstof en waterstof in biomassa zijn: CH_{1.41}O_{0.64}.

De energie-inhoud van de verschillende covalente bindingen is als volgt gerangschikt: C=C > S-H > C-H > C-C > C-N > N-H > C=O > C-O > O-H, wat geldig is voor gassen (Rhe & Lestander 2005).

De nadelen van rechtstreekse verbranding van biomassa voor elektriciteit/hitteopwekking zijn:

- energetische verliezen door verbranding van vochtige biomassa,
- agglomeratie en afzettingen door anorganische bestanddelen,
- de nood aan voldoende en continu aanvoer van biomassa aan de centrale.

2.1.2 Alternatieve thermochemische routes

Er bestaan verscheidene alternatieven voor directe verbranding, de voornaamste zijn:

Snelle pyrolyse

Bij pyrolyse wordt biomassa in afwezigheid van zuurstof omgezet tot vaste stof (zijnde kool), gas en vloeistof. De verhouding tussen deze drie eindproducten is afhankelijk van de procesvariabelen (Mohan et al. 2006). Snelle pyrolyse is geoptimaliseerd om zoveel mogelijk vloeistof (i.e. homogeen mengsel van organische componenten en water) te genereren (Bridgwater et al. 2002). In essentie wordt een homogene (intermediaire) vloeistof, quasi asvrij en met een hogere energiedichtheid verkregen (Venderbosch & Prins 2010).

Verkoling

Dit omzettingsmechanisme wordt reeds eeuwenlang gebruikt in rurale gemeenschappen overal ter wereld. Zijn hogere energiedichtheid op gewichtsbasis zorgt voor allerlei voordelen voor verwarming en/of bereiden van voedsel. Houtskool is het hoofdproduct van deze zgn. trage pyrolyse en wordt in ontwikkelingslanden vaak nog op traditionele manier geproduceerd (Vamvuka 2011).

Vergassing

Bij vergassing vindt een conversie plaats van de biomassa op verhoogde temperatuur en in zuurstofarme omgeving. Het ontstane product is een brandbaar mengsel van hoofdzakelijk CO en H₂. Daarnaast vormen zich in mindere mate methaan en andere componenten. Dit mengsel kan ontbrand worden voor energiedoeleinden, of omgezet worden naar producten (Brown 2011).

2.1.3 Verbrandingsparameters

Vooraleer energetische parameters besproken worden is het noodzakelijk de vochtgehaltedefinities te bekijken.

De literatuur hanteert verschillende definities van het vochtgehalte (Brown 2011, herwerkt):

- vochtgehalte op droge basis: $MC_{droge\ basis} = \frac{m_w}{m_{f,d}}$
- vochtgehalte op natte basis: $M_{natte\ basis} = \frac{m_w}{m_{f,d} + m_w}$

met m_w en $m_{f,d}$ respectievelijk de massa van het water en ovendroge massa (gedroogd bij 103.5°C). Belangrijk hierbij is dat de ovendroge toestand nog steeds gebonden water bevat, terwijl vluchtige componenten (vb. alcoholen) reeds vervluchtigd zijn bij deze temperatuur (Brown 2011; Bowyer et al. 2003).

De verbrandingswaarde wordt gemeten met behulp van een bomcalorimeter. Het is de energie-inhoud die vrijkomt bij verbranding onder bepaalde condities (Brown 2011). Anderzijds is voor de verbrandingswaarde van brandstoffen zoals kool (White 1987) en biomassa de Dulong formule ontwikkeld, welke de Higher Heating Value (HHV) berekent op basis van de elementaire samenstelling (Doat 1977; Telmo & Lousada 2011a). De formule van Laut genereert een slechtere schatting dan deze van Dulong (Doat 1977). Voor specifieke kritische ontwerptoeepassingen, zijn schattingen van verbrandingswaardes echter niet aangewezen en is het opportuun om zelf metingen te verrichten. Als biomassa vochtig is en/of waterstof bevat, zal naargelang de methode het gevormde water na reactie zich in gasfase of vloeistoffase bevinden (Brown 2011).

De meting van de energie-inhoud bij biomassa gebeurt algemeen onder constant volume (Brown 2011; Doat 1977). De HHV is de verbrandingswaarde van de biomassa verkregen als al het gevormde water gecondenseerd is na verbranding. Bij condensatie zal het water zijn verdampingswarmte (latente warmte) afstaan aan de omgeving, wat een grotere waarde creëert (Brown 2011). Het is de output die verkregen wordt bij een bomcalorimeter (Doat 1977) bij volledige ontbranding onder gecontroleerde omstandigheden (Bowyer et al. 2003).

Indien het door de verbranding ontstane water zich in de gasfase bevindt na reactie, behoudt het zijn verdampingswarmte, wat resulteert in een lagere energie-inhoud. De bekomen waarde wordt gedefinieerd als LHV (Lower Heating Value). De literatuur hanteert beide methoden, maar de basis dient steeds vermeld te worden opdat onderlinge vergelijking mogelijk is (Brown 2011).

De beschikbare potentiële energie bij een gegeven vochtgehalte, is gedefinieerd als de GHV (Gross Heating Value) ((Bowyer et al. 2003; Brown 2011), herwerkt):

$$GHV = HHV \times (1 - MC_{natte\ basis}) \quad (1)$$

waarbij de *HHV* de verbrandingswaarde is op droge basis. De GHV drukt de HHV uit in het aandeel vochtvrij hout en is bijgevolg voor vochtige biomassa lager. GHV is meestal de waarde die verkregen wordt via bomcalorimetrie (uitgedrukt in energiewaarde per massa-eenheid). Het staal wordt namelijk gewogen bij een bepaald vochtgehalte. Vocht in de biomassa wordt na verbranding terug gecondenseerd, aldus draagt dit niets bij tot de verbrandingswaarde. Omzetting van (1) genereert de HHV:

$$HHV = \frac{GHV}{(1 - MC_{natte\ basis})} \quad (2)$$

Ook de LHV kan worden bepaald bij constant volume of constante druk. De LHV bij constante druk wordt vaak gehanteerd, vermits deze zijn praktijktoepassingen kent (Telmo & Lousada 2011a). Het is de verbrandingswaarde in open lucht (i.e. atmosferedruk), waardoor het water gevormd bij de verbranding niet condenseert (Doat 1977).

De LHV bij constante druk wordt als volgt uit de HHV berekend (Telmo & Lousada 2011a), herwerkt):

$$LHV = HHV - 212.2 \times w(H) - 0.8 \times [w(O) + w(N)] \quad (3)$$

met *HHV* berekend bij constant volume. $w(H)$, $w(O)$, $w(N)$ zijn gedefinieerd als de gewichtspersenten van waterstof, zuurstof en stikstof respectievelijk in de droge biomassa. Vaak zijn hiervoor algemene waarden toegekend voor hout zonder naalden, schors en bladeren (Telmo & Lousada 2011a). Deze elementaire samenstelling in hout (Tabel 1) varieert, in tegenstelling tot de chemische samenstelling, heel gering (Doat 1977).

Tabel 1: Elementaire samenstelling (Doat 1977)

Element	Aandeel van de houtmassa (%)
C	49 – 50
H	6
O	43 – 44
N	0.5

De waarden uit Tabel 1 zijn analoog aan deze voorgesteld door Bowyer et al. (2003).

De as-received (i.e. als geleverde biomassa met een bepaald vochtgehalte) LHV (LHV_{AS}) van biomassa wordt als volgt berekend (Telmo & Lousada 2011a) :

$$LHV_{AS} = LHV \times \frac{100 - M_{ar}}{100} - 0.02443 \times M_{ar} \quad (4)$$

met 0.02443 (MJ/kg per gewichtsprocent) als de correctiefactor voor de verdampingsenthalpie voor water (constante druk) bij 25°C. Het spreekt voor zich dat de LHV_{AS} in de praktijk het meest relevant is.

De maximaal bereikbare temperatuur is afhankelijk van de voelbare warmte van de reactieproducten en het vochtgehalte. Hoe hoger het vochtgehalte, hoe groter het aandeel warmte noodzakelijk om het water te verdampen. Voorbij 90% vochtgehalte ($M_{natte\ basis}$) is de verdampingsenergie groter dan de verbrandingswaarde van de biomassa. Rond de 70 à 80% vochtigheid verdwijnt de zelfonderhoudende verbranding en bij 50 à 55% ontstaat reeds een zwakke vlamstabiliteit (Brown 2011).

In de praktijk is vochtgehalte de meest significante factor die invloed heeft op de productie van bruikbare warmte uit hout (Bowyer et al. 2003; Doat 1977; Patzek & Pimentel 2006). Voor industriële toepassingen is de houtsoort relatief onbelangrijk vermits de verbrandingswaarde per oven-droge kilogram weinig varieert van soort tot soort (Bowyer et al. 2003). Telmo & Lousada (2011) benadrukken eveneens het geringe verschil in HHV van oven-droge species tussen soorten en stellen dat schors minder energie-inhoud bezit ten opzichte van stamhout. In ingenieurstoepassingen wordt vaak uitgegaan van gemiddelde HHV's van 21 MJ/kg voor droog harsig hout en 20 MJ/kg voor andere droge houtsoorten (Bowyer et al. 2003). Dit neemt niet weg dat verschillen tussen houtsoorten mogelijks op grote schaal aanzienlijke onder- of overschattingen geven zodat het nuttig is deze verschillen te kennen voor procesoptimalisatie.

Ondanks de verschillende drogingstechnieken, worden vele houtresiduen verbrand as-received, zonder de voordelen van het drogen (Bowyer et al. 2003). In de vochtige tropen, zal dood hout snel rotten waardoor de calorische waarde daalt, soms ontstaat zelfontbranding door stapeling (Patzek & Pimentel 2006). Het vochtgehalte van de biomassa varieert in functie van de relatieve vochtigheid (Brown 2011) en vermits in de tropen een hoge relatieve vochtigheid heerst, resulteert dit in een lagere bruikbare warmte.

Vochtgehalte en gevormd water bij verbranding zijn niet de enige verliesposten bij industriële toepassingen. Naast waterdamp verlaten ook andere droge gassen (zoals CO₂) het systeem met een

bepaalde hitte-inhoud. Eveneens resulteert overmatige luchttoevoer in een verdere verlaging van de bruikbare warmte vermits deze ook warmte uit het systeem opneemt. Tot slot zijn er de conventionele verliezen door convectie, geleiding en straling, alsook onvolledige verbranding etc. (Ince 1979).

De verhouding van de herwonnen hitte ten opzichte van de beschikbare potentiële hitte is de verbrandingsefficiëntie. Deze bedraagt 80% voor droge, en 60% voor vochtige brandstoffen (Bowyer et al. 2003).

2.2 Structurele eigenschappen (volumegegewicht)

De parameter volumegegewicht is relevant voor de verbrandingswaarde van hout (De Ridder et al. 2011). Daarnaast is ze gecorreleerd met verscheidene morfologische, mechanische, fysiologische en ecologische eigenschappen (Chave et al. 2006). Volumegegewicht wordt hierdoor aanzien als een integrator van hout eigenschappen (Chave et al. 2009).

Denser hout met een lage vochtigheid is wenselijk omwille van zijn hoge volumetrische energie-inhoud (Bowyer et al. 2003), alsook zijn trage verbrandingssnelheid (Kataki & Konwer 2001).

2.2.1 Verschillen tussen soorten

De gemiddelde verschillen in volumegegewicht van hout die heersen in het Amazonegebied (inclusief het Guyana bekken) hangen niet zozeer af van het klimaat, maar eerder van bodemvruchtbaarheid. Algemeen blijkt een negatieve relatie tussen volumegegewicht en bodemvruchtbaarheid (Chave et al. 2009).

Lichtbehoevende pioniersboomsoorten behalen grote hoogtegroeisnelheden, ondermeer door te investeren in biomassa met een laag volumegegewicht, wat minder bouwstoffen vereist (Nock et al. 2009).

Volumegegewicht is een geschikte indicator voor de overlevingsstrategie van een boomsoort, vermits het gerelateerd is aan groeisnelheid en lichtbehoefte. Densere soorten zijn vaak geassocieerd met schaduwtolerantie en trage groei, terwijl soorten met laag volumegegewicht lichtbehoevend zijn (Hernández et al. 2012). Dichtheid wordt aldus aanzien als een proxy voor overlevingstrategie (Chao et al. 2008).

2.2.2 Verschillen binnen soorten

Radiale toenames van het volumegegewicht van merg naar schors toe (verschil kern - spint) zijn mogelijks te wijten aan een verschuiving in de verdeling van de bouwstoffen: van snelle hoogtegroei in de beginfase wordt overgeschakeld op structurele versterking naarmate de boom groeit (wind, etc.) (Nock et al. 2009). Aldus ontstaat een stijgend volumegegewicht van kern naar spint. Dit patroon wordt vooral toegeschreven aan pioniersoorten, terwijl climaxsoorten (met een hoog volumegegewicht) een afvlakkend tot dalend radiaal verloop kennen omwille van de minder uitgesproken structurele versterking (Woodcock & Shier 2002).

De radiale volumegegewichtsvariatie kan ingedeeld worden in drie types (Bhat et al. 1989):

- Het gemiddelde volumegegewicht stijgt van merg naar schors in lineaire of curvilineaire vorm (type I).

- Een volumegewichtsprofiel geassocieerd met een initiële daling van het merg naar buiten toe, gevolgd door een stijging naar de schors toe. Aldus kan volumegewicht nabij de schors hoger of lager zijn dan nabij het merg (Type II).
- Het volumegewicht daalt van het merg naar de schors in een lineaire of curvilineaire manier (type III).

2.2.3 Link tussen HHV en volumegewicht

Hout met een groter volumegewicht heeft een hogere lignine-inhoud en calorische waarde, aldus zouden densere soorten een hogere calorische waarde moeten hebben (Montes et al. 2011). Montes et al. (2011) stellen echter dat volumegewicht eveneens samenhangt met chemische eigenheid en anatomische opbouw van een houtsoort, en dat er zowel positieve, negatieve als niet-significante verbanden aanwezig zijn in de literatuur. In een studie waar ook Surinaamse houtsoorten werden bemonsterd werd geen verband gevonden tussen HHV en volumegewicht (Doat 1977).

2.3 Chemische eigenschappen

Deze sectie is (tenzij anders vermeld) grotendeels gebaseerd op Fengel & Wegener (1984).

Er bestaat een waaier aan mogelijkheden om houtcomponenten te analyseren. Een belangrijk onderscheid dient gemaakt te worden tussen methodes voortvloeiend uit algemeen wetenschappelijk onderzoek en deze gericht op de pulpindustrie. Ze verschillen in de vereiste precisie en het doel van de analyse.

Algemeen bezit hout de volgende chemische samenstelling:

- macromoleculaire componenten: cellulose, hemicellulose en lignine, welke te vinden zijn in alle houtsoorten, en
- laagmoleculair gewicht componenten zoals extractieven en mineralen waarvan de hoeveelheden sterk variëren naargelang de houtsoort.

De verschillende analysemethodes om houtcomponenten te kwantificeren zijn min of meer gestandaardiseerd.

Een verder onderscheid is er tussen componentenbepaling in de voedingsindustrie en deze in de houtindustrie. Elk heeft namelijk zijn eigen methodes om de componenten cellulose, hemicellulose en lignine te scheiden (Carrier et al. 2011).

2.3.1 Minerale componenten (asgehalte)

Algemeen is het anorganisch gedeelte in biomassa afkomstig van twee bronnen (Brown 2011):

- adventief materiaal, zoals bodemdeeltjes die tijdens het oogsten of verslepen tussen de biomassa zijn geraakt, en
- componenten die inherent verbonden zijn aan de biomassastructuur.

Sluiter et al. (2010) maken een onderscheid tussen structureel en extraheerbaar anorganisch materiaal. Het laatste is gedeeltelijk afkomstig van bodemdeeltjes en een groot deel kan verwijderd worden door spoeling en extractie.

Vaak zijn de mineralen van het adventief materiaal aanwezig in een ingebedde vorm (vb. kalium ingebed in veldspaten, waardoor ze weinig kunnen reageren en een beperkte invloed hebben op

afzettingsreacties). Het inherent materiaal daarentegen zit meer verspreid over de biomassa heen en bevat elementen als Si, K, Na, S, Cl, P, Ca, Mg en Fe. Dit leidt tot de eerder vermelde afzettingen zoals bvb: slakvorming (Brown 2011).

De reactie van alkali met silicium vormt alkalisilicaten die smelten of verweken bij hoge temperatuur. De reactie van alkali met zwavel geeft aanleiding tot alkalisulfaten welke zich afzetten op warmtewisselaars (Brown 2011). Hout bezit een lager gehalte aan anorganische bestanddelen dan vb. kruidachtig materiaal. Toch bevatten bepaalde tropische houtsoorten eveneens silicium (Fengel & Wegener 1984). Op basis van deze gegevens zou dit in analoge problemen kunnen resulteren. Minerale inclusies in hout (in bijzonder silicium) zijn bovendien nefast voor de zaagmachines in de verwerkingseenheden (Lhate 2011).

Er is een accumulatie van anorganische substanties in harskanalen en straalcellen van de houtmaterie. Mineralen zitten niet enkel ingebed in de celstructuren, maar zijn eveneens afgezet in de lumina van parenchymcellen en libriforme vezels. Deze bestaan vaak uit calciumcarbonaat, calciumoxalaat of silicaatverbindingen en hebben verscheidene vormen.

Het gehalte aan anorganische verbindingen in hout wordt gekwantificeerd door het asgehalte (bepaald door volledige verbranding bij 600-850°C). In vergelijking met houtsoorten uit gematigde streken bevatten bepaalde tropische soorten een hoger asgehalte. De as bestaat uit anorganische componenten als K, Ca, Mg, etc. Het eerder vermelde silicium hoort hier ook bij. Fouten in de bepaling van het asgehalte kunnen optreden als gevolg van verlies van alkalimetaalchlorides, ammoniumzouten alsook onvoldoende oxidatie van carbonaten van aardalkalimetalen.

2.3.2 Extractieven

Secundaire metabolieten zijn gedefinieerd als substanties die niet rechtstreeks bijdragen aan de boomgroei en ontwikkeling, maar accumuleren in de celwand en celholtes (lumens). Vanwege hun oplosbaarheid door extractie met water of andere solventen krijgen ze de collectieve naam van extractieven toegewezen (Bowyer et al. 2003).

Extractieven omvatten een groot aantal chemische verbindingen, welke slechts een klein deel van de houtbiomassa uitmaken. Sommige extractieven geven kleur en geur aan het hout. Verschillende houtsoorten bezitten substanties die een toxische of afwerende werking uitoefenen op bacteriën, schimmels en termieten. In enge zin zijn ze verbindingen die oplosbaar zijn in organische componenten. Echter, wateroplosbare koolhydraten en anorganische stoffen zijn eveneens extraheerbare moleculen (cf. 2.3.1). In bepaalde subtropische en tropische houtsoorten worden grote hoeveelheden extractieven gevormd (Fengel & Wegener 1984). Meer dan 25.000 secundaire metabolieten zijn gekend bij planten en zijn essentieel voor de evolutie van de plantenverdediging (Chave et al. 2009).

Een deel van de extractieven wordt als “hars” omschreven, wat niet als een chemische entiteit op zich wordt beschouwd, maar eerder als een fysische toestand, nl. een mengsel van verschillende componenten die weerstand bieden tegen kristallisatie. Terpenen, lignanen, stilbenen, flavonoïden en andere aromatische verbindingen behoren hiertoe. Naast deze stoffen maken vetten, was, vetzuren, alcoholen, steroïden en hogere koolhydraten eveneens deel uit van de extractiefractie (Fengel & Wegener 1984).

Het extractiegehalte is hoger in schors dan in hout (Chave et al. 2009), is groter in kernhout dan in spint, en kan abrupte overgangen vertonen (Lhate 2011).

2.3.3 Lignine

Lignine is een karakteristieke chemische en morfologische component van de weefsels uit hogere planten. Het bestaat uit een aromatisch systeem opgebouwd uit fenylpropaaneenheden. De primaire bouwstenen van deze complexe molecule zijn: p-coumaryl alcohol, coniferyl alcohol en sinapyl alcohol. Wereldwijd is lignine een grote potentiële bron van koolstof voor chemische en energetische doeleinden (Fengel & Wegener 1984).

Lignine wordt over het algemeen niet fermenteerbaar geacht, hoewel veel onderzoek lopende is. Lignine kent voornamelijk zijn gebruik in thermochemische conversie (Brown 2011).

De beschreven en beoordeelde methodes in Sluiter et al. (2010) zijn gebaseerd op hydrolyse met behulp van zwavelzuur. De analysemethoden gaan vaak uit van een sterke zwavelzuuroplossing voor een eerste hydrolyse, waarna vervolgens een verdunning met water plaatsvindt en uiteindelijk een tweede hydrolyse geschiedt. Rond het einde 19^{de} eeuw en het begin van de 20^{ste} eeuw zijn deze twee-staps hydrolysemethodes ontwikkeld. De bepaling zou oorspronkelijk gebeurd zijn op vurenhout. Later (jaren '20) werden door de Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI) analytische methodes beschreven. Tijdens de daarop volgende jaren werden steeds meer methodes voorgesteld. In essentie hydroliseren de polymeerstructuren van de koolhydraten tot oplosbare monosachariden. Nadien volgt een gravimetrische bepaling van het na de filtratie achtergebleven ligninerijk residu. Tenslotte is het mogelijk de opgeloste fractie te kwantificeren om een beeld te krijgen van de koolhydraatfractie van het staal. De oplosbare ligninefractie wordt eveneens via deze weg bepaald m.b.v. fotospectrometrie. Het onoplosbare residu wordt Klason lignine genoemd.

Vooraleer de ligninebepaling uit te voeren, moeten niet-structurele materialen verwijderd worden. Materialen als was en vetten kunnen namelijk coprecipiteren tijdens filtratie van het zure hydrolysaat, wat een overschatting geeft van de lignine. Hout bevat algemeen minder van deze niet-structurele componenten dan kruidachtige materialen. Het bepaalde extractiegehalte kan vervolgens gehanteerd worden om de nadien bepaalde samenstellingen terug te rekenen naar het oorspronkelijke droge staal inclusief extractieven (Sluiter et al. 2010).

De zwavelzuurmethode is de meest gehanteerde om ligninegehalte in houtachtige biomassa te bepalen, hoewel ze een zeer lange uitvoeringstijd heeft (Carrier et al. 2011). Een ligninebepaling kan zowel aanleiding geven tot een overschatting (meest waarschijnlijke) als een onderschatting. In het beste geval heffen ze elkaar op en genereert de analyse bevredigende resultaten (Santana & Okino 2007).

Sluiter et al. (2010) stellen enkele verbeteringen voor.

De methode waarbij de zuur-onoplosbare lignine verkregen wordt, is de « vuilnisbak » der methodes vermits alle ongehydrolyseerde vaste stoffen bij de lignine bijgeteld worden. Ongeveer 1/5 van de lignine in de biomassa raakt opgelost door analytische hydrolyse. UV spectroscopie kan worden gehanteerd om de zuuroplosbare lignine te bepalen. Er zijn echter problemen met de extinctiecoëfficiënt. Nuclear Magnetic Resonance (NMR) en High Performance Liquid

chromatography (HPLC) zijn aangewezen als betere methodes. De tweede verbetering kan gebeuren door de efficiëntie van bestaande methodes te verbeteren en aldus meer kosteneffectieve en snellere analyses te bewerkstelligen. Tot slot zouden de prestaties van al deze methodes op een breder spectrum van verschillende soorten biomassa gevalideerd moeten worden. Op deze manier kunnen meer gerichte analyses uitgevoerd worden (vb. op landbouwresiduen).

Sluiter et al. (2010) vermelden dat Near-Infrared (NIR) spectroscopie gekoppeld aan multivariate kalibratiemethoden veel mogelijkheden biedt. Dit is een snelle manier om op een technisch simpele wijze de samenstelling te bepalen. Een goed gekalibreerd model rekent af met de variabiliteit van de onderliggende analysemethode. Goede data kwaliteit van de chemische analysemethode blijft echter noodzakelijk om een goede kwaliteit van NIR metingen te bekomen.

2.3.4 Cellulose en hemicellulose

Cellulose is een moleculaire ketting van anhydroglucopyranose-eenheden met een uniforme kettingstructuur. Hemicelluloses of polyoses verschillen van cellulose vermits ze samengesteld zijn uit verschillende suikereenheden, kortere ketens en een vertakte polymeerstructuur hebben (Fengel & Wegener 1984).

Zetmeel kan eveneens een overschatting geven bij de bepaling van de cellulose-inhoud, hoewel het zetmeelgehalte laag is in hout (Sluiter et al. 2010).

Ideaal bevat holocellulose enkel cellulose en hemicellulose. Beiden worden verkregen door extractievrij hout eerst in een zure oplossing (natriumacetaat) te brengen, waarbij sequentieel natriumchloriet wordt toegevoegd. De zure behandeling zorgt eerst voor het verbreken van de niet-covalente interacties tussen de biomassa-polymeren. Het natriumchloriet zorgt vervolgens voor een stabilisatie van de hydrolyse, waarbij monomere suikers zoveel mogelijk behouden blijven. α -cellulose is de fractie die overblijft als (na bovenstaande behandeling) het staal in een 17.5 gewichtspercent NaOH oplossing gebracht wordt. Deze fractie wordt gezien als het onbeschadigde hoogmoleculaire gedeelte van de cellulose. Na de NaOH oplossing wordt opnieuw zuur toegevoegd, waardoor hemicellulose in oplossing gaat (omwille van zijn zwakkere vernetten polymeerstructuur) (Carrier et al. 2011). De vermelde problemen in 2.3.3 gelden evenzeer voor deze bepalingen.

2.3.5 Link tussen chemische eigenschappen en calorische waarde

Een hoger extractiegehalte en ligninegehalte verhogen de calorische waarde van hout (White 1987; Doat 1977).

Gebaseerd op 6% H in de droge biomassa, varieert de HHV ruwweg voor lignine van 23.3 tot 26.8 kJ/g, voor extractieven van 32.9 tot 39.4 kJ/g en voor cellulose van 17.5 tot 19.5 kJ/g (Rhe & Lestander 2005). De waarden voor lignine en holocellulose stemmen in grote mate overeen met de waarden geciteerd in Demirbaş (2001), hoewel deze laatste berekend zijn op basis van extractievrij hout.

Harsen *sensu stricto* hebben een verbrandingswaarde die tweemaal zo hoog is als deze van hout, vandaar de hogere verbrandingswaarde bij harsige stalen (Bowyer et al. 2003). Doat (1977) beschrijft een uitgebreid onderzoek naar verbrandingswaardes bij tropische houtsoorten, waarbij het grootste aandeel uit Surinaamse houtsoorten bestond. Uit de resultaten bleek dat soorten met hoge lignine- en extractiegehaltes hoge HHV's genereerden, terwijl houtsoorten met proportioneel

meer cellulose en hemicellulose een lagere HHV gaven (wat ook blijkt uit de HHV's van de afzonderlijke componenten).

Recent hebben Telmo & Lousada (2011b) eveneens een relatie gezocht tussen lignine-en extractiegehalte en de HHV. Naast gematigd loofhout en naaldhout werden ook enkele tropische houtsoorten onderzocht die in aanzienlijke hoeveelheden geëxporteerd worden naar Portugal (pers. communicatie Lousada, J.), met name *Hymenaea courbaril* en *Bowdichia nitida*, soorten die eveneens voorkomen in Suriname. In dit artikel werd het extractiegehalte bepaald, gevolgd door een meervoudige lineaire regressievergelijking om de HHV te voorspellen aan de hand van ligninegehalte en extractiegehalte. Er werd gesteld dat de soort tot soort variabiliteit op gebied van HHV voornamelijk kan verklaard worden door extractiegehalte. Als meer harsige stalen aangewend werden, zou de relatie nog duidelijker blijken (Telmo & Lousada 2011b). Het aspect van een onvoldoende range van extractiegehaltes is ook bemerkt door Doat (1977).

Een ander onderzoek (Telmo & Lousada 2011a) weerspiegelt eveneens de onzekerheid van verbrandingswaardes bij tropische houtsoorten. De resultaten gaven een significant verschil in verbrandingswaarde tussen gematigd en tropisch loofhout. In Doat (1977) wordt het besluit getrokken dat de tropische houtsoorten een grotere HHV bezitten dan gematigde soorten.

Echter moet steeds rekening gehouden worden met een groot en divers soortenspectrum, zodat het gebruik van meervoudige lineaire regressievergelijkingen steeds onderbouwd moet zijn met voldoende data. Modellen op basis van een waaier aan tropische en gematigde soorten kunnen fouten genereren, terwijl modellen louter gebaseerd op soorten uit een bepaalde streek te enge resultaten genereren. Het komt erop neer bij praktische toepassingen te achterhalen aan de hand van welke houtsoorten de vergelijkingen opgesteld zijn. Bovendien kunnen de chemische gegevens waarmee deze relaties zijn geconstrueerd, heel variabel zijn (cf. 2.3.3).

2.4 Proxy's voor structurele en chemische eigenschappen

2.4.1 X-stralen tomografie

Naast anatomisch onderzoek levert X-stralen tomografie (X-CT) veel nuttige informatie op m.b.t. allerlei houttechnologische eigenschappen, en dit op een snelle niet-destructieve basis (Van den Bulcke et al. 2009). Naast de kwantitatieve informatie, zorgt de resulterende 3D-beeldvorming voor een sterker onderbouwde interpretatie.

Radiale volumegewichtsprofielen van kern naar spint kunnen in beeld gebracht worden m.b.v. X-stralendensitometrie (Nock et al. 2009; De Ridder et al. 2011). Zo ontstaan zogenaamde microdensitometrisch profielen met een hoge resolutie.

2.4.2 Near-infrared beeldvorming

NIRhi is een opkomende technologie waarbij integratie van conventionele beeldvorming en spectroscopie resulteert in zowel ruimtelijke als spectrale informatie van een object (Gowen et al. 2007). De principes van NIRhi zijn gebaseerd op NIR spectroscopie.

2.4.2.1 NIR spectroscopie

NIR spectroscopie is gebaseerd op spectra die na transmissie of reflectie geregistreerd worden door een sensor. Deze spectra bevinden zich in het golflengtebereik van 800 tot 2500 nm. Het is een techniek die wijdverspreid in verschillende domeinen toegepast wordt als een niet-destructieve

methode om talrijke parameters te bepalen. Specifiek rond hout zijn reeds zowel fysische (structurele) als chemische eigenschappen onderzocht (Tsuchikawa 2007). Zowel massief hout (Kelley et al. 2004; Nkansah 2010; Schimleck et al. 2002; Jones et al. 2006; Raymond & Poke 2006) als gemalen hout (Hou & Li 2011; Raymond & Schimleck 2002; Üner et al. 2010) worden gebruikt voor analyse. Het is een techniek die o.a. wordt aangewend als proxy (voor vb. cellulosegehalte) bij veredelingsprogramma's van boomsoorten ten behoeve van de pulpindustrie (Raymond & Schimleck 2002).

Het resultaat van spectroscopie is een spectrum van golflengtes waarvan de initiële intensiteit gewijzigd is door interactie met het materiaal. In de literatuur zijn reeds chemische eigenschappen toegewezen aan pieken bij bepaalde golflengtes (Tsuchikawa 2007).

Deze proxy, in combinatie met multivariate data-analyse, kan ook gebruikt worden om biobrandstoffen te karakteriseren, vermits dit op een snelle en niet-destructieve manier gebeurt (Rhe & Lestander 2005).

2.4.2.2 Uitbreiding naar NIR beeldvorming

De uitbreiding naar beeldvorming is evident. Zo kan per ruimtelijke eenheid een spectrum geconstrueerd worden, waardoor een datakubus (3D matrix) ontstaat. Oorspronkelijk ontwikkeld voor teledetectie-toepassingen, wordt hyperspectrale NIR beeldvorming alsmaar meer toegepast in de landbouw, farmacie, geneeskunde, astronomie, etc. (Gowen et al. 2007). Recent wordt naast eerder vermelde spectroscopie, ook NIRhi aangewend als proxy voor houteigenschappen (Thumm et al. 2010). Voorgaande studie genereerde een model dat chemische eigenschappen weergaf bij elke radiale positie van de stam met behulp van multivariate data-analyse en dit op basis van modelgegevens uit Meder et al. (2010). Deze analysetechnieken afkomstig uit de spectroscopie maken deel uit van de zgn. "chemometrie" (Tsuchikawa 2007).

3 Materiaal en methoden

In dit hoofdstuk zal de staalname aan bod komen, gevolgd door de verschillende bepalingen van chemische en structurele eigenschappen, alsook de wijze waarop de gegevens bekomen met X-CT behandeld zijn. De proxy NIRhi zal zowel hier als in de sectie “Resultaten en Discussie” besproken worden, vermits de constructie en optimalisatie een resultaat op zich vormen.

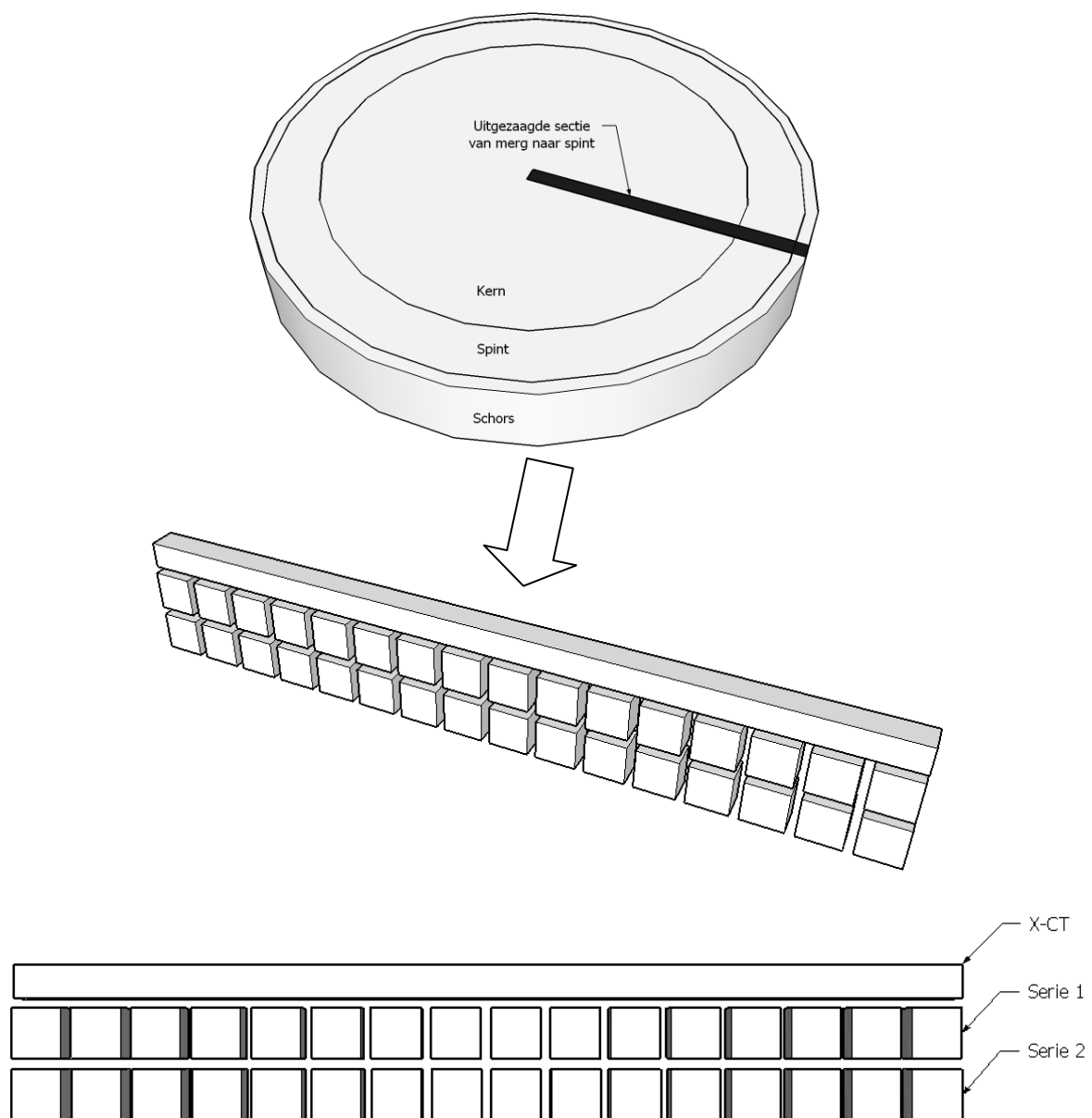
3.1 Staalname

Staalname vond plaats in de concessies van Greenheart NV Suriname (zie Bijlage 1). Monsters werden genomen in Tibiti (centraal gelegen in de productiegordel) en in Apoera (aan de grens met Guyana). Omwille van logistieke redenen - de stalen konden niet tijdig naar Gent getransporteerd worden - konden enkel stalen gebruikt worden uit het onderzoek van Eliat-Eliat (2010) (Tabel 2), eveneens bemonsterd in Tibiti. Deze subset (met een groot aandeel LUS) werd gebruikt om de methodologie uit te werken. Ook kunnen ze reeds een eerste inschatting geven van de variabiliteit in eigenschappen en de geassocieerde energiewaardes van Surinaamse houtsoorten. De niet beschikbare stalen die genomen werden in de zagerijen omvatten wel de meest commerciële soorten, alsook meerdere exemplaren per soort. Deze set (zie Bijlage 1) kan als basis dienen voor toekomstig diepgaand onderzoek op basis van de methodes gebruikt/ontwikkeld in dit onderzoek. De nadruk werd gelegd op zagerijresiduen. Er werden geen oogstresiduen verzameld.

De houtsoorten zijn weergegeven volgens de SBB-code. Dit is een officieel label waarmee commerciële houtsoorten worden aangeduid in Suriname (voor verkoop en export). In volgende secties zal de SBB-code steeds als aanduiding gehanteerd worden. De belangrijkste reden hiervoor is dat vele commerciële soorten meerdere botanische soorten omvatten. De houtstalen bestonden uit segmenten van stamschijven en zijn gedurende 2 jaar bewaard te Gent. Naargelang het staal was het merg al dan niet aanwezig. De beschikbare stamsecties werden verder verzaagd tot plankvormige stalen van merg naar spint. Deze zijn op hun beurt verzaagd tot stalen voor X-CT (houtstaven) en calorimetrie (Figuur 3). De stalen voor calorimetrie werden langs de radiale zijde opgedeeld in regelmatige blokjes. Voor asgehalte, chemische eigenschappen en calorimetrie werd een extra monster (reeds aanwezig op het labo) genomen van *Eperua falcata* (WAL). Op deze werden geen proxymetingen verricht.

Tabel 2: Lijst met onderzochte houtmonsters

Houtsoort	Lokale naam	Botanische naam	Familie
WWK	Wis wis kwari	<i>Vochysia guianensis</i> Aubl.	Vochysiaceae
KOP	Kopi	<i>Goupia glabra</i>	Goupiaceae
DJI	Gindya udu	<i>Buchenavia tetraphylla</i> (Aubl.) R. Howard <i>Terminalia</i> sp.	Combretaceae
BTM	Bostamarinde	<i>Hydrochorea corymbosa/gongrijpii</i>	Fabaceae (Mimosoideae)
MWK	Mawsi kwari	<i>Erismia uncinatum</i>	Vochysiaceae
WAN	Wana	<i>Sextonia rubra</i> <i>Ocotea rubra</i> (syn.)	Lauraceae
PMS	Pikin misiki	<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i>	Fabaceae (Mimosoideae)
ING	Ingipipa	<i>Couratari</i> spp.	Lecythidaceae
MKB	Maka kabbes	<i>Hymenolobium flavum</i> <i>Hymenolobium excelsum</i>	Fabaceae



Figuur 3: Schema verzaging van de houtstalen

De afmetingen van de blokjes (Serie 1 in Figuur 3) bedroegen: 1.0 x 1.5 x 1.5cm (respectievelijk tangenciaal, radiaal en axiaal). Om deze blokjes te positioneren op de originele stamsectie werd de gemiddelde zaagsnede berekend. Onregelmatige blokjes (bvb: langs merg- en spintzijde) werden enkel voor verbrandingswaardebepaling aangewend, niet voor volumegewicht. Als herhaling werden extra blokjes (Serie 2 onderaan Figuur 3) verzaagd die zich op dezelfde radiale positie bevonden.

3.2 Volumegewichtsbepaling

Net na het verzagen werden de regelmatige blokjes met behulp van een Mitutoyo schuifmaat in de drie hoofdrichtingen gemeten om het volume te bepalen.

De afleesprecisie van de schuifmaat bedroeg 0.001mm. De massabepaling gebeurde met behulp van een analytische weegschaal met een gevoeligheid van 0.0001g.

Vermits de stalen reeds twee jaar geconditioneerd werden onder dak maar in directe interactie met het buitenklimaat, kon niet meer uitgegaan worden van groen volumegewicht. Kennis van het groene (i.e. net na velling) volume was niet voorhanden. Om gecontroleerde experimentele condities te creëren werden de stalen geconditioneerd in een klimaatskamer bij een temperatuur van $20 \pm 5^\circ\text{C}$ en $60 \pm 5\%$ relatieve luchtvochtigheid. Na conditionering tot constante massa volgde opnieuw een volume- en massameting. Het volumegewicht bij 60% relatieve vochtigheid ($VG_{60\%}$) werd bepaald:

$$VG_{60\%} = \frac{m_{60\%}}{V_{60\%}} \quad (5)$$

met $m_{60\%}$ en $V_{60\%}$ de massa (g) en het volume (cm^3) respectievelijk van een blokje bij 60% relatieve vochtigheid.

Vervolgens werden de twee blokjesreeksen (Serie 1 en Serie 2) ovendroog gemaakt tot deze (na dagelijkse steekproefwegingen) een constante massa bereikten. Daarna werd nogmaals een massabepaling uitgevoerd. Tot slot werd het ovendroge volumegewicht $VG_{ovendroog}$ bepaald:

$$VG_{ovendroog} = \frac{m_{ovendroog}}{V_{60\%}} \quad (6)$$

met $m_{ovendroog}$ de ovendroge massa (g).

3.3 Bepaling calorische waarde en asgehalte

3.3.1 Bomcalorimeter

De blokjes waarop volumegewichts- en vochtgehaltemetingen verricht werden zijn aangewend voor de bepaling van verbrandingswaardes. Omwille van het groot aantal blokjes en de vereiste staalgrootte om bomcalorimetrie te verrichten, zijn clusters van blokjes gemaakt op basis van visuele inspectie (zichtbare kern vs. spint), alsook inspectie van de reeds bekomen volumegewichten. Naburige blokjes met weinig verschil in volumegewicht werden bijgevolg samengenomen.

Telkens werden de Serie-2 blokjes die zich op dezelfde radiale positie bevonden als identiek beschouwd. Wanneer bijvoorbeeld drie Serie-1 blokjes samengenomen werden, werd dit ook toegepast voor de drie Serie-2 blokjes. Vervolgens ontstond een mengstaal, verkregen door de zes blokjes te vermalen met behulp van een hamermolen (maasgrootte 2mm). Als merkwaardige volumegewichtsverschillen tussen naburige blokjes werden bekomen, is vaak 1 blokje (samen met reserveblokje uit Serie 2) als mengstaal gebruikt. Elke meting gebeurde in drievoud.

De calorische waardebepaling werd uitgevoerd met een isoperibole calorimeter (Parr 6200).

Van ieder mengstaal werd met behulp van een analytische weegschaal telkens ongeveer 0.3-0.6 g staal gewogen in een metalen kroesje. Nadien werd dit kroesje in een stalen bom gebracht, waarbij na vulling met O_2 gas de analyse plaatsvond. De bekomen verbrandingswaarde uitgedrukt per kg vochtig staal werd bekomen en vervolgens omgezet naar HHV via (2). Enkel een correctie voor gedeeltelijke verbranding van de lont werd toegepast.

Na de virtuele positionering volgens de oorspronkelijke kern-spint oriëntatie werden radiale calorische profielen verkregen.

3.3.2 Moffeloven

Asgehaltes werden bepaald m.b.v. een moffeloven volgens een gewijzigde ASTM D 1102-84 standaard (bij 580°C). De samenstelling van de as op zich werd niet bepaald. De asgehaltes werden uitgedrukt t.o.v. de ovendroge massa.

3.4 Chemische analyse

In deze studie werden enkel extractief- en asgehalte onderzocht als chemische eigenschappen. Lignine en cellulosebepaling werden niet uitgevoerd omwille van praktische beperkingen.

3.4.1 Extractiefbepaling

Tijdens het onderzoek werden extractieven enkel op kwantitatieve basis bepaald om een link te leggen tussen extractiefgehalte en verbrandingswaarde. In deze masterproef werd de ethanol-tolueenoplosbare extractiefractie bepaald.

Bij de soortenkeuze is rekening gehouden met de opmerkingen uit sectie 2.3.5. Er werd getracht de spreiding aan extractiefgehalte binnen Surinaamse houtsoorten in de analyse op te nemen. *Couratari* sp. (ING) kon als ondergrens beschouwd worden, omwille van het relatief laag extractiefgehalte (Doat 1977; Santana & Okino 2007). *Eperua falcata* of wallaba (WAL) werd nadien als extra staal onderzocht, een houtsoort welke aanzienlijke percentages extractieven bevat (Amusant et al. 2006) en aldus als bovengrens werd genomen. Wallaba kent zijn toepassing voor shingles en telefoonpalen, omwille van een hoge duurzaamheid te wijten aan een hoog extractiefgehalte. Door zijn frequent gebruik zijn veel residuen van deze soort beschikbaar, wat de praktische relevantie van de soortenkeuze versterkt.

Telkens werd een sectie uit de binnenkern genomen, waarna deze met een hamermolen vermaald (maasgrootte 0.5mm) werd tot poeder. De verfijning zorgt voor een goed contact met de reagentia en een uniformering van de reacties (Fengel & Wegener 1984). Het extractiefgehalte werd bepaald volgens de ASTM D 1107-96 procedure. De ethanol-tolueen oplosbare fractie scheidt zich van het gemalen houtstaal door middel van een Soxhlet-extractie (Figuur 4).



Figuur 4: Opstelling van de Soxhlet-extractie

De houtstalen werden gedurende 6 uur behandeld met een ethanol-tolueen mengsel. Per monster zijn minstens drie herhalingen uitgevoerd. De voorgedroogde en gewogen kolven werden na

extractie uitgedampt met behulp van een draaiverdamper (badtemperatuur 60°C) om het solvent te hergebruiken in opeenvolgende analyses. Na oven droog te maken, werd de kolf opnieuw gewogen en het extractiegehalte bepaald ten opzichte van de oven droge houtmaterie:

$$\text{Ethanol/tolueen oplosbare fractie} = \frac{W_{\text{extract}}}{W_{\text{hout}} \cdot P} \cdot 100 \quad (7)$$

met W_{extract} de massa van het gedroogd extract uit kolf, W_{hout} de massa van het verfijnde houtstaal met een bepaald vochtgehalte. P is de proportie van oven droge houtmassa, dit werd bepaald door een deel van het houtstaal te drogen bij 103.5°C en het vochtgehalte te bepalen.

3.5 X-stralen tomografie

De niet-tangentieel opgedeelde houtstaven (Figuur 3) werden aangewend voor X-CT. Deze werden ook geconditioneerd bij 60 ± 5 % relatieve luchtvochtigheid om een correcte vergelijking te maken met de klassieke methode. De staven werden eerst tangentiaal gebroken opdat ze zouden passen in een staalhouder vervaardigd uit referentiemateriaal met een dichtheid gelijk aan houtcelwand. Helixscans werden genomen naar analogie met De Ridder et al. (2011). De houder is geconstrueerd zodat houtstaven met hun merg-spinrichting verticaal gepositioneerd worden. In de houder bevinden zich namelijk buisvormige openingen, evenwijdig met de openingen waar houtstalen ingebracht werden. Dit laat toe om op dezelfde horizontale positie van de houder zowel referentiemateriaal, hout als lucht in beeld te brengen. De reden hiervoor is bepaalde afwijkingen in grijswaarden (afkomstig van scannerfluctuaties), die resulteren in foutieve volumegewichtsschattingen, te vermijden. Telkens werd een driedimensionaal beeld verkregen met een scanresolutie van 35 μm . Eén 3D pixel (i.e. voxel) meet bijgevolg 35 X 35 X 35 μm en heeft een bepaalde grijswaarde.

De stalen werden virtueel (m.b.v. ImageJ software) uit de cilinder geknipt en indien nodig rechtgetrokken (bvb: bij stalen die niet 100% verticaal stonden). Om “partial volume” effecten (i.e. menging lucht en hout) uit de analyse te houden, is telkens een centrale sectie in het tangentiële vlak genomen. Nadien werd een radiaal grijswaardeprofiel bekomen door grijswaarden in tangentiële en axiale richting uit te middelen. De profielen van de gebroken secties werden vervolgens virtueel aan elkaar geplakt om een volledig radiaal profiel van merg tot spint te verkrijgen.

De grijswaarden van het referentiemateriaal en lucht laten een kalibratie toe van de grijswaarden van het hout, wat resulteert in een schatting van het volumegewicht (De Ridder et al. (2011), herwerkt):

$$VG_{X-CT} = \rho_{\text{ref}} \times \frac{(G_{\text{hout}} - G_{\text{lucht}})}{(G_{\text{ref}} - G_{\text{lucht}})} \quad (8)$$

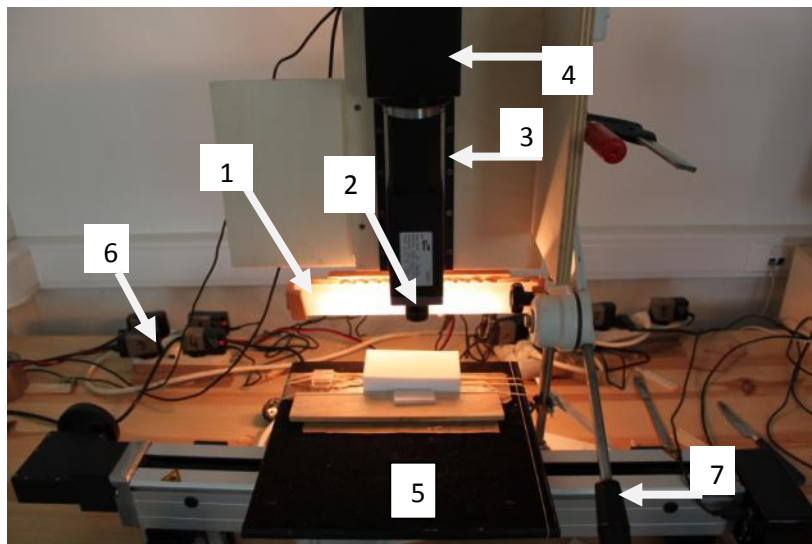
waarbij VG_{X-CT} het geschatte volumegewicht is van een tangentiaal/axiale slice op een bepaalde radiale positie. ρ_{ref} is de gekende dichtheid van het referentiemateriaal (1.4 g/cm³). G_{hout} , G_{lucht} , G_{ref} zijn de grijswaarden (op dezelfde radiale positie) van respectievelijk hout, lucht en referentiemateriaal.

Door visuele vergelijking met de gezaagde blokjes en een schatting van de zaagsnede kon het volumegewicht verkregen met de klassieke methode vergeleken worden met deze bekomen door X-CT, steeds op een bepaalde radiale positie.

Hiervoor werden de blokjes virtueel gepositioneerd op het densitometrisch profiel. Vervolgens werd met behulp van Matlab telkens een gemiddelde genomen van de profielsectie die overeenkwam met dezelfde positie als het blokje (zie Bijlage 2). Een virtuele zaagsnede op het densitometrisch profiel werd weggeknipt opdat eventuele weggezaagde anomalieën bij de blokjes (die door X-CT wel zijn gedetecteerd) niet zouden leiden tot over- of onderschattingen.

3.6 Near-infrared beeldvorming

Het scansysteem werd gedurende de onderzoeksperiode gebouwd en geoptimaliseerd. Het opnamesysteem bestaat uit volgende delen (Figuur 5):



Figuur 5: Opnamesysteem van de NIRhi techniek

- Belichting (1)
- Lens (2)
- Spectrograaf (3)
- Sensor (4)
- Lijntafel waarop het monster werd aangebracht (5)
- Instelbare transformatoren (niet allemaal weergegeven in Figuur 5) (6)
- Verstelbare hendel om de spatiale resolutie te wijzigen (7)
- Verwerkingseenheid (laptop, niet weergegeven op figuur)

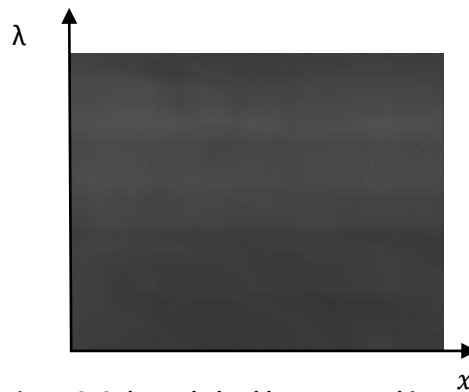
Een rij lampjes met verstelbare intensiteit, werd achter melkglas geplaatst om een uniforme belichting van de houtstalen te creëren. Het gereflecteerde licht wordt door de lens gefocust doorheen een smalle opening (slit). Vervolgens wordt deze lijn gesplitst in de spectrograaf in zijn verschillende golflengten. Golflengten tussen 800 - 2500 nm worden per ruimtelijke eenheid (voorgesteld door een pixel) opgevangen door de matrixsensor. Deze sensor laat toe om simultaan

320 ruimtelijke eenheden in beeld te brengen. De golflengtegevoeligheid bedraagt theoretisch 10 nm (manuele berekening genereert 6.64 nm). Een opname wordt bijgevolg voorgesteld als een matrix van grijswaardes (256×320 pixels).

Als output werd telkens een ruw beeld bekomen dat als volgt dient geïnterpreteerd te worden (Figuur 6):

- In de verticale richting wordt het NIR spectrum weergegeven per spatiale entiteit (i.e. ruimtelijke pixel)
- de horizontale richting bestaat uit een lineaire schikking (reeks of array) van ruimtelijke pixels

Aldus hoort bij elke golflengte λ een grijswaardeprofiel van 320 pixels. Bij elke pixelpositie x zal een volledig spectrum weergegeven worden.



Figuur 6: Onbewerkt beeld van een NIRhi opname

3.6.1 Herschaling

Via formule (9) werden metingen in Matlab herschaald tussen 0 en 1. Op deze manier wordt grotendeels gecorrigeerd voor ruis en differentiële belichting:

$$s = \frac{S - D}{W - D} \quad (9)$$

met s en S respectievelijk de herschaalde en ongecorrigeerde waarde van het staal. D en W zijn de gemiddelde grijswaarden van respectievelijk de donkerreferentie (i.e. met lampen gedoofd en afgedekte lens) en witte referentie (i.e. een homogeen materiaal). Op deze manier wordt een reflectantiekalibratie bekomen zoals beschreven in Gowen et al. (2007). Ondanks deze kalibratie werden echter nog steeds sterke belichtingseffecten waargenomen in de resultaten.

Vandaar dat een reeks optimalisatiestappen uitgevoerd werd. De belichtingseffecten werden mogelijks veroorzaakt door een niet-uniforme belichting, alsook door opwarmingseffecten van de lampen (resultierend in intensiteitwijzigingen). Om deze fenomenen te onderzoeken werd een homogeen materiaal gedurende 30 minuten onder de scanner geplaatst, waarbij per tijdsinterval een reeks beelden genomen werd. Zowel binnen 1 beeld (spatiaal) als tussen verschillende beelden (temporeel) werd variatie vastgesteld (zie Bijlage 3).

- De spatiale variatie door niet-uniforme belichting werd tweërlei gecorrigeerd:
 - Hardwarematig: Door de intensiteit van de lampen variabel te maken kon gecorrigeerd worden voor het fenomeen dat lichtintensiteit daalt met de afstand tot de lichtbron.
 - Softwarematig: Voor subtielere belichtingsartefacten werden langs beide zijden van een spatiale reeks 100 pixels (arbitraire waarde) verwijderd. Door deze 100 pixels als overlap tussen twee opeenvolgende beelden te beschouwen, kon elk beeld aan elkaar gezet worden (zie Bijlage 3). Indien nog steeds visueel merkbare intensiteitsverschillen geobserveerd werden, kon met behulp van Matlab een extra correctie doorgevoerd worden. Deze correctie werd doorgevoerd door het verschil te nemen van twee aaneenliggende pixels tussen twee opeenvolgende opnames en dit verschil telkens op te tellen bij de laatste opname.
- De temporele variatie werd opgevangen door per onderzochte houtstaaf een donker- en lichtreferentie te nemen. Tussen twee opnames werd dit niet gedaan, omwille van de verwaarloosbare tijdspanne.

Het uiteindelijke doel van NIR beeldvorming is het bekomen van een zogenaamde hyperkubus. Totnogtoe is het onmogelijk simultaan een hyperkubus te verkrijgen (Gowen et al. 2007). Dit wordt pas verkregen door een translatie van het staal onder de lens via een “pushbroom” systeem. Vermits per pixel ook het volledige NIR spectrum bekend is, ontstaat een driedimensionale dataset.

Dezelfde tangentiaal gebroken houtstalen die gebruikt zijn voor X-CT werden aangewend voor NIRhi. Omwille van technische redenen kon geen accuraat pushbroomsysteem ontwikkeld worden. Vandaar dat telkens een lijnscan werd genomen met een resolutie van 0.1876 mm (manueel bepaald d.m.v. een meetklem), om nadien alle beelden samen te voegen. Enkel de radiale zijde van de houtstaven werd gescand, vermits deze axiaal weinig varieert.

Om een zo exact mogelijke positionering te verkrijgen werd het staal m.b.v. de lijntafel onder de sensor verschoven. De lijntafel is verbonden met een computer waardoor de positie accuraat kan gemeten worden tot op 0.1 mm. Eén opname bestond telkens uit 20 herhalingen die uitgemiddeld werden. Opdat twee opeenvolgende opnames zouden aansluiten, werd de te verschuiven afstand berekend (rekening houdende met de weg te knippen belichtingseffecten). Uiteindelijk werd na herschaling een profiel per houtstaaf verkregen. Om tot slot een kern-spint profiel te verkrijgen moesten alle houtstaven op hun beurt virtueel aan elkaar gekleefd worden. Ondanks de herhaalde herschaling was er nog steeds een systematische afwijking in intensiteit tussen de houtstaven. Deze afwijking werd op zijn beurt softwarematig weggewerkt op de analoge manier hierboven beschreven, maar op het niveau van de houtstaaf i.p.v. de opname.

Na visuele inspectie werd veel ruis waargenomen bij de kleinste en grootste golflengtes. Deze werden verwijderd, waardoor het golflengtebereik gereduceerd werd van 800 - 2500 nm tot 933-2261 nm. Het bekomen NIR spectrum kon vervolgens gebruikt worden voor kwalitatieve/kwantitatieve verwerking.

3.6.2 Voorverwerking

Vooraleer de multivariate data te verwerken is het vaak noodzakelijk om deze geschikter te maken voor analyse. De reden hiervoor is om niet-chemische “bias”fenomenen (vb: door een inhomogeen staaloppervlak) te corrigeren (Gowen et al. 2007). Verschillende voorverwerkingstechnieken zijn beschikbaar bvb: mean-centering, Savitsky-Golay, baseline-correctie etc.

De gekozen voorverwerking in deze studie werd bekomen door trial-and-error op basis van de kwaliteitsparameters die verkregen werden na modelconstructie.

Na de voorverwerking kunnen spectrale gegevens aangewend worden om te classificeren, of te kwantificeren (regressie). Over alle houtsoorten heen werden regressies uitgevoerd met volumegewicht en HHV.

Net als bij de X-CT profielen werd het volumegewicht virtueel gepositioneerd op het NIR profiel. Dit was eveneens het geval voor de geclusterde blokjes waar de HHV van bepaald werd.

3.6.3 PLS (Projectie op Latente Structuren) regressie

Op de NIR spectra werd vervolgens via multivariate data-analyse een kalibratie uitgevoerd met gegevens bekomen via de conventionele methodes. Het doel van deze kalibratie is om een functie te bekomen die voorspellingen genereert voor verbrandingswaarde, chemische eigenschappen, volumegewicht etc. op basis van NIR spectra.

Het principe van Projectie op Latente Structuren (PLS) gaat als volgt (Fang et al. 2009; Kelley et al. 2004; Schimleck et al. 2002; Rhe & Lestander 2005):

Vooreerst dienen twee matrices te worden geconstrueerd:

- $\mathbf{X}$ is een matrix met spectrale informatie verkregen via NIR-metingen. Elke observatie (gaande van 1, ... I) is opgebouwd uit absorptiewaarden bij K golflengtes. Aldus wordt een $I \times K$ matrix bekomen (Rhe & Lestander 2005).
- $\mathbf{Y}$ bevat de responsvariabelen. Indien slechts één responsvariabele wordt beschouwd, ontstaat een $I \times 1$ kolomvector (Rhe & Lestander 2005). Indien bijvoorbeeld M responsvariabelen in beschouwing genomen worden, wordt een $I \times M$ matrix bekomen. Deze responsvariabelen kunnen waarden zijn van chemische of mechanische aard (Kelley et al. 2004).

In een oplossing verkregen door Principale Componenten Analyse (PCA) worden de data in $\mathbf{X}$ geprojecteerd volgens de grootste variatie. Echter, de as van de grootste variatie in $\mathbf{X}$ verklaart niet noodzakelijk de meeste variatie in $\mathbf{Y}$. PLS zoekt een compromis tussen de maximale verklarende variatie van de stalen in het NIR-spectrum ($\mathbf{X}$) en de waarden uit de $\mathbf{Y}$ matrix. Deze methode wordt beter geacht dan normale principale componentenregressie (PCR) (Rhe & Lestander 2005). Het verschil tussen PCR en PLS regressie zit hem in de doelfunctie (Fang et al. 2009):

$$\text{Doelfunctie PCR: } \max \text{ var } (\mathbf{X}^{-i} \mathbf{w}_i)$$

$$\text{Doelfunctie PLS: } \max \text{ covar } (\mathbf{X}^{-i} \mathbf{w}_i, \mathbf{y})$$

Met $\mathbf{w}_i$ de i^{de} PC, en $\mathbf{y}$ de responsvector

Bij PLS wordt aldus de covariantie gemaximaliseerd, terwijl bij PCR de variantie wordt gemaximaliseerd. Uit de vergelijkingen blijkt dat PLS zowel informatie uit X als Y haalt.

PLS is een data-decompositietechniek waarbij de spectrale data in X ontbonden worden, terwijl principale componentenregressie gebruikt wordt om de afhankelijke veranderlijken in Y te linken met de ontbonden data in X , waarna een projectie gebeurt op zogenaamde “latente structuren”. Gegevens uit beide matrices worden onafhankelijk van elkaar en simultaan ontbonden, waarna een regressie plaatsvindt. Bijgevolg ontstaat een relatie tussen de afhankelijke veranderlijken (chemisch en/of mechanisch) en de NIR spectra. PLS kan zowel toegepast worden met één afhankelijke variabele (Y als vector) als met meerdere (Y als matrix) (Kelley et al. 2004).

Om PLS regressie uit te voeren werd gekozen voor de Eigenvector PLS toolbox software die ingebracht werd in Matlab. Het model werd uitgevoerd met:

- X bestaande uit spectra (al dan niet uitgemiddeld),
- Y bestaande uit de variabelen gemeten met conventionele methodes (i.e. volumegewicht en calorische waarde).

PLS wordt in codevorm uitgevoerd d.m.v. het SIMPLS algoritme. Na de kalibratie werd telkens een testset (met gekende X en Y) gebruikt om de kwaliteit van een predictie na te gaan.

Kwaliteitsparameters als RMSE (Root Mean Square Error) werden gebruikt, zowel voor modelkalibratie (RMSEC en RMSECV), als voor de predicties (RMSEP). Ook zijn telkens de R^2 weergegeven, naar analogie met Lande et al. (2009).

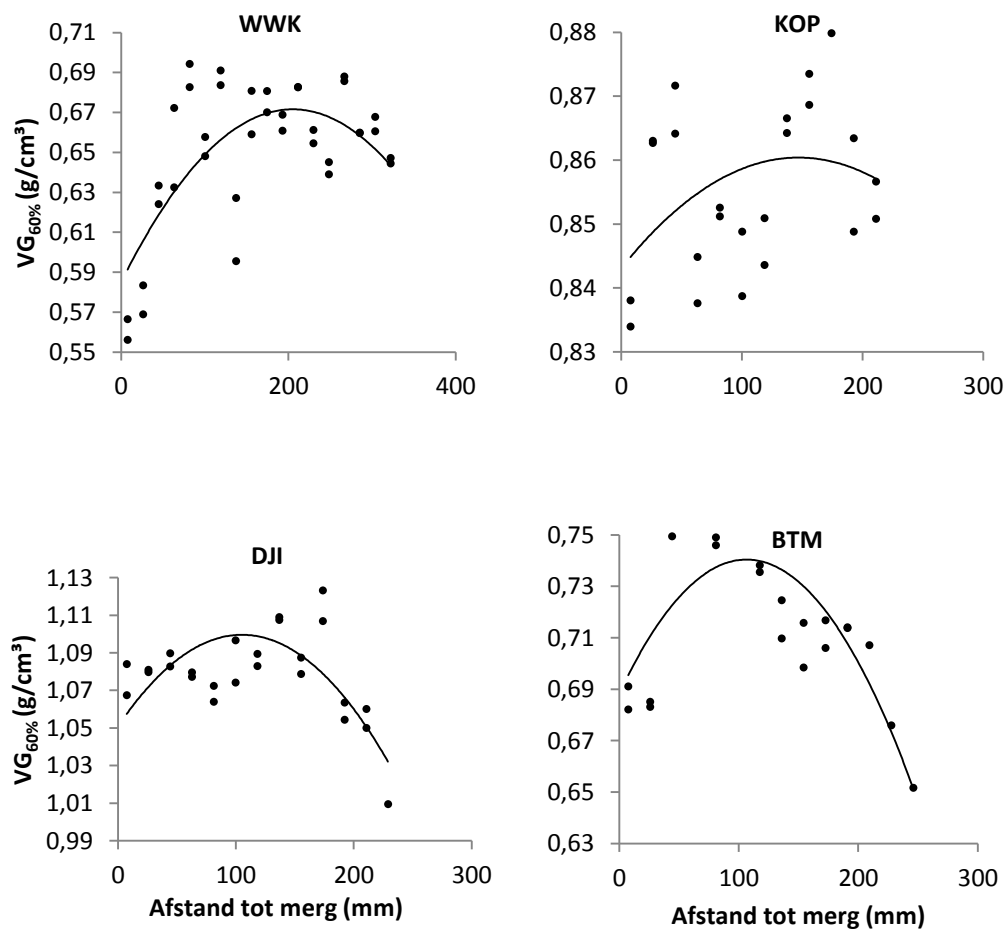
4 Resultaten en bespreking

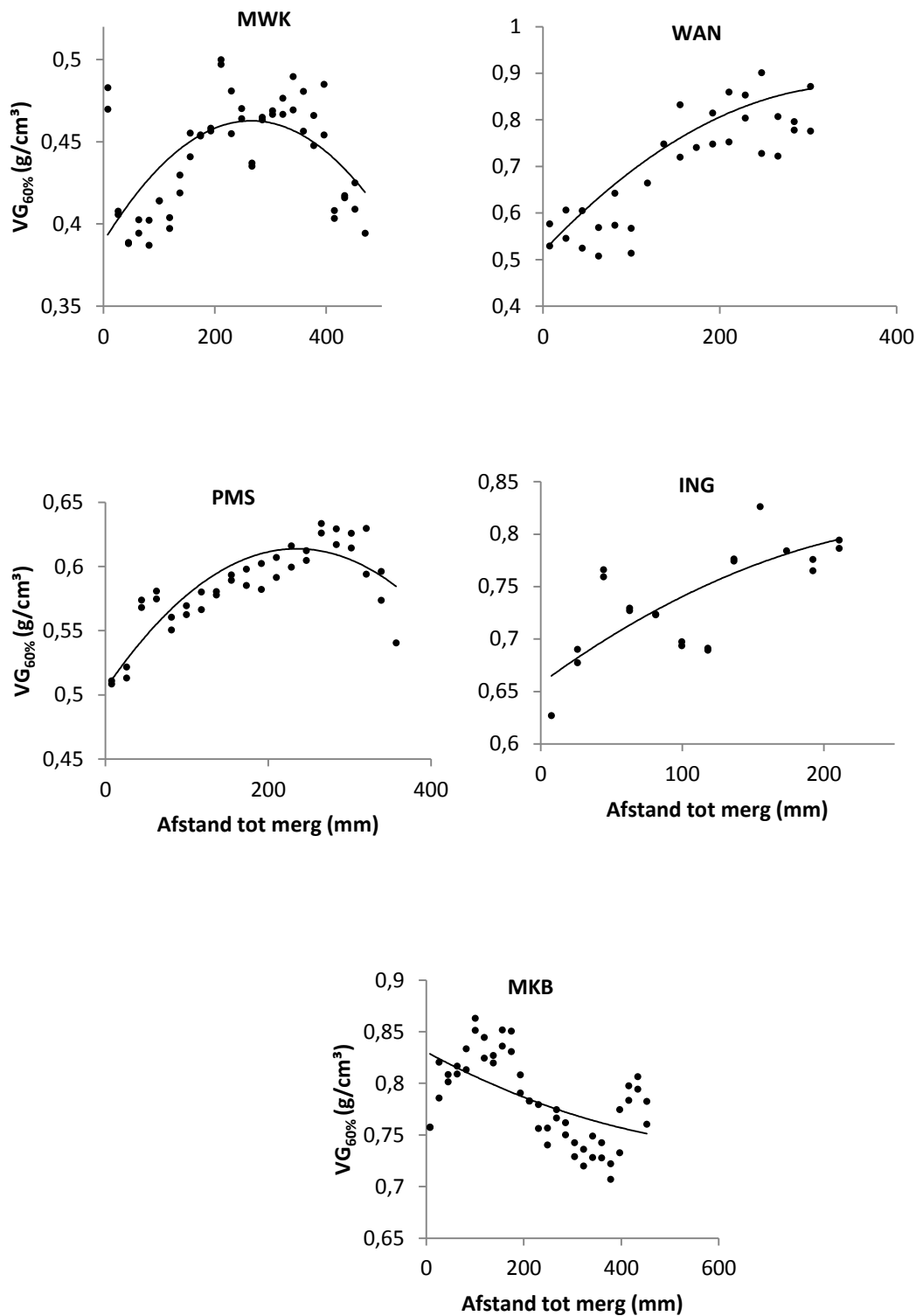
In volgende secties worden de voornaamste resultaten weergegeven, voor bijkomende informatie werd verwezen naar de bijlage. Bij statistische analyses werd een significantieniveau gehanteerd van 0.05, tenzij anders vermeld.

4.1 Volumegewicht

In de beschouwde subset is een groot bereik aan volumegewichten gevonden (gemiddeld van 0.442 g/cm³ voor MWK tot 1.073 g/cm³ voor DJI) tussen de verschillende houtsoorten.

Binnen deze houtsoorten werd gezocht naar radiale trends. Met de klassieke methode werd een radiaal VG_{60%} profiel geconstrueerd van zowel Serie 1 als Serie 2 blokjes (herhaling). Om trends te benadrukken werd een polynoom (2^{de} graad) gefit (Figuur 7).





Figuur 7: Radiale volumegewichtprofielen

Volumegewicht als structureigenschap en de variatie ervan is sterk gerelateerd aan de overlevingsstrategie van een boomsoort.

KOP is een boomsoort met pionierskarakteristieken (Lacoste & Alexandre 1991) ondanks het relatief hoog volumegewicht van de onderzochte sectie. Het bekomen profiel is conform met Woodcock &

Shier (2002) en wordt door het relatief stijgend verloop geclassificeerd als type I (Bhat et al. 1989). In absolute waarden is echter weinig verschil merkbaar, en is er veel spreiding aanwezig.

Stijgende profielen (zowel convex als concaaf) zijn eveneens terug te vinden bij WWK, MWK, ING en PMS. Aan al deze soorten konden pionierskarakteristieken toegewezen worden door Arets (2005). Bij sommige van deze stalen is echter een lichte daling naar het spint toe merkbaar. De pionierskarakteristiek kon reeds afgeleid worden uit hun laag volumegewicht (Hernández et al. 2012), hoewel dit niet altijd geldt.

Bij het onderzochte profiel van WAN is een aanzienlijke sprong in dichtheid merkbaar op ongeveer 10 cm van het merg. Dit staal heeft dus een abrupte stijging naar het spint toe ook al is *Sextonia rubra* een schaduwtolerant soort (Scotti et al. 2010) met climaxeigenschappen. Een plausibele verklaring is een snelle groei in het jeugd stadium (mogelijks door toevallige factoren).

Een min of meer (sterk curvilineair) dalend verband is te observeren bij DJI, BTM en MKB. Er is een grote variatie, maar algemeen kan een type III patroon geobserveerd worden. Als de onderzochte sectie van DJI wordt toegeschreven aan de botanische naam *Terminalia amazonia*, dan is deze te beschouwen als een climaxsoort (Arets 2005), wat zijn dalend profiel verklaart (Woodcock & Shier 2002). De naamverwarring die heerst bij deze soort zorgt voor onduidelijkheid. Zijn hoog volumegewicht wijst echter op duidelijke climaxeigenschappen. Over BTM werden geen gegevens gevonden. Afgezien van de dalende trend vertoont de sectie afkomstig van de houtsoort MKB, te classificeren in een van de langlevende pioniersklassen volgens Arets (2005), toch sterk variërende eigenschappen.

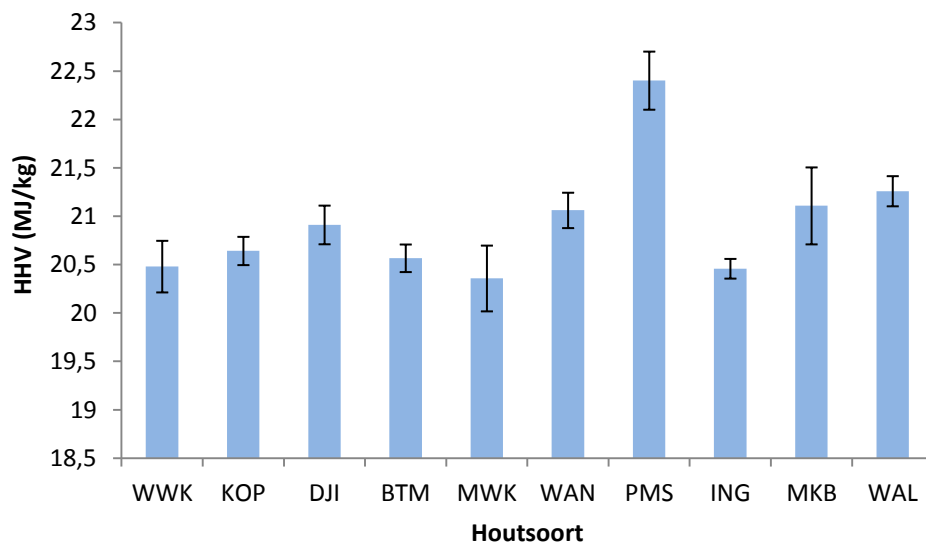
Algemeen dienen bovenstaande gegevens voorzichtig geïnterpreteerd te worden aangezien er slechts één profiel is bepaald van één individu (waar toevallige factoren zoals onderdrukking, pathogenen etc. een grote kunnen spelen). Ook kunnen extractieven een grote rol spelen in de radiale trends (Woodcock & Shier 2002). Desondanks geven deze profielen een beeld van het groeiverloop en de significante variaties binnen verschillende soorten. De radiale resolutie van deze methode is echter beperkt omwille van de staalgrootte noodzakelijk voor gravimetrische bepaling. Subtiële fenomenen kunnen moeilijk geobserveerd worden, alsook meetfouten spelen een rol.

Of de verschillen in absolute waarden significant zijn voor de valorisatie van restproducten, zal in de praktijk nog afgetoetst moeten worden.

4.2 HHV

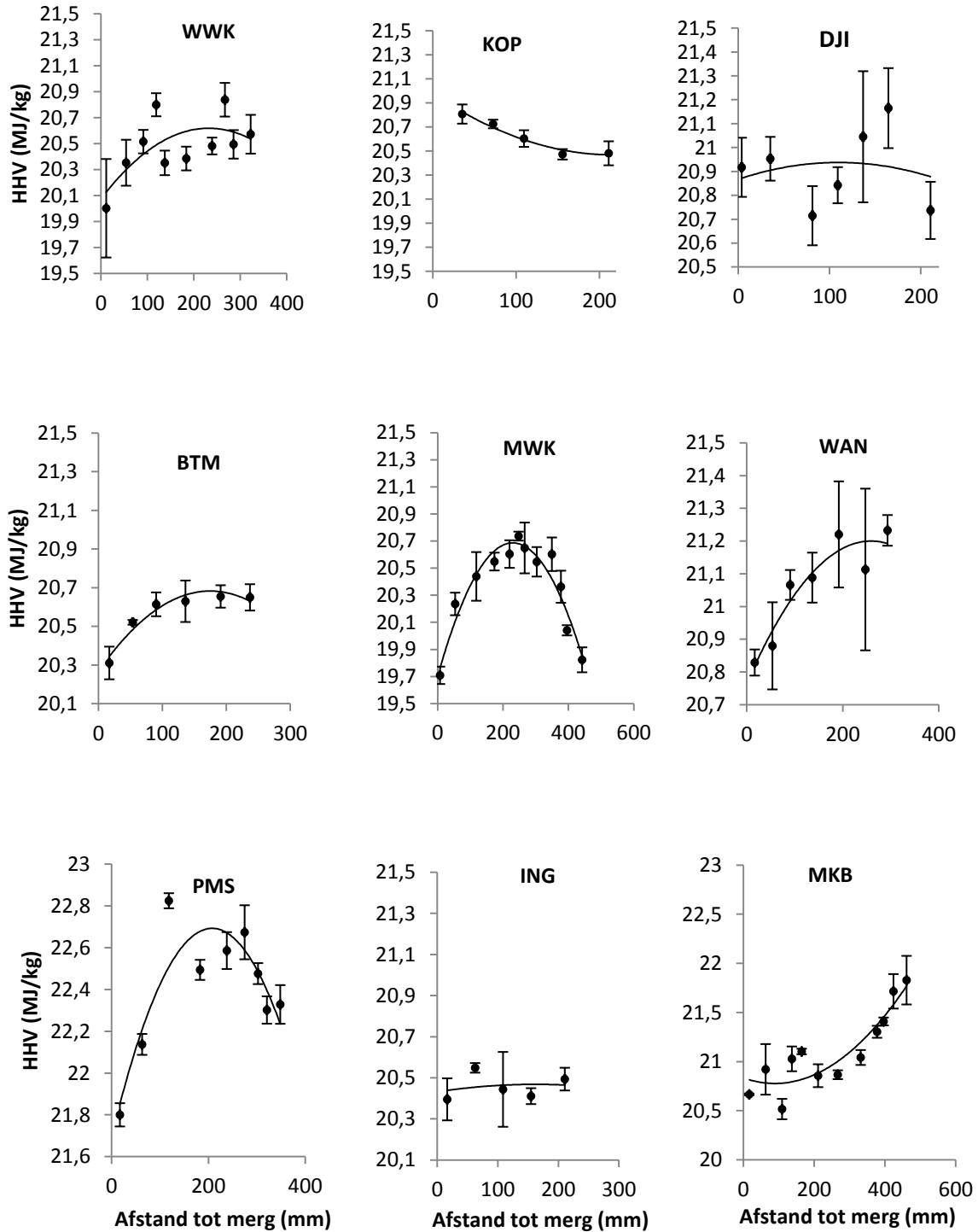
Met de bekomen HHV's werd onderzocht of er verschillen bestaan tussen en binnen de beschouwde soorten. Zowel houtsoort en radiale positie werden in rekening gebracht (zie Bijlage 4). Er is een significant effect van soort en van positie op de variabiliteit van de gemeten HHV waarden ($P=0.000$).

De gemiddelde HHV per houtsoort is weergegeven (Figuur 8 en Bijlage 4). Van het extra monster WAL (zie 2.3.2) werd geen radiale variabiliteit onderzocht.



Figuur 8: HHV van de verschillende soorten

Om per houtsoort apart een radiale trend na te gaan is telkens een Kruskal-Wallistoets uitgevoerd om significante effecten van de positie te achterhalen (zie Bijlage 4). Hieruit blijkt dat er een effect is bij alle houtsoorten behalve WAN en ING. De radiale trends van alle houtsoorten zijn weergegeven in Figuur 9.



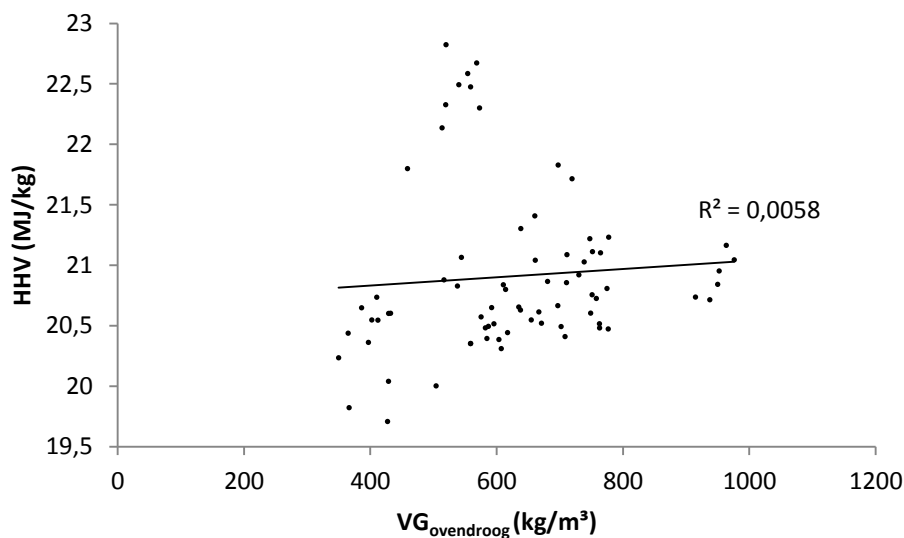
Figuur 9: Radiale HHV profielen

De trends in verbrandingswaardes zijn variabel van houtsoort tot houtsoort: zowel dalende, stijgende als parabolische trends zijn merkbaar. Sommige monsters vertonen aanzienlijke radiale verschillen ($> 1\text{MJ/kg}$). Net als bij volumegewichtsbepaling, is de ruimtelijke resolutie gelimiteerd door de staalgrootte nodig om accurate metingen te verrichten, in dit geval minimum staalgrootte nodig voor bomcalorimetrie. Aan deze tekortkomingen kan verholpen worden door gebruik van een proxy als NIRhi, wat verder in deze masterproef is uitgewerkt.

4.3 Link tussen volumegewicht en HHV

Om te achterhalen of structuurvariatie tussen en binnen houtsoorten de variatie in HHV kan verklaren, werd op basis van de volledige subset een verband gezocht.

Om eventuele afwijkingen m.b.t. vochtgehalte te elimineren, werd het ovendroog volumegewicht genomen in deze analyse. Vaak werden meerdere blokjes (i.e. posities) samengenomen (zie 3.3) bij de HHV bepaling, waardoor het volumegewicht telkens werd uitgemiddeld over deze afstand. Zo werd elke HHV op een bepaalde radiale positie, gekoppeld aan het volumegewicht. Dit werd voor elke positie in alle houtsoorten uitgevoerd, waarna een spreidingsdiagram geconstrueerd werd (Figuur 10). De houtsoort WAL werd niet meegenomen in de analyse vermits hierop geen dichtheidsbepaling werd uitgevoerd.



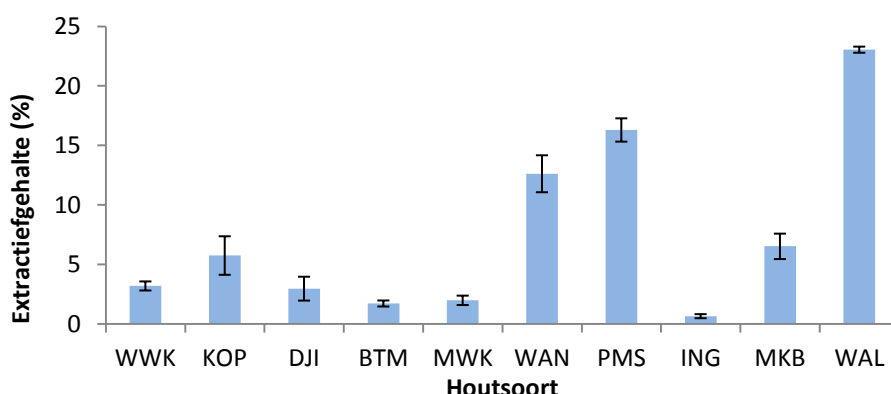
Figuur 10: relatie tussen VG_{ovendroog} en HHV voor alle houtsoorten

Tussen beide variabelen werd een Pearson correlatie gevonden van 0.076, de P-waarde hierbij bedraagt 0.520 waardoor geen covariatie plaatsvindt tussen HHV en VG_{ovendroog} in de beschouwde subset aan soorten.

Als gekeken wordt naar de eenheden, dan is het verband tussen volumegewicht en HHV niet evident: het ene staat uitgedrukt t.o.v. volume, het andere t.o.v. de massa. Vermits een hoog volumegewicht vaak (maar niet altijd, zie Chave et al. (2009)) gepaard gaat met trage groei, zouden eventuele ecologische parameters in acht genomen moeten worden (m.b.t. de relatieve verhoudingen der componenten). Zo zou een trage groei gepaard gaan met een hoger ligninegehalte (Novaes et al. 2010). Vermits lignine de energie-inhoud laat stijgen, is een positief verband niet uitgesloten. Een mogelijk effect per staal is nagegaan (zie Bijlage 4), waarbij sommige stalen een significante covariatie vertonen (WWK, WAN en DJI), andere niet. Dit is een bevestiging van de algemene onzekerheid die heerst rond deze relatie (Montes et al. 2011). Uit voorgaande blijkt dat verder fundamenteel onderzoek (gelinkt aan chemische eigenschappen) nodig is om al dan niet een verband te detecteren. Dit kan op zijn beurt een link leggen tussen verbrandingswaarde en ecologische eigenschappen van de boom zelf. In sectie 4.8 wordt terug gekomen op de combinatie van volumegewicht en HHV tot een “volumetrische energiewaarde”, en zijn praktische implicaties.

4.4 Ethanol-tolueen oplosbare fractie

Er is een significant effect van houtsoort wat extractiegehalte betreft ($P=0.001$). De absolute waarden (Figuur 11) komen enigszins overeen met deze bekomen uit de literatuur (zie Bijlage 5).



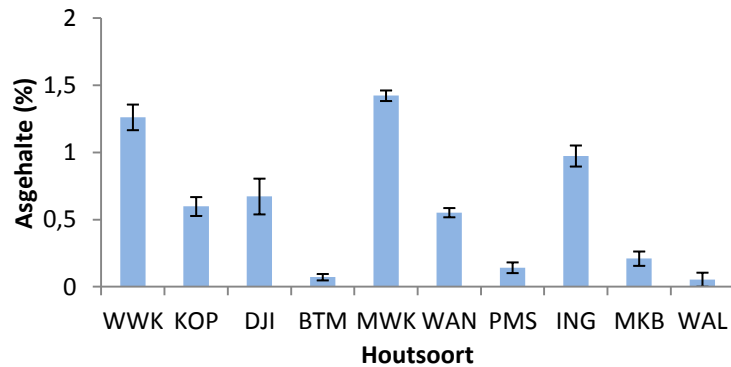
Figuur 11: Extractiegehalte van de beschouwde houtsoorten

Om de totale hoeveelheid extractieven te bekomen, zijn in principe verschillende behandelingen nodig met verschillende solventen. De gebruikte extractiemethode in de ASTM D 1107 – 96 vermeldt een droging bij 103.5°C van de bekomen extractieven. Deze studie kon niet aantonen of er vervluchtiging optrad van volatiele componenten. In de ASTM standaard staat vermeld dat ze enkel van toepassing is op alle Noord-Amerikaanse houtsoorten. Omwille van het ontbreken van andere standaarden, werd toch geopteerd voor deze. Onderzoek naar de geldigheid van bepaalde standaarden voor het brede spectrum aan tropische soorten zou gepast zijn in deze context. De opmerkingen van Sluiter et al. (2010) met betrekking tot de nood om een zekere differentiatie te brengen in de chemische analysemethoden, zou doorgetrokken kunnen worden naar verschillende houtsoorten.

Ecologische verklaringen van de hoeveelheid extractieven en de aard ervan is niet onderzocht. Zeker zullen ze te maken hebben met aspecten van kernvorming, gekoppeld aan overlevingsstrategie.

4.5 Asgehalte

De verkregen waarden weergegeven in Figuur 12 komen overeen met deze uit de literatuur (zie Bijlage 5). Er is een significant effect van de houtsoort op het asgehalte ($P=0.001$). MWK en WWK zijn de houtsoorten uit de subset met het hoogste asgehalte.



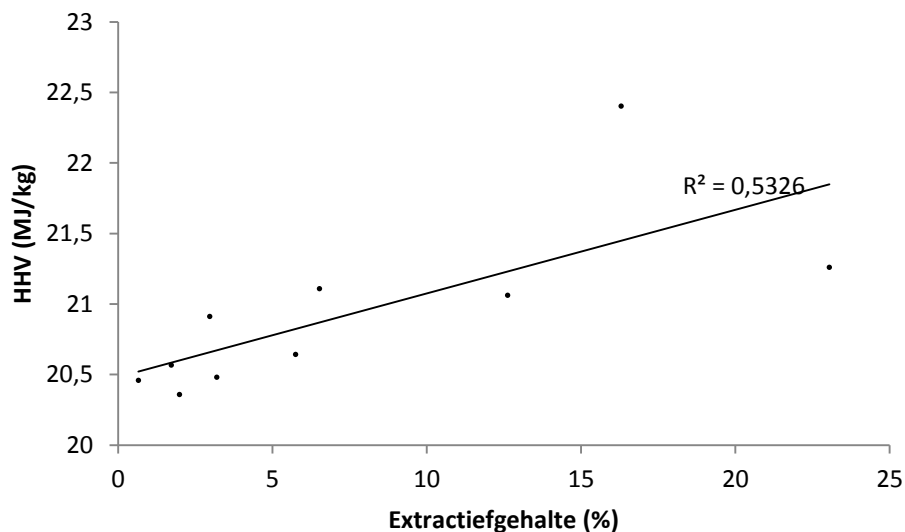
Figuur 12: Bepaald asgehalte van de beschouwde houtsoorten

In de studie is geen asgehalte bepaald van spinthout of schors. Asgehaltes van schors zullen aanzienlijk hoger liggen en zullen aldus meer bijdragen tot afzettingen op de installaties.

4.6 Link tussen chemie en HHV

4.6.1 Extractiegehalte en HHV

In Figuur 13 worden de gemiddelde HHV en extractiegehalte (van de binnenkern) t.o.v. elkaar uitgezet, inclusief de houtsoort WAL.



Figuur 13: Relatie extractiegehalte en HHV

De Pearson correlatiecoëfficiënt bedraagt 0.73 en de P-waarde is 0.017. Er is dus een significant verband tussen extractiegehalte en HHV.

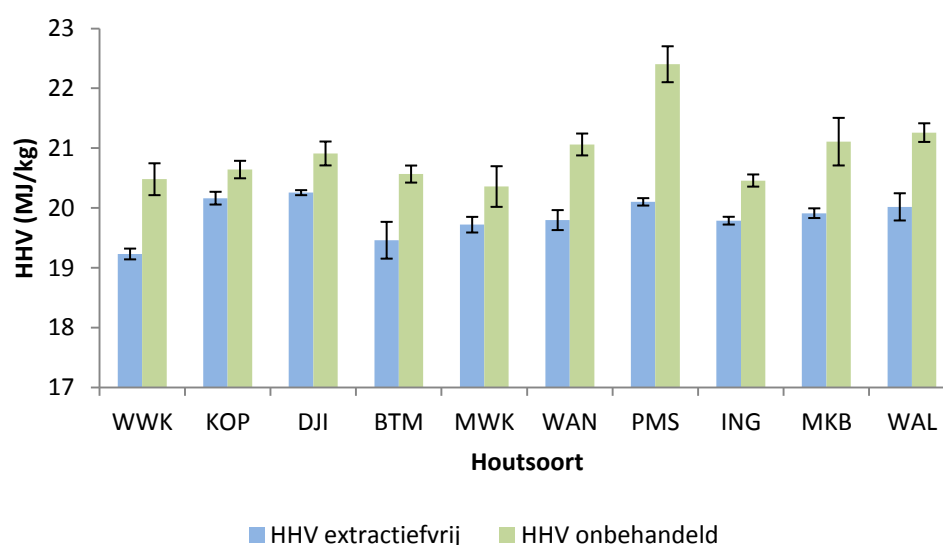
Vermits de term extractieven een veelheid aan chemische componenten kan omvatten, zal de eventuele bijdrage aan een hogere HHV eveneens verschillen van houtsoort tot houtsoort. Dit kan resulteren in een vervaging van het verband tussen HHV en extractiegehalte. Na uitdampen bleek duidelijk dat bij sommige houtsoorten harsen achterbleven, terwijl bij andere soorten kristalvorming optrad (Figuur 14). De grote diversiteit aan verbindingen is eveneens aangekaart in Doat (1977). Mogelijks zou calorische bepaling van extractieven meer inzicht geven in huidige verbanden.



Figuur 14: Kristalvorming bij WAN (links) en harsige substanties bij PMS (rechts)

De houtsoort WAL werd gekozen als bovengrens van extractiegehalte, maar draagt ondanks zijn harsig voorkomen duidelijk niet proportioneel bij tot de HHV. Mogelijks is dit eveneens te wijten aan de aard van de verbinding zelf. De HHV van WAL komt overeen met deze van het Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD)(Bijlage 5).

Ter bevestiging van de relatie werd extractievrij materiaal (bekomen via Soxhlet-extractie) gebruikt om te kijken of er een effect was van extractieven (Figuur 15). Extractievrij materiaal is enkel afkomstig van de binnenkern.



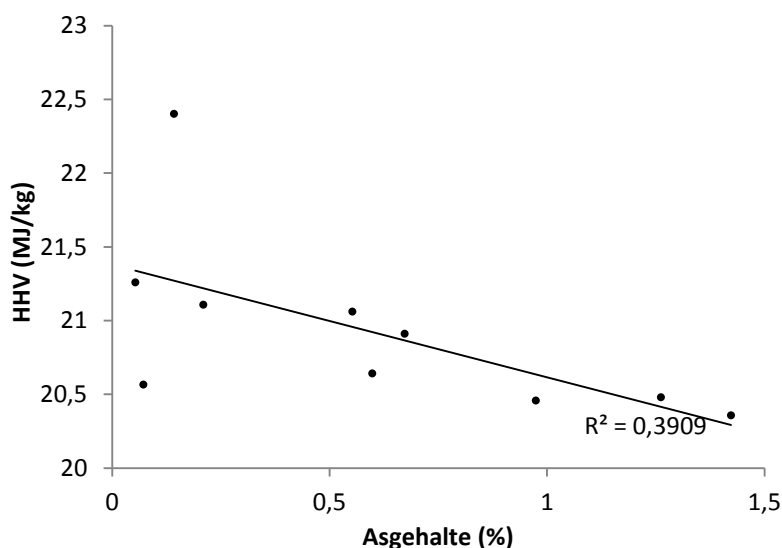
Figuur 15: Vergelijking van HHV tussen extractiefvrij en onbehandelde hout

Om te kijken of de HHV van het extractiefvrij materiaal significant verschillend is van deze van het onbehandeld hout, werd een Mann-Whitney test uitgevoerd. Een P-waarde van 0.000 geeft een significant verschil tussen het extractiefvrije en onbehandelde materiaal.

De nog steeds bestaande onderlinge verschillen binnen het extractiefvrij materiaal kunnen verklaard worden door een verschillende koolhydraat/lignineverhouding of asgehalte. In dit onderzoek werd omwille van praktische redenen geen holocellulose of ligninebepaling uitgevoerd.

4.6.2 Asgehalte en HHV

Tussen asgehalte en HHV is een zwak, niet significant verband (P-waarde 0.053) aanwezig. Enerzijds is het aantal datapunten waarschijnlijk onvoldoende om een eventueel verband aan te tonen. Anderzijds heeft hout in vergelijking met andere biomassa relatief lage asgehaltes. Het geringe effect van asgehalte op de HHV is eveneens aangekaart in Doat (1977).



Figuur 16: Relatie asgehalte en HHV

Een licht gravimetrisch effect (vermits as niet bijdraagt tot de HHV) kan aangenomen worden in het geval van stalen met een aanzienlijke ashoeveelheid (Figuur 12). De meeste problemen met betrekking tot as situeren zich dan ook in depositieproblemen zoals reeds vermeld in 2.3.1. Effecten aanwezig in Figuur 16 kunnen te wijten zijn aan verschillen in extractiegehaltes, alsook de koolhydraat/lignineverhouding.

Op basis hiervan werd een stapsgewijs regressiemodel gebouwd met extractiegehalte en asgehalte ten opzichte van de HHV (zie Bijlage 4). Hieruit bleek enkel het extractiegehalte een significant effect te hebben op de HHV. Het effect van asgehalte, alsook interactie-effecten tussen extractiegehalte en asgehalte zijn niet significant bevonden in deze studie. Een mogelijkheid voor toekomstig onderzoek is om, op basis van een grotere dataset, modellen op te stellen met voornoemde variabelen, gecombineerd met koolhydraat- en lignineconcentraties. Bovendien kan de factor volumegewicht meegenomen worden, om de complexe interacties vermeld in 4.3 te achterhalen.

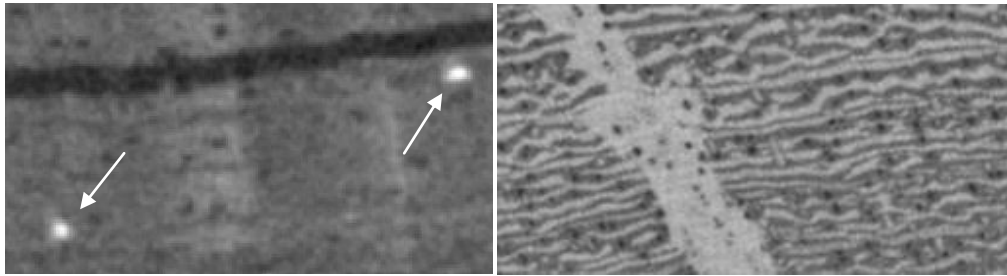
4.7 Analyses op basis van hoge-resolutie methodes

4.7.1 X-CT

4.7.1.1 Kwalitatieve analyse

Enkele X-CT visualisaties van houtsoorten bevinden zich in Bijlage 6. Reeds door visuele inspectie van de hoge resolutie opnames konden een aantal fenomenen binnenin de houtmaterie geobserveerd worden. Zo zijn inclusies van kristallen zichtbaar als heldere grijswaarden bij ING (*Couratari* sp.) (Figuur 17, opm. de horizontale zwarte band is een scheurvlak). Dit zijn prismatische kristallen in axiale parenchymcellen, alsook siliciumkorrels in de straalcellen (Richter & Dallwitz 2000). Zijn relatief hoog asgehalte kan deels hierdoor verklaard worden. Welke van de twee minerale vormen

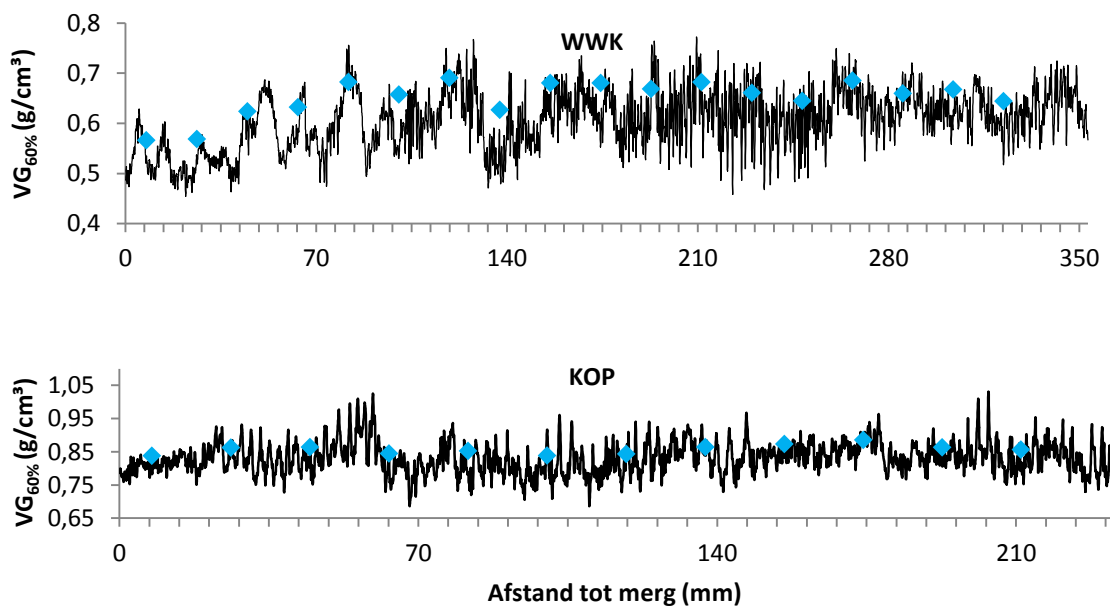
zichtbaar zijn op de X-CT beelden is niet af te leiden. Een inclusie van extractieven is duidelijk zichtbaar in de buitenkern van MKB (Figuur 17).

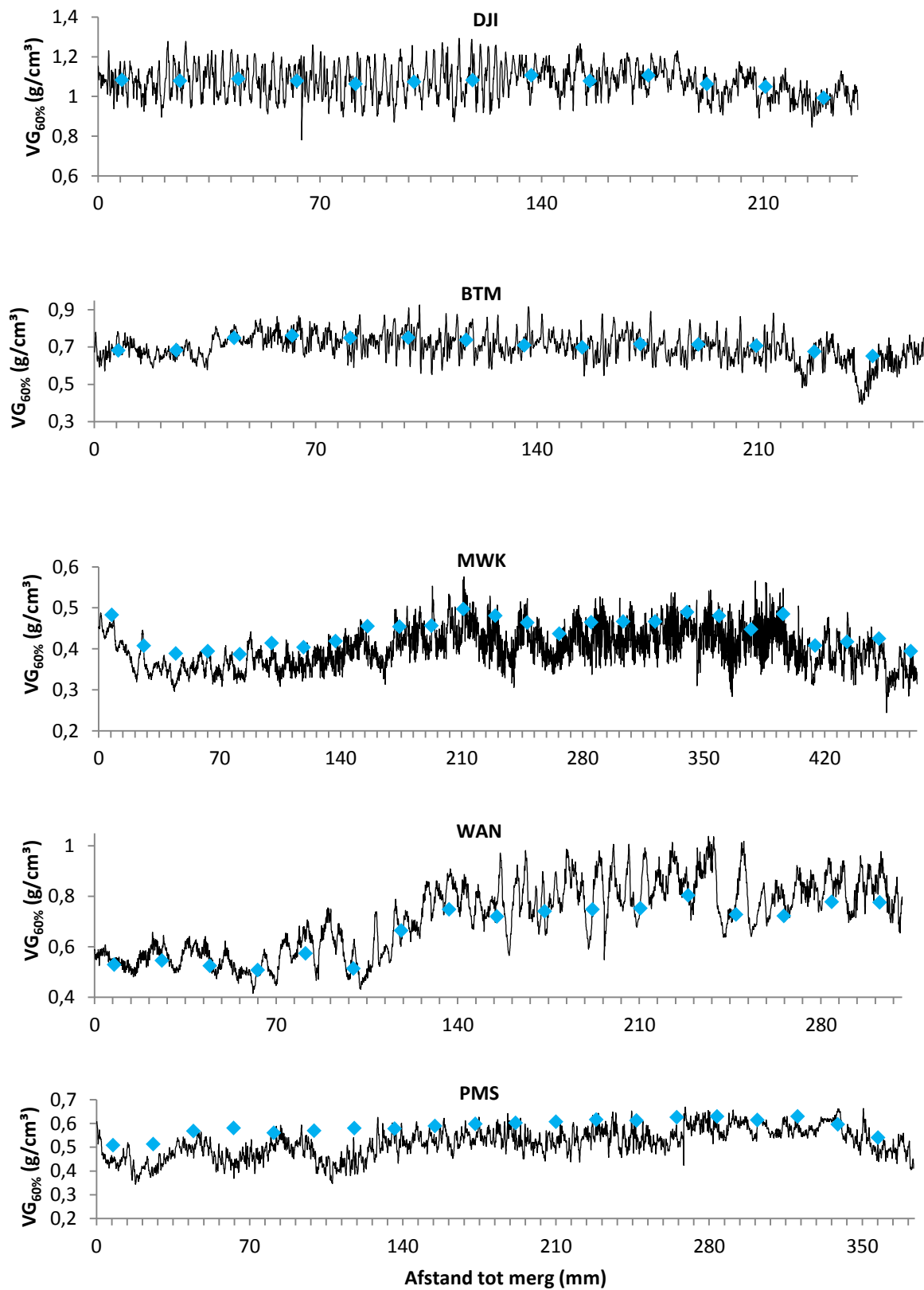


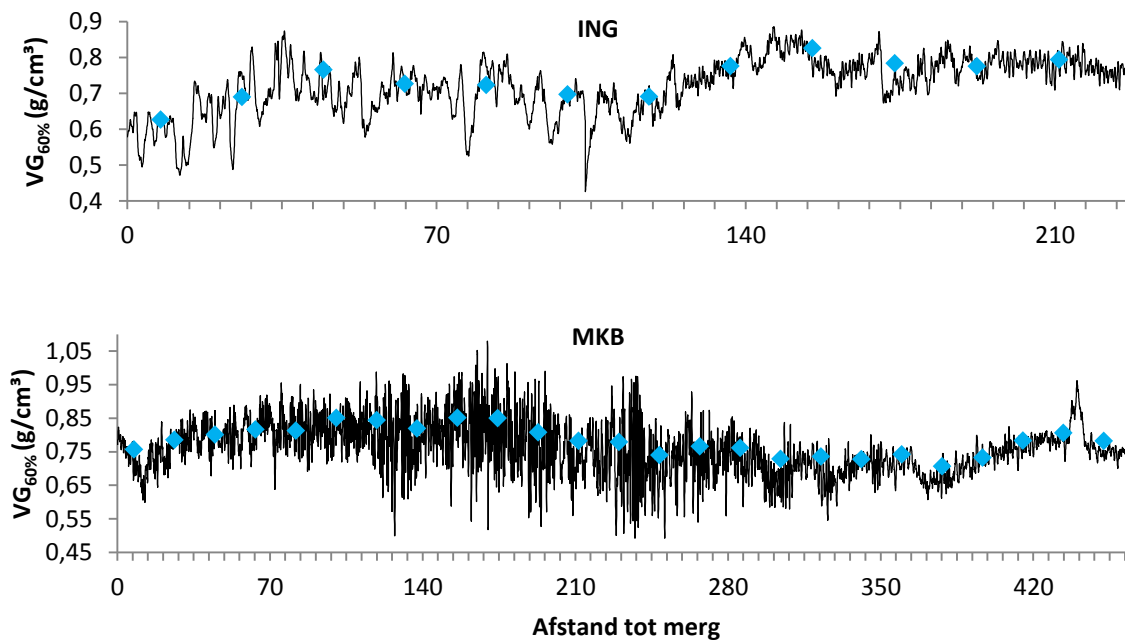
Figuur 17: X-CT beelden van het kopse vlak, met inclusies van kristallen bij ING (links) en extractieven bij MKB (rechts)

4.7.1.2 Kwantitatieve analyse

De microdensitometrische profielen zijn weergegeven in Figuur 18. Ter illustratie werden de conventioneel bepaalde volumegewichten voorgesteld. De bekomen resolutie is veel hoger en de link met ecologische eigenschappen kan gedetailleerder bestudeerd worden in vergelijking met de conventionele methode (zie 4.1). De hoogfrequente fenomenen van de X-CT profielen zijn te verklaren door afwisseling van weefseltypes met verschillende porositeit. Hierdoor kan naast de overlevingsstrategie (lagere frequenties), ook groei met hoge precisie bestudeerd worden op basis van het (hoogfrequent) systematisch patroon van grijswaarden, afkomstig van potentiële groeiringen. Bijzondere fenomenen beschreven in 4.7.1.1 zijn eveneens zichtbaar: de inclusie bij MKB is op het microdensitometrisch profiel zichtbaar als een scherpe piek naar het spint toe (Figuur 18). Hieruit kan opnieuw bevestigd worden dat extractieven de radiale trends beïnvloeden. Met deze methode kunnen ze echter duidelijker gelokaliseerd en gekwantificeerd worden.







Figuur 18: Densitometrische profielen (zwarte lijn) van merg naar spint samen met het VG bepaald met de conventionele methode (blauwe ruiten)

Op basis van alle waarnemingen werd geen significant verschil gevonden in volumegewichtsbepaling tussen beide methodes ($P=0.220$). Bijgevolg is X-CT een geschikte proxy voor deze bepaling, wat tevens gesteld werd in De Ridder et al. (2011).

Om dieper in te gaan op de houtsoorten zelf werden afzonderlijke testen uitgevoerd. Het gemeten $VG_{60\%}$ van de blokjes volgens de conventionele methode (VG_{conv}) en deze verkregen m.b.v. X-CT (VG_{X-CT}) zijn samen met P-waardes weergegeven in Tabel 3. Daaruit blijkt dat sommige houtsoorten significante verschillen vertonen tussen X-CT en de klassieke methode.

Tabel 3: Volumegewichten bekomen met X-CT en de conventionele methode, met bijhorende standaardafwijking (st.afw) en P-waarde, significante verschillen zijn aangeduid met (*)

Staal	VG_{X-CT} (g/cm ³)	st.afw	VG_{conv} (g/cm ³)	st.afw	P-waarde
WWK	0.6053	0.0389	0.6515	0.0368	0.001*
KOP	0.8328	0.0171	0.8574	0.0145	0.001*
DJI	1.0721	0.0334	1.0735	0.0288	0.911
BTM	0.7006	0.0490	0.7135	0.0332	0.421
MWK	0.4031	0.0334	0.4439	0.0346	0.000*
WAN	0.7096	0.1291	0.6695	0.1089	0.335
PMS	0.5190	0.0492	0.5860	0.0352	0.000*
ING	0.7166	0.0652	0.7399	0.0568	0.36
MKB	0.7579	0.0487	0.7832	0.0428	0.057

Er zijn een aantal mogelijke verklaringen voor deze significante verschillen.

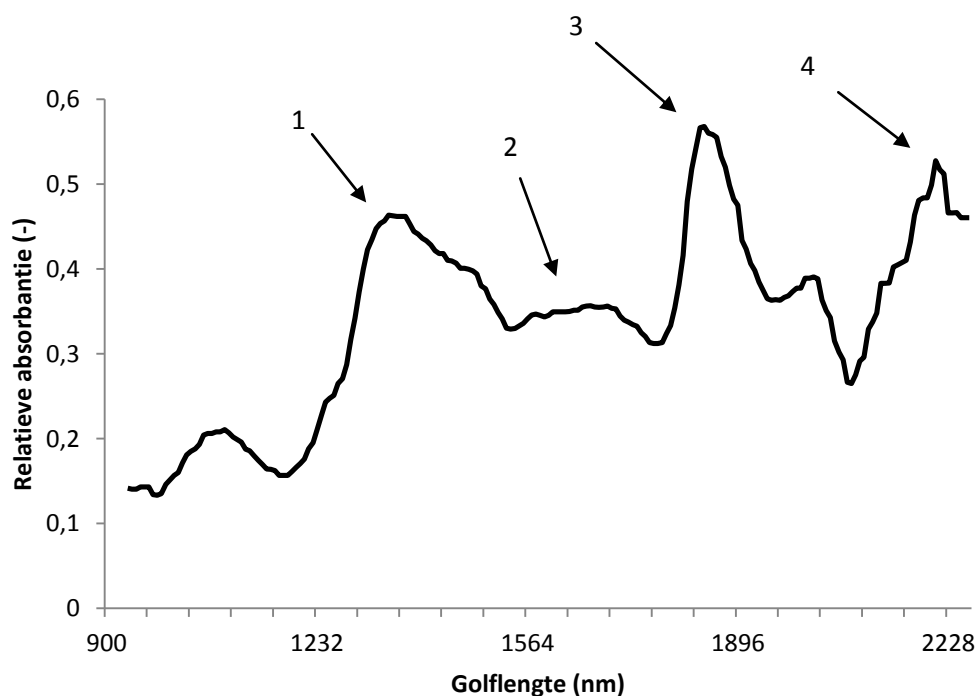
Kristallen gedragen zich in het X-stralengolfenlengtegebied anders dan celwandmateriaal en aldus ook het referentiemateriaal, waardoor de conversie van grijswaarden naar volumegewichten op basis van het referentiemateriaal niet exact overeenstemt met de realiteit. WWK bezit een relatief hoog asgehalte (Figuur 12) en dit geldt ook voor MWK, beide behorend tot de familie *Vochysiaceae*. Bij MWK is een systematische afwijking merkbaar. Het hoge asgehalte kan wijzen op minerale inclusies, hoewel deze volgens Richter & Dallwitz (2000) enkel bij *E. calcaratum* voorkomen. Minerale inclusies zijn hier niet visueel gedetecteerd, echter kan dit te wijten zijn aan de lage resolutie (35 μm) ten opzichte van de kristalmaat. Hoe dan ook zorgen de kristallen voor een afwijkend volumegewicht. Merk op dat geobserveerde kristallen in 4.7.1.1 niet geleid hebben tot een significant verschil bij ING.

Een andere belangrijke maar niet-systematische bron van afwijkingen in de onderzochte stalen kan toe te schrijven zijn aan een inaccuraat positionering.

4.7.2 NIRhi

4.7.2.1 Kwalitatieve analyse

De interacties tussen het te onderzoeken materiaal en de NIR straling zijn gebaseerd op overtonen en combinatiebanden die uiteindelijk een NIR spectrum genereren (Kelley et al. 2004). Figuur 19 toont het spectrum van één random gekozen spatiale pixel. Gegevens uit de literatuur (Kelley et al. 2004; Lande et al. 2009; Hein et al. 2009) werden gebruikt om een verklaring te vinden voor de voornaamste pieken (Tabel 4). Er zijn lichte verschillen met betrekking tot absolute waarden, toch zijn de patronen gelijkaardig aan deze gevonden in de literatuur. Vibraties van zowel lignine als koolhydraten zullen steeds voor overlapping zorgen (Kelley et al. 2004).



Figuur 19: NIR spectrum (zonder voorverwerking) met aanduiding van enkele relevante pieken (KOP)

Tabel 4: Verklaring voor enkele absorptiepieken

Piek	Oorzaak
1	Overtoon cellulose/hemicellulose hydroxylverbindingen(-OH)
2	Overtoon aromatische/alifatische C-H bindingen lignine
3	Interactieband (combinatieband) tussen OH-bindingen van koolhydraten en H ₂ O
4	Cellulose OH-vibraties

Softwarematig werd vervolgens een ruimtelijk expliciet beeld verkregen van de spectra, en dit voor een volledig merg-spintprofiel (Figuur 20). Subtiele verschillen zijn visueel merkbaar langsheen het traject kern-spint. Profielen van alle monsters zijn weergegeven in Bijlage 7.



Figuur 20: merg-spintprofiel verkregen via NIRhi (KOP)

4.7.2.2 Kwantitatieve analyse

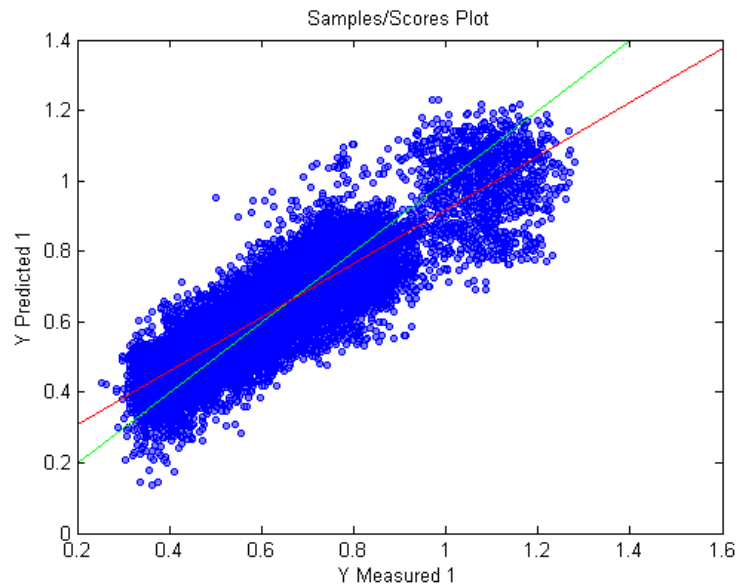
In volgende secties zijn modellen geconstrueerd met zowel volumegewicht als HHV. Resultaten werden, indien van toepassing, afgetoetst aan literatuurgegevens. Outliers werden na visuele inspectie telkens verwijderd. De software kiest zelf het aantal factoren die in beschouwing genomen worden voor modelconstructie. Teveel factoren geeft een “overfitting”, terwijl te weinig factoren onvoldoende voorspellende kracht genereren (Raymond & Schimleck 2002).

Relatie NIR en volumegewicht

Deze relatie werd zowel bepaald voor volumegewichten bekomen met de conventionele methode, als X-CT. Alle radiale volumegewichtsprofielen werden eerst omgezet naar de resolutie van het NIR spectrum d.m.v. interpolatie. Naast de kwaliteitsparameters (zie 3.6.3), wordt modelkwaliteit visueel voorgesteld door een spreidingsdiagram met gemeten en voorspelde waarden (Figuur 21). De groene lijn geeft het ideale geval aan waarbij de voorspelde waarden exact overeenkomen met de gemeten waarden. De rode lijn geeft de afwijking weer t.o.v. deze ideale voorspelling.

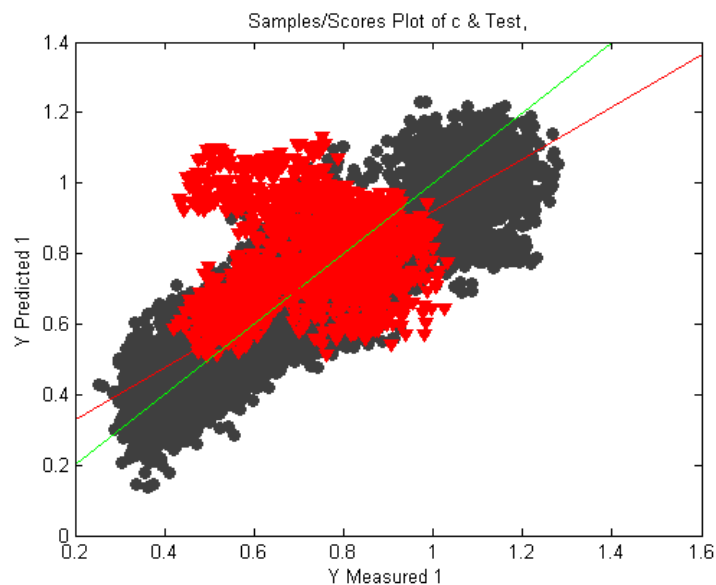
Vooreerst werd het model gebouwd met de X-CT volumegewichten. Om met testdata te werken werd een staal met gemiddeld volumegewicht (WAN) weerhouden. Aldus gebeurde de kalibratie met de acht resterende houtsoorten. Merk in Figuur 21 op dat na kalibreren een specifieke zone (0.8-0.9 g/cm³ bij de gemeten waarden) weinig datapunten bevat, wat in dit geval betekent dat verwijdering

van een houtsoort veel effect kan hebben op het bereik in volumegewichten. Bij de kalibratie zelf bedroeg de RMSECV 0.097 en de R^2_{CV} 0.672, wat een behoorlijk resultaat is.



Figuur 21 Spreidingsdiagram van de kalibratie met vergelijking van gemeten versus voorspelde volumegewichten

Na toevoeging van WAN als testset, werd volgende voorspelling verkregen (aangeduid door rode driehoeken in Figuur 22).



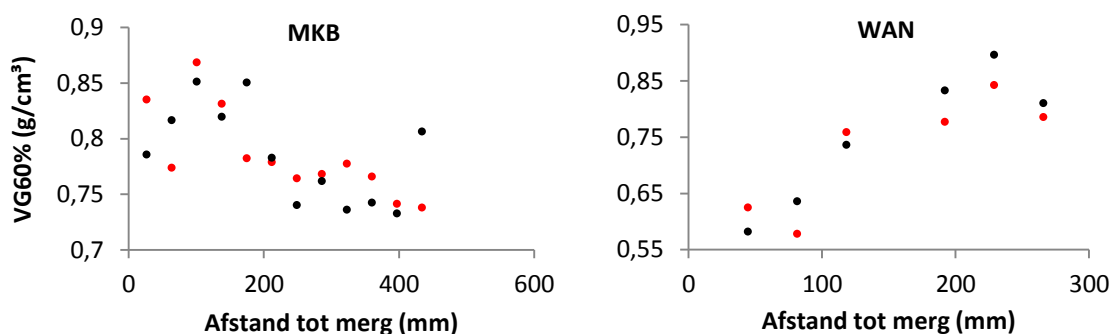
Figuur 22: Spreidingsdiagram van gemeten versus voorspelde volumegewichten voor alle beschouwde houtsoorten, zowel gekalibreerde volumegewichten (zwarte punten) als de testset (rode driehoeken) zijn weergegeven

De kwaliteitsparameters van de voorspelling zijn relatief zwak ($R^2_{PRED} = 0.039$ en $RMSEP = 0.188$). De rode puntenwolk (testset) bevindt zich echter in de buurt van het gemeten gemiddelde van WAN, maar met een grote spreiding. Uit deze parameters blijkt dat het model onvoldoende de data kan voorspellen. Een mogelijke reden hiervoor is de grote spatiale variatie van het X-CT dichtheitsprofiel (zie 4.7.1.2). Deze hoge resolutie zorgt namelijk voor een abrupte radiale afwisseling wat nadelig kan

zijn voor modelconstructie. Vandaar dat nadien ook de geïnterpoleerde volumegewichten op basis van de klassieke methode gebruikt werden, vermits deze een iets minder variërend verloop kennen. Dit verbeterde het model echter niet ($R^2_{\text{pred}}=0.039$ en $\text{RMSEP}=0.197$). Als gekeken wordt naar de RMSEP zou de gemiddelde afwijking dus 0.197 g/cm^3 bedragen. De voorspellingskwaliteit van de relatie NIR/volumegewicht is duidelijk lager dan deze bekomen door Mora & Schimleck (2010) (waar een RMSEP van 0.042 bekomen werd). Een mogelijke reden hiervoor is dat in voorvermelde studie steeds dezelfde houtsoort (van verschillende herkomsten) werd gebruikt, waardoor veel beïnvloedende factoren geëlimineerd worden. De factor soort en zijn geassocieerde chemische samenstelling zal ongetwijfeld een grote invloed uitoefenen op de modelkwaliteit. Andere bronnen van fouten zijn mogelijks afkomstig van belichtingseffecten of een ongelijk staaloppervlak (vb. door verzagen).

Om de factor soort te elimineren werd een model geconstrueerd op basis van het MKB staal ($\text{RMSEP}= 0.035$ en $R^2_{\text{pred}}=0.369$), omwille van het groot aantal datapunten (te danken aan de grote stamdiameter) en de grote variatie aan volumegewicht (zie Figuur 7). De resultaten werden uitgezet op een radiaal profiel, samen met de gemeten waarden van de testset (Figuur 23 links). Ter bevestiging werd ook het monster van WAN apart gemodelleerd ($\text{RMSEP}= 0.045$ en $R^2_{\text{pred}} = 0.876$). Zijn bruuske variatie in volumegewicht werd goed beschreven door het model (Figuur 23 rechts) (zie Bijlage 8).

De testset werd voor beide modellen opgesteld door op willekeurige wijze posities (met bijhorende volumegewichten) uit het radiaal profiel te selecteren.



Figuur 23: Radiaal profiel van MKB en WAN, met gemeten (zwart) en voorspelde (rood) volumegewichten van de testset

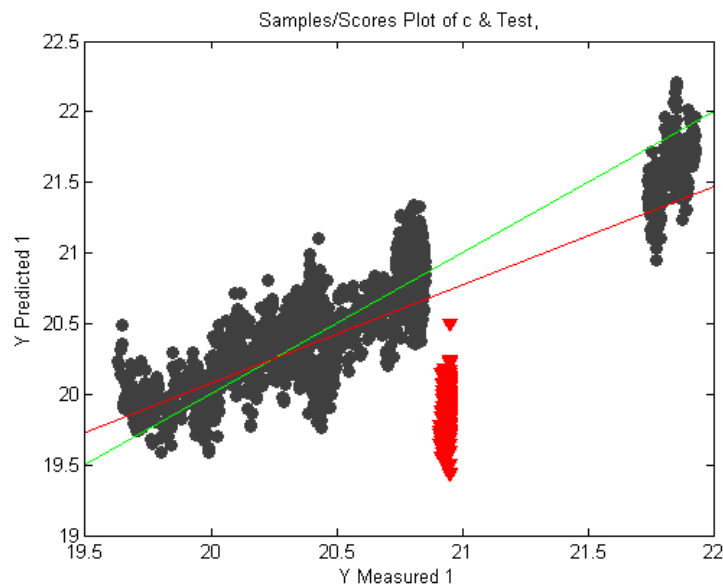
Deze RMSEP zijn van dezelfde grootte-orde als beschreven in Mora & Schimleck (2010) voor volumegewicht. Bijgevolg kan geconcludeerd worden dat de factor soort bij deze techniek een grote rol speelt. Zeker omwille van de diversiteit aan verbindingen tussen soorten (zie 4.6.1).

Naast X-CT, zou NIRhi in verder geoptimaliseerde vorm eveneens een goede proxy kunnen zijn voor volumegewicht. Op basis van deze bevindingen zou echter steeds een model per soort moeten geconstrueerd worden, wat door de grote diversiteit aan houtsoorten ingewikkeld is. Daarentegen vereist X-CT enkel een referentiemateriaal, wat veel robuuster is.

Relatie NIR en HHV

Vooreerst werden HHV data geïnterpoleerd volgens de spatiale resolutie van de NIR spectra. Na doorrekenen van het model gaven de kwaliteitsparameters geen goede resultaten (niet weergegeven).

Vervolgens werd een subset genomen van elk profiel (binnenkern), waarna opnieuw PLS uitgevoerd werd met DJI als testset (Figuur 24). De RMSEP en R^2_{Pred} bedroegen respectievelijk 1.064 en 0.039, wat opnieuw geen verband gaf. De relatief grote afwijking (1.064 MJ/kg) wijst opnieuw op teveel variatie in de data. Waarschijnlijk ligt dit ook aan de grote spreiding in het profiel van DJI zelf.

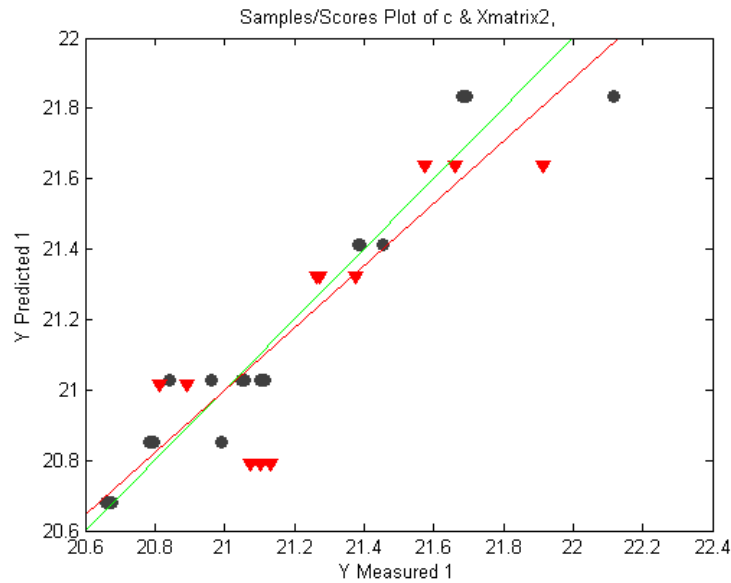


Figuur 24: Spreidingsdiagram van de gemeten HHV versus de voorspelde HHV (voor alle metingen), zowel gekalibreerde HHV (zwarte punten) als de testset (rode driehoeken) zijn weergegeven

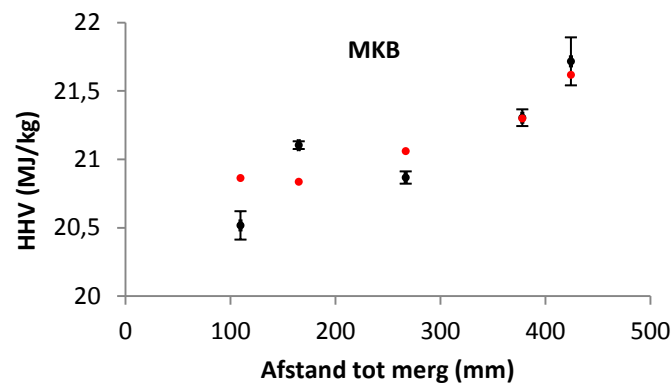
Uit bovenstaande blijkt dat de data niet volledig geschikt zijn om de HHV te voorspellen, dit is waarschijnlijk opnieuw te wijten aan de diversiteit aan houtsoorten, waardoor (net als bij volumegewicht) mogelijks andere factoren de subtiele verschillen maskeren. Toch wordt verwacht dat NIR spectra de HHV goed zouden voorspellen, omwille van hun sterk verband met chemische eigenschappen.

Om opnieuw het soorteffect te elimineren, werd één houtsoort MKB beschouwd (een monster met een relatief sterke stijging in verbrandingswaarde naar het spint toe, zie Figuur 9).

Net als bij volumegewicht werd een testset op willekeurige wijze opgesteld met HHV's die over het gehele profiel genomen zijn. Hier is geen interpolatie gebeurd van HHV's, maar werden wel de meetherhalingen in rekening gebracht. Het model werd doorgerekend en de testset werd toegepast (Figuur 25). Het voorspelde en gemeten calorisch profiel van de testset is weergegeven (Figuur 26). Kwaliteitsparameters R^2_{Cal} en R^2_{CV} bedroegen respectievelijk 0.925 en 0.841, de R^2_{Pred} bedroeg 0.693 (zie Bijlage 8). Ruwweg kan hiermee gesteld worden dat 70% van de variatie door het model wordt verklaard. R^2 is echter niet steeds een goede kwaliteitsmaat, een meer intuïtieve maat is de RMSEP (in dezelfde eenheden als de variabele). De RMSEP bedraagt in dit geval 0.194, wat een kleine afwijking is.



Figuur 25: Spreidingsdiagram van gemeten t.o.v. de voorspelde HHV's (MKB) voor zowel de gecalibreerde (zwarte punten) als testdata (rode driehoeken)



Figuur 26: Calorisch profiel van MKB, met gemeten (zwart) en voorspelde (rood) volume-gewichten van de testset

De intuïtieve verklaring voor deze goede voorspelling gaat als volgt: verbrandingswaarden houden verband met chemische bindingen uit de biomassa. Een NIR spectrum resulteert uit vibraties van deze verbindingen, vandaar dat NIRhi de mogelijkheid biedt om subtiele verschillen in HHV te voorspellen. Vermits bovendien met hetzelfde houtsoort gewerkt wordt, zullen vibraties enkel afhangen van de onderlinge verhoudingen van de organische componenten (koolhydraten, lignine en extractieven). Opnieuw is toekomstig onderzoek met bepaling van koolhydraten en ligninegehalten aangewezen. De proxy NIRhi biedt veel perspectieven en zou in die mate kunnen evolueren dat ze meer accuraat wordt dan de klassieke methodes (Thumm et al. 2010), omwille van zijn hoge spatiale resolutie.

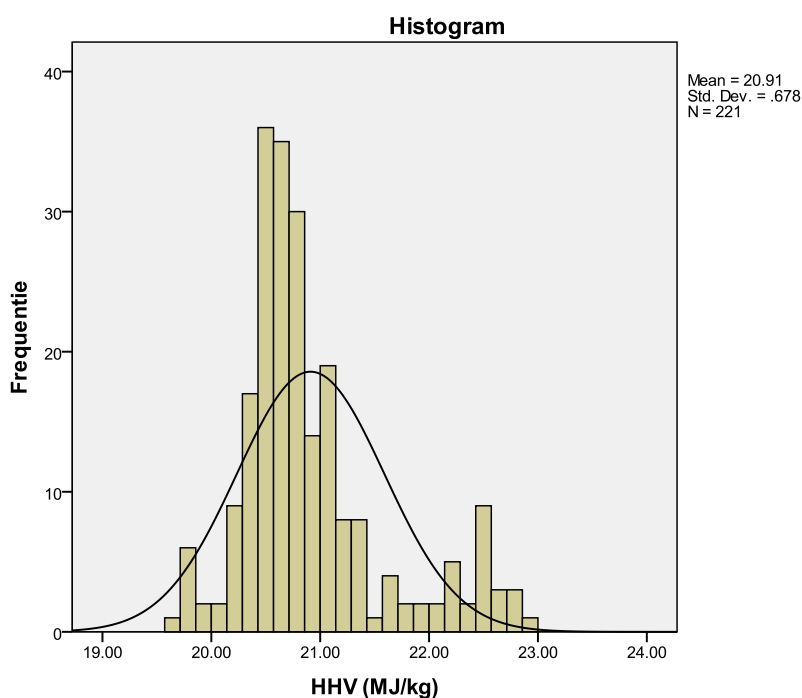
Huidig NIR-onderzoek in de houtwetenschappen focust zich vooral op gekende houtsoorten, waarmee uitgebreide modellen kunnen gebouwd worden op basis van gecontroleerde omstandigheden. Deze modellen ontbreken voor het beschouwde soortenspectrum. De onderzochte bomen komen uit een complex ecosysteem waarin abiotische en biotische invloeden sterk inspelen op de kroniek van een groeiende boom, en uiteindelijk op de geassocieerde chemische en structurele eigenschappen.

4.8 Implicaties voor valorisatie

De opgebouwde fundamentele kennis uit vorige secties laat vervolgens toe om enkele uitspraken te doen over de variabelen die relevant zijn in de praktijk.

4.8.1 Verbrandingswaarde

Met alle HHV's werd een histogram geconstrueerd. Het gemiddelde bedraagt 20.91 MJ/kg. De 5% en 95% percentielen bedragen respectievelijk 20.07 en 22.51 MJ/kg. De scheefheid van de distributie kan wijzen op een onvoldoende aantal stalen opgenomen in de analyse.



Figuur 27: Histogram van alle HHV's bekomen uit het onderzoek

Vermits spinthout een groot aandeel uitmaakt van de residuen werden significante verschillen in HHV tussen kern en spint onderzocht. Uit de subset in zijn geheel kan besloten worden dat er geen significant verschil is in HHV tussen kern en spint ($P=0.430$). De significantie per houtsoort is gegeven in Tabel 5.

Tabel 5: Vergelijking HHV's tussen kern en spint met bijhorende standaardafwijking (st.afw.) en P-waarde

Houtsoort	HHV _{kern} (MJ/kg)	stdev	HHV _{spint} (MJ/kg)	st.afw.	P-waarde
WWK	20.47	0.27643	20.5735	0.14942	0.533
KOP	20.6739	0.13791	20.4821	0.04487	0.033*
DJI	20.9399	0.19761	20.7373	0.11966	0.105
BTM	20.5483	0.14919	20.6503	0.06815	0.273
MWK	20.4064	0.31059	19.8228	0.09204	0.003*
WAN	21.0165	0.17234	21.1727	0.17192	0.076
PMS	22.4114	0.31677	22.3281	0.09258	0.659
ING	20.4494	0.11039	20.4935	0.05527	0.522
MKB	20.975	0.27243	21.7725	0.2017	0.000*

Opnieuw geldt de regel dat deze significanties niet kunnen doorgetrokken tot op soortniveau omwille van de beperkte datagrootte.

Bij de interpretatie van de bekomen energiewaardes moet voor ogen gehouden worden dat dit een ideale verbrandingswaarde is, waar theoretisch een droge biomassa verondersteld wordt waarbij het bij verbranding gevormde water terug condenseert. Bovendien is deze waarde veel groter dan de werkelijk bruikbare warmte, waar rekening gehouden wordt met vochtgehalte, het niet condenseren van het gevormde water (cf. LHV), gassen, onvolledige verbranding van de biomassa zelf, alsook allerlei efficiëntieverliezen door de installatie zelf. Zeker in de vochtige tropen zal het vochtgehalte van het geoogste hout een grote rol spelen.

4.8.2 Volumegewicht

De kennis van het volumegewicht is evenzeer belangrijk in termen van totale energiewaarde.

Ondanks de gravimetrische uitdrukking van de HHV, worden in het bosbeheer en de houtverwerkende industrie meestal volume-eenheden gehanteerd. Volumegewicht is bijgevolg noodzakelijk om een idee te krijgen van absolute energiewaarden afkomstig van zagerijresiduen. Deze parameter is eveneens belangrijk bij de conversie tot pellets of tot een vloeibare energiedrager (bvb: door snelle pyrolyse).

Het gemiddeld volumegewicht $VG_{60\%}$ van alle beschouwde houtsoorten bedraagt 702.95 kg/m^3 met een standaardafwijking van 174.01 kg/m^3 . De 5% en 95% percentielwaarden bedragen respectievelijk 414.39 en 1078.57 kg/m^3 .

Vermits spinthout een groot aandeel uitmaakt van de residuen werden significante verschillen in volumegewicht tussen kern en spint onderzocht. Als de gehele subset genomen werd, was er bij hantering van de proxy een significant verschil ($P=0.000$) tussen kern en spint wat betreft volumegewicht. Voor de conventionele methode was dit niet het geval ($P=0.462$).

Ter aanvulling werd deze hypothese per houtsoort apart getest. Bij soorten met weinig kern-spint differentiatie werd arbitrair de buitenste zone genomen. De testen werden zowel gedaan voor dichtheden bekomen via X-CT (Tabel 6) als de klassieke methode (Tabel 7).

Tabel 6: Gemiddeld volumegewicht van kern/spint per soort op basis van de X-CT methode met bijhorende standaardafwijking (st.afw.), significante verschillen zijn aangeduid met (*)

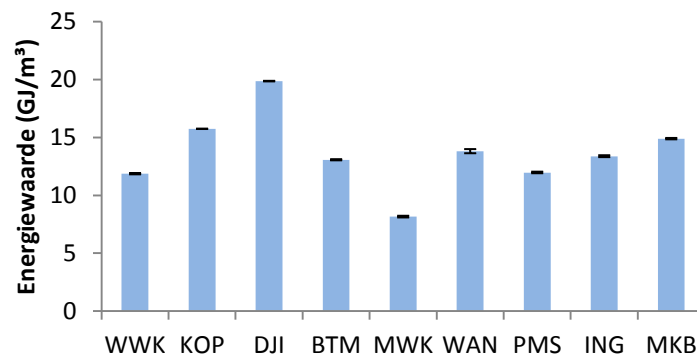
Houtsoort	X-CT kern (g/cm ³)	st.afw.	X-CT spint (g/cm ³)	st.afw.	P-waarde
WWK	0.601	0.060	0.628	0.038	0.000*
KOP	0.829	0.047	0.837	0.044	0.000*
DJI	1.085	0.079	1.021	0.060	0.000*
BTM	0.715	0.062	0.622	0.080	0.000*
MWK	0.406	0.047	0.375	0.039	0.000*
WAN	0.678	0.141	0.809	0.077	0.000*
PMS	0.514	0.061	0.533	0.061	0.000*
ING	0.705	0.081	0.779	0.027	0.000*
MKB	0.757	0.077	0.749	0.017	0.005*

Tabel 7: Gemiddeld volumegewicht van kern/spint per soort op basis van de klassieke methode met bijhorende standaardafwijking (st.afw.), significante verschillen zijn aangeduid met (*)

Houtsoort	VG _{kern} (g/cm ³)	st.afw.	VG _{spint} (g/cm ³)	st.afw.	P-waarde
WWK	0.6509	0.03887	0.6561	0.01649	0.859
KOP	0.8568	0.01587	0.86	0.0048	0.788
DJI	1.0848	0.01361	1.0358	0.03713	0.007*
BTM	0.7218	0.02748	0.6638	0.01718	0.015*
MWK	0.4475	0.03521	0.4113	0.01317	0.096
WAN	0.6443	0.11257	0.7513	0.03008	0.13
PMS	0.5880	0.03538	0.5684	0.03934	0.469
ING	0.7309	0.05816	0.7882	0.01069	0.128
MKB	0.7821	0.04544	0.7829	0.01924	0.973

Verschillen in volumegewicht tussen kern en spint zijn significant voor X-CT, deze significantie is echter vooral te wijten aan het grote datavolume. Als gekeken wordt naar absolute waarden, zijn deze in de praktijk verwaarloosbaar. Bij de klassieke volumegewichtsbepaling werd slechts bij enkele soorten een verschil waargenomen.

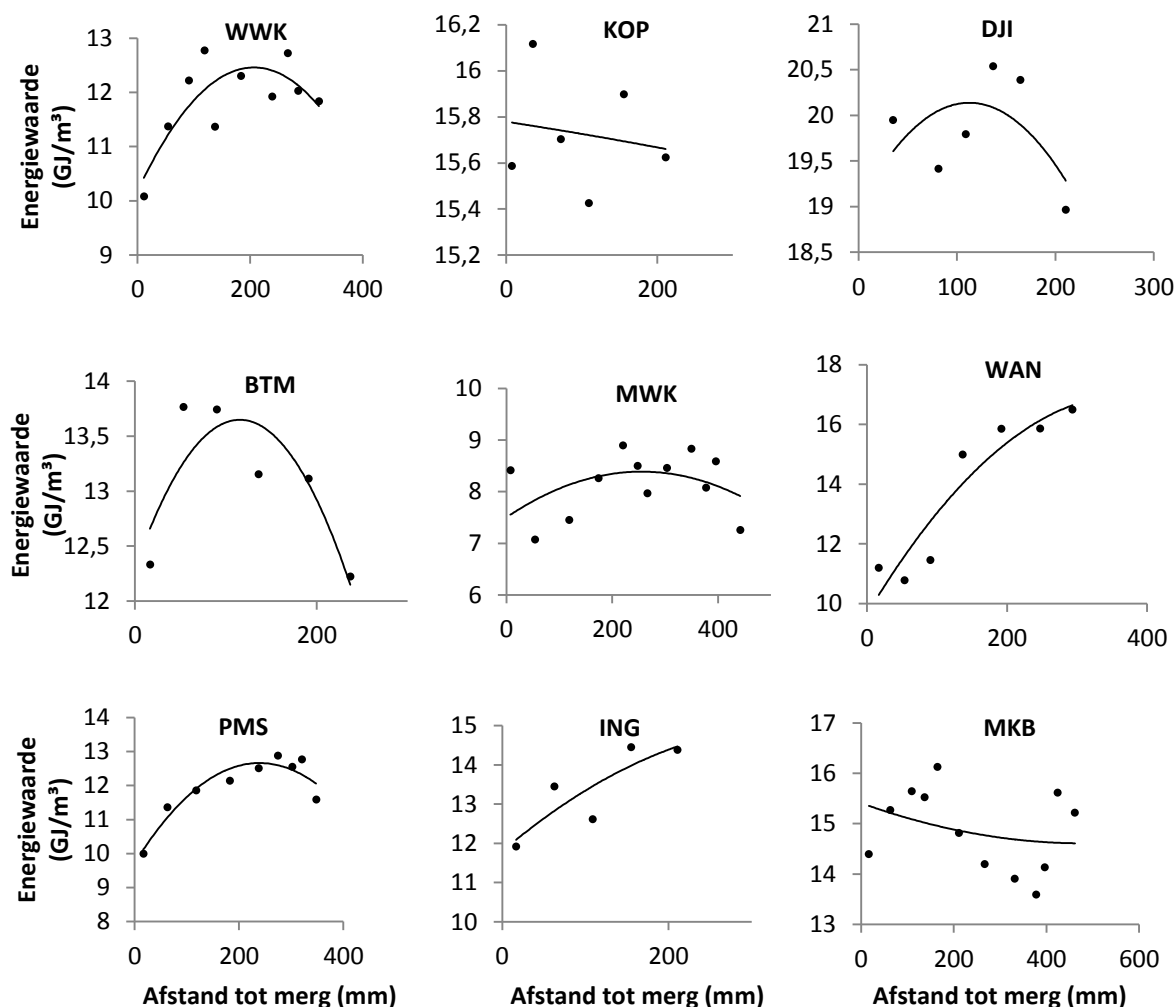
Om de beschouwde soorten enigszins te classificeren werd naar absolute energie toe het ovendroog volumegewicht vermenigvuldigd met de HHV. Aldus wordt een volumetrische energiewaarde in GJ/m³ bekomen (Figuur 28):



Figuur 28: Volumetrische energiewaarde per houtsoort

Als de relatieve verhoudingen uit Figuur 28 worden vergeleken met deze van Figuur 8 treden er verschuivingen op: PMS met zijn uitzonderlijk hoge HHV, heeft door zijn laag volumegewicht een relatief lage energiewaarde in zijn geheel.

Om ook de praktische relevantie van radiale trends voor zowel (ovendroog) volumegewicht als HHV te illustreren werden radiale profielen van de volumetrische energiewaardes geconstrueerd (Figuur 29):



Figuur 29: Radiale profielen van volumetrische energiewaardes samen met trendlijn

Uit de analoge trends bij bepaalde soorten (vb. MKB en MWK) tussen Figuur 7 en Figuur 29 blijkt dat volumegewicht een grote invloed uitoefent op de radiale trend. Bovendien is de energiewaarde nabij spinthout bij bepaalde houtsoorten gunstiger dan in het kernhout. Deze waarden zijn door de kleine steekproefgrootte slechts indicatief om de grote radiale variatie in volumetrische energiewaardes van tropisch hout aan te duiden. Los van het volumetrisch effect, kan een volumegewichtswijziging (veroorzaakt door groei, overlevingsstrategie) ook gepaard gaan met een productie van componenten die de energiewaarde verhogen (extractieven/lignine). Dit kan gezien worden als een interactie tussen HHV en volumegewicht.

Houtsoorten met een hoog volumegewicht blijken in absolute energietermen gunstig. In deze context is het echter onmogelijk het beheerd bos op duurzame wijze te exploiteren, louter voor energie. Bomen met een hoog volumegewicht zijn namelijk vaak geassocieerd met een trage groei. Deze hebben een belangrijke waarde voor het tropisch bos, waarvan de integriteit in al zijn facetten (biodiversiteit, bescherming, productie, etc.) moet behouden blijven. Dit werk richtte zich dan ook op valorisatie van restproducten uit een industrie waar met volumes gewerkt wordt om materialen te produceren. Deze materialen zijn al dan niet afkomstig van soorten met een hoog volumegewicht, maar de oogst ervan is gerechtvaardigd door toepassing van het CELOS systeem. De potentiële incorporatie van energetische residuvalorisatie in dit systeem, gebaseerd op de hier vermelde fundamentele kennis, kan alleen maar een positieve aanvulling zijn. Bovendien zou deze valorisatie

afgelegen gebieden van elektriciteit kunnen voorzien, wat belangrijk is voor de sociale dimensie. De mogelijkheid om deze restproducten als alternatief aan te wenden voor materiaaltoepassingen is hier niet ter sprake gekomen. Naargelang de context, biedt deze optie eveneens perspectieven.

Ook asgehalte van een houtsoort speelt een rol als verbrandingsparameter, zij het dan eerder in de context van afzettingen op installatie-onderdelen. Of de relatieve verhoudingen in asgehalte tussen de soorten van belang zijn zal moeten blijken uit de praktijk.

Abstractie makend van het feit dat het onmogelijk is om alle residuen te verzamelen, alsook het gegeven dat rondhoutexport sensu stricto geen zagerijresiduen oplevert in Suriname zelf, wordt volgend rekenvoorbeeld beschouwd. De totale houtkap bedroeg ongeveer 250.000m³ (SBB 2011), rekening houdende met een rendement van 50% zou dit neerkomen op 125.000m³ residuen. Het verschil tussen de percentielen van de HHV waardes bedraagt ongeveer 2.5MJ/kg, enkel te wijten aan eigenschappen van het hout. Door middel van het gemiddeld volumegewicht wordt een spreiding bekomen van 219 TJ, wat een aanzienlijk bereik is. Dit is echter een ruwe schatting, waarbij talrijke randvoorwaarden een rol spelen. Desondanks geeft het een indicatie van de mogelijke fouten die gegenereerd kunnen worden als de energiewaarde van houtmaterie op zich, als constant wordt beschouwd.

Bovenstaande cijfers zouden in de toekomst versterkt kunnen worden door de bemonsterde stalen (cf. veldwerkmissie in Suriname) mee te nemen in de analyse. Deze set bevat eveneens verschillende exemplaren van de meest geëxploiteerde houtsoorten (zie Bijlage 1). Dit onderzoek heeft eerder de nadruk gelegd op fundamentele principes en methodiek. In toekomstig onderzoek zou gebruik makende van het groen volumegewicht ook meer accurate schattingen gemaakt kunnen worden.

5 Conclusie

Voor de onderzochte parameters met de klassieke methodes zijn significante verschillen gevonden tussen de beschouwde houtsoorten. Ook werden duidelijke radiale trends ontdekt, zowel voor volumegewicht als HHV (Higher Heating Value). Vermits volumegewicht verband houdt met ecologische eigenschappen, konden op basis van literatuurgegevens mogelijke verklaringen gezocht worden voor de geobserveerde trends, tot op het niveau van de boom zelf.

Er is een significant effect van extractiegehalte op de HHV ($R^2 = 0.53$). Voorts is geen aantoonbaar effect gevonden tussen volumegewicht, asgehalte en de HHV (R^2 respectievelijk 0.00 en 0.39). Verder onderzoek met een groter bereik aan soorten en individuen is noodzakelijk om hierover meer uitspraken te doen. De aard van de gekwantificeerde extractieven alsook cellulose/ligninegehaltes (niet onderzocht in deze studie) zullen ongetwijfeld deze relaties beïnvloeden. Extractief- en asgehalte werden enkel op de binnenkern bepaald.

Over de houtsoorten heen is geen significant verschil gevonden tussen volumegewichtsbepaling met X-CT (X-stralen tomografie) en de klassieke methode. Bijgevolg kan besloten worden dat X-CT een geschikte proxy is om de houtsoorten densitometrisch te karakteriseren. De afwijkingen binnen een aantal soorten zijn gering en vaak systematisch. In deze studie werden de kleine verschillen toegewezen aan afwijkingen in positionering, alsook de aanwezigheid van minerale inclusies.

NIRhi (Near-Infrared hyperspectral imaging) werd onderzocht als state-of-the-art methode om eigenschappen van hout op een snelle en niet-destructieve manier te bepalen. Bij samenvoeging van alle stalen in één model, werd voor zowel volumegewicht als HHV geen tot matige modelkwaliteit bekomen. Echter, bij modelconstructie voor de individuele houtsoorten apart, werden goede relaties bekomen. Een mogelijke oorzaak is de variabiliteit aan verbindingen tussen verschillende houtsoorten, die subtiele spectrale informatie over volumegewicht en HHV kunnen maskeren. NIRhi blijkt een geschikte en accurate manier om volumegewicht en HHV te voorspellen. De factor soort dient hier echter wel constant te blijven, waardoor in deze studie enkel radiale trends voorspeld werden. Volumegewichtsbepaling is sneller en accurater uit te voeren via X-CT vermits hierbij geen modelconstructie nodig is, enkel een referentiemateriaal. De toepassing van NIRhi is vooral geschikt om chemische eigenschappen (en uiteindelijk de HHV) te achterhalen. Toekomstig onderzoek met behulp van lignine/cellulosebepaling zou de mogelijkheden van NIRhi verder kunnen ontdekken. Hardware- en softwarematige verbeteringen hebben technische fenomenen mogelijks niet volledig kunnen wegwerken, wat implicaties kan hebben op huidige modelkwaliteit. Verdere optimalisatie zal deze kwaliteit verbeteren.

Een zekere variabiliteit aan HHV werd aangetoond, die (naast de belangrijkste factor vochtgehalte) een belangrijke invloed kan hebben op de energetische valorisatie. Omwille van het grote aandeel spinthout in restfracties werd onderzocht of er verschillen waren met het kernhout, wat op basis van de data niet het geval was. De factor volumegewicht is daarentegen belangrijk om de link met de bosbouwsector (waar productie in volumes wordt uitgedrukt) te maken. In deze context zal de factor volumegewicht (die een grote variatie kent tussen en binnen soorten) belangrijker zijn dan de meer subtiele verschillen in HHV.

De hier beschreven methodes en voorgestelde verbeteringen, kunnen in de toekomst toegepast worden op het meer uitgebreide soortengamma dat bemonsterd werd in Suriname. Meer onderzoek van hout uit deze regio is bovendien essentieel voor een betere valorisatie in het algemeen.

6 Literatuurlijst

- Amusant, N., Moretti, C., Richard B., Prost, E., Nuzillard, J.M. & Thévenon, M.F., 2006. Chemical compounds from *Eperua falcata* and *Eperua grandiflora* heartwood and their biological activities against wood destroying fungus (*Coriolus versicolor*). *Holz als Roh- und Werkstoff*, 65(1), pp.23-28.
- Arets, E.J.M.M., 2005. Long-term responses of populations and communities of trees to selective logging in tropical rain forests in Guyana. *Tropenbos-Guyana Series 13*.
- Bhat, K.M., Bhat, K.V. & Dhamodaran, T.K., 1989. Radial patterns of Density Variation in Eleven Tropical Indian Hardwoods. *Holzforschung*, 43(1), pp.45-48.
- Blaser, J., Sarre, A., Poore, D. & Johnson, S., 2011. Status of tropical forest management 2011. *ITTO Technical Series No 38*.
- Bowyer, J., Shmulsky, R. & Haygreen, J.G., 2003. *Forest products and wood science: an introduction* fourth edi., Iowa State University Press.
- Bridgwater, a. V., Toft, A.J. & Brammer, J.G., 2002. *A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion*,
- Brown, R.C. , 2011. *Thermochemical processing of biomass: Conversion into fuels, chemicals and power*, John Wiley & Sons, Ltd.
- Van den Bulcke, J., Boone, M., Van Acker, J., Stevens, M. & Hoorebeke, L., 2009. X-ray tomography as a tool for detailed anatomical analysis. *Annals of Forest Science*, 66(5), pp.508-508.
- CIA, 2012. The World Factbook. Beschikbaar op: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/ns.html>. Geraadpleegd op 15 mei 2012
- Carrier, M. , Loppinet-Serrani, A., Denux, D., Lasnier, J., Ham-Pichavant, F., Cansell, F. & Aymonier, C., 2011. Thermogravimetric analysis as a new method to determine the lignocellulosic composition of biomass. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), pp.298-307.
- Chao, K., Phillips, O.L., Gloor, E., Monteagudo, A., Torres-Lezama, A. & Martínez, R.V., 2008. Growth and wood density predict tree mortality in Amazon forests. *Journal of Ecology*, 96(2), pp.281-292.
- Chave, J., Muller-Landau, H.C., Baker, T.R., Easdale, T., ter Steege, H. & Webb, C., 2006. Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 Neotropical tree species. *Ecological applications : a publication of the Ecological Society of America*, 16(6), pp.2356-67.
- Chave, J., Coomes, D., Jansen, S., Lewis, S., Swenson, N. & Zanne, A., 2009. Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology letters*, 12(4), pp.351-66.
- Demirbaş, A., 2001. Relationships between lignin contents and heating values of biomass. *Energy conversion and management*, 42.
- Doat, J., 1977. Le pouvoir calorifique des bois tropicaux. *Revue Bois et Forests des Tropiques*.

- Dragone, G., Fernandes, B. & Vicente, A., 2010. Third generation biofuels from microalgae. *Current Research, Technology and Education Topics in Applied Microbiology and Microbial Biotechnology*, pp.1355-1366.
- EEA, 2011. Opinion of the EEA Scientific Committee on Greenhouse Gas Accounting in Relation to Bioenergy. *Renewable Energy*, (September), pp.1-10.
- Eisentraut, A., 2010. Sustainable Production of Second-Generation Biofuels. *worldenergyoutlook.org*.
- Eliat-Eliat, O., 2010. *Evaluatie van enkele minder gekende Surinaamse houtsoorten met het oog op introductie op de Europese markt*. (Masterthesis). Universiteit Gent.
- FAO, 1990. Energy conservation in the mechanical forest industries. *FAO forestry paper 93*.
- FAO, 2008. Forests and Energy: Key issues. , pp.1-56.
- Fang, Y., Park, J.I., Jeong, Y., Jeong, M.K., Baek, S.H. & Cho, H.W., 2009. Enhanced predictions of wood properties using hybrid models of PCR and PLS with high-dimensional NIR spectral data. *Annals of Operations Research*, 190(1), pp.3-15.
- Fengel, D. & Wegener, G., 1984. *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions.*, Walter De Gruyter.
- Gowen, A., Odonnell, C., Cullen, P., Downey, G. & Frias, J., 2007. Hyperspectral imaging – an emerging process analytical tool for food quality and safety control. *Trends in Food Science & Technology*, 18(12), pp.590-598.
- Hein, P.G., Campos, A.M. & Trugilho, P., 2009. Near infrared spectroscopy for estimating wood basic density in *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus grandis*. *Cerne*, 15(2), pp.133-141.
- Hernández, L., Dezzio, N., Sanoja, E., Salazar, L. & Castellanos, H., 2012. Changes in structure and composition of evergreen forests on an altitudinal gradient in the Venezuelan Guayana shield. *Revista de biología tropical*, 60(1), pp.11-33.
- Hou, S. & Li, L., 2011. Rapid characterization of woody biomass digestibility and chemical composition using near-infrared spectroscopy. *Journal of integrative plant biology*, 53(2), pp.166-75.
- ITTO, 2008. Energy grows on trees: Report of the International Conference on Wood-based Bioenergy. *ITTO Technical Series #31*, (November).
- Ince, P.J., 1979. How To Estimate Recoverable Heat Energy in Wood or Bark Fuels. *United States Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory General Technical Report FPL 29*, pp.1-6.
- Jones, P., Schimleck, L. & Peter, G., 2006. Nondestructive estimation of wood chemical composition of sections of radial wood strips by diffuse reflectance near infrared spectroscopy. *Wood science and*, pp.709-720.
- Kataki, R. & Konwer, D., 2001. Fuelwood characteristics of some indigenous woody species of north-east India. , 20, pp.17-23.

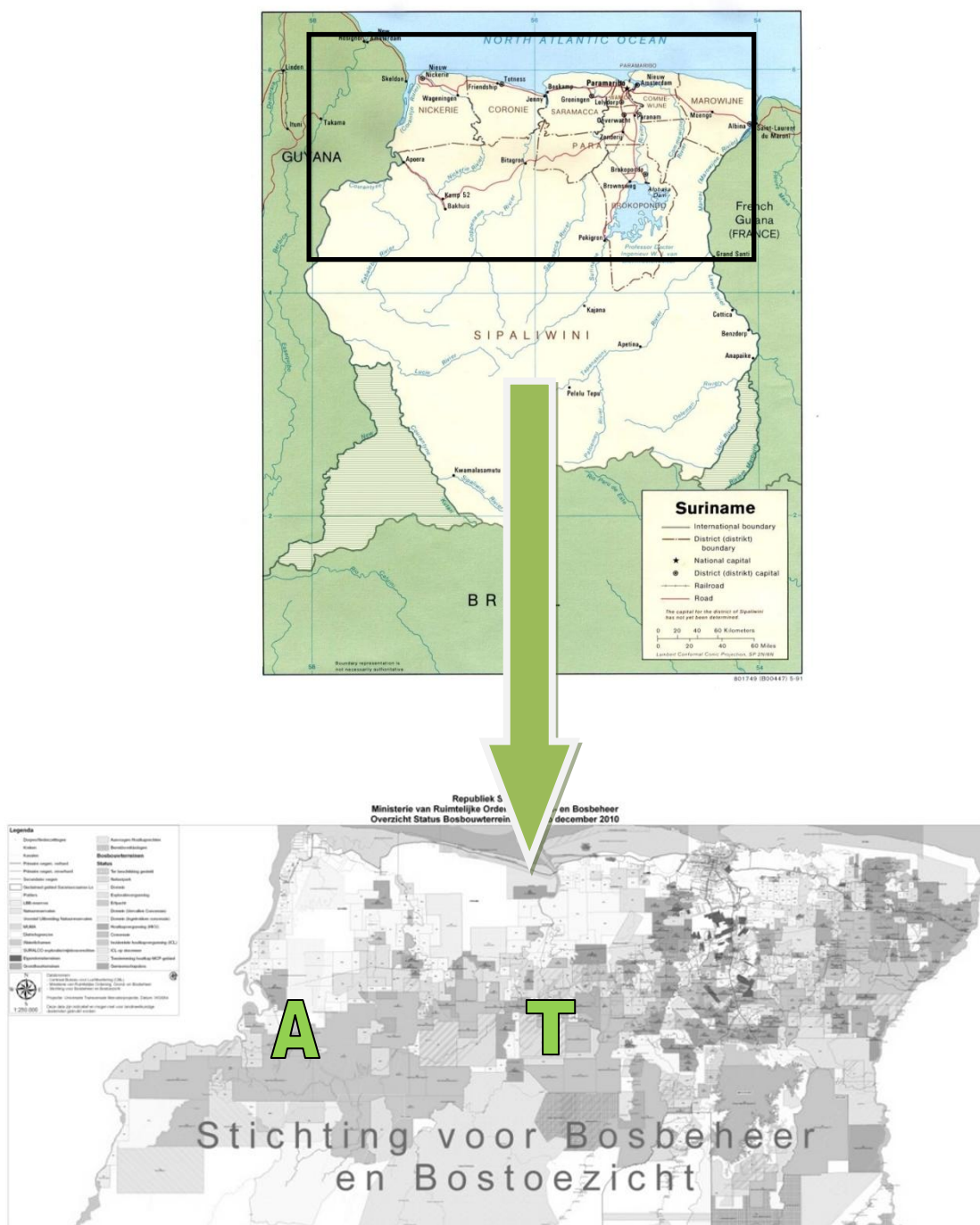
- Kelley, S.S., Rials, T.G., Snell, R., Groom, L.H & Sluiter, A., 2004. Use of near infrared spectroscopy to measure the chemical and mechanical properties of solid wood. *Wood Science and Technology*, pp.257-276.
- Kuchler, M., 2010. Unravelling the argument for bioenergy production in developing countries: A world-economy perspective. *Ecological Economics*, 69(6), pp.1336-1343.
- Lacoste, J.F. & Alexandre, D.Y., 1991. original Le goupier (*Goupia glabra* Aubl), essence forestière d ' avenir en Guyane : analyse bibliographique. *Annals of Forest Science*, 48, pp.429-441.
- Lande, S., Riel, S., Høibø, O.A. & Schneider, M.H., 2009. Development of chemometric models based on near infrared spectroscopy and thermogravimetric analysis for predicting the treatment level of furfurylated Scots pine. *Wood Science and Technology*, 44(2), pp.189-203.
- Lhate, I., 2011. *Chemical Composition and Machinability of Selected Wood Species from Mozambique*. Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala.
- Mantau, U., 2010. Real potential for changes in growth and use of EU forests Final report. *EUwood*, (June), p.160.
- McSweeney, C., New, M. & Lizcano, G., 2003. UNDP Climate Change Country Profiles: Suriname. , pp.1-26.
- Meder, R., Marston, D., Ebdon, N. & Evans, R., 2010. Spatially-resolved radial scanning of tree increment cores for near infrared prediction of microfibril angle and chemical composition. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 18(1), p.499.
- Mohan, D., Pittman, C.U. & Steele, P.H., 2006. Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. *Energy & Fuels*, 20(3), pp.848-889.
- Montes, C.S., da Silva, D.A., Garcia, R.A., Bolzón de Muñiz, G.I. & Weber, J.C., 2011. Calorific value of *Prosopis africana* and *Balanites aegyptiaca* wood: Relationships with tree growth, wood density and rainfall gradients in the West African Sahel. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), pp.346-353.
- Mora, C.R. & Schimleck, L.R., 2010. Kernel regression methods for the prediction of wood properties of *Pinus taeda* using near infrared spectroscopy. *Wood Science and Technology*, 44, pp.561-578.
- Nkansah, K., 2010. Rapid characterization of biomass using fluorescence spectroscopy coupled with multivariate data analysis . II . Northern red oak „ *Quercus rubra*". *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, pp.1-10.
- Nock, C.A., Geihofer, D., Grabner, M., Baker, P., Bunyavejchewin, S. & Hietz, P., 2009. Wood density and its radial variation in six canopy tree species differing in shade-tolerance in western Thailand. *Annals of botany*, 104(2), pp.297-306.
- Novaes, E., Kirst, M., Chiang, V., Winter-Sederoff, H. & Sederoff, R., 2010. Lignin and biomass: a negative correlation for wood formation and lignin content in trees. *Plant physiology*, 154(2), pp.555-61.
- Patzek, T.W. & Pimentel, D., 2006. Thermodynamics of Energy Production from Biomass. *Life Sciences*, pp.1-91.

- Raymond, C.A. & Poke, F., 2006. Predicting extractives, lignin, and cellulose contents using near infrared spectroscopy on solid wood in *Eucalyptus globulus*. *of wood chemistry and technology*.
- Raymond, C.A. & Schimleck, L R, 2002. Development of near infrared reflectance analysis calibrations for estimating genetic parameters for cellulose content in *Eucalyptus globulus*. *Victoria*, 176, pp.170-176.
- Rhe, C. & Lestander, T.A., 2005. Multivariate NIR spectroscopy models for moisture , ash and calorific content in biofuels using bi-orthogonal partial least squares regression. *Society*, pp.1182-1189.
- Richter, H.G. & Dallwitz, M.J., 2000. Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval. Available at: <http://delta-intkey.com>. Geraadpleegd op 2 mei 2012
- 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 Hoorebeke, L. & Van Acker, J., 2011. High-resolution proxies for wood density variations in *Terminalia superba*. *Annals of botany*, 107(2), pp.293-302.
- SBB, 2011. Bosbouwsector analyse 2010.
- Santana, M.A.E. & Okino, E.Y.A., 2007. Chemical composition of 36 Brazilian Amazon forest wood species. *Holzforschung*, 61(5), pp.469-477.
- Schimleck, Evans, R. & Dstick, E.L., 2002. Estimation of *Pinus radiata* D . Don clear wood properties by near-infrared spectroscopy. *Journal of Wood Science*, pp.132-137.
- Scotti, I., Calvo-vialettes, L., Scotti-saintagne, C., Citterio, M., Degen, B. & Bonal, D., 2010. Genetic variation for growth , morphological , and physiological traits in a wild population of the Neotropical shade tolerant rainforest tree *Sextonia rubra* (Mez) van der Werff (Lauraceae). *Tree Genetics & Genomes*, pp.319-329.
- Sluiter, J.B., Ruiz, R.O., Scarlata, C.J., Sluiter, A.D. & Templeton, D.W. 2010. Compositional Analysis of Lignocellulosic Feedstocks. 1. Review and Description of Methods. *Journal of agricultural and food chemistry*, pp.9043-9053.
- St-Hilaire, A., 2001. Ethnicity, assimilation and nation in plural Suriname. *Ethnic and racial studies*, 24:6(998-1019).
- Telmo, C. & Lousada, J., 2011a. Heating values of wood pellets from different species. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), pp.2634-2639.
- Telmo, C. & Lousada, J., 2011b. The explained variation by lignin and extractive contents on higher heating value of wood. *Biomass and Bioenergy*, 35(5), pp.1663-1667.
- Thumm, A., Riddell, M., Harrington, J., Nanayakkara, B. & Meder, R. 2010. Near infrared hyperspectral imaging applied to mapping chemical composition in wood samples. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 18(1), p.507.
- Tomaselli, I., 2007. Forests and energy in developing countries. *Director*.

- Tsuchikawa, S., 2007. A Review of Recent Near Infrared Research for Wood and Paper. *Applied Spectroscopy Reviews*, 42(1), pp.43-71.
- Vamvuka, D.Ā., 2011. Bio-oil , solid and gaseous biofuels from biomass pyrolysis processes — An overview. *International Journal of Energy Research*, (January), pp.835-862.
- Venderbosch, R.H. & Prins, W., 2010. Fast pyrolysis technology. *Society*, (1), pp.178-208.
- Werger, M.J.A. ed., 2011. *Sustainable Management of Tropical Rainforests The CELOS Management System*. Tropenbos International, Tropenbos International, Paramaribo, Suriname.
- White, R.H., 1987. Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of wood. *Wood and fiber science*, 19(4), pp.446–452.
- Woodcock, D.W. & Shier, A.D., 2002. Wood specific gravity and its radial variations: the many ways to make a tree. *Trees*, 16(6), pp.437-443.
- Üner, B., Karaman, I., Tannverdi, H. & Ösdemir, D., 2010. Determination of lignin and extractive content of Turkish Pine (*Pinus brutia* Ten.) trees using near infrared spectroscopy and multivariate calibration. *Wood Science and Technology*, 45(1), pp.121-134.

Bijlage

Bijlage 1: Informatie staalname



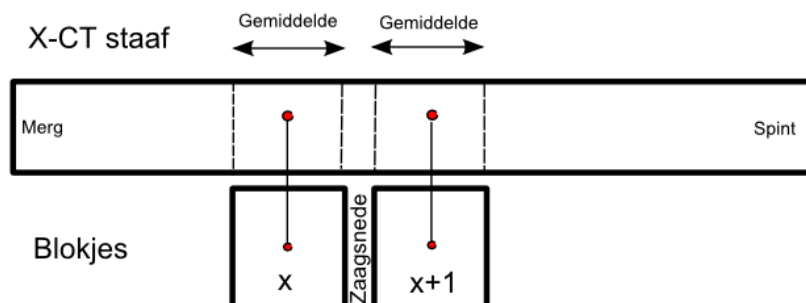
Figuur A: Kaart van Suriname met aanduiding van de concessies waar staalname plaatsvond, herwerkt uit afbeeldingen van Wikipedia (boven) en SBB (onder)

Tabel A: Lijst van bemonsterde stalen, met herkomst en aantal exemplaren (grijs=herbariumstaal)

Lokale naam	SBB	Nr	Herkomst	Opmerking	Botanisch	Familie
Awalapau (watra kanu)	AWA	0	Mozeskreek	landing 1	<i>Cordia alliodora</i>	Boraginaceae
Groenhart	GRH	0	Mozeskreek	landing mei '11	<i>Tabebuia serratifolia</i>	Bignoniaceae
Groenhart	GRH	1	Tibiti		<i>Tabebuia serratifolia</i>	Bignoniaceae
Groenhart	GRH	2	Tibiti		<i>Tabebuia serratifolia</i>	Bignoniaceae
Groenhart	GRH	3	Tibiti		<i>Tabebuia serratifolia</i>	Bignoniaceae
Groenhart	GRH	4	Tibiti		<i>Tabebuia serratifolia</i>	Bignoniaceae
Groenhart	GRH	5	Tibiti		<i>Tabebuia serratifolia</i>	Bignoniaceae
Maka grin	MKG	0	Mozeskreek	onderweg	<i>Tabebuia capitata</i>	Bignoniaceae
Maka grin	MKG	1	Tibiti		<i>Tabebuia capitata</i>	Bignoniaceae
Maka grin	MKG	2	Tibiti		<i>Tabebuia capitata</i>	Bignoniaceae
Maka grin	MKG	3	Tibiti		<i>Tabebuia capitata</i>	Bignoniaceae
Maka grin	MKG	x	Herbarium		<i>Tabebuia capitata</i>	Bignoniaceae
Basralocus	BAS	1	Tibiti	Donker	<i>Dicorynia guianensis</i>	Caesalpiniaceae
Basralocus	BAS	1	Tibiti	Wit	<i>Dicorynia guianensis</i>	Caesalpiniaceae
Basralocus	BAS	a	Herbarium		<i>Dicorynia guianensis</i>	Caesalpiniaceae
Basralocus	BAS	b	Herbarium		<i>Dicorynia guianensis</i>	Caesalpiniaceae
Purperhart	PRH	0	Mozeskreek	landing 1	<i>Peltogyne venosa</i>	Caesalpiniaceae
Purperhart	PRH	x	Herbarium		<i>Peltogyne venosa</i>	Caesalpiniaceae
Rode-djedoe	RDJ	0	Mozeskreek	landing 2	<i>Sclerolobium albiflorum</i>	Caesalpiniaceae
Rode locus	RLO	0	Mozeskreek	landing 1	<i>Hymenaea courbaril</i>	Caesalpiniaceae
Wallaba	WAL	0	Mozeskreek	landing 1	<i>Eperua falcata</i>	Caesalpiniaceae
Wallaba	WAL	1	Tibiti		<i>Eperua falcata</i>	Caesalpiniaceae
Witte pinto locus	WPL	0	Mozeskreek	landing 1	<i>Martiodendrom parviflorum</i>	Caesalpiniaceae
Witte pinto locus	WPL	1	Tibiti		<i>Martiodendrom parviflorum</i>	Caesalpiniaceae
Zwarte kabbes	ZWK	1	Tibiti		<i>Diploptropis purpurea</i> (var. <i>purpurea</i>)	Caesalpiniaceae
Zwarte kabbes	ZWK	a	Herbarium		<i>Diploptropis purpurea</i> (var. <i>purpurea</i>)	Caesalpiniaceae
Zwarte kabbes	ZWK	b	Herbarium		<i>Diploptropis purpurea</i> (var. <i>purpurea</i>)	Caesalpiniaceae
Kopi	KOP	1	Tibiti		<i>Goupia glabra</i>	Celastraceae
Kopi	KOP	x	Herbarium		<i>Goupia glabra</i>	Celastraceae
Bosamandel	BAM	0	Mozeskreek	landing 1	<i>Terminalia dichotoma</i>	Combretaceae
Bosamandel	BAM	x	Herbarium		<i>Terminalia dichotoma</i>	Combretaceae
Gindya udu	DJI	0	Mozeskreek	landing 1	<i>Buchenavia tetraphylla</i> & <i>Terminalia</i> spp.	Combretaceae
Gindya udu	DJI	1	Tibiti		<i>Buchenavia tetraphylla</i> & <i>Terminalia</i> spp.	Combretaceae
Jonge kabbes	JOK	0	Mozeskreek	landing 2	<i>Vataireopsis speciosa</i>	Fabaceae
Maka kabbes	MKB	1	Tibiti		<i>Hymenolobium flavum</i> & <i>excelsum</i>	Fabaceae
Rode kabbes	ROK	1	Tibiti	Gezaagd op x m	<i>Andira</i> spp.	Fabaceae
Rode kabbes	ROK	a			<i>Andira inermis</i> (Wright)	Fabaceae
Rode kabbes	ROK	b			<i>Andira surinamensis</i>	Fabaceae
Wana	WAN	1	Tibiti		<i>Ocotea rubra</i>	Lauraceae
Wana	WAN	2	Tibiti		<i>Ocotea rubra</i>	Lauraceae
Ingipipa	ING	0	Kamp52	mei '11	<i>Couratari stellata</i>	Lecythidaceae

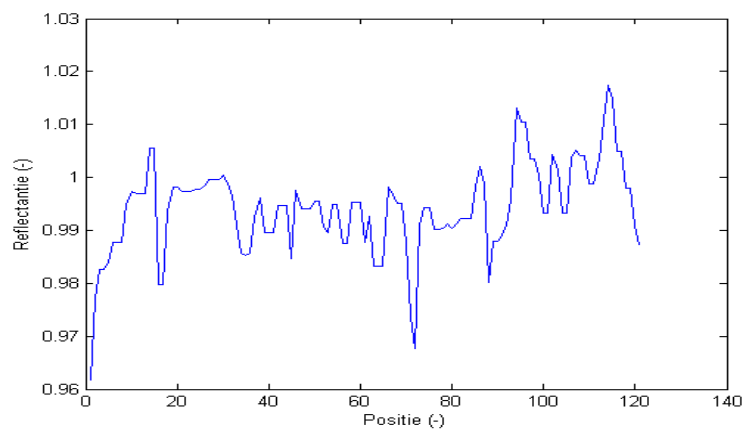
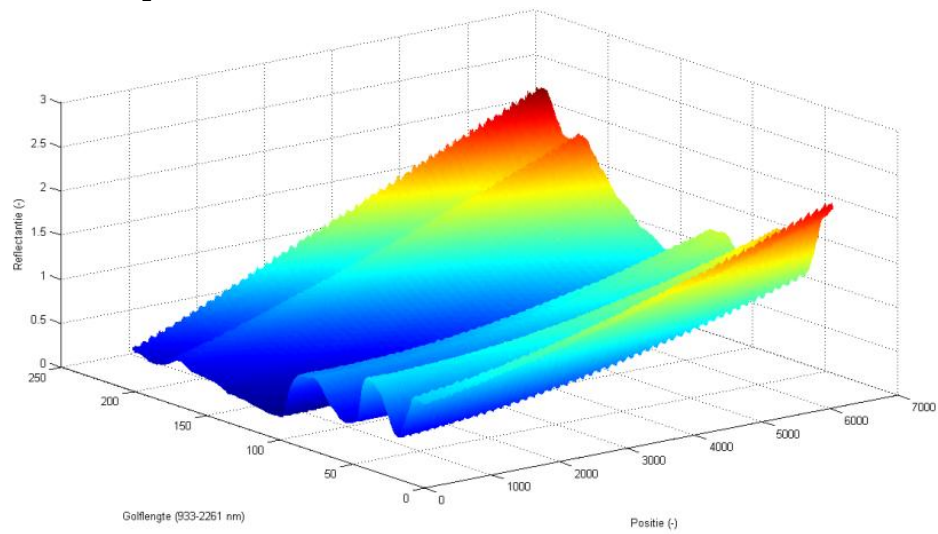
Ingipipa	ING	a	Herbarium		<i>Couratari stellata</i>	Lecythidaceae
Ingipipa	ING	b	Herbarium		<i>Couratari stellata</i>	Lecythidaceae
Ingipipa	ING	c	Herbarium		<i>Couratari oblongifolia</i>	Lecythidaceae
Ingipipa	ING	d	Herbarium		<i>Couratari oblongifolia</i>	Lecythidaceae
Ingipipa	ING	e	Herbarium		<i>Couratari gloriosa</i>	Lecythidaceae
Ceder	CED	0	Mozeskreek	landing mei '11	<i>Cedrela odorata</i>	Meliaceae
Bostamarinde	BTM	1	Tibiti		<i>Hydrochorea corymbosa</i> , <i>H. gonggrijpii</i>	Mimosaceae
Pikinmisiki	PMS	1	Tibiti		<i>Pseudopiptadenia</i> <i>suaveolens</i>	Mimosaceae
Pikinmisiki	PMS	a	Herbarium		<i>Pseudopiptadenia</i> <i>suaveolens</i>	Mimosaceae
Pikinmisiki	PMS	b	Herbarium		<i>Pseudopiptadenia</i> <i>suaveolens</i>	Mimosaceae
Pikinmisiki	PMS	c	Herbarium		<i>Pseudopiptadenia</i> <i>suaveolens</i>	Mimosaceae
Kaw udu	KAW	0	Mozeskreek	landing 1	<i>Bagassa guianensis</i> & <i>tiliaefolia</i>	Moraceae
Kaw udu	KAW	1	Tibiti		<i>Bagassa guianensis</i> & <i>tiliaefolia</i>	Moraceae
Kaw udu	KAW	x	Herbarium		<i>Bagassa guianensis</i> & <i>tiliaefolia</i>	Moraceae
Bolletrie	BOL	0	Mozeskreek	landing mei '11	<i>Manilkara bidentata</i>	Sapotaceae
Bolletrie	BOL	1	Tibiti	Hartrot	<i>Manilkara bidentata</i>	Sapotaceae
Bolletrie	BOL	x	Herbarium		<i>Manilkara bidentata</i>	Sapotaceae
Kimboto	KMB	0	Kamp52	mei '11	<i>Pradosia spp.</i>	Sapotaceae
Kimboto	KMB	a	Herbarium		<i>Pouteria ptychandra</i> Emy	Sapotaceae
Kimboto	KMB	b	Herbarium		<i>Pouteria ptychandra</i> Emy	Sapotaceae
Hoogland gronfolo	HGR	1	Tibiti	Gezaagd op 7 m	<i>Ruizterania albiflora</i>	Vochysiaceae
Pera		x	Herbarium		<i>Couma guianensis</i>	Apocynaceae
Hoepelhout	HPH	x	Herbarium		<i>Copaifera guianensis</i>	
Bruinhart	BRH	x	Herbarium		<i>Vouacapaira americana</i> Aubl.	Caesalpinaceae
Kaneelhart	KNH	x	Herbarium		<i>Licaria canella</i>	Lauraceae

Bijlage 2: Schema positionering

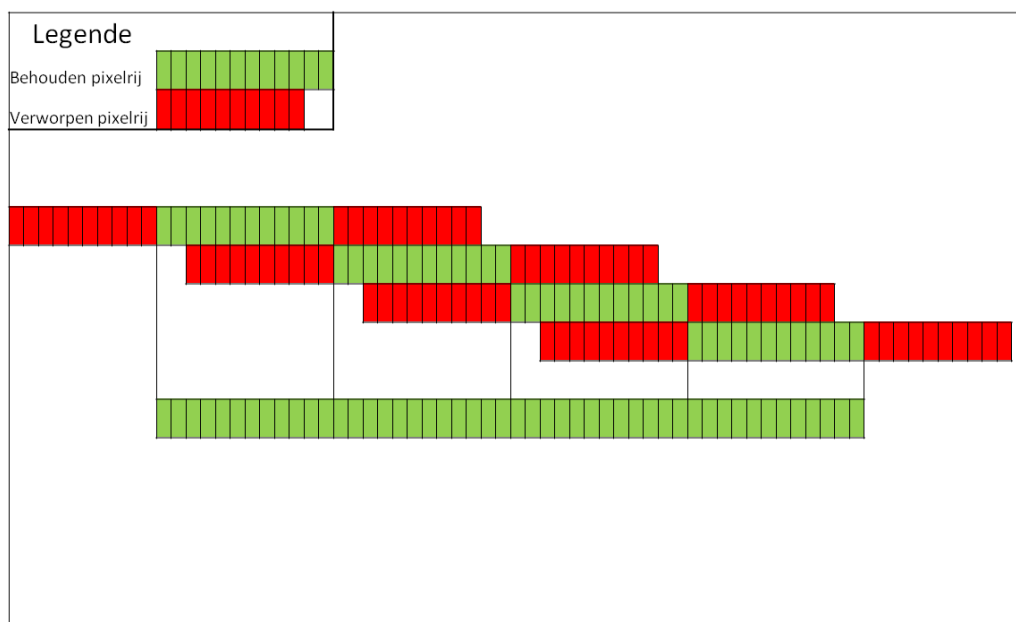


Figuur B: Schema van de positionering van de blokjes op de X-CT staven

Bijlage 3: NIRhi optimalisatie



Figuur C: Belichtingseffecten, tussen (boven) en binnen (onder)opnames



Figuur D: Schema aaneenzetting opeenvolgende opnames (hier deels onder elkaar gezet om overlap te tonen)

Bijlage 4: Statistische output HHV

Effect van positie en houtsoort op de HHV

Dependent Variable:HHV

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	88.272 ^a	19	4.646	72.635	.000
Intercept	53653.593	1	53653.593	838826.223	.000
positie	3.444	11	.313	4.894	.000
soort	82.685	8	10.336	161.587	.000
Error	12.857	201	.064		
Total	96745.686	221			
Corrected Total	101.129	220			

Om rekening te houden met heteroscedasticiteit werd een significantieniveau van 0.001 aangenomen. Transformaties m.b.v. worteltrekking of logaritme/boogsinus konden de heteroscedasticiteit niet elimineren.

Tabel B: Bekomen HHV's van de beschouwde houtsoorten uitgemiddeld over alle radiale posities met bijhorende standaardafwijking (st.afw.)

Houtsoort	HHV (MJ/kg)	st.afw.
WWK	20.48	0.27
KOP	20.64	0.15
DJI	20.91	0.20
BTM	20.57	0.14
MWK	20.36	0.34
WAN	21.06	0.18
PMS	22.40	0.30
ING	20.46	0.10
MKB	21.11	0.40
WAL	21.26	0.16

Significant effect van positie per houtsoort op de HHV (Kruskal-Wallistest)

Tabel C: Significant effect van radiale positie op HHV (per houtsoort), Significante verschillen zijn aangeduid met (*)

Houtsoort	P-waarde
WWK	0.014*
KOP	0*
DJI	0.028*
BTM	0.001*
MWK	0*
WAN	0.055
PMS	0*
ING	0.362
MKB	0.001*

Correlatie tussen HHV en ovendroog volumegewicht

Tabel D: Pearson correlatie tussen ovendroog volumegewicht en HHV, met bijhorende P-waarde

Houtsoort	Pearson corr.	P-waarde
WWK	0.878	0.001
KOP	-0.193	0.715
DJI	0.827	0.042
BTM	0.170	0.170
MWK	0.114	0.724
WAN	0.866	0.012
PMS	0.655	0.056
ING	0.306	0.617
MKB	-0.307	0.332

Significantie extractiegehalte (links) en asgehalte (rechts) bekomen via niet-parametrische testen

Test Statistics ^{a,b}		Test Statistics ^{a,b}	
	asgehalte		extr
Chi-Square	27.028	Chi-Square	31.904
df	9	df	9
Asymp. Sig.	.001	Asymp. Sig.	.000

Stapsgewijs regressiemodel met asgehalte en extractiegehalte als onafhankelijke variabelen.

ANOVA					
Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1 Regression	1.754	1	1.754	9.117	.017 ^a
Residual	1.539	8	.192		
Total	3.292	9			

Coefficients

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
1 (Constant)	20.481	.202		101.389	.000
Extr	.059	.020	.730	3.020	.017

Excluded Variables

Model	Beta In	t	Sig.	Partial Correlation	Collinearity Statistics
					Tolerance
1 AS	-.298 ^a	-.992	.354	-.351	.650
extr as	-.091 ^a	-.352	.735	-.132	.975

Bijlage 5: Beschikbare chemische en calorische gegevens

Gevonden literatuurgegevens van chemische eigenschappen

Tabel E: Chemische samenstelling van de onderzochte houtsoorten

SBB	Botanische naam	cel+hcel(%)	Lign tot. (%)	as (%)	extract. Eth/tol. (%)	Literatuur
DJI	<i>Buchenavia & Terminalia spp.</i>	65.9	25.5	0.8	3.6	Doat 1977
ING	<i>Couratari stellata</i>	66	34	1.8	1	Santana and Okino 2007
	<i>Couratari sp.</i>	58	33.6	1.2	1.6	Fiches techniques bois de Guyane (*)
WAL	<i>Eperua falcata</i>	50.8	25.7	0.63	17.4	Détienne and Thiel 1988
KOP	<i>Goupia glabra</i>	55.5	32	0.7	4	Fiches techniques bois de Guyane (*)
BTM	<i>Hydrochorea corymbosa</i> H. gonggrijpii	-	-	-	-	
MKB	<i>Hymenolobium flavum & excelsum</i>	68.4	31.6	0.4	4.4	Santana and Okino 2007
		60	30	0.7	5	Fiches techniques bois de Guyane (*)
		58.95	25.8	0.5	6.8	Doat 1977
WAN	<i>Ocotea rubra</i>	62	38	0.2	15.4	Santana and Okino 2007
		-	32	-	6	Fiches techniques bois de Guyane (*)
PMS	<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i>	61.1	26.4	0.65	8.45	Doat 1977
WWK	<i>Vochysia guianensis</i>	66.95	23.9	0.95	3.65	Doat 1977
MWK	<i>Erismia uncinatum</i>	63.6	33	1.4	2	Fiches techniques bois de Guyane (*)

(*) ctbg.cirad.fr/fiches_techniques

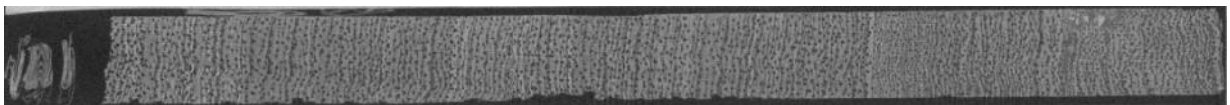
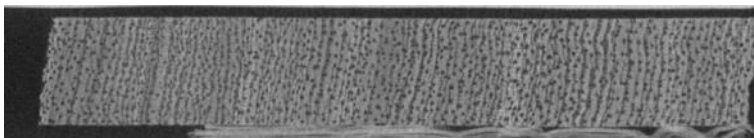
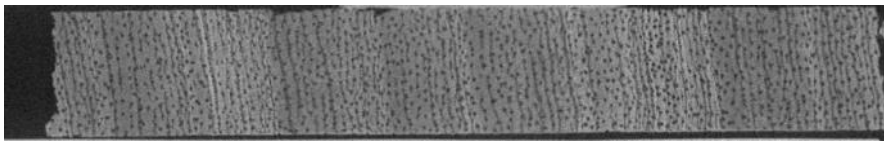
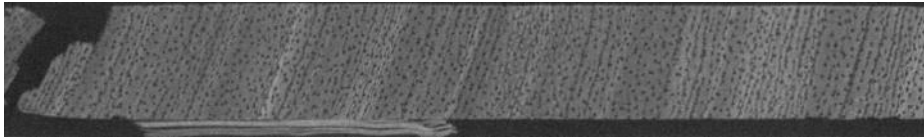
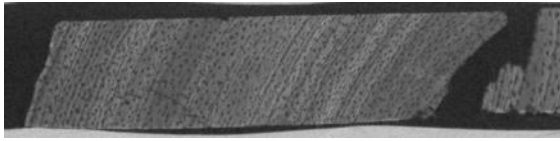
Tabel F: HHV's van enkele soorten, bekomen van het CIRAD (uit databank na persoonlijke communicatie Jean Gérard)

Botanische naam (CIRAD)	Lokale naam	HHV
<i>Andira coriacea</i> Pulle	Rode kabbes	20.80
<i>Andira coriacea</i> Pulle	Rode kabbes	21.18
<i>Andira</i> sp	Rode kabbes	19.90
<i>Bagassa tiliaefolia</i>	Kaw-udu	20.45
<i>Cedrela odorata</i> L.	Ceder	20.49
<i>Cedrela odorata</i> L.	Ceder	20.84
<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz et Pav.) Cham. ex DC.	Tafrabon	20.09
<i>Couratari multiflora</i> Eyma	Ingipipa	20.05
<i>Dicorynia guianensis</i>	Basralocus	20.05
<i>Dicorynia guianensis</i> Amsh.	Basralocus	20.66
<i>Dicorynia guianensis</i> Amsh.	Basralocus	20.69
<i>Diploptropis purpurea</i>	Zwarte kabbes	20.76
<i>Eperua falcata</i> Aubl.	Walaba	21.05
<i>Eperua</i> sp	Walaba	20.33
<i>Eperua</i> sp	Walaba	21.59
<i>Goupia glabra</i> Aubl.	Kopi	20.66
<i>Goupia glabra</i> Aubl.	Kopi	20.40
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Rode locus	19.31
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Rode locus	20.18
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Rode locus	19.97
<i>Hymenolobium excelsum</i> Ducke	Maka kabbes	20.31
<i>Hymenolobium flavum</i>	Maka kabbes	19.13
<i>Hymenolobium</i> sp	Maka kabbes	20.20
<i>Manilkara bidentata</i>	Bolletrie	20.26
<i>Sextonia rubra</i>	Wana	20.76
<i>Sextonia rubra</i>	Wana	20.41
<i>Sextonia rubra</i>	Wana	21.23
<i>Sextonia rubra</i>	Wana	21.23
<i>Sextonia rubra</i>	Wana	21.23
<i>Peltogyne venosa</i> Benth.s.venosa	Purperhart	20.03
<i>Peltogyne venosa</i> Benth.s.venosa	Purperhart	19.72
<i>Pithecellobium dulce</i> Benth.	Bostamarinde	19.36
<i>Pithecellobium dulce</i> Benth.	Bostamarinde	19.43
<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i> (Miq) Brenan	Pikin-misiki	20.82
<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i> (Miq) Brenan	Pikin-misiki	20.99
<i>Ruizterania albiflora</i> Marc.Berti	Hoogland gronfolo	18.64
<i>Sclerolobium albiflorum</i>	Djedoe	20.47
<i>Sclerolobium melanocarpum</i> Ducke	Djedoe	20.23
<i>Sclerolobium melinonii</i>	Djedoe	19.78
<i>Sclerolobium</i> sp	Djedoe	20.36
<i>Terminalia amazonia</i> Exell	Kalebashout	19.87
<i>Terminalia amazonia</i> Exell	Kalebashout	20.03
<i>Vatairea guianensis</i>	Gele kabbes	19.32
<i>Vochysia guianensis</i>	Wis Wis Kwari	19.34

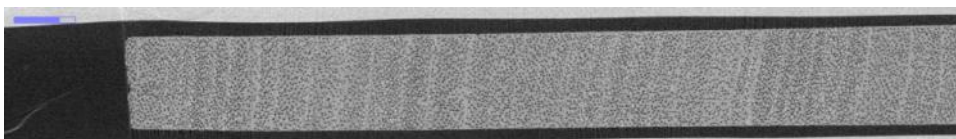
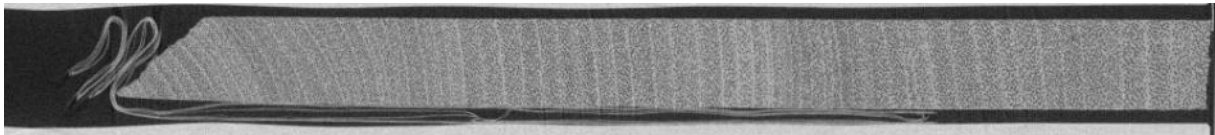
Bijlage 6: X-CT beelden

Telkens weergegeven van kern naar spint

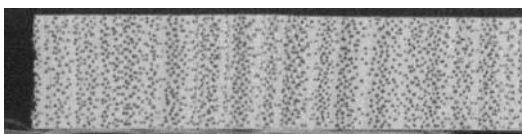
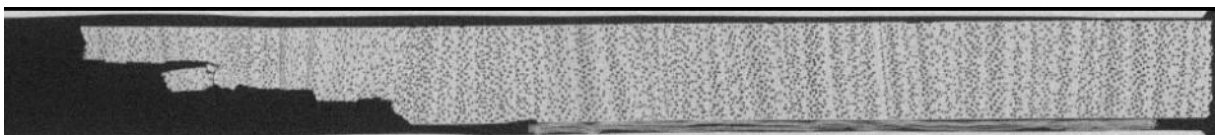
1) WWK

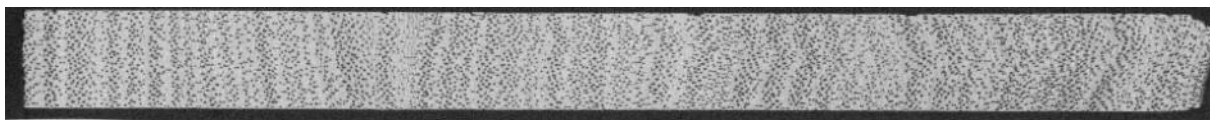


2) KOP

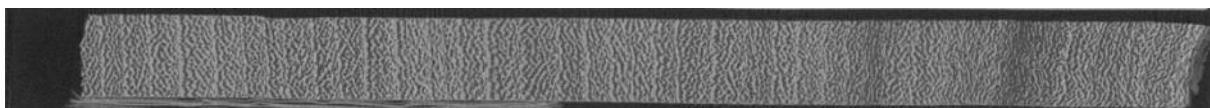
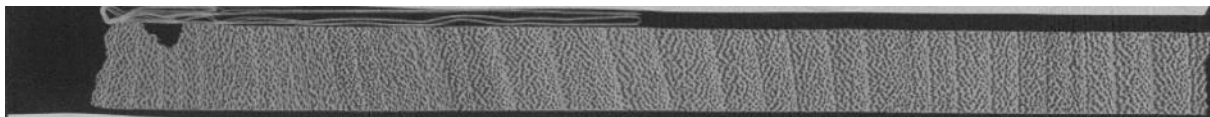


3) DJI

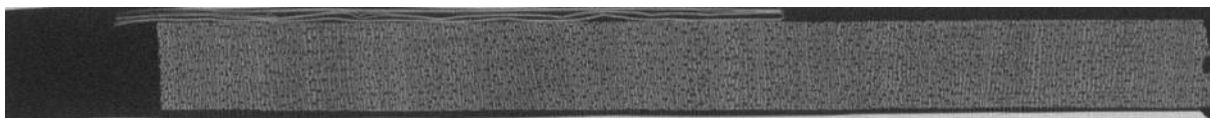
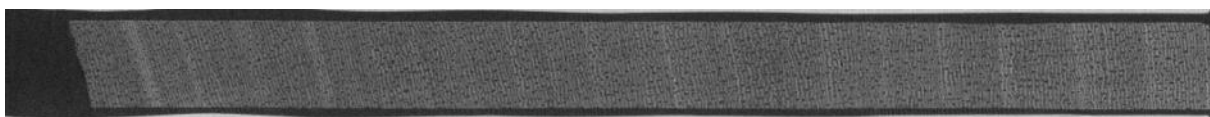




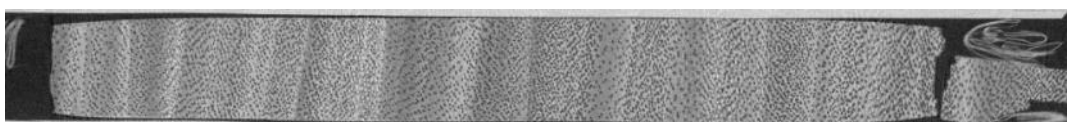
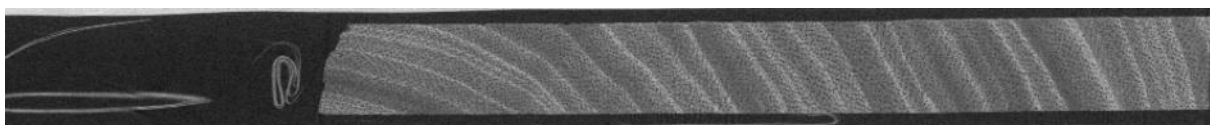
4) BTM



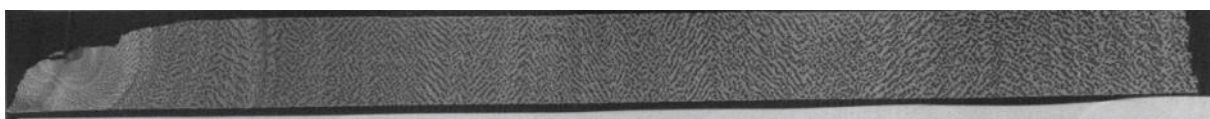
5) MWK



6) WAN

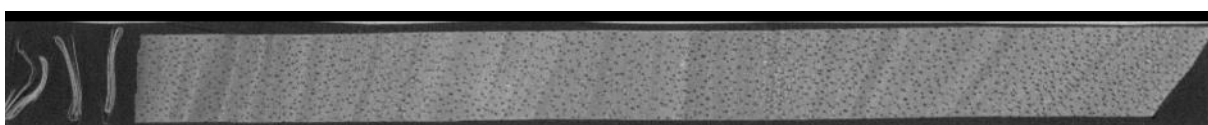
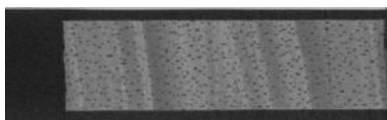
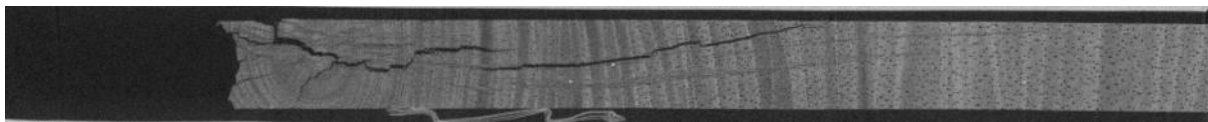


7) PMS (enkel binnenkern en het buitenste deel van de kern met spint is weergegeven)

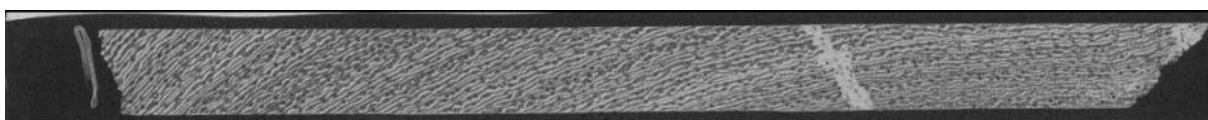
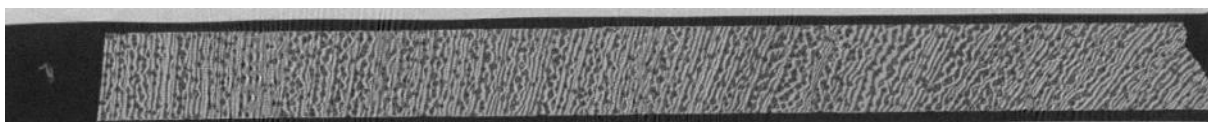
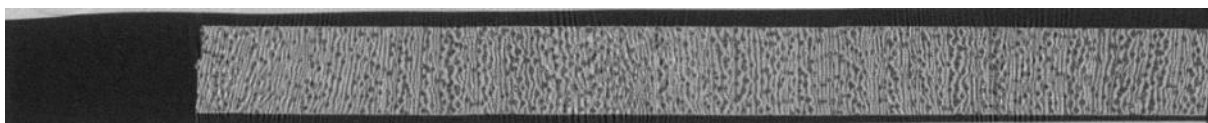
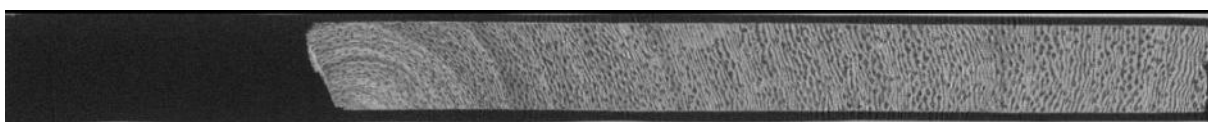




8) ING



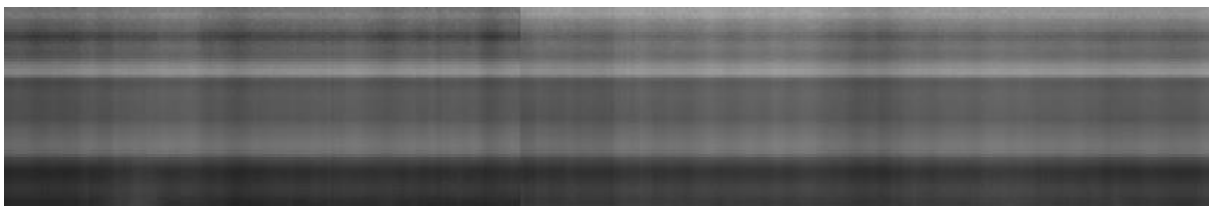
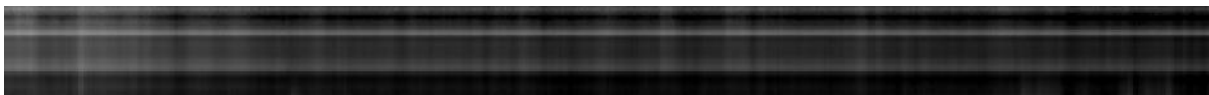
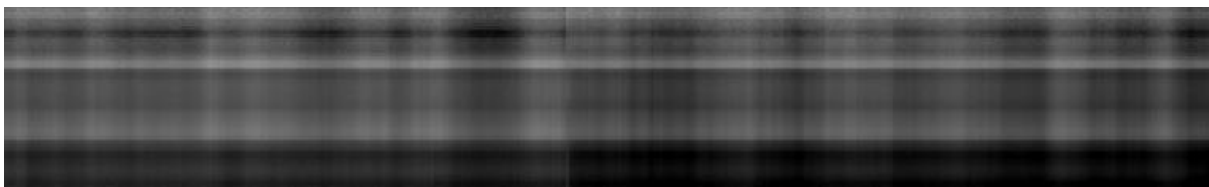
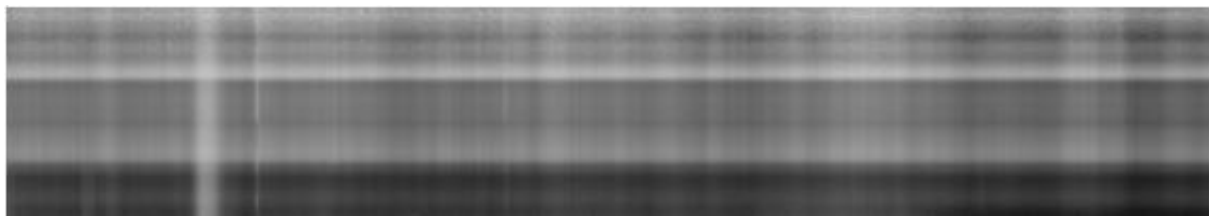
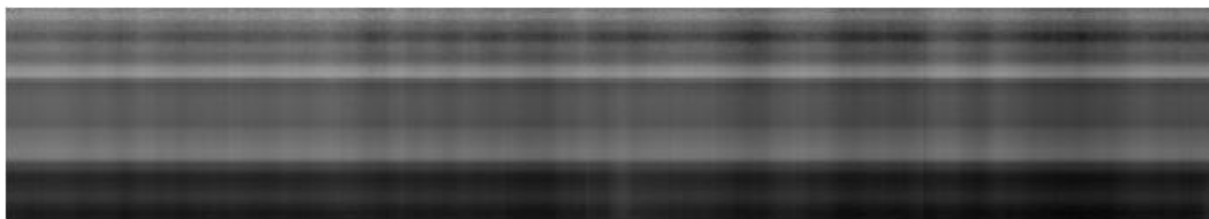
9) MKB



Bijlage 7: NIR profielen

In volgorde: WWK, KOP, DJI, BTM, MWK, WAN, PMS, ING en MKB. Omwille van de verschillende stamdiameters werden de groottes herschaald (vandaar de variabele dikte). Horizontaal worden de ruimtelijke eenheden weergegeven, verticaal de golflengtes.





Bijlage 8: Output van PLS-software

Output van PLS met volumegewicht MKB

```
Linear regression model using
Partial Least Squares calculated with the SIMPLS algorithm
Developed 02-Jun-2012 17:42:040.22
Author: Tom@PC_VAN_TOM
X-block: 24 by 201 (Tom@PC_VAN_TOM@20120602T174227.47341708 m:20120602174227.754)
Included: [ 1-24 ] [ 1-201 ]
Preprocessing: Mean Center
Y-block: 24 by 1 (Tom@PC_VAN_TOM@20120602T174238.64378463 m:20120602174239.937)
Included: [ 1-24 ] [ 1 ]
Preprocessing: Autoscale
Num. LVs: 5
Cross validation: leave one out
RMSEC: 0.00864837
RMSECV: 0.0171822
RMSEP: 0.0355338
Bias: 3.33067e-016
CV Bias: 9.45488e-005
Pred Bias:-0.00129898
R^2 Cal: 0.950611
R^2 CV: 0.807498
R^2 Pred: 0.368806
```

Output van PLS met volumegewicht WAN

```
Linear regression model using
Partial Least Squares calculated with the SIMPLS algorithm
Developed 02-Jun-2012 18:23:017.23
Author: Tom@PC_VAN_TOM
X-block: 6 by 201 (Tom@PC_VAN_TOM@20120602T182308.83693919 m:20120602182309.116)
Included: [ 1-6 ] [ 1-201 ]
Preprocessing: Mean Center
Y-block: 6 by 1 (Tom@PC_VAN_TOM@20120602T182315.09186146 m:20120602182316.932)
Included: [ 1-6 ] [ 1 ]
Preprocessing: Autoscale
Num. LVs: 2
Cross validation: leave one out
RMSEC: 0.0754891
RMSECV: 0.105988
RMSEP: 0.0453046
Bias: 2.22045e-016
CV Bias: 0.0113184
Pred Bias:-0.0210996
R^2 Cal: 0.630161
R^2 CV: 0.344471
R^2 Pred: 0.876098
```

Output van PLS met HHV MKB

```
Linear regression model using  
Partial Least Squares calculated with the SIMPLS algorithm  
Developed 01-Jun-2012 12:38:07.726  
Author: Tom@PC_VAN_TOM  
X-block: Xmatrix2 12 by 201 (Tom@PC_VAN_TOM@20120601T123709.89292166  
m:20120601123800.535)  
Included: [ 4-15 ] [ 1-201 ]  
Preprocessing: Mean Center  
Y-block: Ymatrixbom2 12 by 1 (Tom@PC_VAN_TOM@20120601T123717.79088078  
m:20120601123807.711)  
Included: [ 4-15 ] [ 1 ]  
Preprocessing: Autoscale  
Num. LVs: 4  
Cross validation: leave one out  
RMSEC: 0.105988  
RMSECV: 0.15519  
RMSEP: 0.193733  
Bias: 0  
CV Bias: 0.000944364  
Pred Bias:-0.0555948  
R^2 Cal: 0.925  
R^2 CV: 0.84128  
R^2 Pred: 0.692643
```