



Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen

Academiejaar 2011 – 2012

Bioenergetische karakterisering van inheemse houtsoorten

Hans Van Lommel

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

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

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

The author and promotor give permission to make this master dissertation available for consultation and to copy parts of this master dissertation for personal use.

In the case of any other use, the limitations of the copyright have to be respected, in particular with regard to the obligation to state expressly the source when quoting results from this master dissertation.

Gent, 7 juni 2012

De auteur,

De promotor,

Hans Van Lommel

Prof. dr. ir. J. Van Acker

Voorwoord

Met dit voorwoord wil ik graag iedereen bedanken die mij geholpen en gesteund heeft bij het schrijven van mijn masterproef.

In de eerste plaats wil ik een bijzonder woord van dank uiten aan mijn promotor Professor Joris van Acker en mijn tutor Jan Van den Bulcke voor hun onontbeerlijke raad en daad.

Verder wil ik ook Tom De Mil bedanken voor de aangename samenwerking tijdens het onderzoek. Mede dankzij zijn hulp en ideeën heb ik mijn masterproef tot een goed einde kunnen brengen.

Daarnaast wil ik ook Stijn Willen, Piet Dekeyser, Rik de Rycke en Nele Defoirdt bedanken voor hun zeer gewaardeerde input en Kristine vander Mijnsbrugge, Hans Beeckman, Wannes Hubau en Marc Missoorten voor hun hulp en expertise tijdens het veldwerk.

Ten slotte wil ik mijn vriendin en familie bedanken voor hun steun tijdens het voorbije jaar.

Samenvatting

De laatste decennia wint houtige biomassa terug aan belang als gevolg van de stijgende vraag naar energie, de slinkende fossiele brandstofreserves en de stijgende broeikasgasconcentraties in de atmosfeer. In deze context ontwikkelt deze masterproef een tool-chain voor de structurele en energetische karakterisering van houtige biomassa om de efficiëntie van de energieproductie te verhogen. Daarnaast wordt de energetische inhoud van herstellende hakhoutstoven onderzocht en vergeleken met zaailingen.

Een eerste techniek in de tool-chain is de analyse van de hoeveelheid biomassa met de flatbedscanner. Vervolgens zijn de stalen gescand met de X-stralen scanner om het volumegewicht te bepalen en is de calorische waarde bepaald met een bom calorimeter. Uit die analyses is gebleken dat voor de biomassaproductie de snelgroeïende soorten (populier en wilg) een productie geven welke vier keer groter is dan bij de traaggroeïende soorten (eik, es en beuk). X-stralen tomografie is succesvol toegepast om het volumegewicht van de houtsoorten te voorspellen. Daaruit is gebleken dat het volumegewicht van de snelgroeïende soorten is echter lager dan bij de traaggroeïende (respectievelijk 0,55 en 0,85 g/cm³). De calorische waarde voor het hout is bij snelgroeïende soorten hoger dan bij traaggroeïende. Voor schors zijn de calorische waarden niet verschillend. Op energetisch vlak kunnen we dus stellen dat de snelgroeïende soorten een hogere energieproductie leveren.

Voor de structurele karakterisering is naast de X-stralen scanner voor het volumegewicht ook een SWIR-scanner gebruikt voor de bepaling en visualisatie van de trekhoutzones. Daarnaast is de chemische samenstelling van de stalen bepaald met thermogravimetrische analyse (TGA) en zijn voorspellingen van de chemische samenstelling van de schijven gemaakt door een combinatie van TGA en de SWIR-scanner. Vervolgens is de calorische waarde bepaald met de 'differential scanning calorimeter' en is ook hier de SWIR-scanner gebruikt om voorspellingen te maken van de calorische waarde van alle stalen. Tenslotte zijn de DSC-waarden gecombineerd met het volumegewicht per pixel om de energie-inhoud per pixel te voorspellen.

De tool-chain ontwikkeld in deze masterproef opent dan ook vele perspectieven voor de toekomst. Enerzijds kunnen energetische verschillen tussen hout vastgesteld worden en anderzijds kunnen volumegewichtverschillen, trekhoutzones en de chemische samenstelling ruimtelijk bepaald en gevisualiseerd worden. De combinatie van de DSC-waarden en het volumegewicht per pixel bepaald met de X-stralen tomografie, voorspelt hoeveel energie uit een bepaalde hoeveelheid biomassa te verkrijgen is. Op die manier kan deze tool-chain leiden tot een efficiëntere verbranding van houtige biomassa en bijdragen tot het voldoen aan de stijgende energievraag.

Summary

The past decades woody biomass regains importance as a result of rising energy demand, dwindling fossil fuel reserves and rising greenhouse gas concentrations in the atmosphere. Within this framework this research develops on the one hand a tool-chain for structural and energetic characterization of woody biomass as used to increase the efficiency of energy production. On the other hand, the energy content of restored coppice is examined and compared with seedlings.

A first technique in the tool-chain is the analysis of biomass with the flatbedscanner. Next the samples are scanned with the X-ray scanner to determine the density. The bomb calorimeter is used to determine the calorific value. These analyses show that biomass production of fast-growing species (poplar and willow) is four times greater than that of slow-growing species (oak, ash and beech). The density of fast-growing species is lower than the one of slow-growing species (respectively 0,55 and 0,85 g/cm³). The calorific value of wood of fast-growing species is higher than the one of slow-growing. For bark, the calorific values were equal. On an energetic level we can say that the fast-growing species deliver a higher energy supply.

The structural characterization is obtained by using several techniques. Apart from the X-ray scanner to measure the density, also a short-wave infrared scanner is used for the determination and visualization of the tension wood regions. Further, the chemical composition of the samples is determined by using thermogravimetric analysis (TGA) and predictions have been made by combining the TGA with the SWIR-scanner. Subsequently, the calorific value is determined by the differential scanning calorimeter (DSC) and predictions are made based on the results of the SWIR-scanner. Finally, the DSC-values are combined with values of the density per pixel to predict the energy content per pixel.

The tool-chain developed in this research shows many opportunities for the future. On the one hand energetic differences between wood stocks can be determined and on the other hand differences in density, tension wood zones and chemical composition can be determined spatially and can be visualized. The combination of the DSC-values, the density and the voxelsize predicts the amount of energy available in a quantity of woody biomass. Hence this tool-chain may lead to a more efficient combustion of woody biomass and may thus contribute to meeting the increasing energy demand.

Inhoudsopgave

Voorwoord	5
Samenvatting.....	6
Summary	7
Doelstelling.....	10
1 Literatuurstudie.....	10
1.1 Voorraad houtige biomassa.....	12
1.2 Hakhout	13
1.3 Biomassaverwerking.....	15
1.3.1 Thermochemische conversie	15
1.3.2 Invloedsfactoren	17
2 Technieken voor structurele en energetische karakterisering	18
2.1 Nabij-infrarood analyse	18
2.1.1 Nabij-infrarood spectroscopie	18
2.1.2 Hyperspectrale beeldvorming	20
2.1.3 Voorbehandeling.....	21
2.1.4 Partiële kleinste kwadraten regressie.....	22
2.2 X-stralen tomografie.....	24
2.3 Bomcalorimetrie	25
2.4 DSC-TGA.....	26
3 Structurele en energetische karakterisering.....	30
3.1 Materiaal en methode.....	30
3.1.1 X-ray scanner.....	30
3.1.2 Short Wave Infrared (SWIR) scanner	31
3.1.3 Bomcalorimetrie	34
3.1.4 DSC-TGA	35
3.2 Resultaten.....	36
3.2.1 Biomassabepaling	36
3.2.2 Volumegewichtsbepaling.....	37
3.2.3 Calorische waarde.....	39
3.2.4 SWIR-beeldvorming	41
3.2.5 Chemische samenstelling.....	45

3.2.6 Energie-inhoud.....	47
3.2.7 Energie-inhoud per pixel.....	49
3.3 Discussie	50
3.4 Conclusie.....	53
4 Energetische karakterisering van hakhout.....	54
4.1 Materiaal en methode.....	54
4.2 Resultaten.....	56
4.3 Discussie	60
4.4 Conclusie.....	60
Bibliografie	61
Bijlagen	66

Doelstelling

Ingevolge de stijgende energiebehoefte, de slinkende fossiele brandstofvoorraden en de vereiste reductie van de uitstoot van broeikasgassen is energie de laatste decennia een 'hot topic'. Een grondstof welke de energievoorziening mee kan waarborgen en de uitstoot van broeikasgassen kan verminderen zijn lignocellulose materialen.

De doelstelling van deze masterproef is het ontwikkelen en testen van een tool-chain voor de karakterisering, structureel en energetisch, van lignocellulose grondstoffen voor bio-energie. Daarnaast wordt de energetische inhoud van herstellende hakhoutsoorten onderzocht en vergeleken met zaailingen.

1 Literatuurstudie

Al eeuwenlang vormt biomassa een belangrijke grondstof voor energie. Hoewel het in de 18^e eeuw naar de achtergrond werd verdreven door fossiele brandstoffen (steenkool, aardolie en aardgas), wint het de laatste decennia terug aan belang ingevolge de uitputting van fossiele brandstofreserves en de stijgende broeikasgasconcentraties in de atmosfeer. Door de continue stijgende vraag naar energie, de beperkte voorraad fossiele brandstoffen en de noodzaak om de uitstoot van broeikasgassen te reduceren, zal biomassa in de toekomst een nog prominentere plaats innemen. Bovendien wordt dit ook gestimuleerd door het huidige Europees energiebeleid, met name de 2020 doelstellingen, die vereisen dat tegen 2020 20% van het Europees energieverbruik uit hernieuwbare energiebronnen moet komen (Acuña et al. 2010; Gomez et al. 2008; H. Yang et al. 2007; Yorulmaz & Atimtay 2009; Prins 2005; Timmermans & Koopmans 2007).

De verbranding van biomassa wordt daarenboven als CO₂-neutraal beschouwd, nu de uitgestoten CO₂ tijdens de fotosynthese terug wordt opgenomen. Het gebruik van hout i.p.v. fossiele brandstoffen zou volgens Yorulmaz & Atimtay (2009) de netto CO₂-emissie met 90% verminderen. In dit verband is het wel van belang te wijzen op volgende nuanceringen (Pixelio 2010).

Eenzijds is het zo dat enkel de verbranding van houtige biomassa CO₂-neutraal is. De verwerking (vorming van pellets, houtsnippers, etc.), het transport en de exploitatie zijn dat niet. Deze energie, nodig voor de productie, wordt de grijze energie genoemd. De grijze energie, verbruikt bij het verbranden van houtige biomassa, ligt nog steeds lager dan bij het gebruik van fossiele brandstoffen (Pixelio 2010).

Anderzijds geeft het European Environment Agency (2010) aan dat het verbranden van biomassa de CO₂-concentratie in de atmosfeer kan verhogen, indien de hoeveelheid koolstof opgeslagen in de bodem of planten zou verminderen. Bij de productie van biomassa voor energiedoeleinden kan het land immers niet aangewend worden voor de productie van planten voor andere doelen. Zo zou biomassaproductie bossen kunnen vervangen, waardoor de bosoppervlakte vermindert en dus ook de daarmee gepaard gaande koolstofsequestratie afneemt. De verbranding van biomassa is dus enkel CO₂-neutraal voor zover de biomassaproductie de totale hoeveelheid plantengroei doet toenemen, afkomstig is van een extra productie of als het afgeleid wordt van afval welke niet bijdraagt aan koolstofsequestratie.

Tot slot dient er nog op gewezen te worden dat de biomassaproductie kan concurreren met het telen van voedselgewassen, wat druk kan leggen op de voedselproductie en de voedselprijzen.

De hoger vermelde 2020 doelstellingen van de Europese Unie hebben ondermeer geleid tot een stijging van het gebruik van biobrandstoffen. Eerste generatie biobrandstoffen zijn gebaseerd op gemakkelijk toegankelijke grondstoffen (zoals suikers, zetmeel of olie) die met conventionele chemische processen of vergisting worden omgezet tot biobrandstoffen. Deze biobrandstoffen hebben evenwel een aantal nadelen. Ten eerste worden ze geproduceerd van grondstoffen die eveneens als voedselbron kunnen worden gebruikt (koolzaad, soja, suikerriet, etc.), wat zorgt voor spanningen tussen voedselzekerheid en biobrandstoffen. Daarnaast hebben deze biobrandstoffen veel meststoffen- en insecticide-input nodig. Eerste generatie biobrandstoffen zorgen voor een CO₂-emissiereductie van ongeveer 30 à 50 % en zijn meestal niet CO₂-neutraal (Rommens et al. 2009; Timmermans & Koopmans 2007).

Om die problemen op te lossen worden de tweede generatie biobrandstoffen geproduceerd, welke uit lignocellulose grondstoffen verkregen worden via (thermo)chemische en biologische conversie. De lignocellulose grondstoffen kunnen afkomstig zijn van landbouwnevenstromen, houtafval en de organische fractie van huishoudelijk afval. Daarnaast kunnen ze ook geproduceerd worden uit grondstoffen geteeld als energiegewas (energiemaïs, sorghum, snelgroeiende grassoorten) of korte-omloophout. Tweede generatie biobrandstoffen zijn energie-efficiënter en ecologischer, ze hebben een hogere opbrengst en zijn te telen op marginale en minder vruchtbare gronden. De CO₂-emissiereductie bij tweede generatie biobrandstoffen bedraagt 80-90% (Rommens et al. 2009; Timmermans & Koopmans 2007).

Hierna wordt eerst de voorraad aan houtige biomassa in Europa besproken. Vervolgens wordt dieper ingegaan op een mogelijke bron van houtige biomassa voor energieproductie, hakhout. Tot slot komen de verwerkingsmogelijkheden van biomassa aan bod.

1.1 Voorraad houtige biomassa

De voorraad houtige biomassa, welke gebruikt kan worden voor energieopwekking of omzetting tot biobrandstoffen, kan ingedeeld worden op basis van de herkomst van de biomassa.

Een eerste herkomst is houtige biomassa van de bosbouw, welke nog verder ingedeeld kan worden in vier subcategorieën:

- oogstresten zoals takken, onverkoopbare stammen, naalden en bladeren;
- stompen en wortels;
- stammen welke niet geschikt zijn voor industrieel gebruik; en
- kleine diameter hout van dunningen welke niet gebruikt kunnen worden in industriële toepassingen

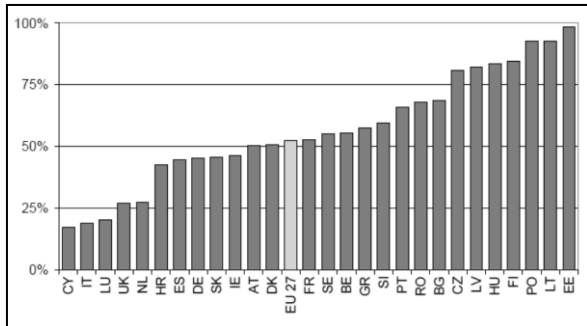
De hoeveelheid houtige biomassa welke potentieel op duurzame wijze kan geogst worden in Europese bossen bedroeg in 2010 1277 miljoen m³. Men schat dat die hoeveelheid met 1,8% zal dalen tegen 2030 (Mantau et al. 2010).

Een tweede herkomst van houtige biomassa is hout afkomstig van landschapszorg. Die bedraagt 86,7 miljoen m³ per jaar, wat niet zal veranderen tegen 2030. Momenteel wordt 45% gebruikt als brandstof en 20% voor compostering. 35% van deze biomassa blijft echter onbenut.

Verder kan ook industrieel houtafval worden gebruikt. Door technologische vooruitgang is de hoeveelheid afval van zagerijen echter sterk verminderd. Een andere bron is gerecycleerd hout, wat in 2007 goed was voor 55,4 miljoen m³ in Europa. Het gaat hier voornamelijk om verpakkingsmateriaal, afbraakhout, schrijnwerkhout en afval van industriële en commerciële activiteiten.

Een bron van hout met hoge verwachtingen is tot slot de korte omloop plantages. De huidige oppervlakte korteomloop hout (KOH) in Europa wordt geschat op 30 000 ha, waarbij enkel Zweden en het Verenigd Koninkrijk een substantiële oppervlakte hebben. Deze oppervlakte KOH komt neer op een jaarlijkse productie van 240 000 ton ovedroog hout (bij een opbrengst van 8 ton ovedroog hout per ha).

Het huidige gebruik van hout voor energieproductie verschilt van land tot land. Gemiddeld bedraagt het voor de EU 27 iets meer dan 50% van de bruto binnenlandse energieconsumptie van hernieuwbare bronnen. Voor België is dit iets meer dan het Europees gemiddelde (Figuur 1) (Mantau et al. 2010).



Figuur 1: Het aandeel van energie geproduceerd uit houtbiomassa als procent van de totale hoeveelheid hernieuwbare energie (Mantau et al. 2010)

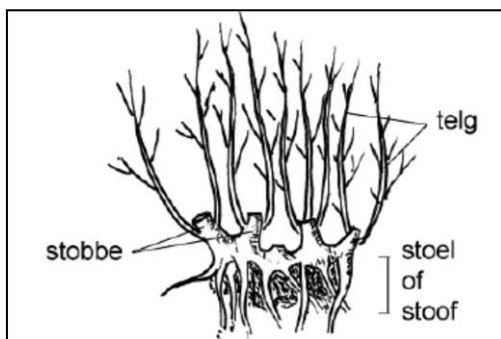
Mantau et al. (2010) hebben een voorspelling gemaakt voor de toekomstige vraag naar hout gebruikt voor energieproductie (Tabel 1). Daaruit blijkt dat de vraag naar hout zal stijgen van 346 miljoen m³ in 2010 tot 573 miljoen m³ in 2020 en 752 miljoen m³ in 2030. De vraag zal vanaf 2020 groter zijn dan het potentiële aanbod.

Tabel 1: Houtvoorraad balans (Mantau et al. 2010)

Houtvoorraad balans							
Herkomst	Potentiëel			Vraag			Gebruik
	2010	2020	2030	2010	2020	2030	
	M m ³			M m ³			
Houtige biomassa afkomstig van bos	686	676	680	458	529	620	Materiaal
Andere houtige biomassa	287	327	375	346	573	752	Energie
Totaal	973	1005	1056	805	1102	1372	Totaal

1.2 Hakhout

Hakhout is een bosbeheervorm waarbij opstanden vegetatief verjongd worden aan de stobbe die na de kap achterblijft. De verjonging ontstaat uit adventiefknoppen of slapende knoppen op de stoel, waaruit een telg of stoofloot groeit (Figuur 2). De herstelkans van het hakhout vermindert echter met de leeftijd door het verlies aan slapende knoppen en door concurrentie met verruigende vegetatie (den Ouden et al. 2010).

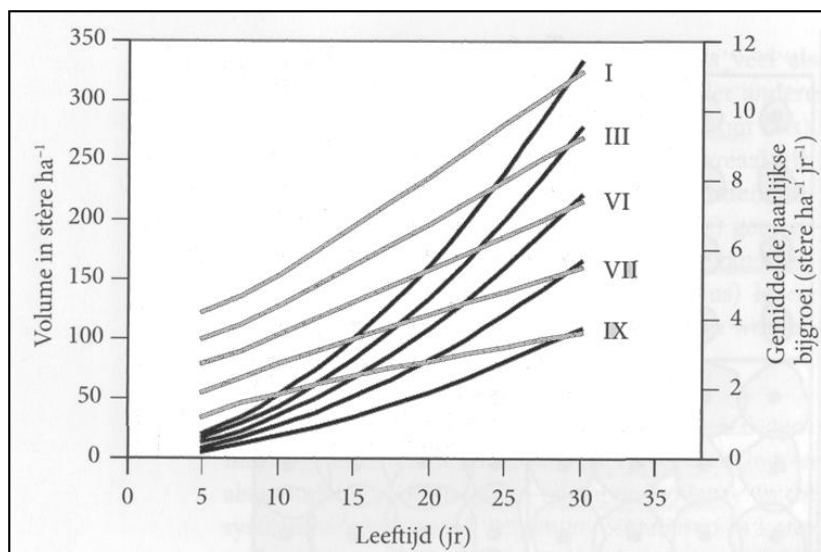


Figuur 2: Enkele hakhouttermen (den Ouden et al., 2010)

Hakhout is vanaf de middeleeuwen tot begin 20^e eeuw de belangrijkste beheervorm geweest in Noordwest-Europa en werd onder meer gebruikt als brandstof. Nadien heeft het aan belangstelling verloren door de verminderde vraag naar klein hout. Vanaf de 21^e eeuw is er een hernieuwde interesse in hakhout vanwege zijn cultuurhistorische belang en de rijke flora en fauna die ermee samengaat. Hakhout komt immers vaak voor op oude bosplaatsen, waar veel oud-bosplanten voorkomen en heeft een speciale licht- en nutriëntendynamiek. Daarnaast zijn oude stoven een perfect habitat voor vele soorten. Tot slot is hakhout eveneens een mogelijke bron van houtige biomassa voor energieopwekking (den Ouden et al. 2010).

Hakhout wordt als groot plantsoen (4-8 jaar) aangeplant. De belangrijkste boomsoorten voor hakhout zijn eik, es, els en wilg. Het plantverband kan afhankelijk van de standplaats gaan tot ongeveer 1 op 1 m. Ook de omlooptijd hangt af van de vruchtbaarheid van de bodem, hoe vruchtbaarder hoe korter de omloop. Daarnaast speelt ook de markt, nl. de gewenste grootte van hout, een rol. Voor eik is de omlooptijd gemiddeld 10 à 15 jaar, voor es is dat 5 à 10 jaar. Hakhout produceert voornamelijk kleine formaten hout ingevolge de korte omlooptijden. Het betreft dan ook voornamelijk brandhout. Voordeel is wel dat elk jaar geogst kan worden (den Ouden et al. 2010; Jansen & Kuiper 2004).

De historische hakhoutcultuur op arme zandbronden bestond voornamelijk uit eik. De recente hakhoutsystemen worden voor biomassa geteeld en voor de papier- en spanindustrie. Jaarlijks kan zo'n 2 à 7 m³ stamhout per hectare geogst worden. Als ook tak- en twijghout ingecalculeerd worden is die hoeveelheid nog veel groter. In Figuur 3 is te zien dat in Frankrijk een gemiddelde jaarlijkse productie van 12 stère/ha (ongeveer 9 m³/ha) bereikt wordt op een zeer goede standplaats (den Ouden et al. 2010).



Figuur 3: Volumeontwikkeling (zwarte lijnen) en gemiddelde jaarlijkse bijgroei (grijze lijnen) in eikenhakhout bij verschillende boniteiten (romeinse cijfers) in Frankrijk. De opbrengst wordt uitgedrukt in stère (Den Ouden et al., 2010).

Een Nederlandse studie van Jansen & Kuiper (2004) heeft aangetoond dat veel eigenaars van hakhout geïnteresseerd zijn in de afzet van hakhout voor bio-energie, mits er subsidies beschikbaar zijn. De hernieuwbare energiemarkt kan dit hakhout gebruiken als hernieuwbare energiebron met een goed imago en is zelfs bereid iets extra te betalen voor hakhout, op voorwaarde dat een voldoende groot volume op jaarbasis beschikbaar is (Den Ouden et al. 2010)..

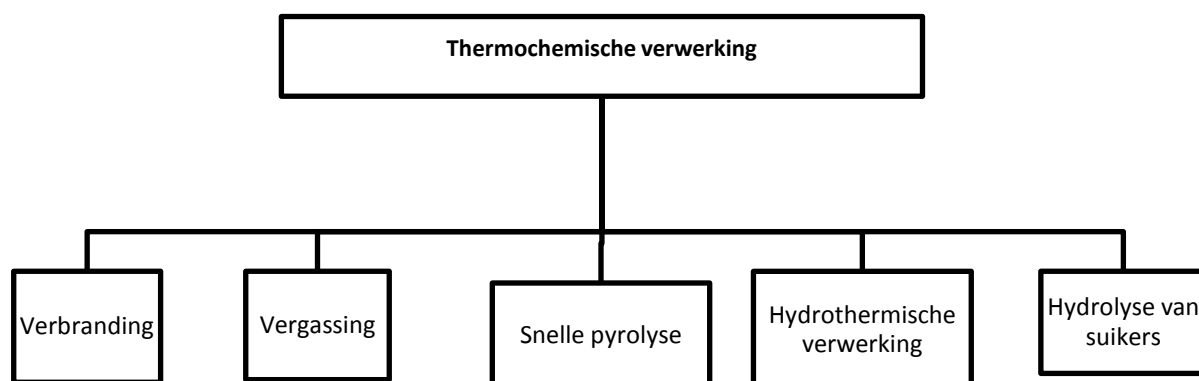
1.3 Biomassaverwerking

Biomassa kan verwerkt worden via diverse omzettingprocedures. Voor biobrandstoffen kan dit fysische verwerking zijn zoals persing of extractie. Een andere verwerkingsmogelijkheid is chemische omzetting. Meer gecompliceerde technieken voor biomassaverwerking zijn thermochemische en biochemische omzettingstechnieken. Bij biochemische omzetting zullen biobrandstoffen verkregen worden door fermentatie van biomassa. Bij thermochemische conversie wordt biomassa omgezet door verhitting (Gomez et al. 2008).

Eerst worden de verschillende thermische conversieprocessen besproken, waarna vervolgens de verschillende invloedsfactoren op het verbrandingsproces van biomassa aan bod zullen komen.

1.3.1 Thermochemische conversie

Bij thermochemische conversie van biomassa worden hitte en katalysatoren gebruikt voor de omzetting van plantpolymeren tot brandstoffen, chemische stoffen of elektrische energie. Er zijn dus verschillende thermochemische conversieprocessen mogelijk zoals hieronder weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4: Thermochemische opties voor de productie van brandstoffen en energie (Brown 2011)

Een eerste thermochemische conversietechniek is verbranding. Bij aanwezigheid van voldoende zuurstof zal de biomassa direct verbranden en wordt matige- tot hoge-temperatuur thermische energie (800-1600°C) geproduceerd. Deze kan bijvoorbeeld gebruikt worden voor elektriciteitsopwekking (Brown 2011). De afbraak in zuurstofatmosfeer gebeurt in drie successieve processen. Eerst vindt er waterverlies plaats, gevolgd door de afbraak van cellulose en hemicellulose tussen 225-380°C. Als laatste gebeurt de afbraak van lignine tussen 400-500°C (Emandi et al. 2011).

Een tweede proces is vergassing. Daarbij wordt matige-temperatuur thermische energie (700-1000°C) geproduceerd en een ontvlambaar gasmengsel, ook gekend als syngas. Dit gas kan door het Fischer-Tropsch proces omgezet worden tot vloeibare brandstoffen of kan rechtstreeks aangewend worden voor elektriciteitsopwekking (Brown 2011).

Een derde conversieproces is pyrolyse, welke plaatsvindt in een anaerobe omgeving. Pyrolyse kan onderverdeeld worden in twee grote klassen: snelle en trage pyrolyse. Snelle pyrolyse gebeurt bij matige temperatuur (450-550°C) en vormt voornamelijk condenseerbare gassen, welke vervolgens omgezet kunnen worden in energierijke bio-olie. Naast de condenseerbare gassen worden ook kleinere hoeveelheden ontvlambare gassen (syngas) en vaste houtskool (biochar) geproduceerd. Trage pyrolyse gebruikt lagere temperaturen (250-750°C) en produceert voornamelijk kool (Brown 2011).

Een vierde omzettingsproces is hydrothermische conversie, welke grondstoffen nat kan verwerken. Hydrothermische conversie gebeurt bij een druk van 50-250 atm om het koken van water in de biomassa te voorkomen. Het proces produceert een partieel gedeoxygeneerde vloeistof, ook gekend als biocrude (Brown 2011).

Een laatste proces is de hydrolyse van plantpolysacchariden om suikers te katalyseren tot biobrandstoffen (Gomez et al. 2008; A. Evans et al. 2010; Brown 2011).

Het grote voordeel van deze thermochemische conversietechnieken is dat het alle organische componenten van biomassa kan omzetten, waar biochemische conversie enkel polysacchariden kan omzetten. Nadeel is dat de opstart en het onderhoud duur zijn ingevolge de hoge-temperatuur processen (Gomez et al. 2008).

1.3.2 Invloedsfactoren

De verbranding van biomassa wordt sterk beïnvloed door de eigenschappen van de biomassa en de reactiecondities (bv. lucht/brandstofverhouding). De hoeveelheid hitte die vrijkomt tijdens de verbranding hangt af van de energie-inhoud van de brandstof en de conversie-efficiëntie van de reactie. Een zeer variabele karakteristiek van biomassa met een grote impact op de verbranding is het vochtgehalte (Brown 2011).

De energie-inhoud of verbrandingswaarde van biomassa wordt gedefinieerd als de hitte vrijgekomen tijdens de verbranding. Voor metingen wordt de reactie uitgevoerd bij constante druk of constant volume. Dit laatste geldt voornamelijk bij de analyse van vaste biomassa met de bomcalorimeter. De calorische waarde kan uitgedrukt worden als 'higher heating value' (HHV) en 'lower heating value' (LHV), zowel droog als nat. De HHV, ook bruto calorische waarde genoemd, is de absolute waarde van de verbrandingsenergie per gewichtseenheid brandstof met toevoeging van zuurstof. De verbrandingsproducten zijn O₂, CO₂, N, SO₂ en vloeibaar water. De LHV, of netto calorische waarde, is de absolute waarde van de verbrandingsenergie per gewichtseenheid brandstof waarbij na verbranding al het water als waterdamp voorkomt. HHV is hoger dan LHV omdat HHV de som is van LHV en de energie die vrijkomt bij condensatie van de waterdamp (Brown 2011; Telmo & Lousada 2011a).

Verder heeft cellulose een lagere verbrandingswaarde (17,3 MJ/kg) dan lignine (21,2 à 26,7 MJ/kg) door zijn hogere graad van oxidatie. Daardoor zal biomassa met een hogere cellulose-inhoud een lagere verbrandingswaarde hebben. Zoals eerder aangegeven (zie 1.3.1) verschilt ook het verbrandingsgedrag van cellulose, hemicellulose en lignine (Brown 2011; Butterman & Castaldi 2009).

Tot slot beïnvloedt de dichtheid de verbrandingswaarde en efficiëntie. De dichtheid wordt zelf beïnvloed door het vochtgehalte door zowel de verandering in grondstofmassa als de volumeverandering (zwell/krimp) (Brown 2011).

2 Technieken voor structurele en energetische karakterisering

Voor de structurele en energetische karakterisering van houtige biomassa worden in het kader van deze masterproef verschillende technieken toegepast. De eerste techniek behelst het gebruik van nabij-infrarood spectra teneinde de samenstelling van biomassa te bepalen. Een tweede techniek is de X-stralen tomografie, waarmee de volumegewichtsbepaling kan gebeuren. De derde techniek betreft de bomcalorimetrie, die de energie-inhoud bepaalt. Tot slot wordt de combinatie DSC-TGA nog aangewend voor het simultaan bepalen van de energie-inhoud en de chemische samenstelling van de biomassa.

Hierna zullen al deze technieken meer in detail worden besproken, nu deze grotendeels het resultaat zijn van eigen onderzoek zullen ze als onderdeel van de resultaten van deze masterproef aanzien worden.

2.1 Nabij-infrarood analyse

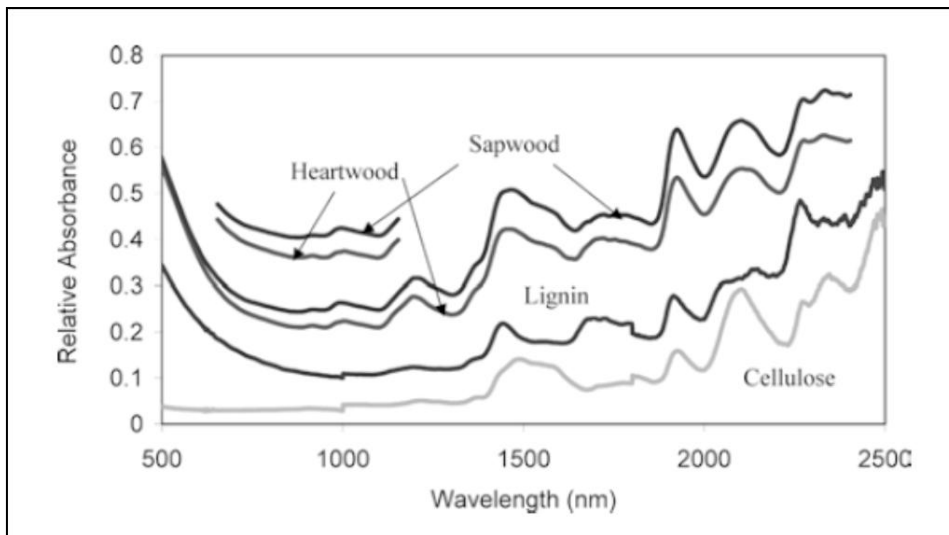
De traditionele techniek voor chemische analyse van hout is de ‘wet analysis’. Die methode is echter zeer tijdrovend, arbeidsintensief, duur en destructief. Bijgevolg is deze techniek dan ook niet op grote schaal implementeerbaar (Hou & Li, 2011; Nkansah & Dawson-Andoh, 2010).

Een goed alternatief voor deze techniek is de analyse van de nabij-infrarood (NIR) spectra. Eerst wordt nabij-infrarood spectroscopie besproken, gevolgd door hyperspectrale beeldvorming in het NIR-bereik. Ten derde gaat de voorbehandeling van de NIR-spectra uitgediept worden en tot slot de partiële kleinste kwadraten regressie voor het opstellen van voorspellingsmodellen aan de hand van de NIR-spectra.

2.1.1 Nabij-infrarood spectroscopie

Een eerste techniek is NIR spectroscopie welke gebruik maakt van het nabij-infrarood bereik van het elektromagnetische spectrum. Het nabij-infrarood (NIR) bereik gaat van golflengte 780 tot 2500 nm (Riddell et al. 2010; Williams 2009).

NIR straling veroorzaakt moleculaire vibraties waarbij verschillende soorten vibraties ontstaan bij verschillende golflengtes. Er zijn twee soorten vibraties: stretching en bending. Bij stretching vergroot of verkleint de bindingsafstand tussen moleculen terwijl bij bending de bindingshoek tussen de moleculen varieert. Moleculen hebben echter een beperkt aantal vibraties, die de fundamentele vibraties worden genoemd. Naast de fundamentele vibraties zijn er nog zeer kleine trillingen, de overtonen of boventonen. Bovendien kunnen niet-fundamentele trillingen ontstaan door combinaties van trillingen onderling, waardoor combinatiebanden kunnen worden gecreëerd. In het NIR bereik zijn nu net die boventonen en combinatiebanden van moleculaire vibraties zichtbaar en dus bruikbaar om verschillen in eigenschappen tussen houtsoorten te bepalen. (Williams 2009; Tallieu 2008).



Figuur 5: Spectra van hout, cellulose en lignine bekomen via NIR spectroscopy (Kelley et al. 2004)

Figuur 5 toont aan dat de eerste boventoon van cellulose en hemicellulose tussen 1400 en 1660 nm ligt. Tussen 2020 en 2250 nm zit er evenwel nog een grote schommeling in absorbantie die toegewezen kan worden aan cellulose. Tot slot toont deze figuur dat de eerste en tweede piek van lignine tussen 1400-1520nm en tussen 1635-1825nm liggen. De vibraties van lignine tussen 1400 en 1520 nm overlappen echter met cellulose (Kelley et al. 2004).

NIR spectroscopie is zeer succesvol in verscheidene onderzoeksvelden maar heeft één ontoereikendheid, namelijk het gebrek aan spatiale informatie. Recente progressie van de technologie laat toe om nabij-infrarood hyperspectrale beelden te gebruiken welke bestaan uit een NIR spectrum voor elke pixel van het beeld. Deze hyperspectrale beeldvorming laat toe om zowel ruimtelijke als spectrale informatie te verkrijgen over een object (Williams 2009; Gowen et al. 2007; Riddell et al. 2010).

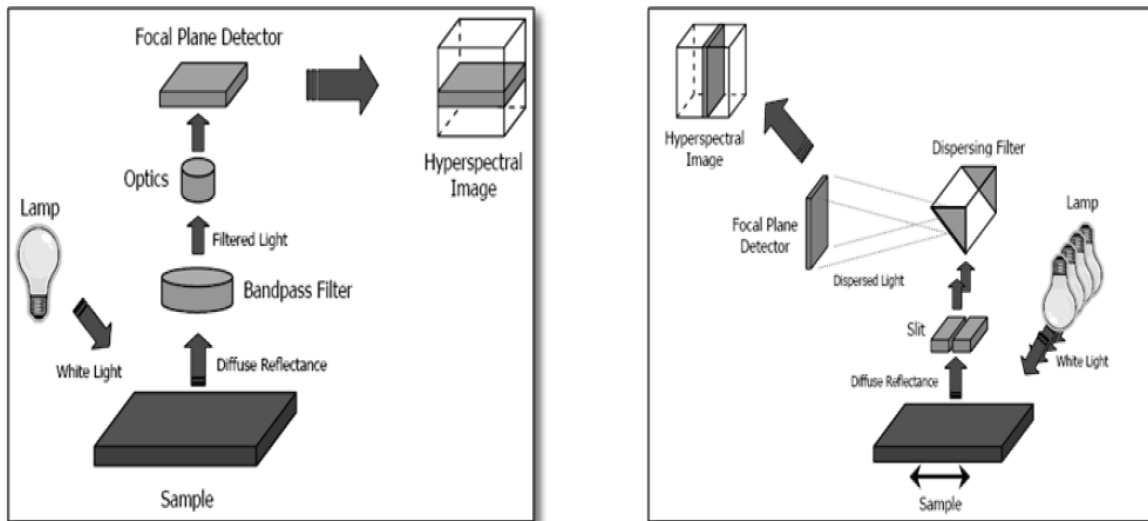
2.1.2 Hyperspectrale beeldvorming

NIR hyperspectrale beeldvorming is een state-of-the-art analytische techniek welke conventionele digitale beeldvorming combineert met NIR spectroscopie om zowel spatiale als spectrale informatie over een object te krijgen. Elke pixel bevat dus het volledige spectrum van die positie, welke gebruikt kan worden voor bepaling van bijvoorbeeld de chemische samenstelling van die pixel. Bij digitale fotografie zit de complete informatieset in slechts drie lagen (RGB). Bij NIR hyperspectrale beeldvorming kunnen daarentegen de data in meerdere lagen teruggevonden worden, variërend van 118 tot 229 lagen, afhankelijk van het gebruikte instrument. Hyperspectrale beelden, ook hypercubes genoemd, zijn dus een compilatie van meerdere aangrenzende golflengtebanden voor elke positie op een staal. De drie dimensionale datablokken bestaan uit twee ruimtelijke en een golflengtedimensie. Een typisch commercieel instrument produceert hypercubes met als dimensies 256x320x118, nl. 118 enkelvoudige kanaalbeelden elk met 256x320 pixels (Williams 2009; Gowen et al. 2007; Geladi 2004).

Hyperspectrale beeldvorming in de NIR regio is ideaal voor de analyse van heterogene biologische stalen omdat NIR straling tamelijk goed binnendringt en diffuse reflectantie geeft. Het staal absorbeert de straling partieel, waardoor slechts een deel van de initiële straling terug opgevangen wordt na reflectie. Daaruit kunnen absorptiespectra afgeleid worden welke gebruikt kunnen worden voor de bepaling van de chemische samenstelling van het staal (Geladi 2004).

Een NIR hyperspectraal systeem bestaat uit een detector, een spectrograaf en een lichtbron. De camera-eenheid is doorgaans een InGaAs (Indium Gallium Arsenide) detector gevoelig voor het NIR bereik. De InGaAs sensor is gevoelig voor een golflengtebereik van 800 tot 2500 nm. Tussen 900 en 950 nm wordt er evenwel slechts een minimum aan licht gedetecteerd met een slecht resultaat als gevolg. Dit golflengtegebied dient in de voorbehandeling verwijderd te worden om fouten (uitschieters) in de analyse te vermijden. De spectrograaf is verantwoordelijk voor de golflengteselectie, -scheiding en -meting. De lichtbron is in het algemeen een tungsten halogeen of xenon gas plasma lamp (Arngren 2011; Hyvärinen et al. 2008).

Momenteel bestaan er drie mogelijke configuraties voor de NIR hyperspectrale beeldvorming: puntscan, lijnscan (ook pushbroomscan genoemd) en focal-plane scan. Bij de puntscan wordt een volledig NIR spectrum verkregen van één punt van het staal. Het verschil met lijnscan is dat bij lijnscan een beeld wordt genomen van een lijn pixels waarvan telkens het spectrum verkregen wordt. Bij focal-plane scannen wordt tot slot een beeld genomen van het volledige staal (Figuur 6). Per golflengte wordt er dus een beeld genomen van het staal en deze beelden volgen elkaar sequentieel op (Williams 2009).



Figuur 6: Focal-plane (links) en lijnscan of pushbroom (rechts) hyperspectrale beeldvorming configuratie (Williams 2009)

De meest voorkomende configuratie is de lijnscan (Figuur 6), die t.o.v. de andere configuraties drie voordelen heeft. Ten eerste worden alle golflengtes verworven op hetzelfde tijdstip, wat hyperspectrale beeldvorming ongevoelig maakt voor de beweging van het staal. Bovendien is de lichtdoorvoer 15 à 30 keer hoger dan bij de andere configuraties, wat resulteert in een kortere blootstellingstijd in gelijkaardige verlichtingscondities. Een laatste voordeel is dat een pushbroom configuratie slechts een lijnvormige verlichting vereist (Arngren 2011; Williams 2009; Hyvärinen et al. 2008).

2.1.3 Voorbehandeling

Om de NIR spectra te analyseren dient men eerst de beelden voor te behandelen (preprocessing). Een eerste voorbehandeling is de standaardisatie om de gemeten spectra onafhankelijk te maken van ruis, temperatuur, e.d. In de literatuur wordt in dit verband een standaardisatie beschreven met een donker en een referentiebeeld volgens de formule:

$$Q_{k,i} = \frac{\text{Staal} - \text{Donker}}{\text{Referentie} - \text{Donker}} \quad (\text{Vergelijking 1})$$

waarbij $Q_{k,i}$ het bekomen beeld na standaardisatie is, Staal stelt het ruwe beeld van het staal voor, Donker het donkere beeld en Referentie het witte referentiebeeld. Het donkere beeld wordt gebruikt om de achtergrondruis van het instrument te verwijderen. Het signaal van de camera is immers niet nul als er geen licht op de detectoren komt. Het donkere beeld wordt verkregen door de lens af te schermen. Het witte referentiebeeld heeft een 100% reflectantie waardoor de verkregen spectra herschaald worden tussen 0 en 1. Witte referentiebeelden kunnen verkregen worden door een beeld te nemen van teflon, een materiaal met een reflectantie dicht bij 100% (Brink et al. 2010; Gowen et al. 2007; Geladi 2004; Williams 2009; Arngren 2011; Kelley et al. 2004; J. Li et al. 2012; Xing et al. 2011).

Een tweede preprocessingstechniek is 'mean centering'. Daarbij wordt het gemiddelde van de relatieve reflectantie van elke spatiale pixel (over alle golflengtes) genomen en wordt dit gemiddelde afgetrokken van elk spectrum. Daardoor wordt het relatief verschil tussen de spectra van de originele datamatrix weergegeven (Eigenvector Research 2011).

Een laatste voorbehandelingsmethode is het gebruik van afgeleiden van de spectra. Fujimoto et al. (2010) en Schimleck et al. (2001) hebben de tweede afgeleiden van de spectra gebruikt. De tweede afgeleide kan de 'baseline offset' verwijderen waardoor niet-interessante baseline signalen niet meegenomen worden. Daarnaast worden ook spectrale kenmerken verscherpt. Om ervoor te zorgen dat door de tweede afgeleide de aanwezige ruis niet versterkt wordt kan het Savitzky-Golay algoritme gebruikt worden. Die gaat tegelijk de signalen 'smoothen' tijdens het afleiden waardoor de karakteristieken van de verdeling, zoals relatieve maxima, minima en breedte, behouden blijven (Hou & L. Li 2011; Eigenvector Research 2011).

2.1.4 Partiële kleinste kwadraten regressie

Omdat er geen rechtstreeks verband bestaat tussen de intensiteit van de NIR pieken en de gezochte variabelen is het aangewezen hiervoor een model op te stellen. Een statistische methode voor het opstellen van dergelijke modellen is partiële kleinste kwadraten (PLS) regressie. De gemeten waarden zijn de NIR spectra. Daar worden vervolgens de factoren of latente variabelen (LV) van gezocht welke de meeste variatie beschrijven. Tot slot wordt met de latente variabelen een lineaire regressie uitgevoerd (Hedrick et al. 2007; Williams 2009; Tallieu 2008).

PLS werd reeds eerder aangewend om de relatie te leggen tussen NIR spectra en andere materiaaleigenschappen. Zo hebben Hein et al. (2010) een partiële kleinste kwadraten regressie uitgevoerd om de relatie te leggen tussen de NIR spectra en plaatmateriaaleigenschappen. Ook Fujimoto et al. (2010), Nkansah & Dawson-Andoh (2010) en Schimleck et al. (2002) hebben PLS modellen gebruikt om NIR spectra te koppelen met sterkte-eigenschappen van hout. Hou & Li (2011) hebben modellen opgesteld op basis van PLS om de NIR spectra bekomen door spectroscopie te linken met de chemische samenstelling van hout.

Bij het opstellen van de mogelijke modellen worden spectrale data at random opgedeeld in een kalibratie- en validatieset. De kalibratieset wordt gebruikt voor het opstellen van het model. De validatieset zal dan gebruikt worden om de robuustheid en het voorspellend vermogen van het model te testen (Kelley et al. 2004; Schimleck et al. 2002). Kelley et al. (2004) en Schimleck et al. (2002) gebruikten 2/3 van de stalen als kalibratie- en 1/3 als validatieset. De kalibratiedata vormen de de X-matrix terwijl de onderzochte eigenschappen, in ons geval de chemische eigenschappen, de Y-matrix vormen.

Om te onderzoeken of de voorspellingsmodellen voldoende presteren kan een cross-validatie uitgevoerd worden. Cross-validatie gaat de dataset opdelen in verschillende delen waarna systematisch elk deel uit de dataset verwijderd wordt en een model wordt gemaakt met de

overgebleven stalen. Dat model wordt gebruikt om de waarden van de Y-variabelen voor het uitgesloten deel te schatten. Het proces wordt herhaald tot elk deel eens uitgesloten is van de dataset en een volledig cross-gevalideerd model ontwikkeld is. Dat volledig cross-gevalideerd model wordt dan gebruikt om de respons van de testset te voorspellen (Kelley et al. 2004).

De sterkte van een voorspellingsmodel kan geëvalueerd worden met de bias, de determinatiecoëfficiënt (R^2), de 'root mean square error of calibration' (RMSEC), de 'root mean square error of prediction' (RMSEP) en het aantal latente variabelen (Hein et al. 2010; Nkansah & Dawson-Andoh 2010).

Bias wordt gebruikt om na te gaan of er een systematisch verschil is tussen de gemiddelde gemeten waarde en de gemiddelde voorspelde waarde. Als er geen verschil is zal de bias gelijk zijn aan nul. Hoe dichter de bias bij nul is hoe accurater het model is zowel naar het correct zijn van het model als naar de voorspelbaarheid van toekomstige stalen (Nkansah & Dawson-Andoh 2010).

De determinatiecoëfficiënt (R^2) is een maat voor de totale variatie tussen de gemeten waarden en de voorspelde waarden die worden bekomen uit het model. Het toont de proportie van X-data die verklaard kunnen worden door variatie in Y-data. Het varieert van nul tot één. Hoe dichter R^2 1 benadert hoe sterker de correlatie. Interpretatie van R^2 kan subjectief zijn. In de literatuur duidt een R^2 boven 0,83 op een model dat gebruikt kan worden voor onderzoeksactiviteiten (Nkansah & Dawson-Andoh 2010; Horvath et al. 2010).

Volgende parameters om de sterkte van modellen te evalueren zijn de 'root mean square error of calibration' (RMSEC) en de 'root mean square error of prediction' (RMSEP). De RMSEC geeft een schatting voor accuraatheid van het model t.o.v. de kalibratiedata. De RMSEP geeft een schatting van de voorspellingsaccuraatheid. Als toekomstige stalen gelijk zijn aan de stalen die gebruikt zijn voor de kalibratie zal de RMSEP ongeveer twee bedragen.

De 'root mean square error of prediction' (RMSEP) wordt gegeven door de formule:

$$RMSEP = \sqrt{\frac{\sum(y_{pred} - y)^2}{n}} \quad (\text{Vergelijking 2})$$

y is de gemeten waarde, y_{pred} de voorspelde waarde en n het aantal validatie- of teststalen. Voor de RMSEC wordt de y_{pred} van vergelijking 2 vervangen door y_{cal} , de calibratiewaarden (Brink et al., 2010; Horvath et al., 2010; Kelley et al., 2004).

Tot slot kan het aantal latente variabelen een significante invloed hebben op de kwaliteit van een PLS model. Te veel variabelen kunnen zorgen voor overfitting van het model, waardoor de analyse onnauwkeurig wordt omdat ruis in het model wordt opgenomen. Te weinig latente variabelen kan resulteren in underfitting wat eveneens een minder accuraat model geeft doordat spectrale structuren niet herkend zullen worden (Kelley et al. 2004; Tallieu 2008).

2.2 X-stralen tomografie

X-stralen tomografie kan gebruikt worden om de interne microstructuur van een staal in 3D te visualiseren op een niet-destructieve manier. Het voordeel van X-stralen tomografie is dat de techniek een hoge resolutie heeft, niet destructief is en het toelaat het staal in alle richtingen te bekijken. Belangrijk bij X-stralen tomografie is dat er een afweging gemaakt moet worden tussen het gescande volume en de spatiale resolutie, een groter volume heeft een kleinere resolutie (Badel et al. 2008; Devetter et al. 2006; Serapiglia et al. 2009; Van den Bulcke et al. 2009).

In de gereconstrueerde datasets kan echter ruis aanwezig zijn. Zo kunnen doorgaans strepen met lage ruimtelijke frequentie worden waargenomen. Trtik et al. (2007) hebben dit opgelost door ervoor te zorgen dat het onderzochte staal niet de hele breedte van de CCD camera bedekt waardoor een deel van de achtergrond mee gescand wordt. Deze achtergrond heeft een hoge signal-to-noise ratio en komt overeen met de lucht buiten het staal, waardoor de voxels overeenkomend met de achtergrond eenzelfde waarde hebben. Vervolgens worden de grenspixels geïdentificeerd. Daarna wordt een derdegraads polynoom opgesteld voor de achtergrond en wordt die functie afgetrokken van de originele data. Tot slot worden alle negatieve waarden vervangen door 0, waardoor ze getoond worden als lege regio's.

Naast ruis kunnen de datasets ook beam hardening vertonen. Beam hardening is zichtbaar als een verdonkering van de randen van het staal en wordt veroorzaakt door een zichtbaar sterkere demping van de stralen nabij de omtrek van de stalen. Bij polychromatische stralen zullen de lage energie en dus de sterk verzwakte fotonen sneller geëlimineerd worden uit de straal. Bovendien zullen de lage energie fotonen meer geabsorbeerd worden bij het afleggen van een langere weg van de stralen door het object. Beam hardening kan verminderd worden door een filter van aluminium, koper of brons net na de stralingsbron te plaatsen, kleinere stalen te gebruiken of een beam hardening correctie uit te voeren tijdens de beeldreconstructie (Wildenschild et al. 2002; Steppe et al. 2004).

Zoals aangegeven in de literatuur kan X-stralen tomografie in de houttechnologie gebruikt worden voor houtidentificatie en voor de analyse van de houtanatomie. Zo gebruikten De Ridder et al. (2011) voor de bepaling van volumegewichten X-stralen tomografie met een zelfgemaakte houder van referentiemateriaal met een gekende dichtheid. Het referentiemateriaal heeft een atomaire samenstelling en dichtheid die ongeveer gelijk is aan houtcelwanden ($1,56 \text{ g/cm}^3$). Dat in combinatie met de gemiddelde grijswaarde voor lucht kan gebruikt worden voor de directe omzetting van grijswaarden van gereconstrueerd hout naar volumegewichten via de formule:

$$D_i = D_{holder} \times \frac{(G_i - G_{air})}{(G_{holder} - G_{air})} \quad (\text{Vergelijking 3})$$

D_i is daarbij gelijk aan het absolute volumegewicht van voxel i , D_{holder} is het absolute volumegewicht van het referentiemateriaal ($1,56 \text{ g/cm}^3$), G_i is de grijswaarde van voxel i , G_{air} is de grijswaarde van lucht en G_{holder} is de grijswaarde van het referentiemateriaal.

2.3 Bomcalorimetrie

De verbrandingswaarde van biomassa wordt bepaald met behulp van een bomcalorimeter. Dit toestel verbrandt een kleine hoeveelheid biomassa in aanwezigheid van zuurstof in een afgesloten container (een bom). De vrijgekomen hitte van de verbranding wordt overgebracht naar de watermassa die de container omringt. De verbrandingswaarde wordt vervolgens berekend door de vloeistofmassa, de specifieke hitte van de vloeistof en de netto temperatuurstijging te vermenigvuldigen. De berekende verbrandingswaarde moet evenwel gecorrigeerd worden voor de warmteverliezen naar de massa van de container, de warmteconductie door de containerwand en de warmteverliezen naar het toestel. De resulterende verbrandingswaarde is de 'higher heating value' (HHV) bij een constant volume omdat de biomassaverbranding plaats vindt in het constante volume van de container. De resulterende HHV op basis van droge massa van de biomassastaal kan uitgedrukt worden met volgende formule:

$$HHV_d = \frac{HHV}{1 - M} \quad (\text{Vergelijking 4})$$

waarbij HHV_d de HHV van de biomassa is op oven-droge biomassa, HHV is de HHV bepaald door de calorimeter en M is het vochtgehalte van de biomassa (Sokhansanj 2011).

2.4 DSC-TGA

Differential scanning calorimetrie (DSC) meet de temperaturen en de warmtestromen, verbonden met overgangen van materialen, als functie van de tijd en temperatuur. Deze metingen voorzien informatie over fysische en chemische veranderingen betrokken bij endothermische en exothermische processen. DSC gaat de stalen verhitten met een lineaire temperatuurverhoging om zo de vrijgekomen hitte van het staal te bepalen en dit relatief t.o.v. een referentie te bekijken. DSC meet dus het verschil in hoeveelheid hitte nodig om de temperatuur van het staal te doen stijgen (Heyse 2003a; Bahng et al. 2009).

Thermogravimetrische analyse (TGA) geeft hittegerelateerde veranderingen (afbraak, oxidatie, etc.) in biomassa weer. Het meet de hoeveelheid en de veranderingssnelheid van het gewicht van een materiaal als functie van de temperatuur of tijd in een gecontroleerde atmosfeer. De veranderingen worden gebruikt om de samenstelling van het staal te bepalen (Heyse 2003b; Serapiglia et al. 2009; Yorulmaz & Atimtay 2009; Bahng et al. 2009).

Bepaalde toestellen combineren DSC en TGA om tegelijk de warmtestromen en de massaveranderingen van één staal tijdens een proces te bepalen. (Heyse 2003a; Yang et al. 2007)

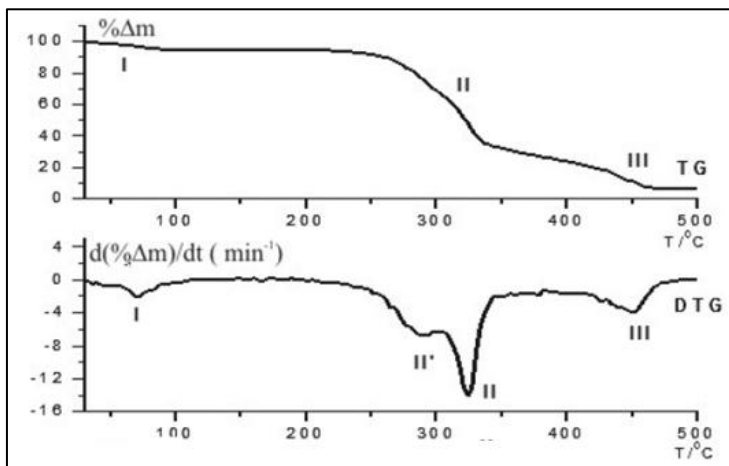
Voor pyrolyse kan het spoelgas zowel uit stikstof als helium bestaan, voor verbranding is dit zuurstof. Spoelgas wordt gebruikt om de atmosfeer continu inert of oxidatief te houden, naargelang de atmosfeer waarin gewerkt wordt, en de gevormde gassen en condenseerbare producten te verwijderen om zo secundaire interacties te voorkomen. (Heyse 2003b; Yang et al. 2007). De hoeveelheid gebruikt spoelgas kan variëren. Shen et al. (2009) hebben voor hun verbranding in zuurstofatmosfeer de TGA gespoeld met 60 ml/min lucht om de oxidatieve atmosfeer voor verbranding te behouden. Yorulmaz & Atimtay (2009) hebben 20 ml/min lucht gebruikt. Voor TGA in inerte atmosfeer hebben Yang et al. (2007) zuiver stikstof (99,9995% N) gebruikt als spoelgas met een debiet van 120 ml/min. Ook Prins (2005) heeft stikstof gebruikt met een debiet van 20 ml/min.

Bij pyrolyse in inerte atmosfeer zal hemicellulose het snelste ontbinden met een gewichtsverlies tussen 220 en 325°C. De maximale gewichtsverliesgraad (0,95 wt%/°C) vindt in het onderzoek van Yang et al. (2007) plaats bij 268°C. Cellulose ontbond tussen 315 en 400°C met een maximaal gewichtsverlies (2,84 wt%/°C) bij 335°C. Lignine ontbond het moeilijkste. De ontbinding vond plaats van omgevingstemperatuur tot 900°C met zeer lage gewichtsverlies (0,14 wt%/°C). Bij temperaturen hoger dan 400°C was bijna alle cellulose gepyrolyseerd zijn, van hemicellulose was nog 20% residu over bij 900°C en lignine had het meeste residu (ongeveer 45,7 wt%)(Yang et al. 2007)(Yang et al. 2007)(Yang et al. 2007). De afbraak in inerte atmosfeer gaat trager dan in oxidatieve omgeving. In oxidatieve atmosfeer geeft de verbranding dus een hogere resolutie voor de verschillende fasen (Serapiglia et al. 2009). In oxidatieve atmosfeer zal hemicellulose, cellulose en lignine verbranden tussen respectievelijk 225-325, 305-375 en 250-500°C.

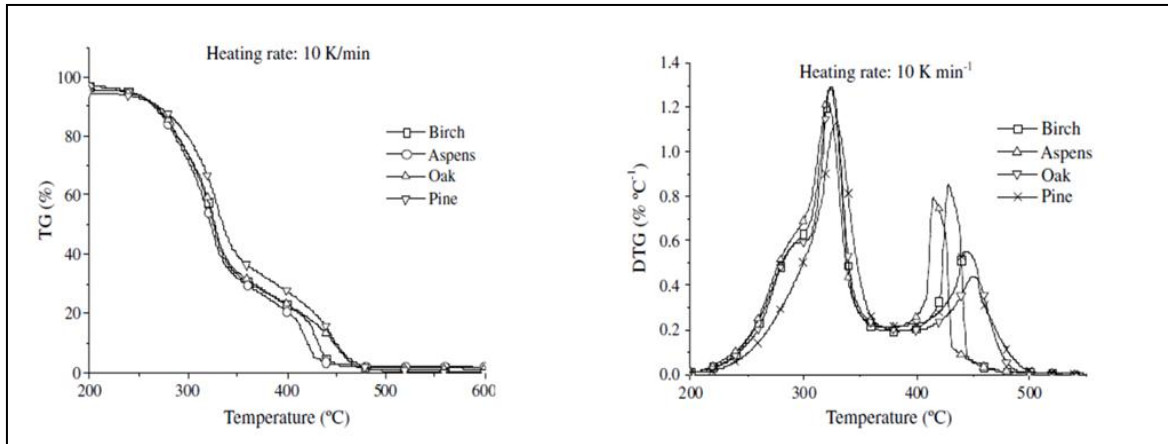
Het oxidatieve proces heeft 3 stappen (Figuur 7). De eerste stap is de waterverdamping welke gevolgd wordt door de vervluchtiging van de hoofdbestanddelen, de lignine wordt gedeeltelijk afgebroken, en productie van koolresidue bij lage temperatuur. De derde stap bevat de verdere afbraak van lignine en de verbranding van houtskool van de tweede stap (Emandi et al. 2011).

De kinetica van afbraak van biomassa onder inerte en oxidatieve atmosfeer zijn beïnvloedt door verschillende uitrusting, experimentele condities (temperatuur, druk en verhittingsnelheid), de fysische eigenschappen van het materiaal (vochtgehalte en deeltjesgrootte) en de chemische samenstelling van het materiaal. Hemicellulose bestaat uit verschillende polysacchariden met een willekeurige, amorse structuur welke gemakkelijk te degraderen zijn tot vluchtige stoffen bij lage temperaturen. Cellulose bestaat uit lange polymeren van glucose welke een sterke structuur vormen met een hoge thermische stabiliteit. Lignine bestaat dan weer uit aromatische structuren met vele vertakkingen, door de chemische bindingen in deze structuren heeft lignine een breed bereik waarin het ontbindt (Shen et al. 2009; Yang et al. 2007; Diertenberger 2002; Butterman & Castaldi 2008; Prins 2005).

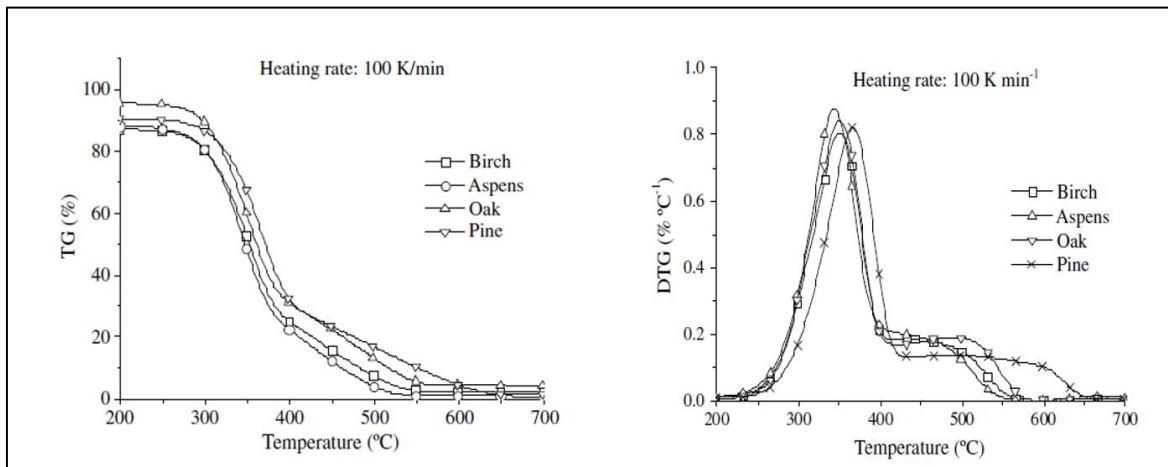
Doorgaans wordt de curve van het massaverlies in functie van de temperatuur de TG-curve genoemd, terwijl de eerste afgeleide van de TG-curve als DTG-curve wordt aangeduid. In Figuur 7 is te zien dat zowel voor TG en DTG een piek voor hemicellulose (II') en cellulose (II) te zien is. Ook de piek voor lignine (III) is te zien in TG en DTG. (Emandi et al. 2011).



Figuur 7: Hout thermogrammen (TG en DTG) met dehydratie en thermo-oxidatie karakteristieken van hemicellulose (II'), cellulose (II) en lignine (III) (Emandi et al. 2011)



Figuur 8: De TG (links) en DTG curves (rechts) van berk, iep, eik en den onder een verwarmingssnelheid van 10 K min⁻¹ (Shen et al. 2009)



Figuur 9: De TG (links) en DTG curves (rechts) van berk, iep, eik en den onder een verwarmingssnelheid van 100 K min⁻¹ (Shen et al. 2009)

In het rechtse beeld van Figuur 8 is een schouder piek te zien in de eerste stap van de DTG curve rond 280°C voor iep, berk en eik, wat komt door de ontbinding van hemicellulose. Den heeft een lagere hemicellulose-inhoud wat de afwezigheid van de schouder piek bij deze soort verklaart. Hemicellulose van loofhout en naaldhout heeft een verschillende samenstelling, de hemicellulose bestaat uit 80-90 wt% 4-O-methyl glucuronoxylaan voor loofhout en 60-70% glucomannaan en 15-30% arabinogalactaan voor naaldhout. De hemicellulose van loofhout reageert veel sneller dan die van naaldhout. De schouderpiek kan dus ook afwezig zijn bij den doordat glucomannaan en arabinogalactaan de thermische afbraak van hemicellulose uitstellen zodat die samenvalt met de afbraak van cellulose. De tweede piek van de DTG curve, in het temperatuurbereik 420-460°C, is voor alle vier soorten verschillend. Dat is het gevolg van een verschillende samenstelling, vnl. ligninegehalte (naaldhout 25-35 wt%, loofhout 18-25 wt%), wat leidt tot verschillende koolvormingsprocessen welke de thermische biomassa afbraak in de tweede stap beïnvloeden (Shen et al. 2009; Prins 2005).

De verwarmingsnelheid kan variëren van 10 tot 100 K/min tot een temperatuur van 900-1000°C. Hogere verwarmingsnelheden zorgen voor een uitstel van de verbranding van de verschillende biomassacomponenten zoals te zien is in Figuur 8 en Figuur 9, de pieken van de DTG curves verplaatsen zich naar hogere temperaturen. Daarnaast zal ook de temperatuur waarbij de verbranding van het staal volledig is, de burnout-temperatuur, hoger worden. Ook is in Figuur 9 geen schouderpiek meer te zien voor hemicellulose. Dat kan wederom verklaard worden door de vertraging van de afbraak van hemicellulose zodat de piek van hemicellulose samenvalt met die van cellulose (Shen et al. 2009; Yorulmaz & Atimtay 2009).

3 Structurele en energetische karakterisering

3.1 Materiaal en methode

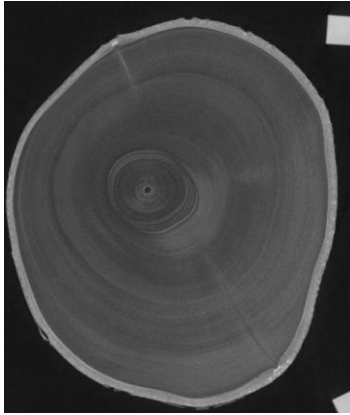
De stalen gebruikt in deze maserproef zijn afkomstig van een potproef waarbij boompjes werden overgehield onder een hoek van 30° en om de twee weken gedraaid werden. De stalen hebben eenzelfde leeftijd. De hellingsrichting werd aangegeven met een rode lijn op de schors. Door het hellen zijn trekhoutzones gevormd in de boompjes. De gebruikte soorten zijn den, eik, es, wilg en beuk. Van de boompjes zijn stamstukken op 20 cm hoogte genomen en in de diepvriezer bewaard om het originele vochtgehalte te behouden.

Nadien zijn van de stamstukken stalen van 2,5 cm dik en 0,5 cm dik gezaagd. De 2,5 cm stamschijven zijn ingescand met een flatbedscanner als kleurenbeelden (RGB) met een resolutie van 508 dpi of $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ per pixel. Met Matlab werd een beeldanalyse programma geschreven om van elke schijf de schijfoppervlakte, het aandeel hout en het aandeel schors te bepalen. Daarnaast geeft vermenigvuldiging van de schijfoppervlakte met de dikte het nat volume van de schijf. De schijven werden nat gewogen, ovensdroog gemaakt bij 103°C gedurende 48 uur en dan bij constante massa opnieuw gewogen om het vochtgehalte te bepalen. Het volumegewicht kan dan bepaald worden door de ovensdroge massa te delen door het nat volume. De ovensdroge stalen werden vermalen tot materiaal kleiner dan 2 mm en vervolgens is de calorische waarde bepaald met de bomcalorimeter.

3.1.1 X-ray scanner

De stamschijven van 0,5 cm dik werden in de oven gedroogd op 40°C gedurende 72 uur, ze zijn niet ovensdroog gemaakt om barsten te voorkomen. Nadien zijn ze gescand met een X-stralen CT scanner welke gebouwd is door het Ghent University Centre for X-ray Tomography (UGCT). De schijven zijn gescand volgens het helixscan principe waarbij het staal ronddraait en verticaal naar boven beweegt terwijl beelden worden genomen. Het scannen gebeurde met een spanning van 90 kV en 250 μA en een blootstellingstijd van 600 ms. De beelden hebben een resolutie van 60 μm en zijn nadien verwerkt in Octopus, een server/cliënt tomografie reconstructiepakket. Fluctuaties van de X-stralenbuis zijn opgevangen door een normalisatie met de achtergrond, beschadigde pixels werden uitgefilterd met een spot filter en de beam hardening werd gecorrigeerd met een beam hardening correctie (BHC). Na de verwerking werd een analyse uitgevoerd met Morpho+. Een helixscan afbeelding is weergegeven in Figuur 10.

De schijven zijn tijdens het scannen in een op maat gemaakte houder geplaatst. De houder is van een materiaal met gelijkaardige chemische samenstelling en volumegewicht als een houtcelwand (1,56 g/cm³). Door middel van de gekende volumegewicht van de houder en het volumegewicht van de lucht konden de grijswaarden van de scanbeelden omgezet worden naar volumegewichtwaarden.



Figuur 10: Helixscan afbeelding van wilg, schijf 201

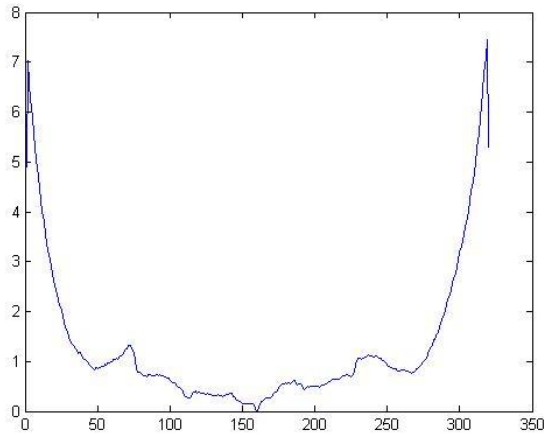
3.1.2 Short Wave Infrared (SWIR) scanner

De 0,5 cm schijven werden vervolgens gescand met een Short Wave Infrared (SWIR) hyperspectrale camera. De camera bestaat uit een InGaAs (Indium Gallium Arsenide) sensor en is gevoelig in het spectrale bereik van 800 tot 2500 nm. Het beeldvormingsprincipe gebeurt volgens de pushbroom methode zoals uitgelegd in 2.1.2. De outputbeelden hebben een dimensie van 320 x 256 pixels, 320 spatiale pixels en 256 spectrale pixels (golflengtes). De derde dimensie van de datacubes werden verkregen door translatie met de lijntafel of rotatie met een draaischijf.

De beeldcaptatie gebeurde met het softwarepakket X-control van XenICs. De captatie werd ingesteld met een integratietijd van 10 ms en een koelingstemperatuur van 190 K.

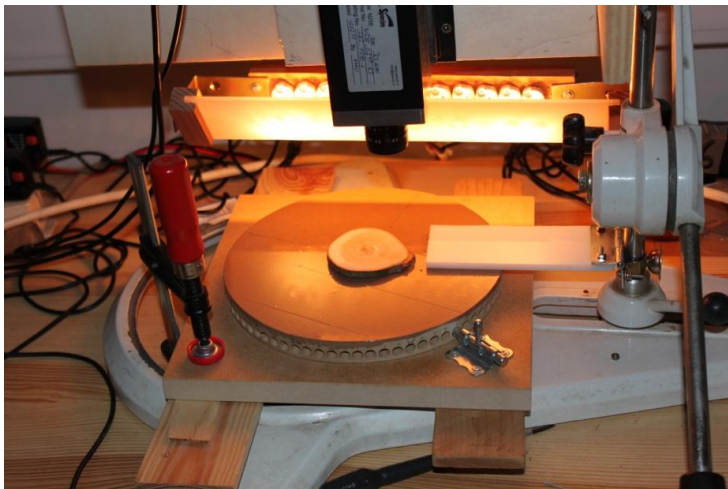
De belichting gebeurde met 12 radium halogeen lampen van 10W, elk met een aanpasbare voeding (3, 5, 6, 7.5, 9 of 12V). Door die regelbare voedingen kan de intensiteit van de buitenste lampen versterkt worden zodat het effect van de grotere afstand tot de lens verholpen wordt. De vier buitenste lampen werden ingesteld op 7.5 V intensiteit, de andere op 6 V.

De buitenste pixels van de detector hadden relatief t.o.v. de middelste pixel een variantie tot 7 % (Figuur 11). Omwille van die variantie werden de buitenste pixels niet gebruikt. De variantie is bepaald door een materiaal met een homogene samenstelling te scannen.



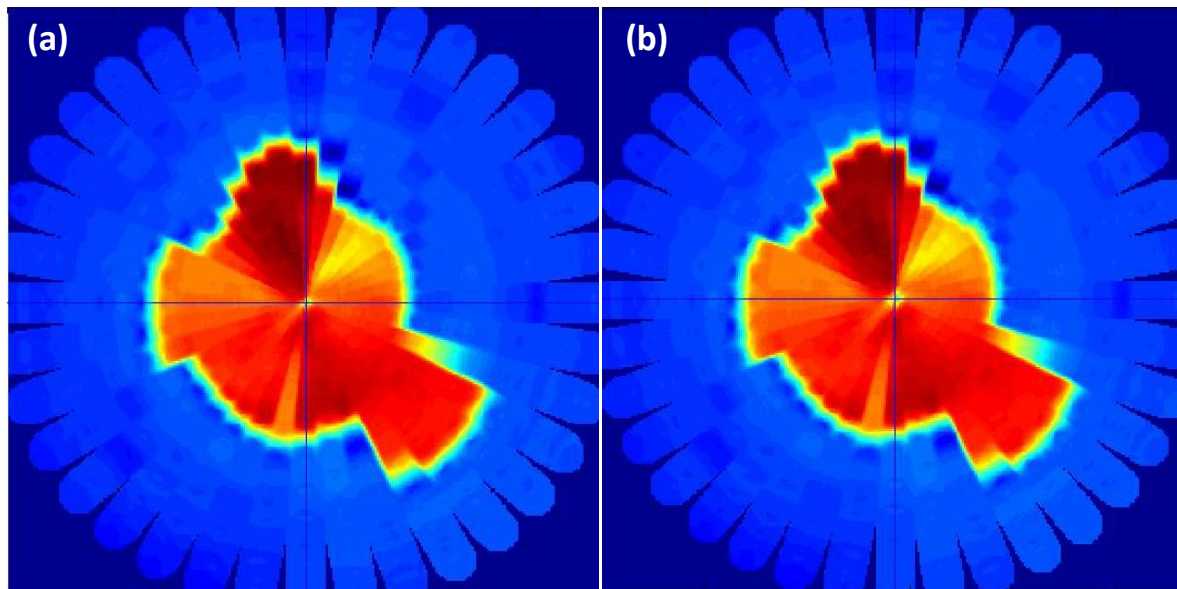
Figuur 11: Variantie van elke pixel t.o.v. de centrale pixel (x = 160)

Om een volledige opname van de schijven te maken werden de houtschijven groteerd op een draaischijf (Figuur 12). De schijven zijn zowel met stapgrootte 5° als 10° gescand om het verschil in detailgraad tussen beiden te bepalen. Van alle schijven zijn ook lijntrajecten gescand met behulp van de lijntafel.



Figuur 12: Foto van de draaischijf voor SWIR beeldvorming

De schijven werden gereconstrueerd in Matlab door middel van interpolatie. De positionering van de draaischijf t.o.v. de camera was van groot belang voor de reconstructie van de schijven. De draaischijf is gepositioneerd gebruik makend van een onregelmatig figuur, een dummy, welke telkens gescand en gereconstrueerd werd in Matlab. Indien het centrum van de draaischijf niet samenviel met het midden van het gereconstrueerd beeld was het centrum van de dummy zichtbaar als een grote cirkel of was het centrum van de dummy niet meer zichtbaar (Figuur 13) . Indien de draaischijf perfect in het midden van het gereconstrueerd beeld stond werd het centrum van de dummy een kleine stip. Daarnaast moest de scanlijn van de detector perfect samenvallen met de scanlijn op de draaischijf. Die positionering is gebeurd d.m.v. drie naalden op de scanlijn van de draaischijf te plaatsen. Als de scanlijn van de detector en de draaischijf perfect overeenkwamen waren de drie naalden zichtbaar op de gecapteerde beelden. De positionering van de scanlijn bij de lijntafel gebeurde eveneens gebruikmakend van de naalden.



Figuur 13: (a) dummy waarbij het centrum van de draaischijf perfect samenvalt met het midden van de detector, (b) dummy waarbij het centrum van de draaischijf niet samenvalt met het midden van de detector

De pixelgrootte voor zowel het scannen met de draaischijf als de lijntafel is bepaald met de formule:

$$W_i = \frac{W_p * D}{f} \quad \text{(Vergelijking 5)}$$

waarbij W_i de pixelgrootte op het staal voorstelt, W_p de pixelgrootte van de detector (30 μm in ons geval), D de afstand tot het staal (10,2 cm) en f de brandpuntafstand van de camera (16 mm). De pixelgrootte was 191,25 μm .

Zoals in de literatuurstudie staat is het noodzakelijk een model op te stellen om de SWIR-data te analyseren. In deze masterproef zijn de modellen opgesteld met Matlab in combinatie met de PLS-toolbox van Eigenvector. Door de grote hoeveelheid ruis in de lage en hoge golflengtes van de detector (Figuur 11) zijn enkel de data tussen spectrale pixels 20 en 220 gebruikt. Voor het trekhoutmodel zijn oppervlaktes trekhout en niet-trekhout, welke met het blote oog zichtbaar waren, gescand. Zoals aangehaald in de literatuurstudie is het aangewezen de beelden te 'preprocessen' met een standaardisatie, een 'mean centering' en een tweede afgeleide. Na de 'preprocessing' werd een 'random subsets' cross-validatie uitgevoerd.

Naast de grote hoeveelheid ruis bij de onderste en bovenste spectrale pixels was er ook een fluctuatie van de relatieve reflectantie, veroorzaakt door opwarming van het staal en van de lampen. Die fluctuatie werd verwijderd door 'preprocessing'.

Na de kalibratie van het model kon het model nog verbeterd worden door uitschieters te verwijderen. Daarvoor werd de Hotelling's T^2 verdeling gebruikt. Dat is een statistische toets voor de multivariate afstand van elke observatie tot het centrum van de dataset. De data liggen buiten de kritische limiet als:

$$T_i^2 > A \frac{(I^2 - I)}{I(I - A)} \cdot F_{critical,\alpha} \quad (\text{Vergelijking 6})$$

Waarbij T_i^2 de multivariate afstand is bepaald met de Hotelling's T^2 verdeling, I het totale aantal observaties in de kalibratieset is, A het gebruikt aantal latente variabelen en $F_{critical,\alpha}$ de kritische waarde van de F-distributie. In de PLS toolbox worden de uitschieters bij een 95% betrouwbaarheidsinterval weergegeven en kunnen die uitgesloten worden van het model. Het model kan na het verwijderen van de uitschieters gevalideerd worden met een testset, welke bestaat uit 1/3 van de data.

3.1.3 Bomcalorimetrie

Voor het bepalen van de verbrandingswaarde van de biomassa moet eerst de energie equivalent (EE) van de bomcalorimeter bepaald worden. De energie equivalent is de energie nodig om de temperatuur van een staal een graad (uitgedrukt als °C) te laten stijgen. Daarvoor wordt een 1g benzoëzuur (C_6H_5COOH , netto verbrandingswaarde van $26457 \pm 20 \text{ J g}^{-1}$) pellet verbrand. Het staal wordt in een verbrandingskroes afgewogen en vervolgens in de container (bom) geplaatst. Voor de ontbranding van het staal wordt een 10 cm chroomnikkel lont gebruikt. Voor de ontbranding wordt de bom gevuld met O_2 onder een druk van 3 MPa of 30 bar (450 psig). De bom wordt in een vat met twee liter gedemineraliseerd water geplaatst en verbonden met de ontstekingsdraden.

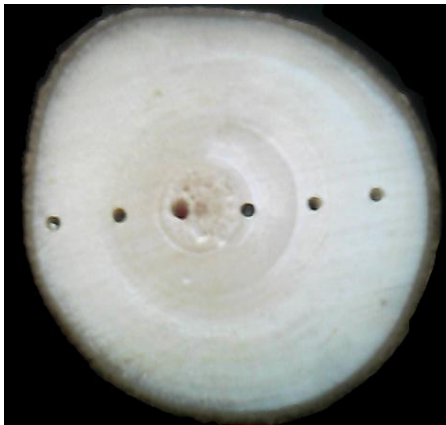
De stalen werden vermalen tot materiaal kleiner dan 2 mm, 0,7 g ($\pm 0,1$ g) werd afgewogen en samengeperst met de pelletpers van Parr Instruments. Nadien werden de stalen verbrand in de calorimeter volgens het hiervoor aangehaalde protocol. De stalen waren niet ovendroog. De bekomen HHV bij de verbranding in de bomcalorimeter werd aangepast met formule 6 om de HHV voor ovendroge biomassa te bekomen.

3.1.4 DSC-TGA

De differentiële scanning calorimetrie en de thermogravimetrische analyse werden uitgevoerd met de Sensys Evo van SETARAM Instrumentation.

Twee schijven, wilg en populier, zijn om de centimeter bemonsterd evenwijdig met de rode lijn. De staalname gebeurde met een kolomboor om de positie nauwkeurig te bepalen (Figuur 14). Het staal werd afgewogen in een platina kroesje welke daarna aan een balans werd opgehangen. Die balans was verbonden met een ander platina kroesje, de referentie, welke leeg was. Stalen die maximaal 2 mg wogen, werden verbrand met een verhittingsnelheid van 10K/min en een zuurstofstroom van 30ml/min.

Voor de dataverwerking met het softwarepakket Calisto is eerst een blanco, een analyse van een leeg kroesje, afgetrokken van het signaal. Dat om de fluctuatie van het gewicht en de warmteflux door de gasstroom te neutraliseren. De samenstelling werd bepaald door in de TG-curve de massaverliezen voor de verschillende componenten te bepalen. De begin- en eindtemperaturen van de verbranding van de verschillende elementen werd bepaald aan de hand van de DTG-curve, de eerste afgeleide van de TG-curve. De totale warmtestroom en geproduceerde energie van het staal werden bepaald aan de hand van de DSC-curve. Daarnaast werd de warmtestroom en geproduceerde energie per component bepaald met Calisto.



Figuur 14: Staalname voor DSC-TGA, vanaf rechts te beginnen

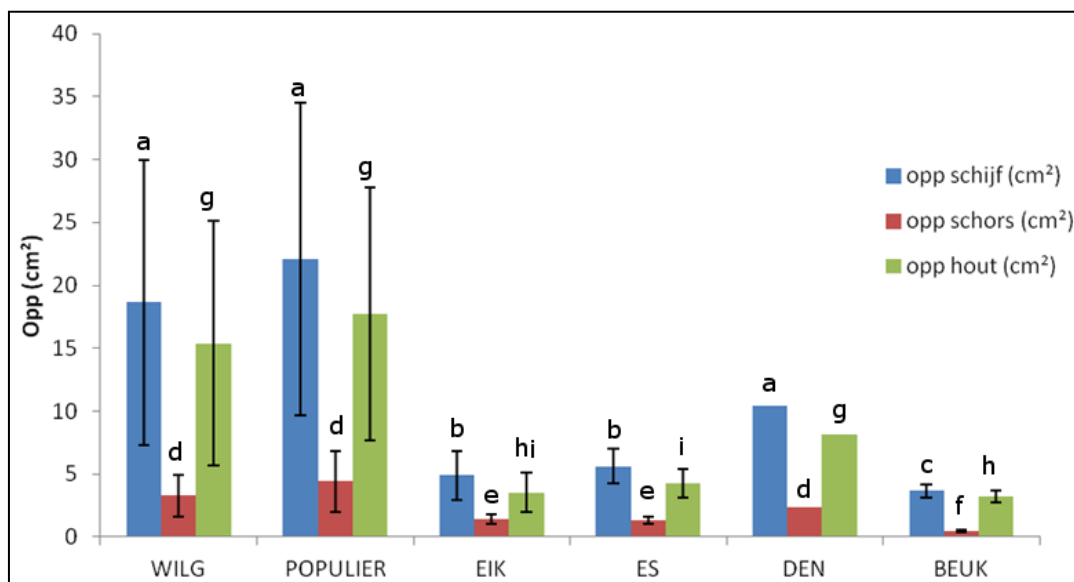
3.2 Resultaten

3.2.1 Biomassabepaling

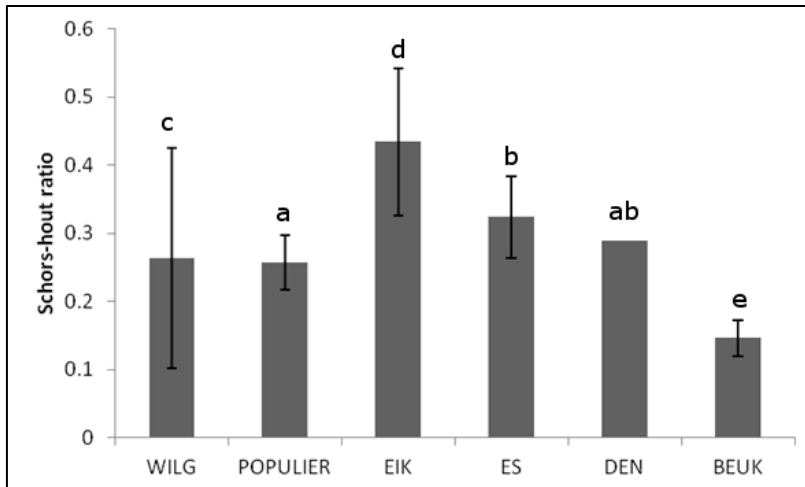
Een eerste parameter voor de structurele en energetische karakterisering is de hoeveelheid biomassa. Die kan bepaald worden door de omtrek te meten en daarbij het aandeel van het hout en de schors te registreren (Figuur 15). De verhouding tussen de gemiddelde oppervlakte van het hout en de schors is weergegeven door de schors-hout ratio (Figuur 16).

De normaliteit en homoscedasticiteit werden getest met respectievelijk de Kolmogorov – Smirnov GOF toets en de Modified Levene test. Indien aan deze voorwaarden voldaan was konden significante verschillen vastgesteld worden via One Way ANOVA. Wanneer de data niet normaal verdeeld en/of de te vergelijken groepen niet homoscedastisch waren werd de niet-parametrische Kruskal-Wallis toets gebruikt.

Uit de statistische analyse met SPSS blijkt dat alle data niet-normaal verdeeld zijn (Kolmogorov-Smirnov test, $p < 0,1$). De Kruskal-wallis test geeft een sterk significant verschil voor alle parameters ($p < 0,01$). Met de Mann-Whitney test werd dan bepaald tussen welke houtsoorten er significante verschillen zijn (Bijlage 1). Daaruit blijkt dat de schijfoppervlakte, de houtoppervlakte en de schorsoppervlakte, niet significant verschillen ($p > 0,1$) tussen wilg, populier en den. De schijf-, schors- en houtoppervlakte tussen eik en es zijn eveneens niet significant verschillend ($p > 0,1$). Voor beuk zijn de schijf- en schorsoppervlakte significant verschillend ($p < 0,01$) met de andere houtsoorten, de houtoppervlakte van beuk is niet significant verschillend t.o.v. eik. Voor de schors-hout ratio zijn er geen significante verschillen tussen populier en den ($p > 0,1$) en tussen es en den ($p > 0,1$). Voor alle andere soorten is de schors-hout ratio wel significant verschillend ($p < 0,05$).



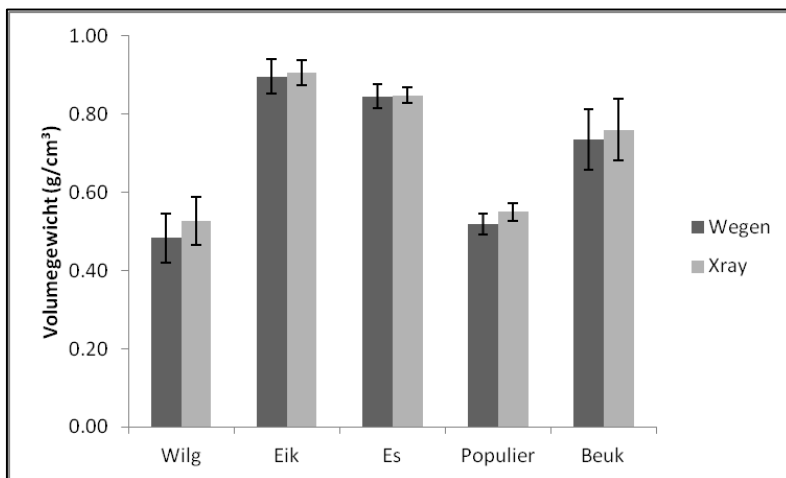
Figuur 15: De gemiddelde oppervlakte (cm²) van de volledige schijf, hout en schors per houtsoort, de significante verschillen zijn weergegeven met letters a t.e.m. i, voor den was er slechts één staal waardoor er geen spreiding aanwezig is



Figuur 16: De gemiddelde schors-hout ratio, verhouding tussen de schorsoppervlakte en de houtoppervlakte, voor de verschillende houtsoorten. De significante verschillen zijn weergegeven met letters a t.e.m. e.

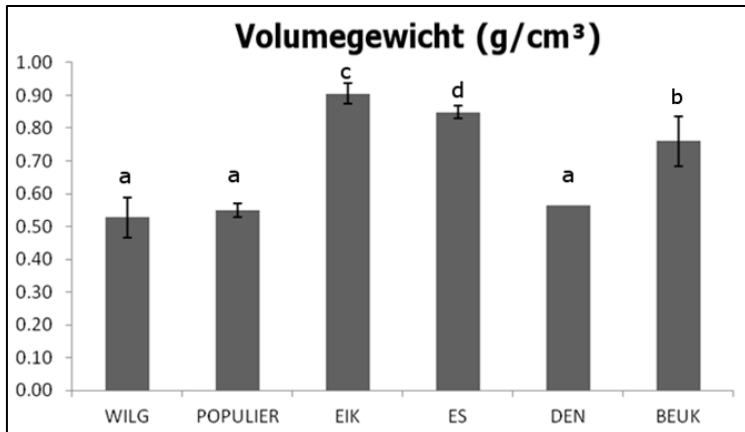
3.2.2 Volumegewichtsbepaling

Om na te gaan of X-stralen tomografie gebruikt kan worden voor volumegewichtsbepaling is X-stralen tomografie vergeleken met de klassieke methode, ovendroge massa delen door nat volume (Figuur 17). Het gemiddelde volumegewicht per schijf bepaald met de X-stralen tomografie verschilt maximaal $0,08 \text{ g/cm}^3$ van de volumegewichten bepaald met de klassieke methode.



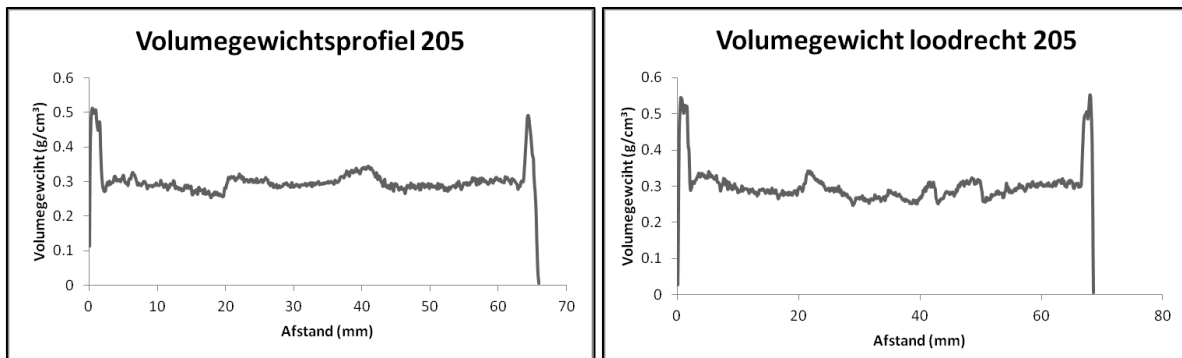
Figuur 17: Vergelijking van volumegewichtsbepaling met differentiël wegen en X-stralen tomografie

Het volumegewicht (gedroogd in de oven op 40°C gedurende 72 uur) is eveneens niet-normaal verdeeld (Kolmogorov-Smirnov test, $p < 0,1$). Met de Kruskal-Wallis test is aangetoond dat er sterk significante verschillen ($p < 0,01$) zijn tussen de verschillende houtsoorten. Als de soorten worden vergeleken is duidelijk dat den, populier en wilg niet significant verschillen van elkaar (Mann-Whitney test, $p > 0,1$). Voor alle andere soorten is het volumegewicht significant verschillend (M-W test, $p < 0,05$) (Bijlage 1).

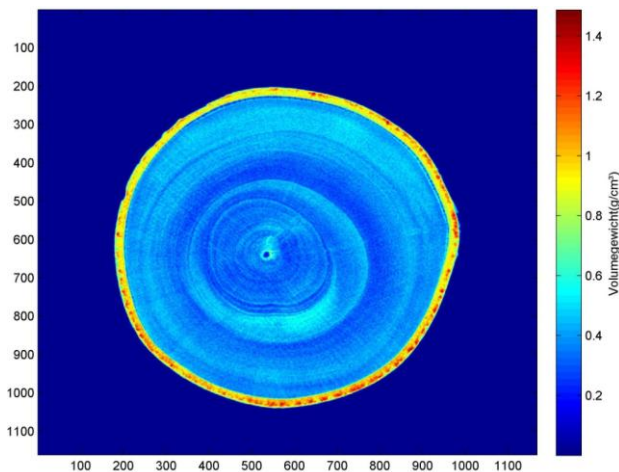


Figuur 18: Gemiddelde volumegewicht per houtsoort bij ovengedroogd hout (72 uur op 40°C), de significante verschillen zijn weergegeven met letters a t.e.m. d

In Figuur 20 is de volumegewichtreconstructie voor schijf 207 weergegeven. Met behulp van Matlab werd van elke schijf een volumegewichtprofiel gemaakt evenwijdig met de rode lijn en loodrecht hierop (Figuur 19). Zo kunnen de volumegewichtverschillen binnenin de schijven gevisualiseerd worden. De profielen van alle schijven staan in bijlage 5.



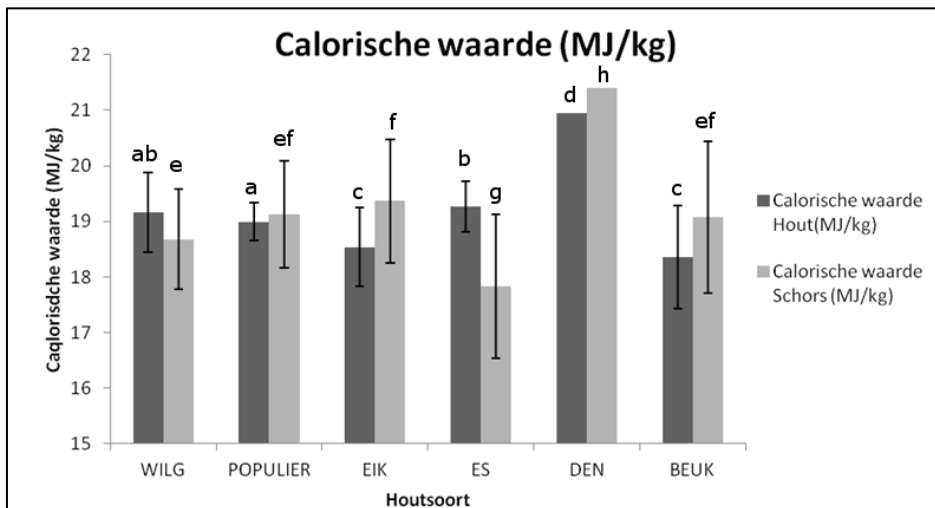
Figuur 19: Volumegewichtprofiel van X-stralen tomografie, linkse beeld is het profiel evenwijdig met de rode lijn, het rechtse beeld is het profiel loodrecht hierop



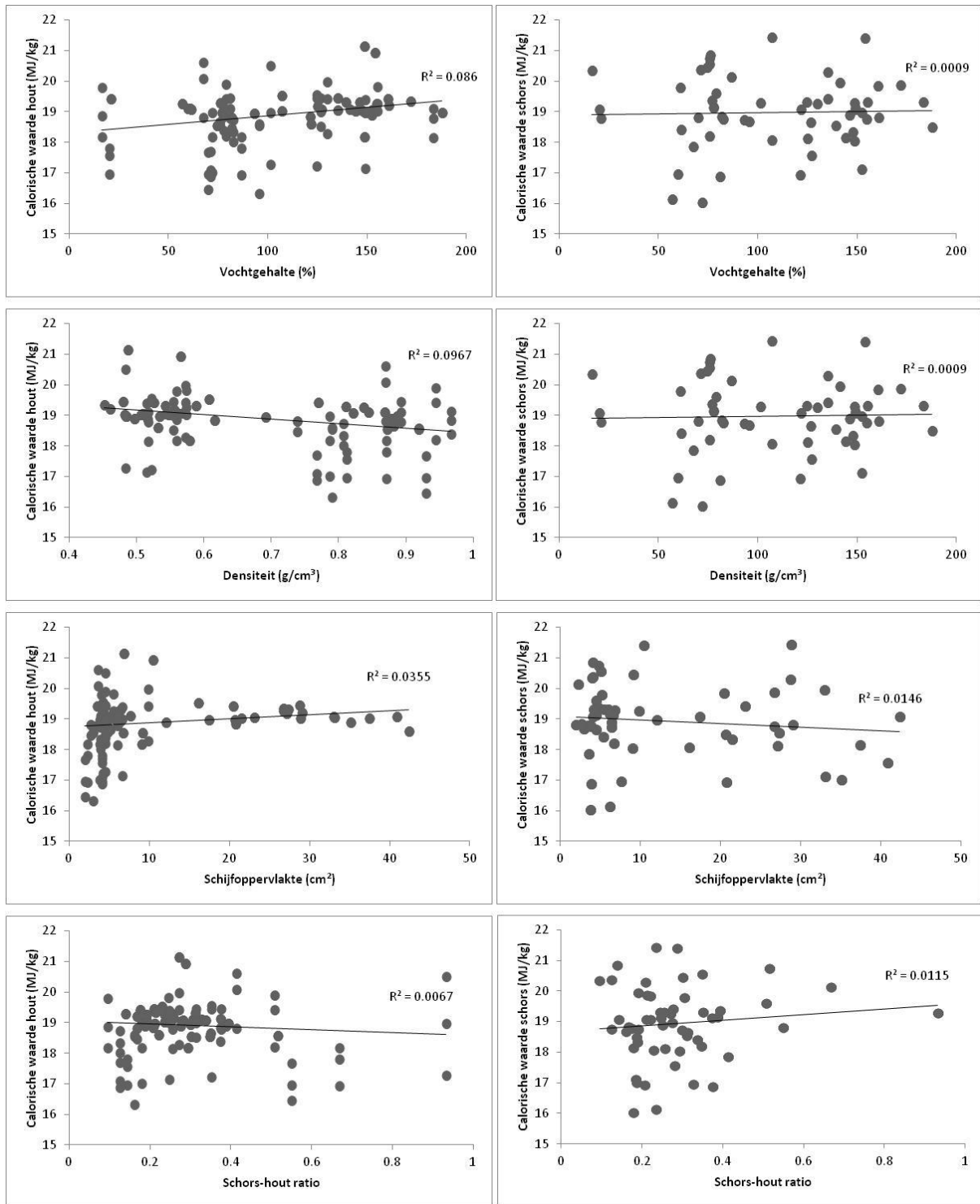
Figuur 20: Volumegewichtreconstructie (g/cm³) voor schijf 207 (wilg)

3.2.3 Calorische waarde

De data van de calorische waarde zijn niet-normaal verdeeld (Kolmogorov-Smirnov test, $p > 0,01$). De Kruskal-Wallis test toont aan dat er sterk significante verschillen ($p < 0,01$) zijn tussen de calorische waarden, zowel voor hout als schors, tussen de verschillende houtsoorten. De Mann-Whitney test (Bijlage 1) geeft voor de calorische waarde van hout geen significante verschillen ($p > 0,1$) tussen wilg en populier, tussen wilg en es en tussen beuk en eik. Tussen alle andere houtsoorten zijn er significante verschillen ($p < 0,05$). Voor de calorische waarde van schors zijn er geen significante verschillen ($p > 0,1$) tussen populier, wilg en beuk en tussen populier, beuk en eik. Voor es is de calorische waarde van de schors significant lager ($p < 0,05$) t.o.v. de anderen. De verschillen tussen de calorische waarde van de verschillende soorten zijn niet gecorreleerd met het vochtgehalte, het volumegewicht, de schijfoppervlakte of de schors-hout ratio, zoals blijkt uit Figuur 22.



Figuur 21: Gemiddelde calorische waarde van de verschillende houtsoorten, de significante verschillen zijn weergegeven met letters a t.e.m. h



Figuur 22: Correlaties tussen calorische waarde (MJ/kg) voor zowel schors als hout en de andere parameters

De calorische waarden voor hout bekomen in deze masterproef zijn vergeleken met de literatuur (Tabel 2). De data zijn normaal verdeeld maar heteroscedastisch. De niet-parametrische Kruskal-Wallis test geeft geen significante verschillen ($p > 0,1$) tussen de onderzoeksresultaten en de literatuurgegevens, enkel voor populier is er een zwak significante aanduiding ($p < 0,1$) voor verschil.

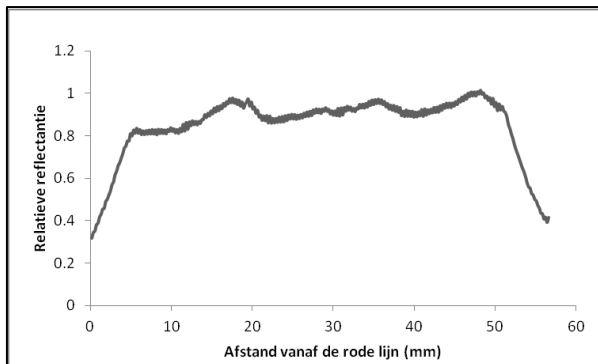
Tabel 2: Vergelijking van de higher heating values (HHV) in MJ/kg met literatuurgegevens

Higher Heating Value (HHV) in MJ/kg					
	Onderzoeksresultaten	Telmo & Lousada, 2011	Butterman & Castaldi, 2009	Phyllis ECN	TU Wien
Beuk	18.4 ± 0.93	19.1	-	18.8	18.5
Eik	18.5 ± 0.71	18.7	20.0	19.1	19.8
Wilg	19.2 ± 0.71	18.3	-	18.6	19.2
Populier	19.0 ± 0.34	18.8	19.7	19.0	20.3
Den	20.9	-	20.0	20.2	20.9

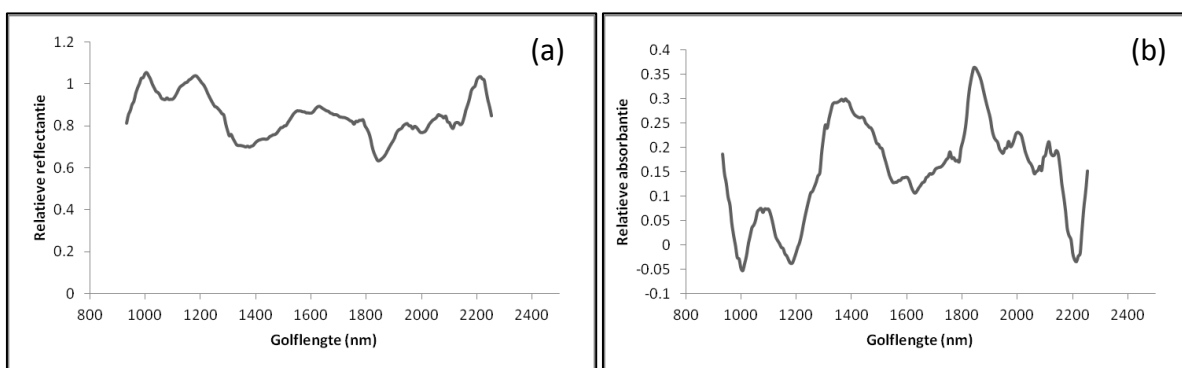
3.2.4 SWIR-beeldvorming

De calorische waarde is afhankelijk van de chemische samenstelling van het hout. Zoals eerder aangegeven is het gebruik van SWIR-beelden een goede manier om de chemische samenstelling snel en niet-destructief te bepalen. Een eerste onderzoeksparameter is de aanwezigheid van trekhout in de stalen. Dat werd geanalyseerd d.m.v. SWIR-beelden en Matlab in combinatie met de Eigenvector PLS-toolbox.

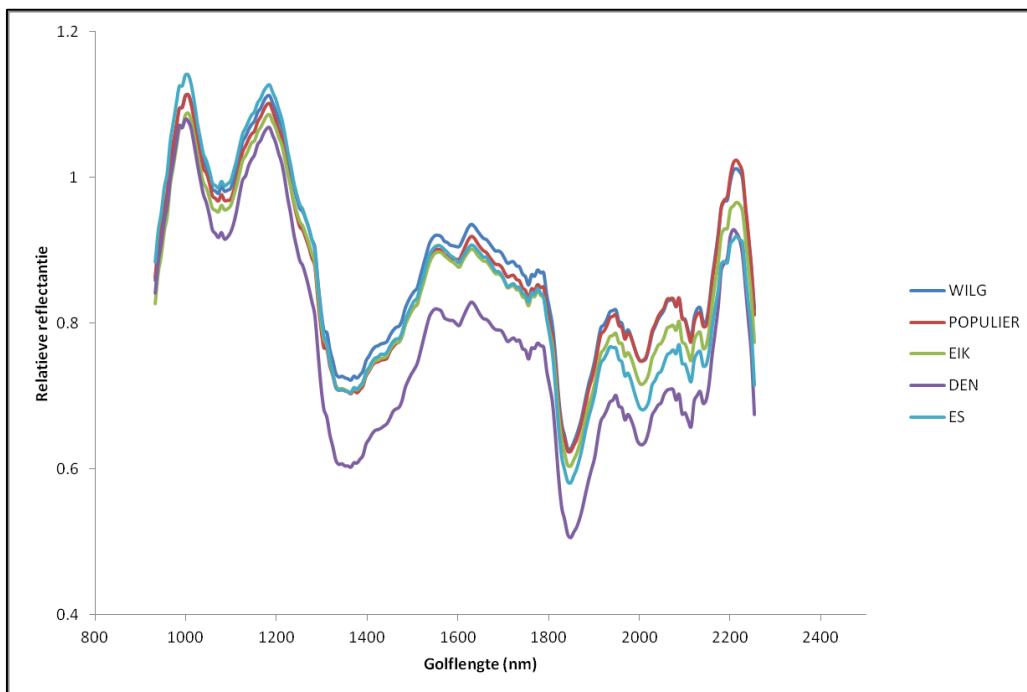
In Figuur 23 is de relatieve reflectantie in functie van de schijflengte vanaf de rode lijn weergegeven. In Figuur 24 is de relatieve reflectantie en relatieve absorptantie (1-reflectantie) weergegeven voor schijf 207. In Figuur 25 is de gemiddelde reflectantie per houtsoort weergegeven. Daaruit blijkt dat wilg en populier de hoogste reflectantie hebben en den een reflectantie welke opmerkelijk lager is dan de rest. De relatieve reflectanties voor alle schijven staat in de fiches in bijlage 5.



Figuur 23: De gemiddelde relatieve reflectantie vanaf de rode lijn voor schijf 207 (wilg), uitgemiddeld over de golflengtes

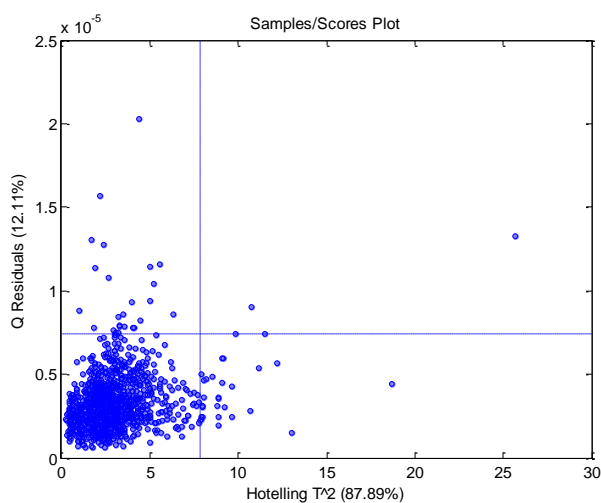


Figuur 24: Relatieve reflectantie (a) en relatieve absorptantie (b) voor schijf 207 (wilg), uitgemiddeld over alle pixels

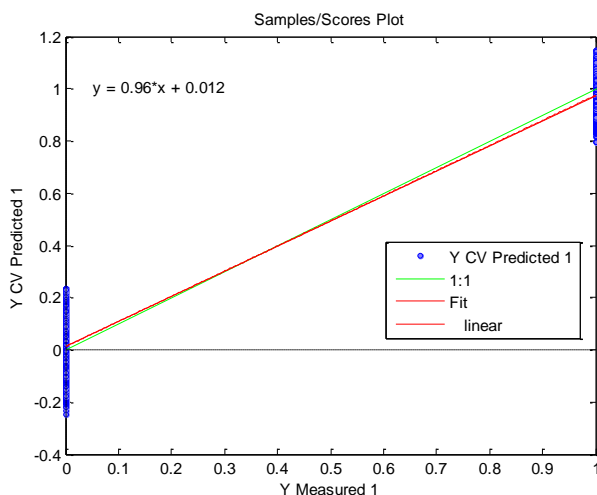


Figuur 25: Gemiddelde relatieve reflectantie in functie van de golflengte voor alle houtsoorten

De trekhoutmodellen zijn zoals eerder aangehaald gemaakt met behulp van Matlab en de Eigenvector PLS-toolbox. Voor de X-matrix werden de beelden van de scans van trekhout- en niet-trekhoutzones gebruikt. De Y-matrix is een matrix met nullen (niet-trekhout) en enen (trekhout). Figuur 26 geeft de plot van de uitschieters weer, de datapunten boven en rechts van de 95% betrouwbaarheidsintervallijn zijn uitschieters, die verwijderd worden. De validatie van de trekhoutmodellen is weergegeven in bijlage 2. De gescande schijven zijn pixel per pixel in het model geladen om zo per pixel een trekhoutvoorspelling uit te voeren. Die voorspellingen zijn m.b.v. K-means clustering geanalyseerd om de trekhoutzones te bepalen. Met Matlab zijn dan voor de wilg- en populierschijven schijfreconstructies uitgevoerd met de trekhoutzones (Figuur 29). Alle schijfreconstructies voor trekhout zijn weergegeven in de fiches in bijlage 5.

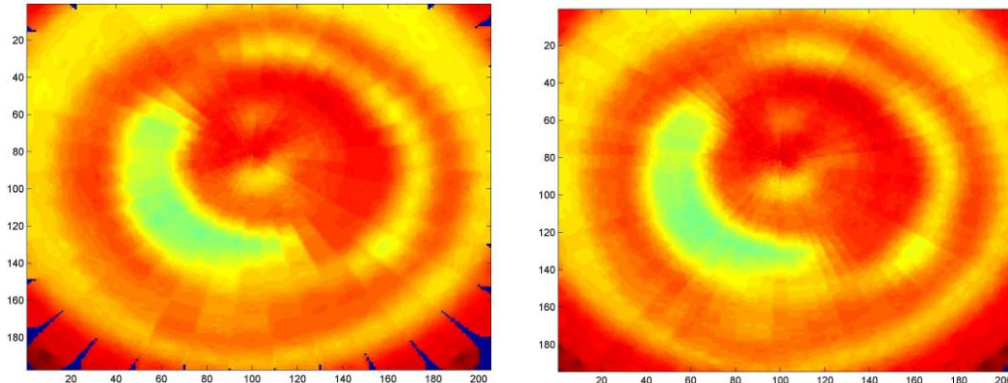


Figuur 26: Plot van de uitschieters, de blauwe streepjeslijn is het 95% betrouwbaarheidsinterval

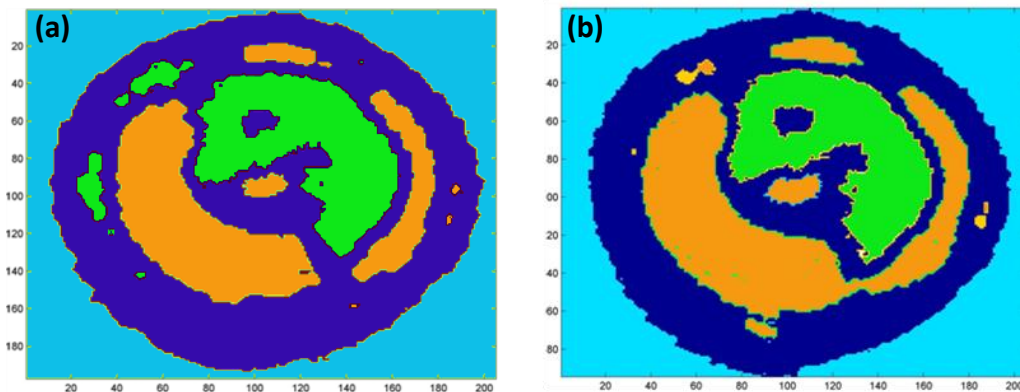


Figuur 27: Trekhoutmodel voor de lijnscans van wilg, de rode lijn is de rechte van de kalibratie, de groene lijn is de optimale rechte

Om het verschil in detail te bepalen tussen het scannen van de schijven met een draaihoek van 5° en 10° zijn beide methoden vergeleken (Figuur 28). De reconstructies van de SWIR-beelden geven geen grote variatie voor beide draaihoeken (Figuur 29). Om het detailverschil in de voorspellingen te vergelijken zijn voor wilg en populier trekhoutmodellen opgesteld.



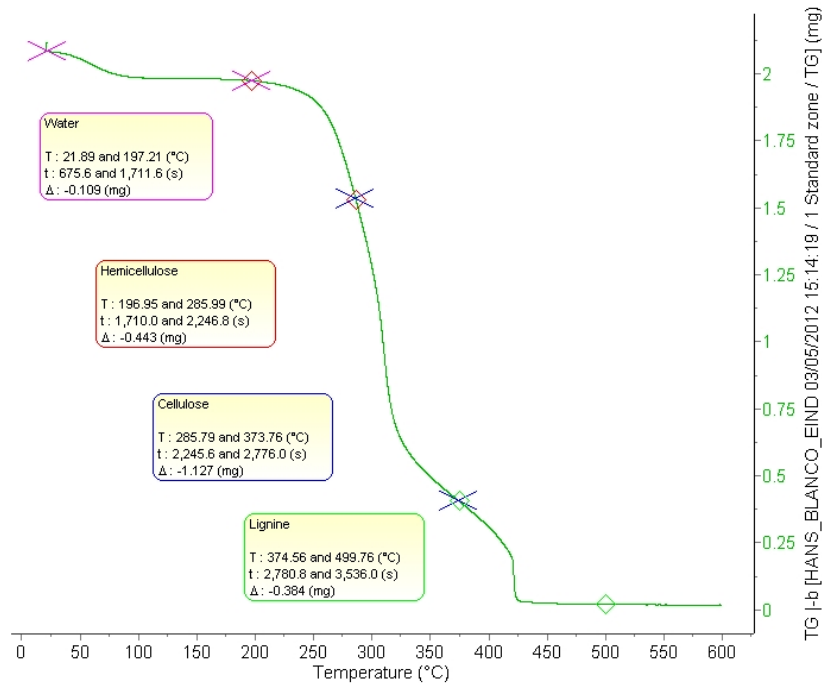
Figuur 28: Reconstructie van de geïnterpoleerde schijf 255 met een stapgrootte van 10° (linkse beeld) en 5° (rechtse beeld)



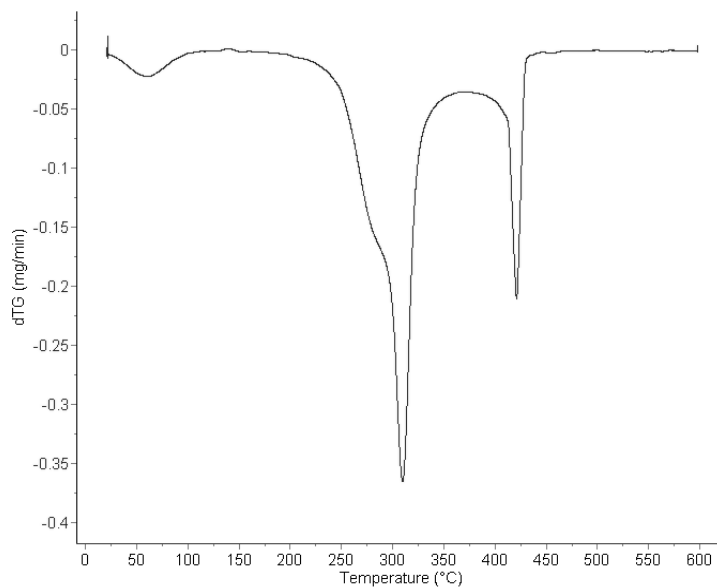
Figuur 29: Voorspelling van de trekhoutzones van schijf 255 met behulp van het trekhoutmodel voor draaischijf van populier, links de voorspelling voor rotatiestap van 10° (a) en 5° (b), de trekhoutzones zijn in oranje aangegeven.

3.2.5 Chemische samenstelling

Om de chemische samenstelling te koppelen aan de SWIR-beelden zijn twee schijflengtes bemonsterd en geanalyseerd in de TGA. In Figuur 30 is de TG-curve weergegeven met het gewichtsverlies voor de belangrijkste componenten voor schijf 207. De DTG-curve (Figuur 31) toont de eerste afgeleide van de TG-curve. De chemische samenstelling is weergegeven in Tabel 3. De bekomen resultaten zijn eerste resultaten en vereisen nog verdere verfijning.



Figuur 30: TG-curve voor eerste staal van schijf 207

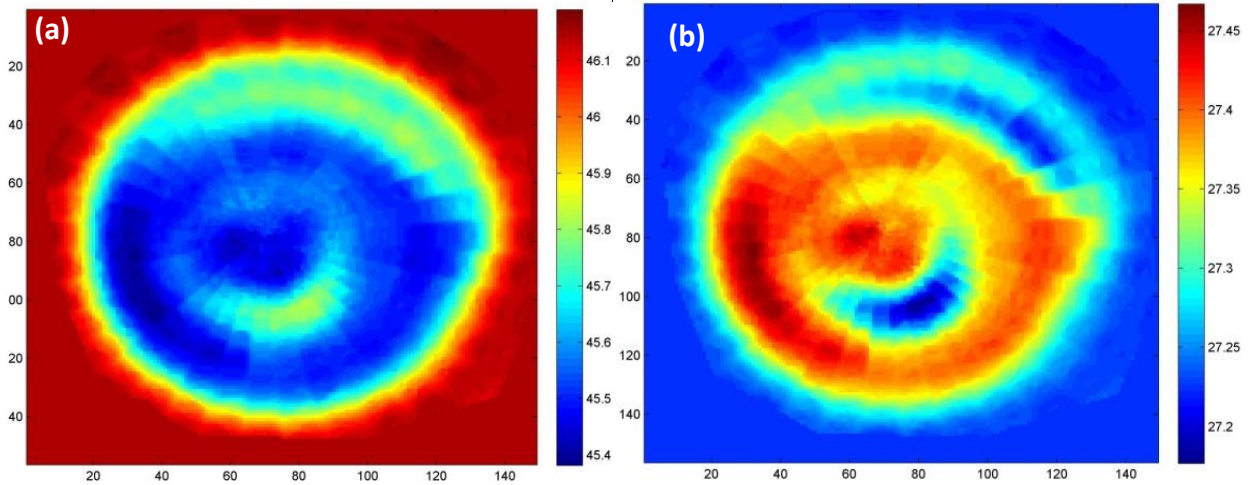


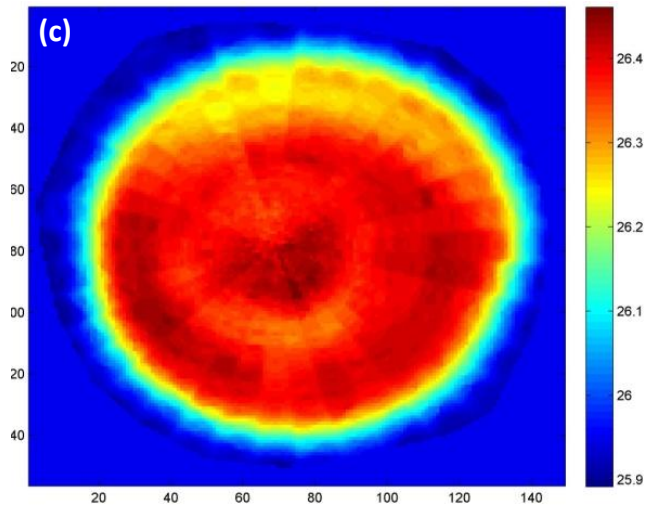
Figuur 31: DTG-curve voor eerste staal van schijf 207

Tabel 3: Gewicht van de componenten (mg) en chemische samenstelling (%) op 5 en 6 plaatsen voor respectievelijk schijven 207 en 264

Staal	Water (mg)	Hemicellulose (mg)	Cellulose (mg)	Lignine (mg)	Hemicellulose gehalte (%)	Cellulose gehalte (%)	Lignine gehalte (%)
207A	0.109	0.443	1.127	0.384	22.67	57.68	19.65
207B	0.112	0.422	1.272	0.390	20.25	61.04	18.71
207C	0.145	0.386	1.303	0.432	18.20	61.43	20.37
207D	0.116	0.445	1.194	0.370	22.15	59.43	18.42
207E	0.091	0.311	1.509	0.086	16.32	79.17	4.510
264AA	0.091	0.365	1.156	0.395	19.05	60.33	20.62
264B	0.100	0.335	1.744	0.092	15.43	80.33	4.240
264C	0.114	0.423	1.100	0.371	22.33	58.08	19.59
264D	0.106	0.491	1.105	0.368	25.00	56.26	18.74
264E	0.118	0.443	1.181	0.417	21.71	57.86	20.43
264F	0.097	0.507	1.206	0.117	27.70	65.90	6.390

Met behulp van Matlab en de PLS-toolbox zijn modellen gemaakt voor het cellulose-, hemicellulose- en ligninegehalte. De X-matrix was telkens de SWIR-reflectantie, uitgemiddeld over de verschillende golflengtes, voor de pixels die bemonsterd zijn met TGA. De Y-matrix waren het cellulose-, hemicellulose- en ligninegehalte bepaald met de TGA. Met de bekomen voorspellingswaarden van die modellen zijn schijfreconstructies gemaakt om zo de chemische samenstelling van de schijf te voorspellen. In Figuur 32 is de reconstructie van schijf 255 weergegeven, de reconstructies van alle schijven staan in Bijlage 5.

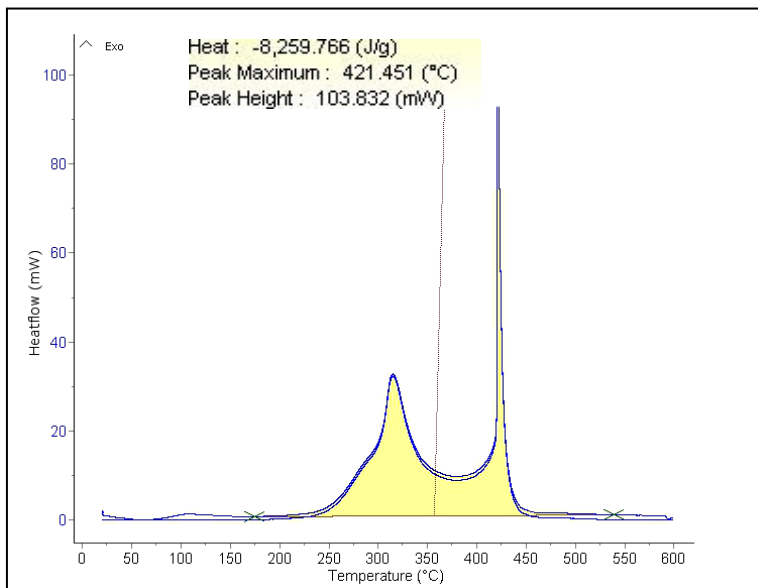




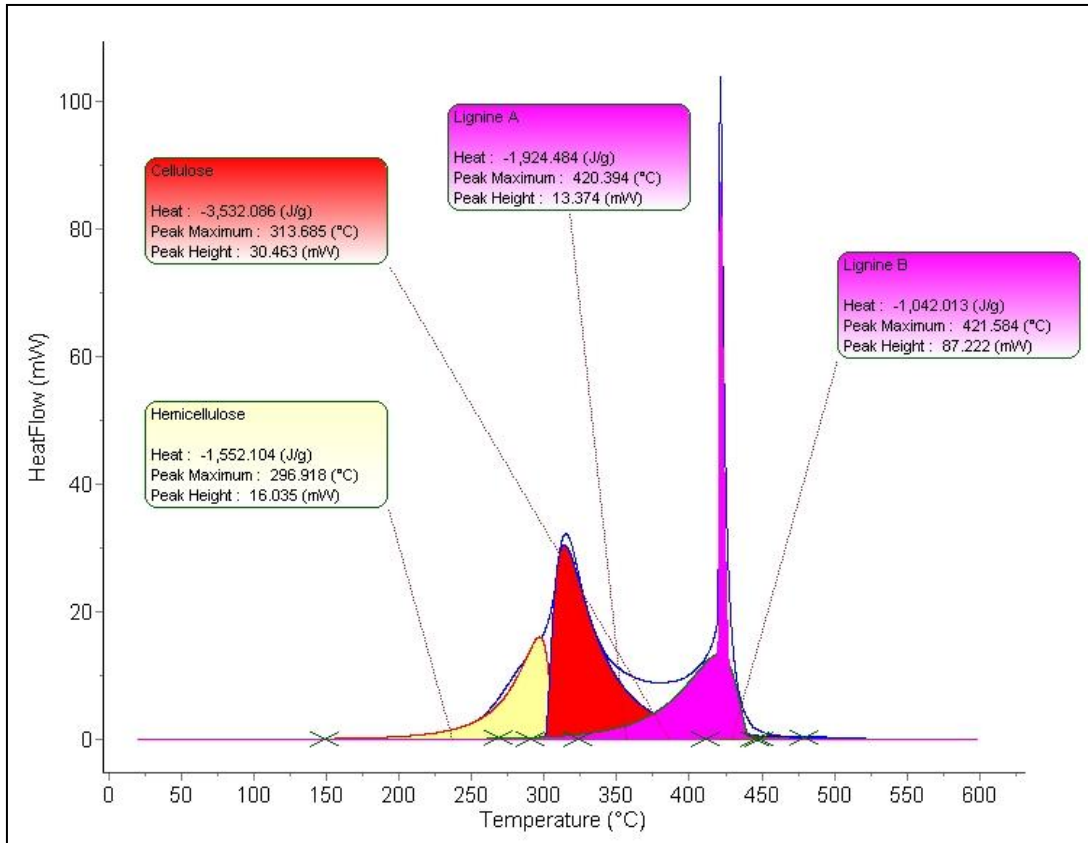
Figuur 32: Schijfreconstructies van de chemische samenstelling (%) voor schijf 207 (wilg)
 (a) is het cellulosegehalte, (b) het hemicellulosegehalte en (c) het ligninegehalte

3.2.6 Energie-inhoud

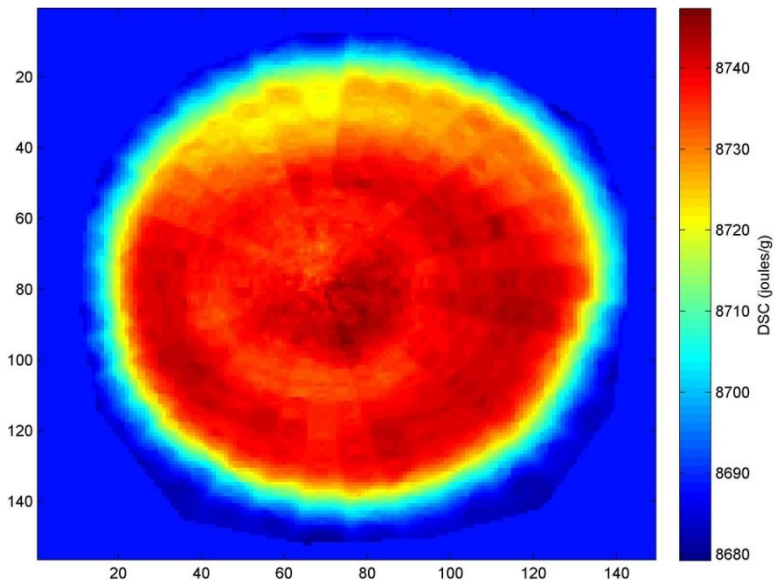
In Figuur 33 is de energie en de warmtestroom voor het eerste staal van 207 weergegeven. De vrijgekomen energie (8,26 kJ/g) komt niet overeen met de calorische waarde gevonden met de bomcalorimeter. In Figuur 34 is een schatting van de warmtestroom en de energie per component weergegeven. In Tabel 4 is de vrijgekomen energie per staal weergegeven. Daaruit blijkt dat er grote verschillen zijn tussen de verschillende meetpunten.



Figuur 33: Totale heatflow (mW) en energie (kJ/g) voor het eerste staal van 207



Figuur 34: Heatflow (mW) en energie (kJ/g) per component voor eerste staal van 207



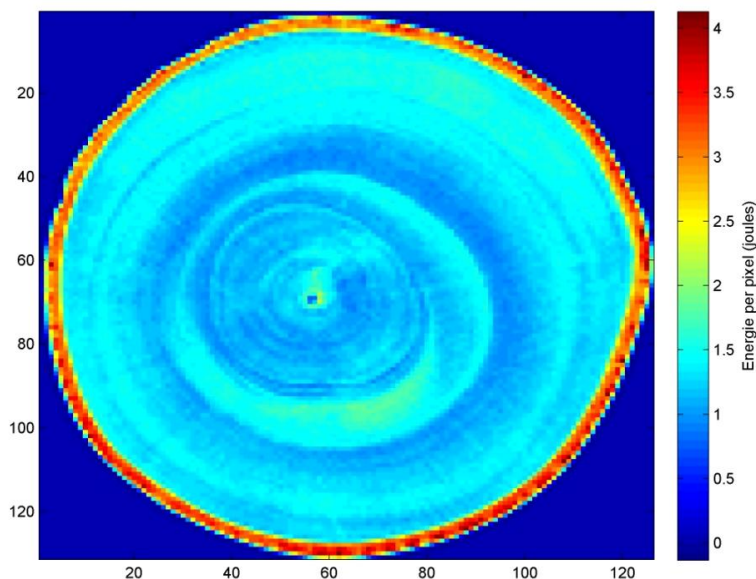
Figuur 35: Schijfreconstructies van de energetische waarde (J/g) bepaald met DSC voor schijf 207 (wilg)

Tabel 4: De energie (J/g) per staal

Staal	Hitte (J/g)			
	Totaal	Hemicellulose	Cellulose	Lignine
207A	8259.766	1552.104	3532.086	2966.497
207B	8254.736	678.853	4331.728	3334.395
207C	8209.764	798.629	6065.86	1550.334
207D	7541.798	421.7	4574.223	2295.103
207E	7278.809	910.329	4399.779	1054.325
264AA	8352.154	616.686	4070.091	3323.761
264B	7836.44	499.52	5891.243	1264.214
264C	8086.601	1674.518	4832.55	1463.634
264D	7895.333	1416.24	3180.187	3118.638
264E	8497.104	2479.616	2987.963	2860.37
264F	7573.947	2446.184	3576.552	1308.286

3.2.7 Energie-inhoud per pixel

Om de energie per pixel te voorspellen zijn de voorspellingen voor de energetische waarde bepaald met de DSC (Figuur 35) vermenigvuldigd met het volumegewicht bepaald met de X-ray scanner (Figuur 20). De voorspellingen van de energetische waarde waren op basis van de SWIR-beelden. Die hadden een resolutie van 191,25 μm . De X-stralen beelden hadden een resolutie van 60 μm . De resoluties zijn dus eerst op elkaar afgestemd vooraleer ze te vermenigvuldigen zodat het uiteindelijke beeld een resolutie had van 191,25 μm . De voorspelling van de energie per pixel is weergegeven in Figuur 36. Daarbij moet opgemerkt worden dat de energie voor de schors in realiteit niet zo hoog is. De minerale componenten leveren per definitie weinig energie maar hebben wel een erg hoge dichtheid.



Figuur 36: Energievoorspelling (joules) per pixel voor schijf 207 (wilg)

3.3 Discussie

Uit de analyse van de biomassaproductie volgt duidelijk dat de biomassa van snelgroeiende soorten (wilg en populier) en van naaldhout twee à vier keer groter is dan die van traaggroeiende soorten (eik, es en beuk). De schors-hout ratio voor eik en es zijn hoger dan de andere, wat te verklaren is door hun kleine schijfoppervlakte. De schors-hout ratio van beuk is significant kleiner dan van de andere soorten.

Voor het volumegewicht is het duidelijk dat X-stralen tomografie een goede manier is voor volumegewichtbepaling. Zo geeft het een duidelijk verschil tussen traaggroeiende soorten (eik, es en beuk) en snelgroeiende soorten (populier, wilg en den), het volumegewicht van de traaggroeiende soorten is 0,2 à 0,4 g/cm³ hoger. Uit de lijnprofielen van het volumegewicht is af te leiden dat het volumegewicht van schors ongeveer 0,2 g/cm³ hoger ligt dan van hout. Hierbij moet er rekening gehouden worden met kristallen in de schors die het volumegewicht kunnen verhogen.

De calorische waarde, zowel van hout als van schors, is bij den hoger dan bij de andere soorten. Daarnaast is er voor de calorische waarde van het hout geen significant verschil tussen wilg en populier, tussen wilg en es en tussen beuk en eik. De calorische waarden voor hout van beuk en eik zijn dus lager dan die van wilg, populier en es. Voor de calorische waarde van schors zijn er geen significante verschillen tussen populier, wilg en beuk en tussen populier, beuk en eik. De calorische waarde van schors bij es ligt significant lager dan de rest. De verschillen in calorische waarde zijn niet te correleren met het vochtgehalte, het volumegewicht, de schijfoppervlakte of de schors-hout ratio.

Op energetisch vlak hebben de snelgroeiende populieren en wilgen dus een veel hogere biomassaproductie, een iets hogere calorische waarde voor het hout en een gelijkaardige calorische waarde voor de schors. Echter is het volumegewicht van de snelgroeiende soorten lager dan die van traaggroeiende soorten (resp. circa 0,5 g/cm³ en 0,75-0,9 g/cm³). Zoals blijkt uit de schatting van de verbrandingsenergie voor schijven van 1 cm dik (Tabel 5) leveren de snelgroeiende soorten meer verbrandingsenergie dan de traaggroeiende soorten. Een kanttekening hierbij is dat in Tabel 5 geen rekening is gehouden met de warmteoverdracht. Traaggroeiende soorten zullen namelijk bij verbranding hun warmte trager afgeven en zullen daarom belangrijker zijn als brandhout.

Tabel 5: Schatting van de verbrandingsenergie bij het verbranden van schijven van 1 cm dikte, de weergegeven waarden zijn de gemiddeldes per houtsoort, de standaardafwijking wordt verwaarloosd in deze berekeningen

Schatting verbrandingsenergie voor schijven van 1 cm dikte						
	WILG	POPULIER	EIK	ES	DEN	BEUK
opp schijf (cm ²)	18.66	22.12	4.90	5.60	10.43	3.66
Volumegewicht (g/cm ³)	0.53	0.55	0.91	0.85	0.56	0.76
Gewicht (g)	9.84	12.15	4.44	4.75	5.89	2.79
Calorische waarde Hout(MJ/kg)	19.16	18.99	18.54	19.27	20.94	18.36
Calorische waarde Schors (MJ/kg)	18.68	19.12	19.36	17.83	21.40	19.08
Calorische Waarde hout en schors (MJ/kg)	18.92	19.05	18.95	18.55	21.17	18.72
Verbrandingsenergie (KJ)	186.11	231.57	84.10	88.07	124.76	52.14

Als de relatieve absorptantie van de SWIR-scanner vergeleken wordt met de relatieve absorptantie van Kelley et al. (2004) is duidelijk dat de aanwezige pieken overeenstemmen, maar dat de golflengte waarbij de pieken zich manifesteren verschillend is. In de literatuur vinden de pieken plaats bij een golflengte welke circa 100 nm hoger ligt. Als de relatieve reflectanties van de verschillende soorten vergeleken worden (Figuur 25) dan geven wilg en populier de hoogste relatieve reflectantie en is die van den opmerkelijk lager dan de rest.

Voor de vergelijking van een draaihoek van 5° en 10° bij het scannen met de draaischijf is er geen noemenswaardige verbetering van de details. Het is dus efficiënter de schijven in te scannen met een draaihoek van 10°, omdat dit de werktijd halveert.

Voor de validatie van de trekhoutmodellen liggen de R²-waarden van de kalibratie en de voorspelling boven 0,83. De trekhoutmodellen zijn dus geschikt voor onderzoeksdoeleinden. De biaswaarden liggen dicht bij nul, wat aangeeft dat er een verwaarloosbaar systematische afwijking tussen de gemeten en de voorspelde data aanwezig is. Een RMSEP van ongeveer 2 geeft aan dat de voorspellingsaccuraatheid perfect is. De lage RMSEP-waarden in deze masterproef (bijlage 2) wijzen dus op een mindere voorspellingsaccuraatheid. De lage RMSEC-waarden geven aan dat de kalibratie-accuraatheid eveneens minder is.

Voor de modellen welke de chemische samenstelling voorspellen liggen de R²-waarden eveneens boven 0,83 (bijlage 3) en zijn de modellen dus geschikt voor onderzoek. De bias is zeer klein, tot zelfs 0 bij het cellulosemodel. Er is dus zo goed als geen systematische afwijking voor de kalibratiedata en de validatiedata. De RMSEC van het cellulose- en het ligninemodel liggen boven de 1,1 wat overeenkomt met de RMSEC-waarden van Kelley et al. (2004) voor hun ligninemodel (Tabel 6). Voor het hemicellulosemodel is de RMSEC ongeveer 0,3, wat dan weer opmerkelijk lager is dan de twee andere modellen. De RMSEP van het cellulosemodel is ongeveer 1, voor het hemicellulose- en het ligninemodel is dit respectievelijk 0,77 en 0,76. De RMSEP-waarden liggen dus hoger dan bij de trekhoutmodellen en liggen al dichter bij 2, de optimale voorspellingsaccuraatheid, maar zijn lager dan de RMSEP-waarden van Kelley et al. (2004).

Tabel 6: Validatiegegevens uit enkele artikels met gelijkaardige modellen op houtige biomassa

	Kelley et al. 2004		Nkansah & Dawson-Andoh 2010		Jones et al. 2006		
	Lignine	Glucose	Totale lignine	Holocellulose	Cellulose	Hemicellulose	Totale lignine
R^2_{cal}	0.81	0.9	0.86	0.48	0.8	0.59	0.85
$RMSEC_{cal}$	1.1	2.4	0.0409	0.0176			
R^2_{val}	0.76	0.78	0.88	0.48	0.68	0.3	0.51
RMSEP	1	2.7	0.0436	0.0175			
Bias			0.0051	0.0016			

Als de reconstructies van de voorspelling van de chemische samenstelling vergeleken worden met de trekhoutreconstructies komt het hogere cellulosegehalte van de trekhoutzones duidelijk naar voor.

De DTG-curves voor populier en wilg hebben net zoals de DTG-curves in de literatuur (Figuur 7 en Figuur 8) een cellulosepiek bij ca. 320°C en een hemicellulose 'schouder' bij ca. 290°C. De ligninepiek in Figuur 31 ligt iets lager, ca. 430°C.

De TGA-gegevens geven een chemische samenstelling voor wilg van 16-22 % hemicellulose, 57-79 % cellulose en 4,5-20 % lignine. Voor populier komt dit op 15-27 % hemicellulose, 56-80 % cellulose en 4-20 % lignine. De cellulosewaarden zijn opmerkelijk hoger voor trekhoutzones. In vergelijking met de literatuur (Tabel 7) ligt het cellulosegehalte zowel voor populier als voor wilg hoger in deze masterproef. Het hemicellulose- en ligninegehalte is bij sommige stalen van deze masterproef lager dan de literatuur. Een verklaring voor de verschillen met de literatuur kan de veelvuldige aanwezigheid van trekhout zijn. Daarnaast moet er opgemerkt worden dat dit eerste resultaten zijn die nog verdere verfijning vereisen.

Tabel 7: Literatuurwaarden voor de chemische samenstelling van populier en wilg

	Populier				Wilg
	Hou & Li 2011	Carrier et al. 2010	Butterman & Castaldi 2009	Phyllis ECN	Serapiglia et al. 2009
Cellulosegehalte (%)	46-56	43	41	40	35-42
Hemicellulose gehalte (%)	24-26	28	21	23	20-25
Ligninegehalte (%)	15-24	25	24	20	20-26

De vergelijking van de voorspelling voor de energiewaarde per pixel (Figuur 36) en de andere voorspellingen (Bijlage 5) geeft aan dat de DSC calorische waarde sterk samenhangt met de chemische samenstelling. Zoals aangehaald in 1.3.2 heeft lignine een hogere verbrandingswaarde dan cellulose, het is dan ook zo dat hogere DSC waarden verkregen worden bij een hoger ligninegehalte.

3.4 Conclusie

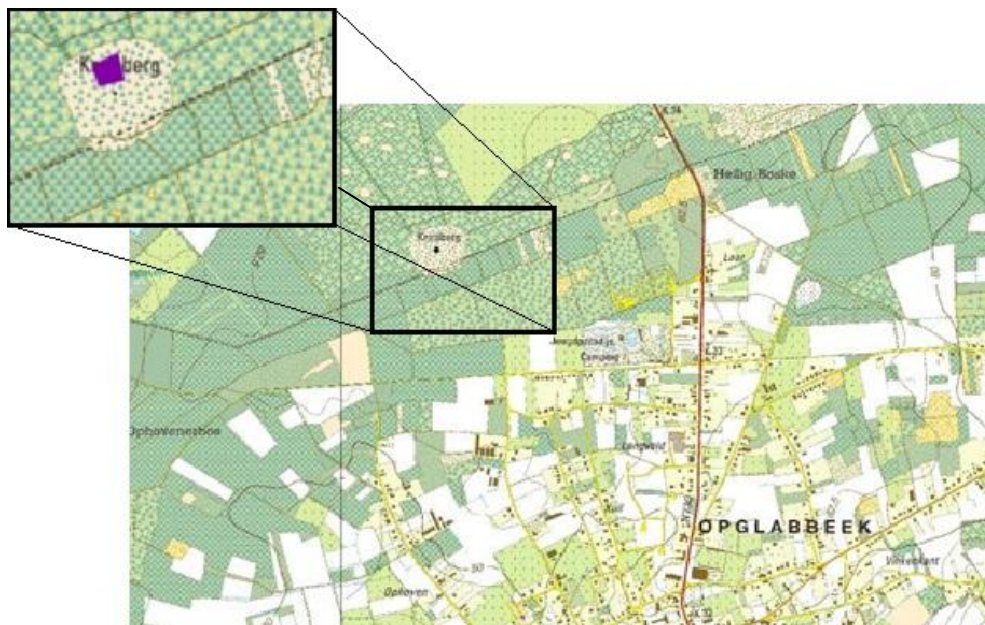
De voorgestelde tool-chain voor de energetische en structurele karakterisering opent vele perspectieven voor de toekomst. Zo kan een optimale selectie van soorten gebeuren en kan de variabiliteit tijdens de groei ingeschat worden. Ook kan geconcludeerd worden dat X-stralen tomografie gebruikt kan worden voor het schatten van het volumegewicht. Daarnaast is er nog ruimte voor verbetering bij de analyses met SWIR en DSC-TGA, maar is het duidelijk dat de bepaling en visualisatie van volumegewichtverschillen, trekhoutzones en de chemische samenstelling werkt. Tenslotte kan de tool-chain gebruikt worden om de energie-inhoud van houtige biomassa te bepalen, wat kan leiden tot een efficiëntere verbranding van houtige biomassa. De tool-chain kan dus naar de toekomst toe gebruikt worden voor high-throughput screening en analyse.

4 Energetische karakterisering van hakhout

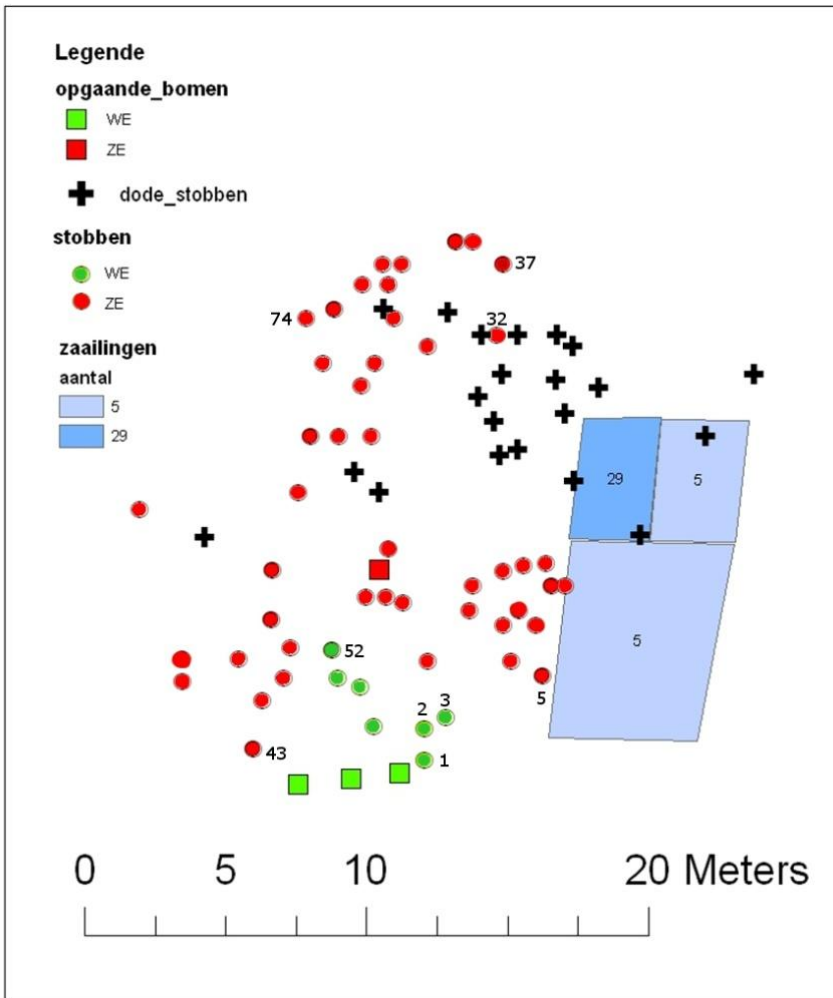
Energiegewassen zijn de laatste tijd belangrijker geworden voor energieopwekking en biobrandstofproductie. Een cultuurhistorische beheervorm met potentieel voor energiewinning is hakhout. Deze beheervorm is terug in de belangstelling gekomen, voornamelijk door de ecologische functie. Door de verwaarlozing van historisch hakhout zijn vele hakhoutstoven doorgroeid. De vraag rijst of na vele jaren verwaarlozing verlaten en uitgegroeid hakhout terug in hakhoutbeheer kan worden gebracht en of dit hakhout een goed energiegewas is. In deze masterproef wordt dit laatste aspect onderzocht.

4.1 Materiaal en methode

In deze studie werd een stuk oud eikenhakhout op een zandduin te Kruisberg, op de grens van Gruitrode en Opglabbeek (Figuur 37) bemonsterd. Het hakhout bestaat uit zomereik (*Quercus robur*) en wintereik (*Quercus petraea*). Tien jaar geleden zijn de eiken terug in hakhout gebracht door ze te kappen, daarvoor was de laatste kap in 1926. Naast het hakhout zijn er ook plaatselijke verjongingen met zaailingen, vermoedelijk door het toegenomen licht tijdens de eerste jaren na het hakken.



Figuur 37: Ligging van studiegebied hakhout te Kruisberg, op de grens van Gruitrode en Opglabbeek



Figuur 38: Verspreiding van hakhoutstoven en opgaande bomen van zomer- (ZE) en wintereik (WE) en positie van de zaailingen

Vier wintereik- en vijf zomereikstoven zijn bemonsterd (genummerde stobben in Figuur 38), daarnaast zijn ook drie zomereikzaailingen meegenomen voor analyse. Van de scheuten zijn stamstukken van 20 cm genomen en in de diepvriezer gestockeerd om ze in verse toestand te bewaren. Van de stamstukken zijn schijven van 2,5 cm dik gezaagd. Die zijn gescand met de flatbedscanner als kleurenbeelden (RGB) met een resolutie van 508 dpi of $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ per pixel. Van elke staal is met Matlab de schijf-, de hout- en de schorsoppervlakte bepaald. Het natte gewicht is bepaald en ze zijn gedroogd op 103°C tot constant gewicht om het vochtgehalte te bepalen.

De ovedroge stamschijven werden vermalen tot materiaal kleiner dan 2mm en van elke schijf is een homogeen mengmonster gemaakt voor de analyse van de verbrandingswaarde in de bomcalorimeter. Het staal is in een verbrandingskroes afgewogen en vervolgens in de bom geplaatst.

Voor de ontbranding van het staal werd dezelfde methode gebruikt als bij de energetische karakterisering in het vorige deel. Een 10 cm chroomnikkel lont is gebruikt. De bom is gevuld met O₂ onder een druk van 3 MPa of 30 bar (450 psig). De bom werd in een vat met twee liter gedemineraliseerd water geplaatst en verbonden met de ontstekingsdraden. De stalen waren niet ovendroog. De bekomen HHV is aangepast met formule 6 om de HHV voor ovendroge biomassa te bekomen.

Het asgehalte werd bepaald volgens de ASTM procedure D 1102 – 84. Daarvoor is 2 g ovendroog (103 ± 2°C) in een smeltkroes afgewogen, in een moffeloven op 600°C geplaatst gedurende 24 uur en nadien gewogen om het asgehalte te bepalen (Shanavas & Kumar 2003; ASTM 2001).

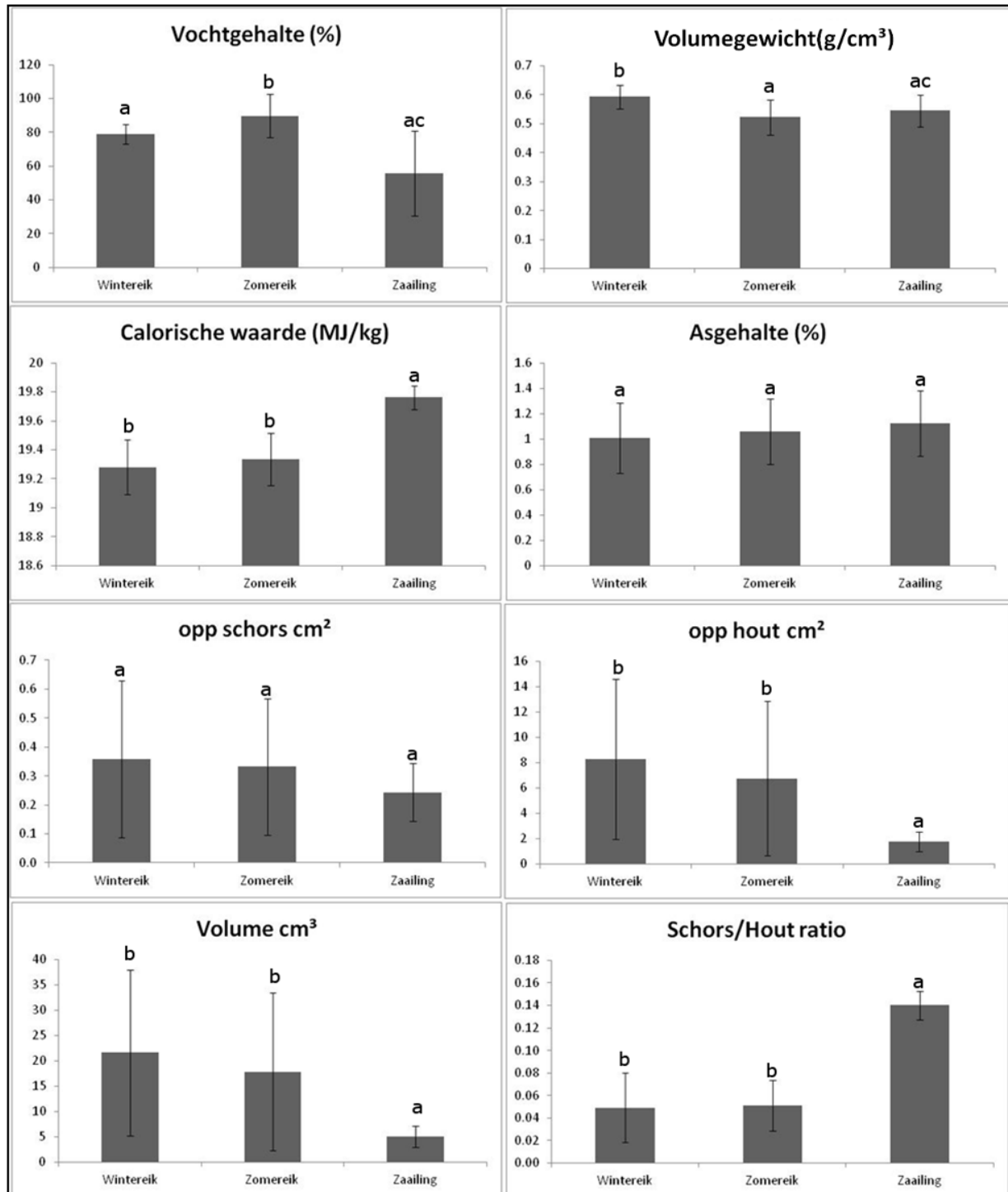
4.2 Resultaten

De gegevens van het volumegewicht, calorische waarden en het asgehalte zijn normaal verdeeld ($p > 0,1$). Het vochtgehalte, schorsoppervlakte, houtoppervlakte, volume en schors-houtratio zijn niet normaal verdeeld is ($p < 0,05$). Uit de ANOVA test volgt dat er een sterk significant verschil is ($p < 0,001$) in volumegewicht en de calorische waarden. Bij het asgehalte is er geen significant verschil ($p > 0,1$).

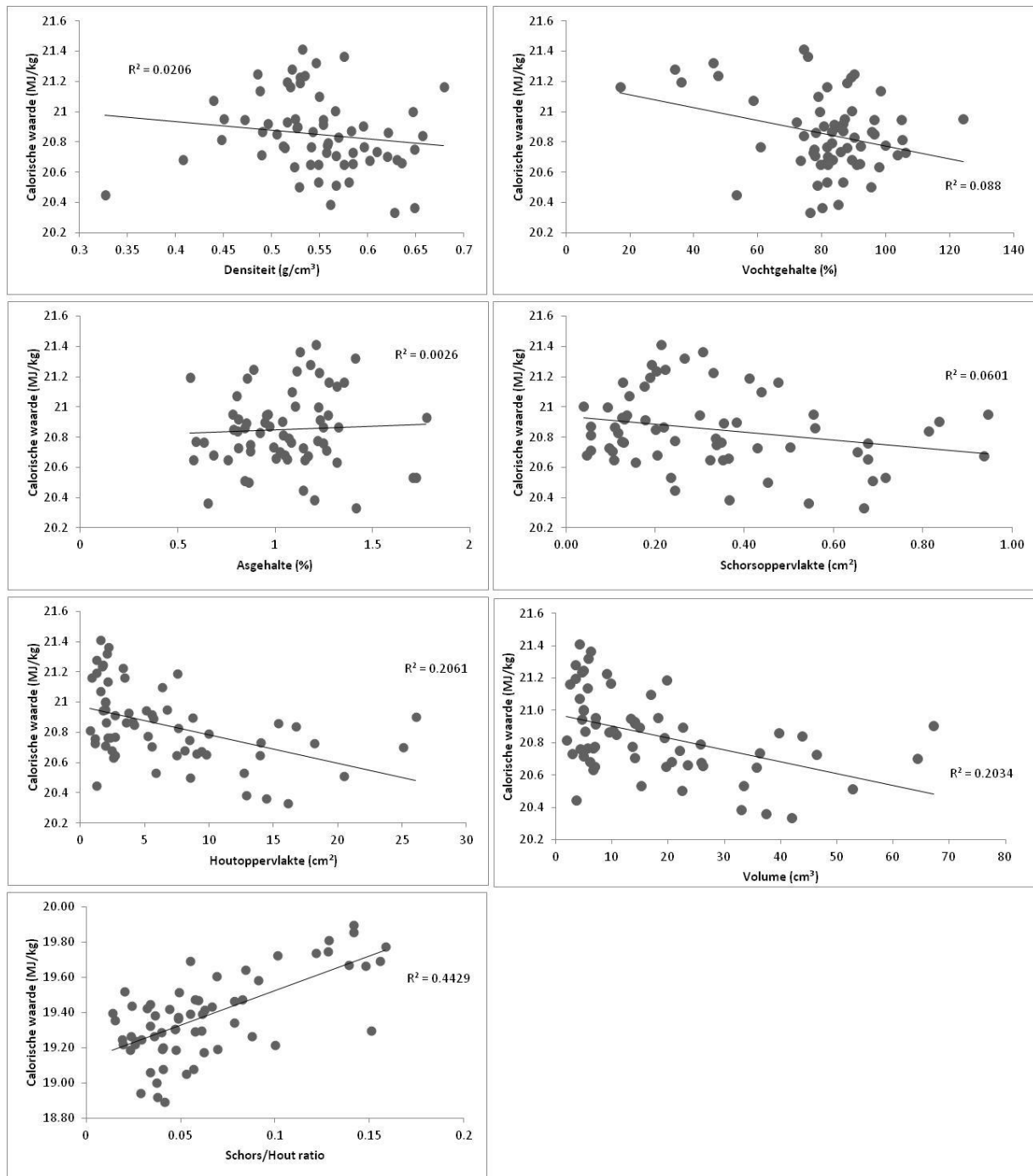
Voor volumegewicht is er een sterk significant verschil ($p < 0,001$) tussen wintereik en zomereik en een zwak significant verschil ($p < 0,1$) tussen wintereik en zaailingen (Figuur 39). Voor de calorische waarde is er een sterk significant verschil ($p < 0,001$) tussen de zaailingen en de hakhoutsoorten (Figuur 39). Als dan de verschillen tussen het volumegewicht op het niveau van de stoven worden onderzocht zijn er significante verschillen ($p < 0,05$) tussen stoof 2 (wintereik) en stoof 5 (zomereik) en stoof 2 en stoof 37 (zomereik). Voor de calorische waarde zijn er geen significante verschillen tussen de verschillende stoven (Figuur 41).

Bij de niet-normaal verdeelde gegevens is er volgens de Kruskal-Wallis test een sterk significant verschil ($p < 0,01$) voor het vochtgehalte, de houtoppervlakte, het volume en de schors-hout ratio (Figuur 39). Voor de schorsoppervlakte en het asgehalte is er geen significant verschil ($p > 0,1$) (Figuur 39). Voor de schorsoppervlakte is dit waarschijnlijk te wijten aan de grote spreiding. Het vochtgehalte verschilt sterk significant ($p < 0,001$) tussen zomereik en wintereik en tussen zomereik en zaailingen (Figuur 39). Voor de houtoppervlakte en het volume is er een sterk significant verschil ($p < 0,001$) tussen zaailingen en wintereik en tussen zaailingen en zomereik (Figuur 39). Voor de schors-hout ratio is er een sterk significante aanduiding ($p < 0,001$) voor verschillen tussen het hakhout en de zaailingen (Figuur 39).

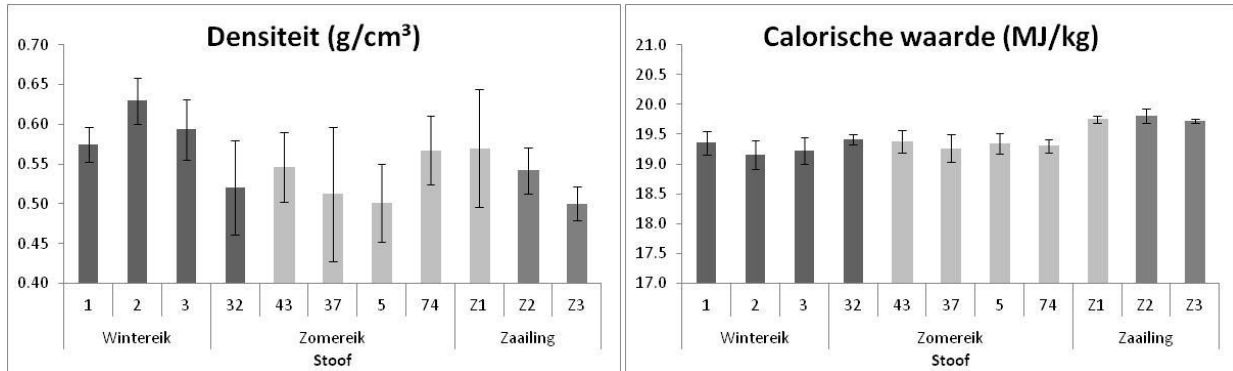
In Figuur 40 is weergegeven dat er een zwakke negatieve correlatie is tussen de calorische waarde enerzijds en de houtoppervlakte ($R^2 = 0,2061$) en het volume ($R^2 = 0,2034$) anderzijds. Daarnaast is er ook een zwakke correlatie ($R^2 = 0,40$) voor de schors-hout ratio en de calorische waarde. Voor de andere parameters is er geen correlatie met de calorische waarde te zien. Figuur 42 geeft echter weer voor enkel het hakhout de correlaties nog zwakker zijn (resp. $R^2 = 0,1187$; $0,1159$ en $0,0943$)



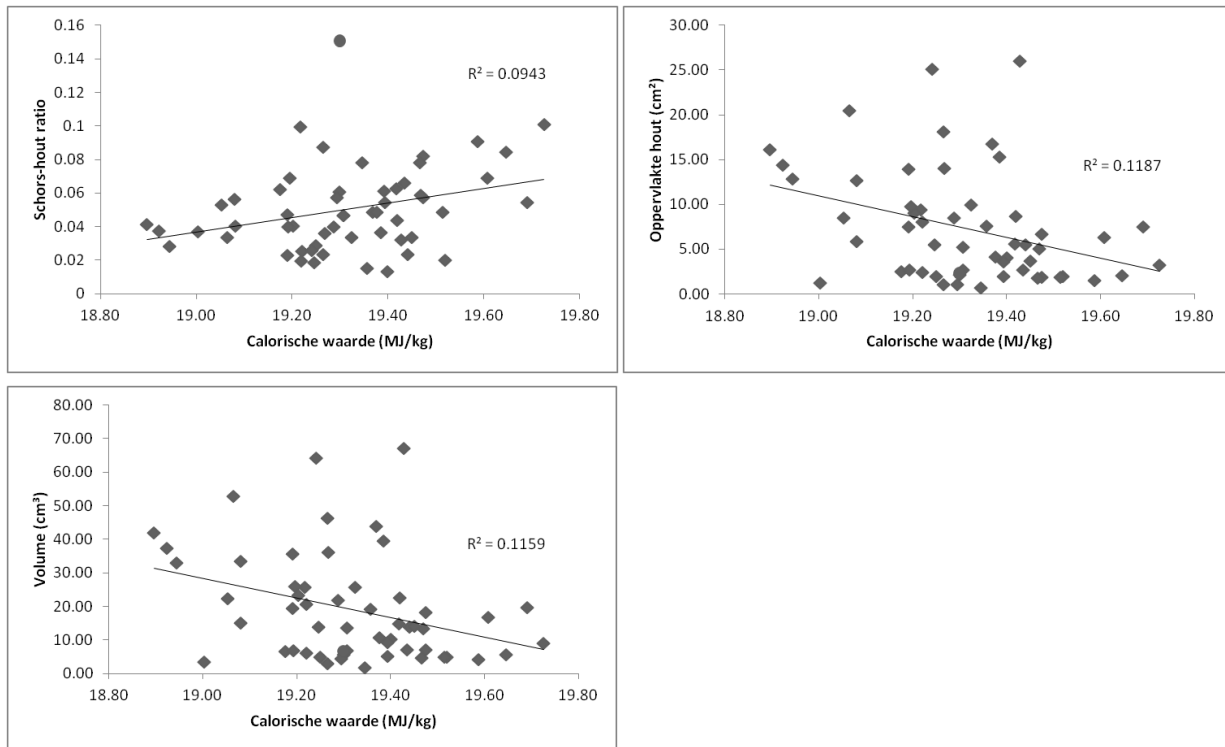
Figuur 39: Vergelijking van de parameters tussen de verschillende houtsoorten en beheersvormen, significante verschillen worden aangegeven met letters a, b en c



Figuur 40: Correlaties tussen calorische waarde en andere parameters



Figuur 41: Gemiddelde volumegewicht en calorische waarde per stoof, de grijswaarden duiden op wintereik, zomereik en zaailing



Figuur 42: Correlatie tussen calorische waarde en schors-hout ratio, oppervlakte hout (cm²) en volume (cm³) voor hakhoutstalen

4.3 Discussie

De calorische waarde van zaailingen is hoger dan die van hakhout (resp. gemiddeld 19,8 en 19,3). Er is voor de calorische waarde een zeer zwakke correlatie met de schors-hout ratio, de houtoppervlakte en het volume.

De biomassaproductie, bepaald door de hout- en schorsoppervlakte, is veel hoger voor hakhout dan voor zaailingen. Hier moet wel opgemerkt worden dat de hakhoutscheuten en de zaailingen niet dezelfde leeftijd hebben.

Tussen hakhout van zomereik en wintereik is enkel het vochtgehalte significant verschillend. De calorische waarde is niet verschillend tussen de beide soorten.

4.4 Conclusie

Voor de energetische karakterisering zijn er geen verschillen tussen hakhout van zomereik en wintereik. Ook naar biomassaproductie zijn er geen verschillen tussen beide. De zaailingen hebben wel een hogere calorische waarden dan het hakhout maar een kleinere biomassaproductie door hun leeftijdsverschil.

Bibliografie

- ASTM. (2001). Standard Test Method for Ash in wood. Paper Industry, 84:1-2.
- Acuña, E., Espinosa, M., Cancino, J., Rubilar, R. & Muñoz, F. (2010). Estimating the bioenergy potential of *Pinus radiata* plantations in Chile. *Ciencia e investigación agraria*, 37 (1): 93-102.
- Arngren, M. (2011). Hyperspectral NIR Camera. Technical University of Denmark ,Kongens Lyngby.
Beschikbaar op:
<http://www2.imm.dtu.dk/pubdb/public/allpublications.php?year=2011&pubtype=6>
- Badel, E., Delisee, C. & Lux, J. (2008). 3D structural characterisation, deformation measurements and assessment of low-density wood fibreboard under compression: The use of X-ray microtomography. *Composites Science and Technology*, 68 (7-8), 1654-1663.
- Bahng, M.K., Mukarakate, C., Robichaud, D.J. & Nimlos, M.R. (2009). Current technologies for analysis of biomass thermochemical processing: a review. *Analytica chimica acta*, 651 (2): 117-38.
- Bird, M.I., Ascough, P.L., Young, I. M., Wood, C.V. & Scott, A.C. (2008). X-ray microtomographic imaging of charcoal. *Journal of Archaeological Science*, 35 (10): 2698-2706.
- Brink, M., Mandenius, C.F. & Skoglund, A. (2010). On-line predictions of the aspen fibre and birch bark content in unbleached hardwood pulp, using NIR spectroscopy and multivariate data analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 103(1): 53-58.
- Broeckx, L., El Kasmoui, O. & Verlinden, M. (2011). Populier, energieleverancier. *Groencontact*, 35: 18-21.
- Brown, R.C. (2011). Thermochemical processing of biomass: conversion into fuels, chemicals and power. Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Butterman, H.C. & Castaldi, M.J. (2008). Enhanced Steam Gasification of Biomass Fuels.
Beschikbaar op:
<http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/eecnawtec/nawtec16/nawtec16-1949.pdf>
- Butterman, H.C. & Castaldi, M.J. (2009). Selected Articles from the 2008 IT3 Conference. *Environmental Engineering Science*, 26(4):703-713.
- Cogen. (2008). Biomassa in Vlaanderen, Eeklo.
gevonden op 15/01/2012 op <http://www.cogen-energy.be/BRBIOMASSA.pdf>

- Devetter, L., Cnudde, V., Masschaele, B., Jacobs, P. & Vanacker, J. (2006). Detection and distribution analysis of organosilicon compounds in wood by means of SEM-EDX and micro-CT. *Materials Characterization*, 56 (1): 39-48.
- Dietenberger, M. (2002). Update for Combustion Properties of Wood Components. *Fire and Materials*, 26: 255-267.
- Eigenvector Research. (2011). PLS Toolbox Manual.
Beschikbaar op: http://wiki.eigenvector.com/index.php?title=PLS_Toolbox_Topics
- Emandi, A.N.A., Vasiliu, C.I. & Budrugaec, P. (2011). Quantitative investigation of wood composition by integrated FT-IR and Thermogravimetric methods. *Cellulose Chemistry and Technology*, 45: 579-584.
- Evans, A., Strezov, V. & Evans, T.J. (2010). Sustainability considerations for electricity generation from biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (5): 1419-1427.
- Fujimoto, T., Kurata, Y., Matsumoto, K. & Tsuchikawa, S. (2010). Feasibility of near-infrared spectroscopy for online multiple trait assessment of sawn lumber. *Journal of Wood Science*, 56 (6): 452-459.
- Geladi, P. (2004). Hyperspectral imaging: calibration problems and solutions. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 72 (2): 209-217.
- Gomez, L.D., Steele-king, C.G. & Mcqueen-mason, S.J. (2008). Sustainable liquid biofuels from biomass : the writing ' s on the walls. *New Phytologist*, 178: 473-485.
- 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): 590-598.
- Hedrick, S.E., Bennett, R.M., Rials, T.G. & Kelley, S. (2007). Correlation of Near-Infrared Spectroscopy Measurements with the Properties of Treated Wood. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19 (4): 279.
- Hein, P.R.G., Campos, A.C.M., Mendes, R.F., Mendes, L.M. & Chaix, G. (2010). Estimation of physical and mechanical properties of agro-based particleboards by near infrared spectroscopy. *European Journal of Wood and Wood Products*, 69 (3): 431-442.
- Heyse, D.K. (2003a). Differential Scanning Calorimetry (DSC), Colorado.
Beschikbaar op: www1.chm.colostate.edu
- Heyse, D.K. (2003b). Thermogravimetric Analysis, Colorado.
Beschikbaar op: www1.chm.colostate.edu

- Horvath, L., Peszlen, I., Peralta, P. & Kelley, S. (2010). Use of transmittance near-infrared spectroscopy to predict the mechanical properties of 1- and 2-year-old transgenic aspen. *Wood Science and Technology*, 45 (2): 303-314.
- 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): 166-75.
- Hyvärinen, T., Herrala, E. & Jussila, J. (2008). High Speed Hyperspectral Chemical Imaging, International Near-Infrared Conference, Umea, Sweden.
- Jansen, P. & Kuiper, L. (2004). Double green energy from traditional coppice stands in the Netherlands. *Biomass and Bioenergy*, 26 (4): 401-402.
- 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*, 38(4): 257-276.
- Li, J., Rao, X. & Ying, Y. (2012). Development of algorithms for detecting citrus canker based on hyperspectral reflectance imaging. *Journal of the science of food and agriculture*, 92: 125-134.
- Mantau, U., Saal, U., Prins, K., Steierer, F., Lindner, M. & Verkerk, H. (2010). EUwood - Real potential for changes in growth and use of EU forests. Final report. Hamburg/Germany, 160 p.
- Nkansah, K. & Dawson-Andoh, B. (2010). Rapid characterization of biomass using fluorescence spectroscopy coupled with multivariate data analysis. I. Yellow poplar (*Liriodendron tulipifera* L.). *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2 (2): 23-103.
- den Ouden, J., Muys, B., Mohren, F. & Verheyen, K. (2010). *Bosecologie en Bosbeheer*, Leuven: Acco.
- Pixelio, M.L. (2010). *Duurzaam gebruik van energiehout in de Benelux*, Brussels.
Beschikbaar op: [http://www.benelux.int/pdf/pdf_nl/dos/10-NAT-BOSSSEN\(NO-012\)NL.pdf](http://www.benelux.int/pdf/pdf_nl/dos/10-NAT-BOSSSEN(NO-012)NL.pdf)
- Prins, M.J. (2005). *Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction*. Technische Universiteit Eindhoven.
- Riddell, M., Harrington, J., Nanayakkara, B., Meder, R. & Thumm, A. (2010). Near infrared hyperspectral imaging applied to mapping chemical composition in wood samples. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 18 (1): 507.
- 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): 293-302.

- Rommens, T., Suetens, E. & Albrecht, J. (2009). Het potentieel van biobrandstoffen van de tweede generatie. Universiteit Gent.
- Schimleck, L.R., Evans, R. & Ilic, J. (2001). Estimation of *Eucalyptus delegatensis* wood properties by near infrared spectroscopy. *Canadian Journal of Forest Research*, 31: 1671-1675.
- Schimleck, L.R., Evans, R. & Matheson, A. C. (2002). Estimation of *Pinus radiata* D. Don clear wood properties by near-infrared spectroscopy. *Journal of Wood Science*, 48 (2): 132-137.
- Serapiglia, M.J., Cameron, K.D., Stipanovic, A.J. & Smart, L.B. (2009). Analysis of Biomass Composition Using High-Resolution Thermogravimetric Analysis and Percent Bark Content for the Selection of Shrub Willow Bioenergy Crop Varieties. *BioEnergy Research*, 2 (1-2): 1-9.
- Shanavas, A. & Kumar, B.M. (2003). Fuelwood characteristics of tree species in homegardens of Kerala , India. *Agroforestry Systems*, 58: 11-24.
- Shen, D.K., Gu, S., Luo, K.H., Bridgwater, A.V. & Fang, M.X. l. (2009). Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment. *Fuel*, 88 (6): 1024-1030.
- Sokhansanj, S. (2011). The Effect of Moisture on Heating Values. Oak Ridge National Laboratory, Tennessee. Beschikbaar op: http://cta.ornl.gov/bedb/appendix_a/The_Effect_of_Moisture_on_Heating_Values.pdf
- Spinelli, R., Nati, C., Sozzi, L., Magagnotti, N. & Picchi, G. (2011). Physical characterization of commercial woodchips on the Italian energy market. *Fuel*, 90 (6): 2198-2202.
- Steppe, K., Cnudde, V., Girard, C., Lemeur, R., Cnudde, J.-P. & Jacobs, P. (2004). Use of X-ray computed microtomography for non-invasive determination of wood anatomical characteristics. *Journal of structural biology*, 148 (1): 11-21.
- Tallieu, L. (2008). Onderzoek naar de mogelijkheden van nabij infrarood voor de opvolging van de productieprocessen uctieprocessen van biodiesel , NVS en 3GO. Ph.D.thesis, Katholieke Hogeschool Brugge-Oostende.
- Telmo, C. & Lousada, J. (2011). Heating values of wood pellets from different species. *Biomass and Bioenergy*, 35 (7): 2634-2639.
- Timmermans, G.H. & Koopmans, C.J. (2007). Biomassa als energiebron, Driebergen. Beschikbaar op: <http://www.louisbolk.org/downloads/1908.pdf>
- Trtik, P., Dual, J., Keunecke, D., Mannes, D., Niemz, P., Stähli, P., Kaestner, A., Groso, A. & Stampanoni, M. (2007). 3D imaging of microstructure of spruce wood. *Journal of structural biology*, 159 (1): 46-55.

- Van den Bulcke, J., Boone, M., Van Acker, J., Stevens, M. & Van Hoorebeke, L. (2009). X-ray tomography as a tool for detailed anatomical analysis. *Annals of Forest Science*, 66 (5): 508.
- Wildenschild, D. et al. (2002). Using X-ray computed tomography in hydrology: systems, resolutions, and limitations. *Journal of Hydrology*, 267(3-4): 285-297.
- Williams, P.J. (2009). Near Infrared (NIR) Hyperspectral Imaging For Evaluation of Whole Maize Kernels: Chemometrics for Exploration and Classification. Ph.D.thesis, Stellenbosch University.
- Xing, J., Symons, S., Hatcher, D. & Shahin, M. (2011). Comparison of short-wavelength infrared hyperspectral imaging system with an FT-NIR spectrophotometer for predicting alpha-amylase activities in individual Canadian Western Red Spring wheat kernels. *Biosystems engineering*, 108: 303-310.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86 (12-13): 1781-1788.
- Yorulmaz, S.Y. & Atimtay, A.T. (2009). Investigation of combustion kinetics of treated and untreated waste wood samples with thermogravimetric analysis. *Fuel Processing Technology*, 90 (7-8): 939-946.

Bijlagen

Bijlage 1: Output van statistische analyse met SPSS van de energetische en structurele karakterisering

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

		Oppervlakte schijf (cm ²)	Oppervlakte schors (%)	Oppervlakte hout (cm ²)
Normal Parameters ^{a,,b}	N	174	174	174
	Mean	13.1724	2.5250	10.6478
	Std. Deviation	11.63237	2.03174	9.68405
Most Differences	Extreme Absolute	.260	.186	.264
	Positive	.260	.186	.264
	Negative	-.168	-.142	-.166
	Kolmogorov-Smirnov Z	3.431	2.456	3.481
	Asymp. Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

		Schors-hout ratio	Vochtgehalte (%)	Volumegewicht (g/cm ³)
Normal Parameters ^{a,,b}	N	174	171	171
	Mean	.2820	108.6782	.6705
	Std. Deviation	.13943	41.87339	.16554
Most Differences	Extreme Absolute	.153	.138	.219
	Positive	.153	.138	.219
	Negative	-.112	-.108	-.134
	Kolmogorov-Smirnov Z	2.019	1.800	2.869
	Asymp. Sig. (2-tailed)	.001	.003	.000

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

		Calorische waarde (MJ/kg) Hout	Calorische waarde (MJ/kg) schors
Normal Parameters ^{a,b}	N	174	174
	Mean	18.9228	18.9351
	Std. Deviation	.78540	1.17789
Most Extreme Differences	Absolute	.152	.093
	Positive	.149	.085
	Kolmogorov-Smirnov Z	2.005	1.230
	Asymp. Sig. (2-tailed)	.001	.097

Test Statistics^a

	Oppervlakte schijf (cm ²)	Oppervlakte schors (%)	Oppervlakte hout (cm ²)	Schors-hout ratio	Vochtgehalte (%)
Chi-Square	105.324	104.460	91.410	121.157	130.402
df	5	5	5	5	5
Asymp. Sig.	.000	.000	.000	.000	.000

Test Statistics^a

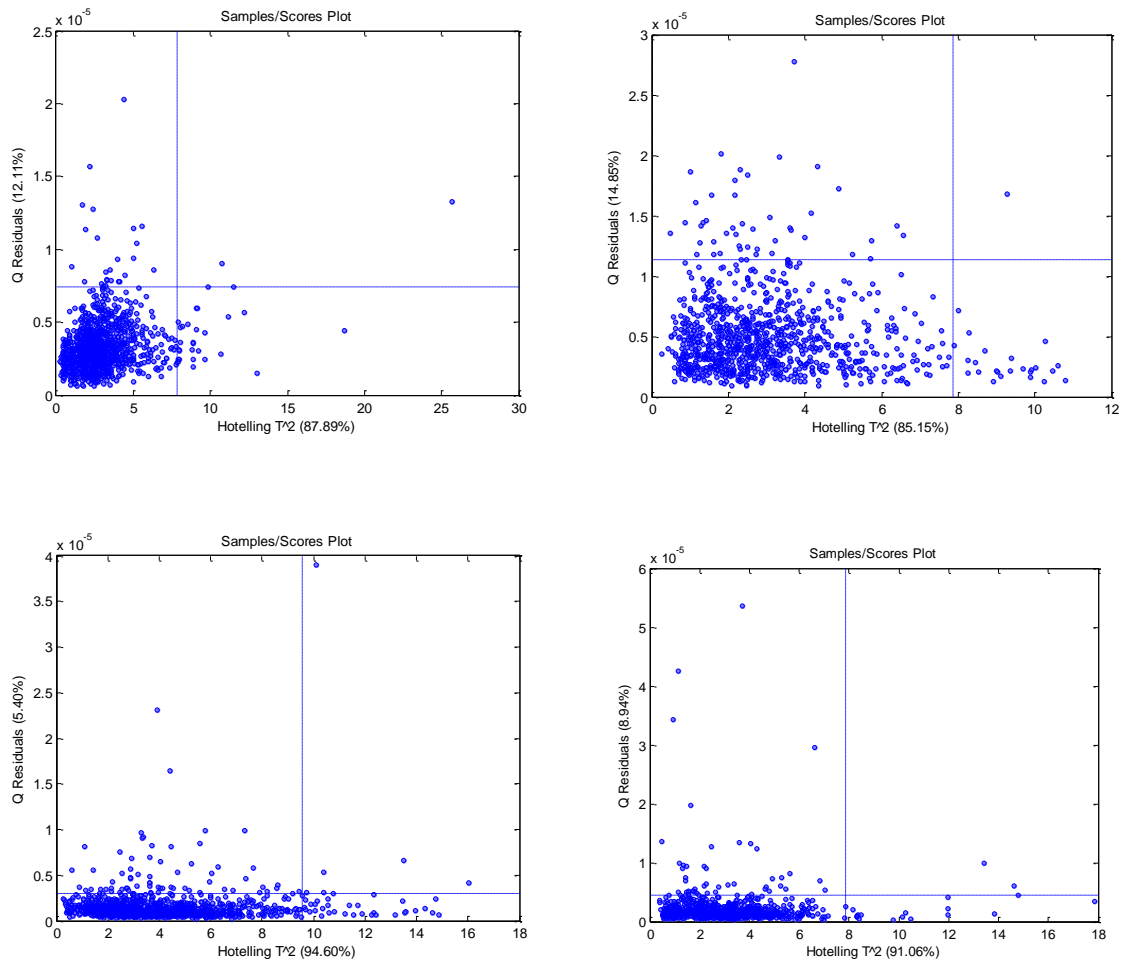
	Volumegewicht (g/cm ³)	Calorische waarde (MJ/kg) Hout	Calorische waarde (MJ/kg) schors
Chi-Square	137.891	46.054	29.156
df	5	5	5
Asymp. Sig.	.000	.000	.000

a. Kruskal Wallis Test

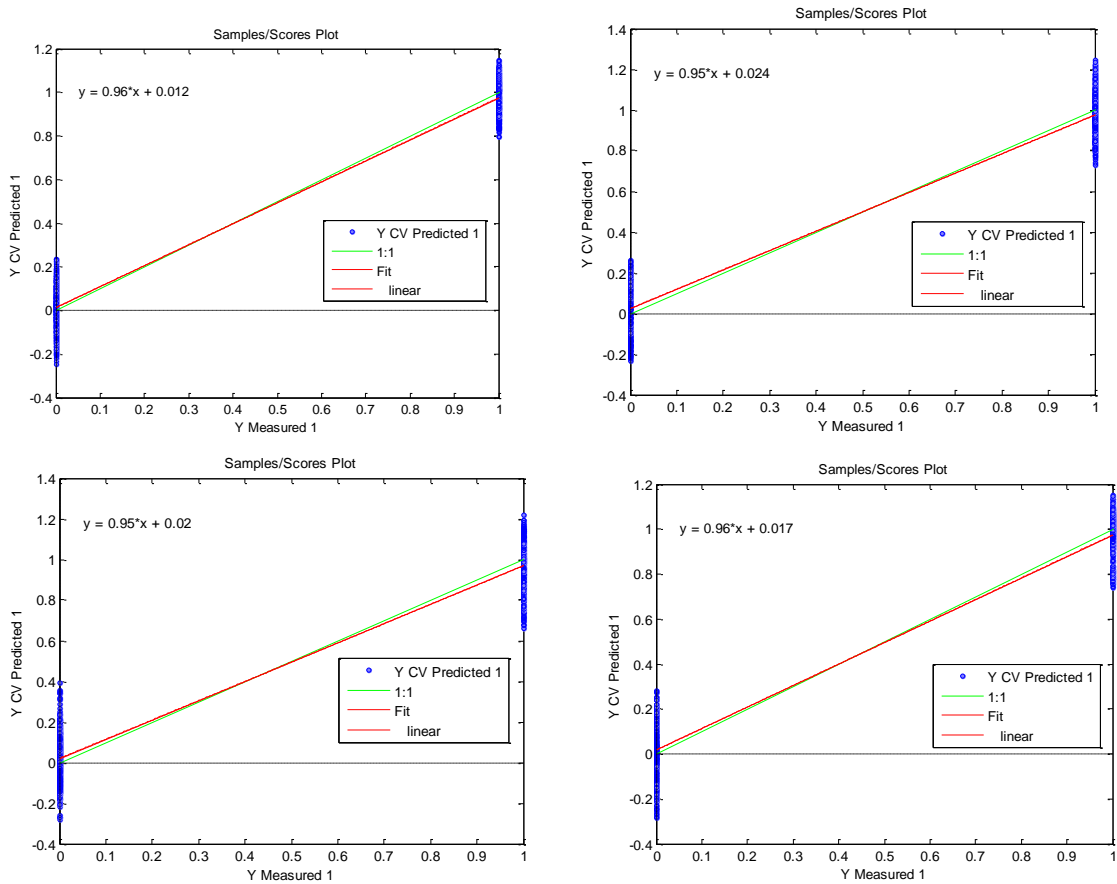
Tabel 8: p-waarden voor de Mann-Whitney test

Test Statistics								
Asymp. Sig. (2-tailed)	Oppervlakte schijf (cm ²)	Oppervlakte schors (%)	Oppervlakte hout (cm ²)	Schors-hout ratio	Vochtgehalte (%)	Densiteit (g/cm ³)	Calorische waarde (MJ/kg) Hout	Calorische waarde (MJ/kg) schors
Wilg vs. Populier	.207	.056	.307	.003	.320	.000	.144	.152
Beuk	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.116
Es	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.434	.012
Eik	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.001
Den	.591	.591	.591	.040	.308	.235	.003	.000
Populier vs. Beuk	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.003	.707
Es	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.020	.001
Eik	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.066
Den	.172	.172	.172	.172	.012	.249	.000	.012
Beuk vs. Es	.000	.000	.001	.000	.076	.000	.004	.003
Eik	.000	.000	.639	.000	.124	.000	.572	.160
Den	.000	.000	.000	.000	.000	.005	.000	.000
Es vs. Eik	.088	.616	.057	.000	.000	.000	.000	.001
Den	.002	.002	.002	.130	.002	.002	.002	.002
Eik vs. Den	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000

Bijlage 2: Trekhoutmodellen voor lijn- en draaischijfscans



Figuur 43: Plot van de uitschieters voor lijnscans van wilg (links boven), populier (rechts boven), draaischijfscans van wilg (links onder) en populier (rechts onder)

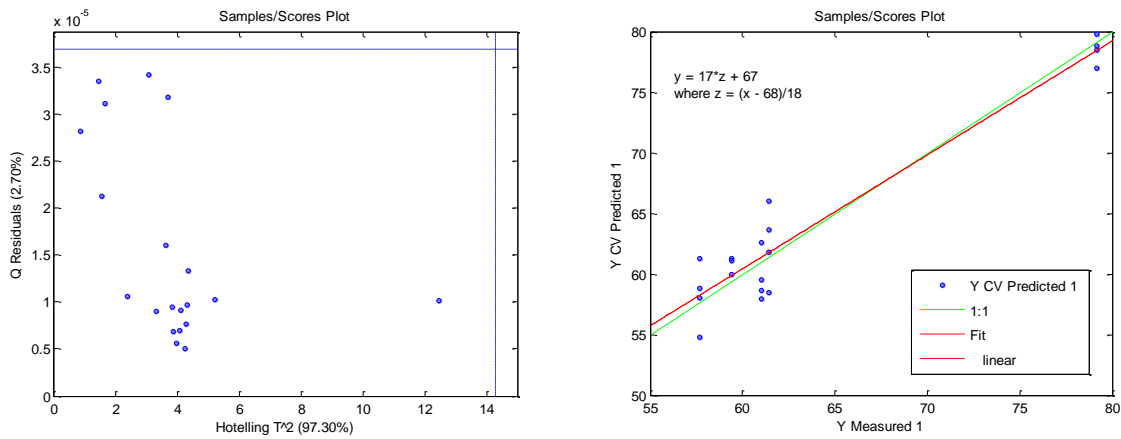


Figuur 44: Plot van de trekhoutmodellen voor lijnscans van wilg (links boven), populier (rechts boven), draaischijfscans van wilg (links onder) en populier (rechts onder)

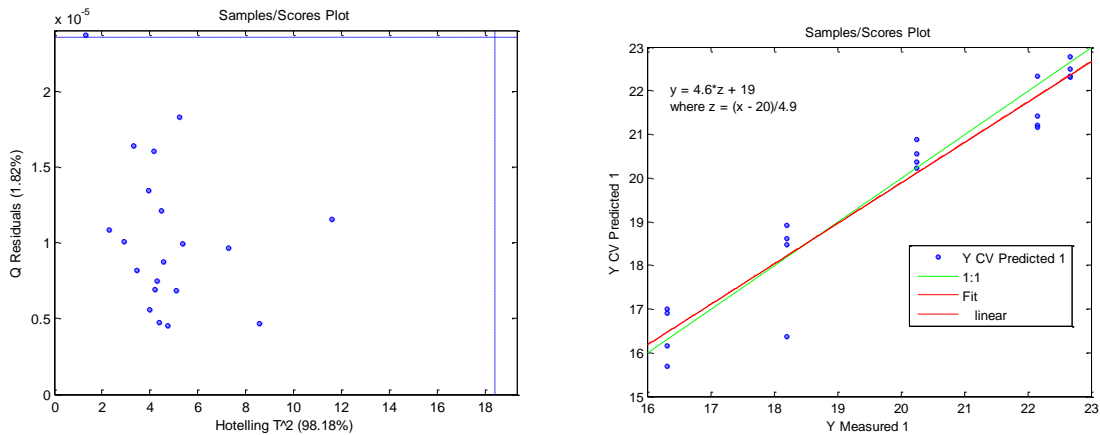
Tabel 9: validatiegegevens van de verschillende trekhoutmodellen

	Lijnscan wilg	Lijnscan populier	Draaischijf wilg	Draaischijf populier
RMSEC	0.0897561	0.109785	0.109855	0.100158
RMSEP	0.103343	0.0866873	0.0641393	0.143393
Bias	7.38298E-15	3.27516e-015	-5.55112e-016	1.34337e-014
Pred Bias	-0.0142152	0.00784066	0.0112167	0.0224344
R ² Cal	0.963316	0.951767	0.949414	0.958057
R ² Pred	0.942079	0.969053	0.975118	0.917031

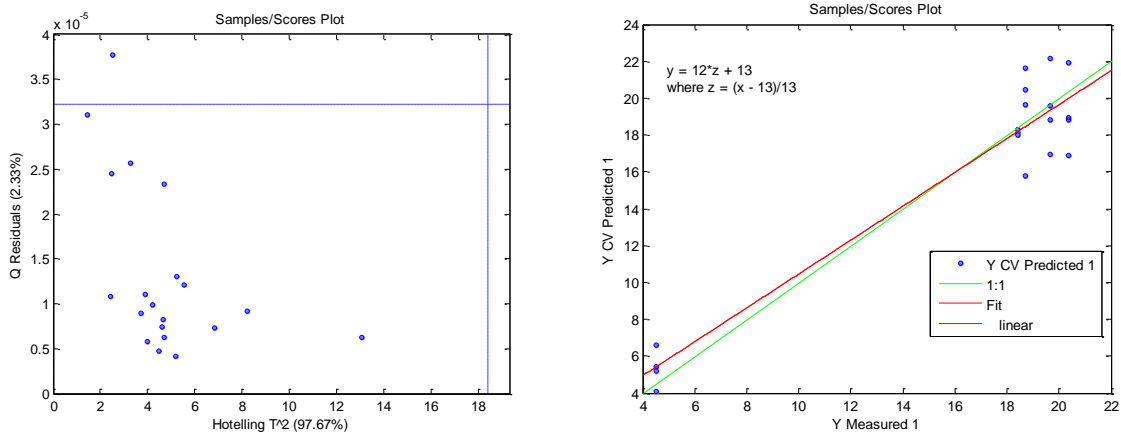
Bijlage 3: Modellen voor chemische samenstelling voor wilg schijven



Figuur 45: Uitschietersplot (links) en model voor cellulosevoorspelling (rechts) van wilg schijven



Figuur 46: Uitschietersplot (links) en model voor hemicellulosevoorspelling (rechts) van wilg schijven

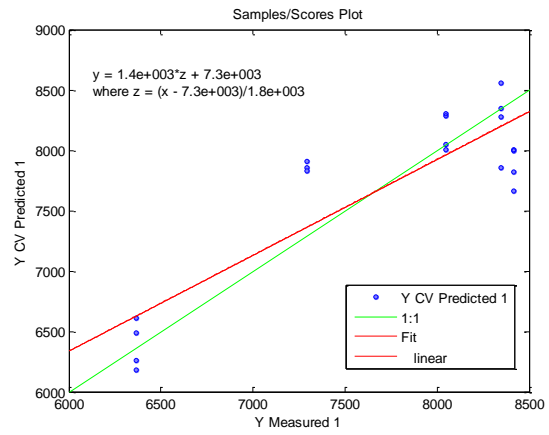
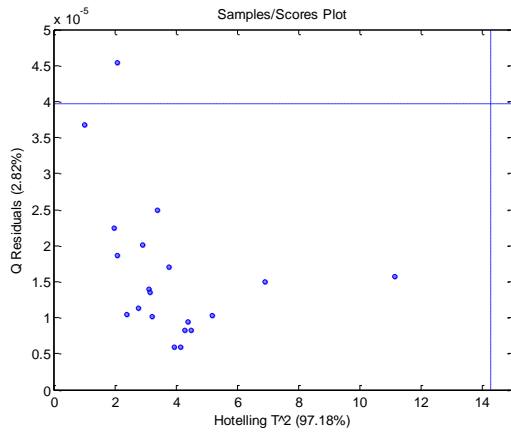


Figuur 47: Uitschietersplot (links) en model voor ligninevoorspelling (rechts) van wilg schijven

Tabel 10: validatiegegevens van de verschillende modellen voor chemische samenstelling

Schijf 264	Cellulosemodel	Hemicellulosemodel	Ligninmodel
RMSEC	1.37136	0.291999	1.18434
RMSEP	1.08662	0.772954	0.762765
Bias	0	$3.55271e^{-15}$	$-1.06581e^{-14}$
Pred Bias	0.46813	0.0370329	-0.347674
R ² Cal	0.969277	0.985093	0.962122
R ² Pred	0.987597	0.897419	0.988305

Bijlage 4: Modellen voor calorische waardevoorspelling voor wilg



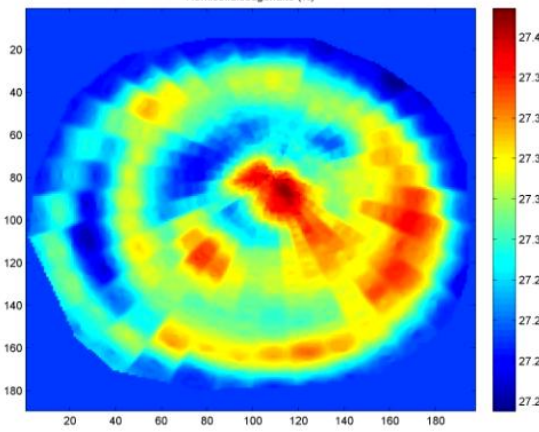
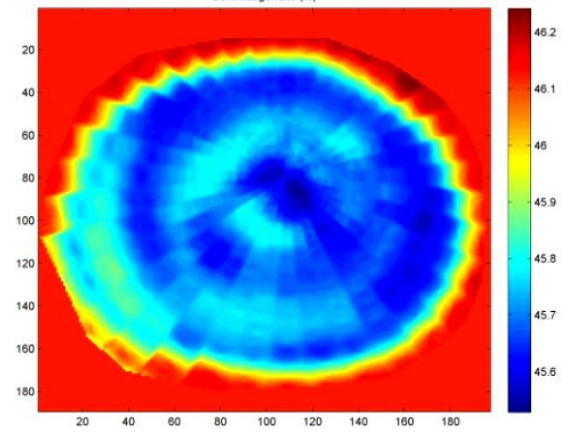
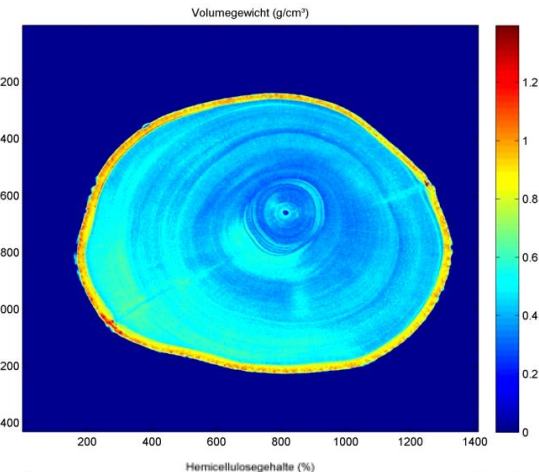
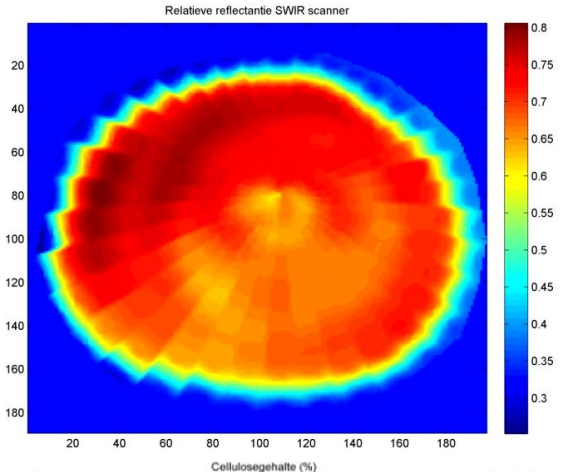
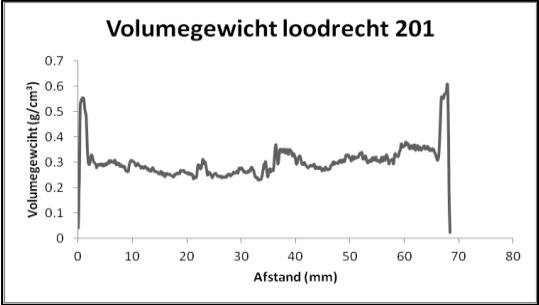
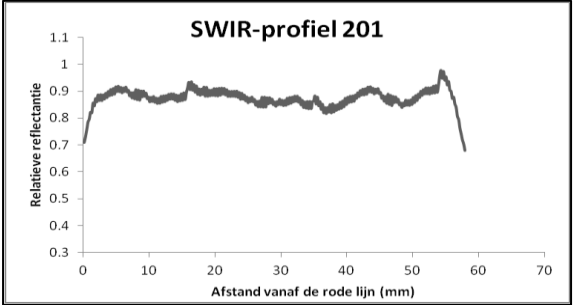
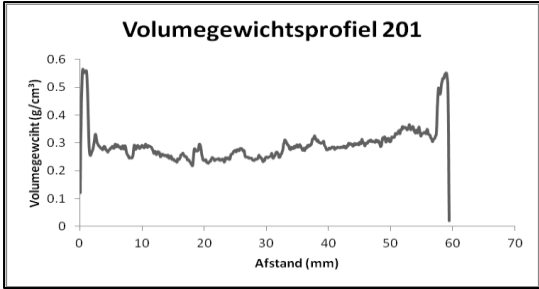
Tabel 11: : validatiegegevens van het DSC-model

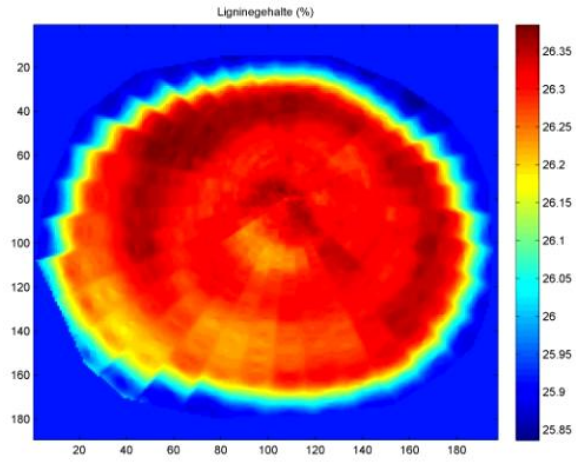
RMSEC	274,932
RMSEP	264,453
Bias	0
Bias pred	29,4972
R² Cal	0,878626
R² Pred	0.89103

Bijlage 5: Fiches van alle stalen voor structurele en energetische karakterisering

Schijf 201

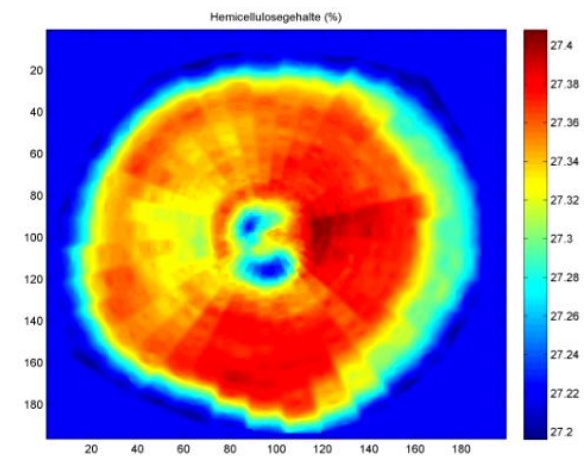
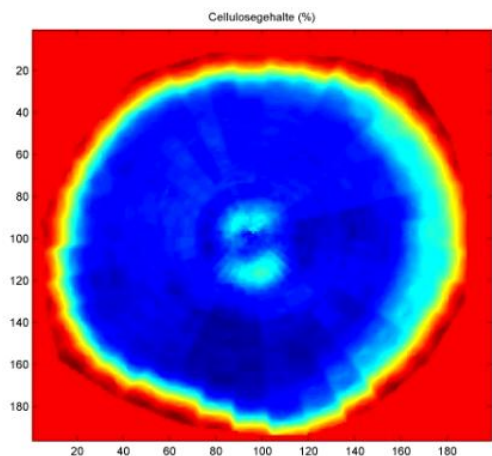
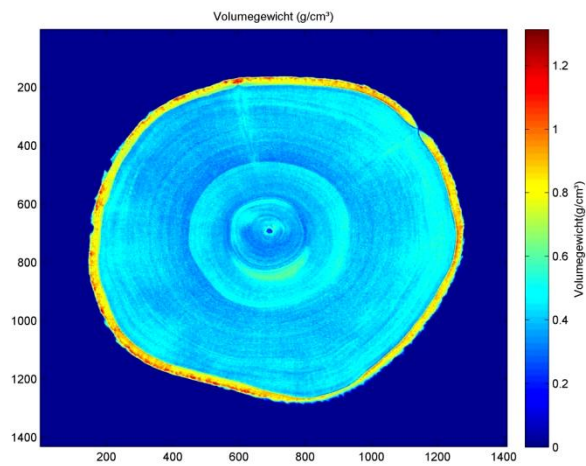
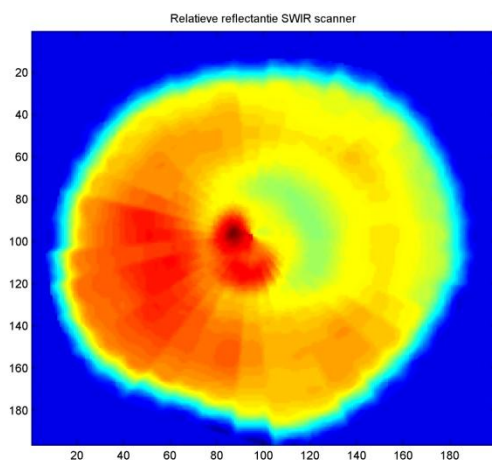
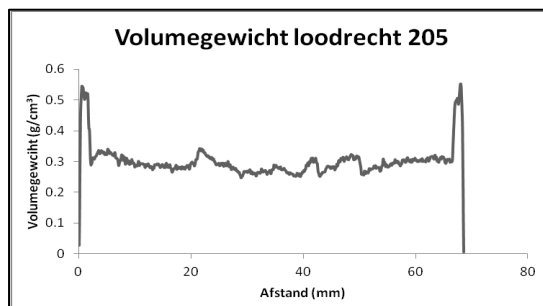
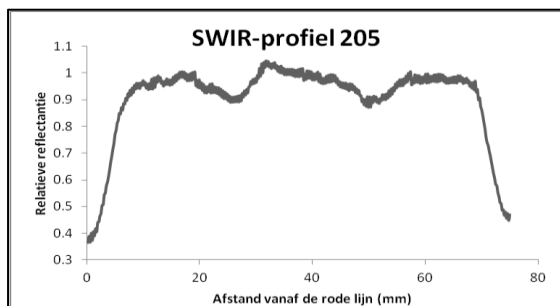
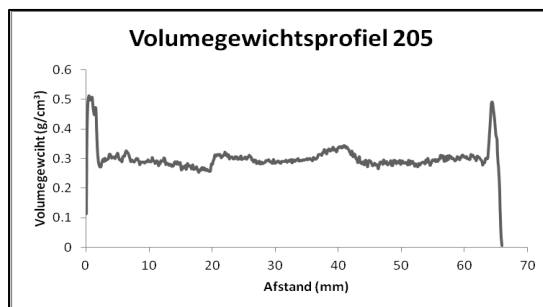
Soort: Wilg
Vochtgehalte: 152,41 %
Calorische waarde hout: 19,04 MJ/kg
Calorische waarde schors: 17,12 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 33,14 cm²
Oppervlakte hout: 27,98 cm²
Oppervlakte schors: 5,16 cm²

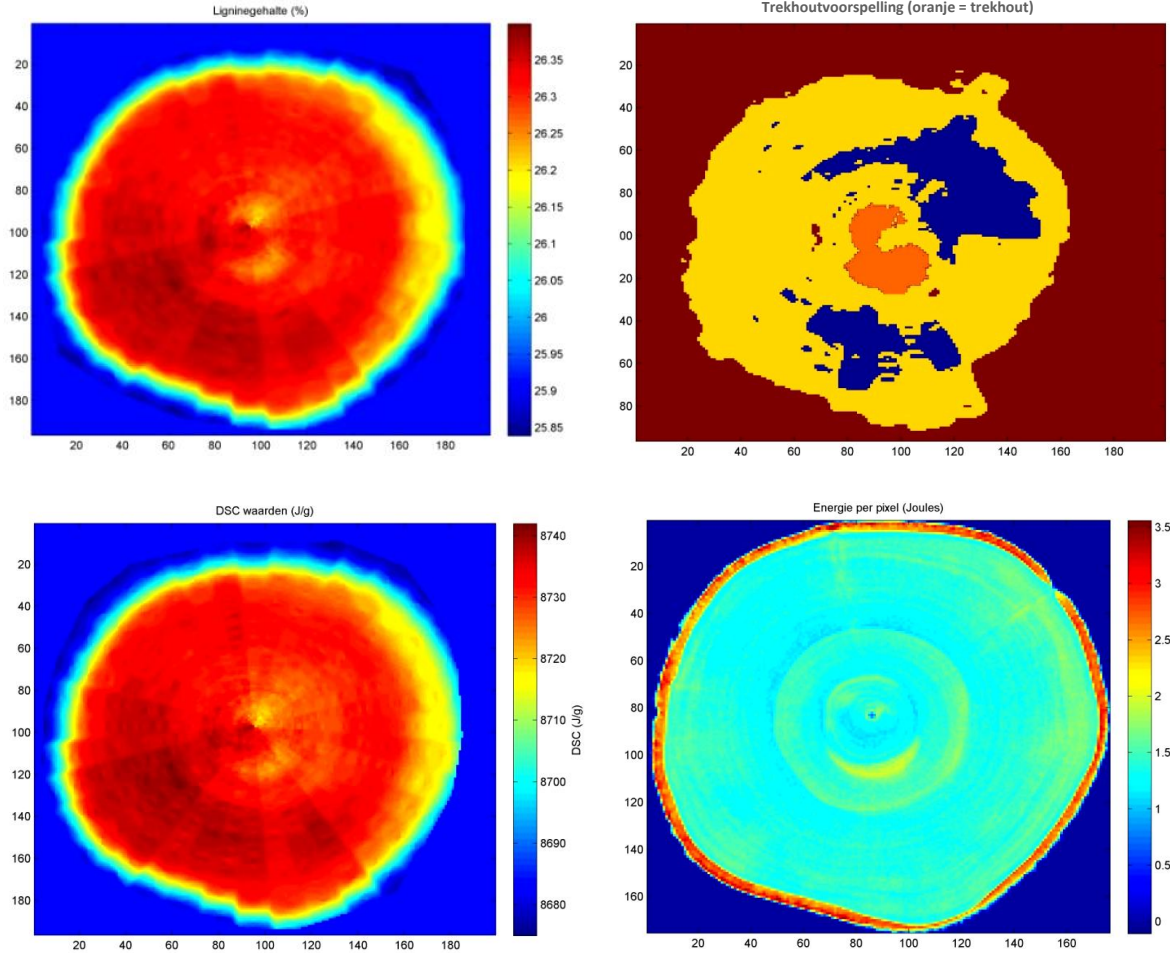




Schijf 205

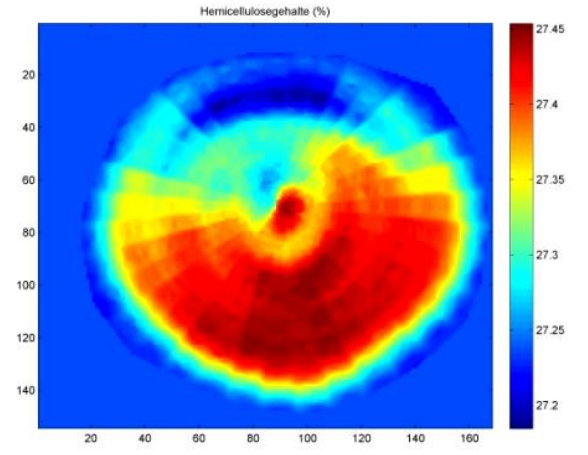
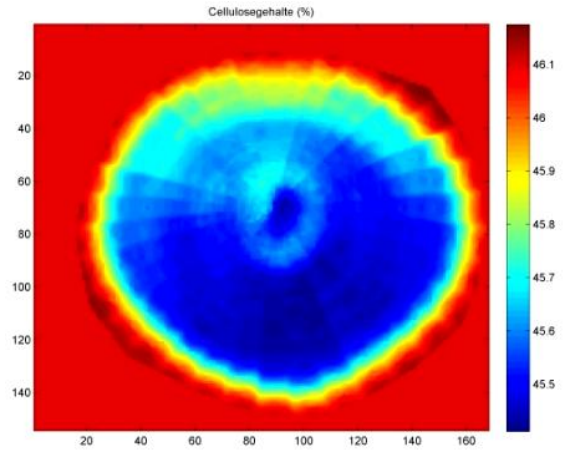
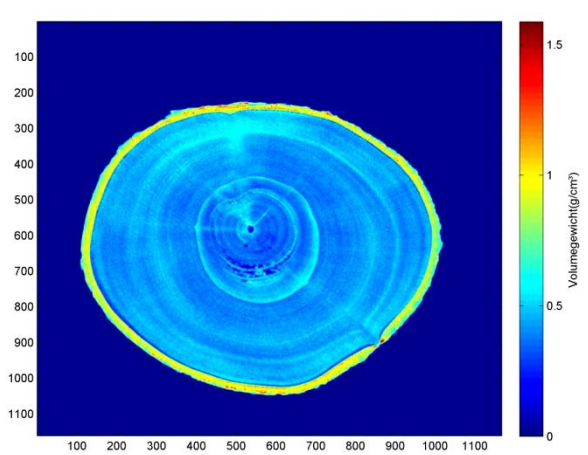
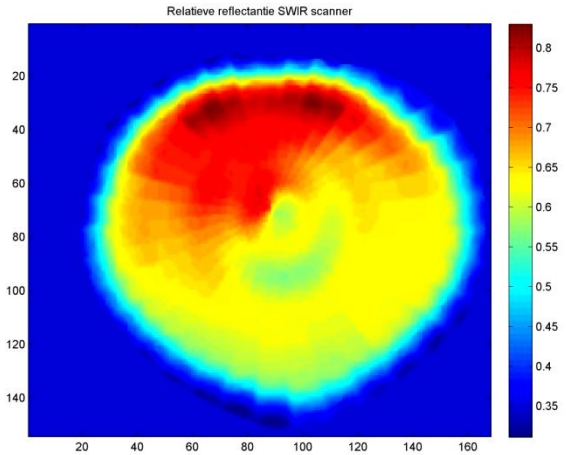
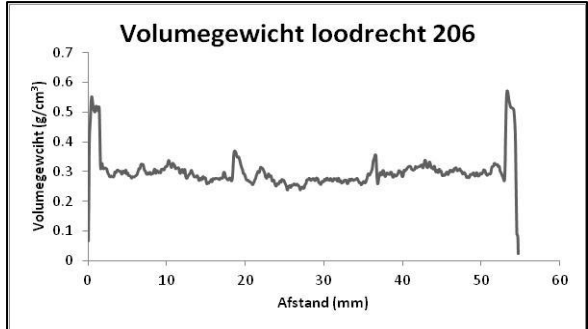
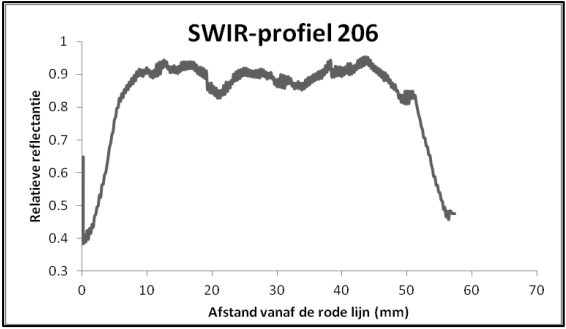
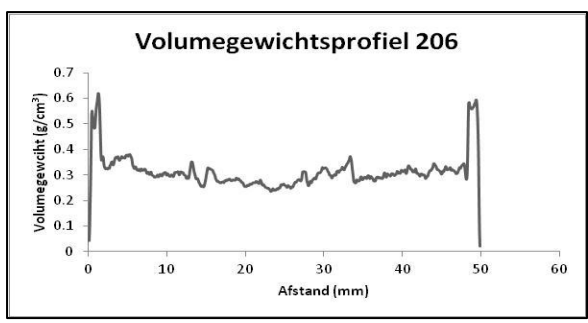
Soort: Wilg
 Vochtgehalte: 143.98 %
 Calorische waarde hout: 19.02 MJ/kg
 Calorische waarde schors: 18.15 MJ/kg
 Oppervlakte schijf: 37.46 cm²
 Oppervlakte hout: 31.76 cm²
 Oppervlakte schors: 5.70 cm²

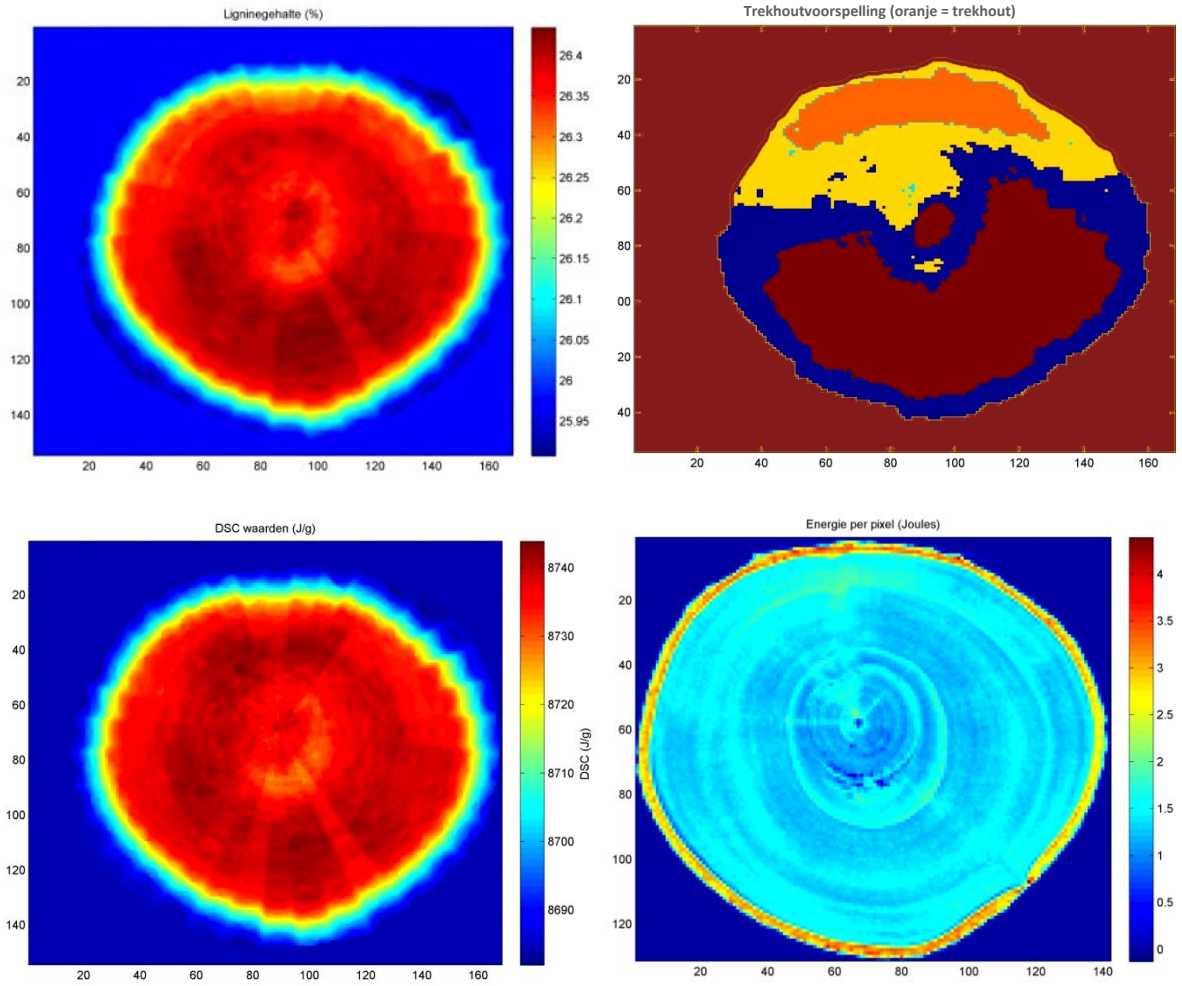




Schijf 206

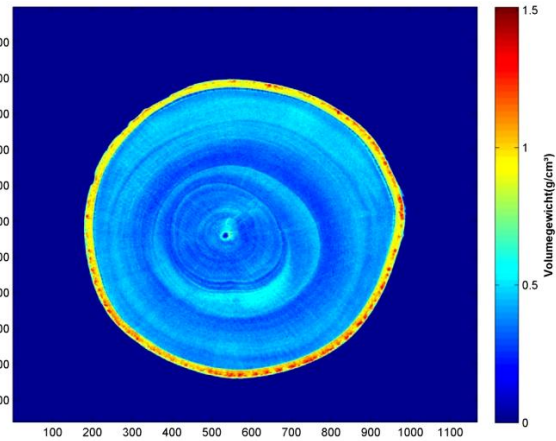
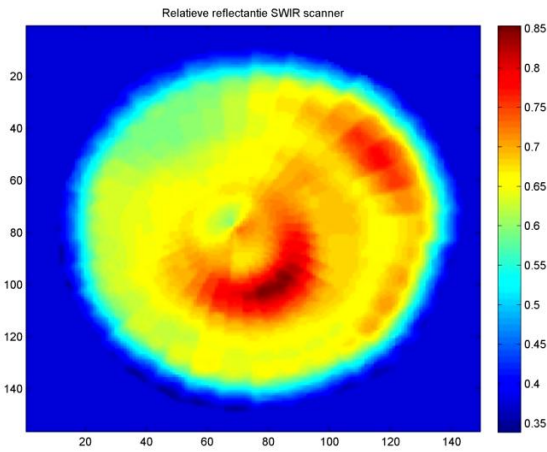
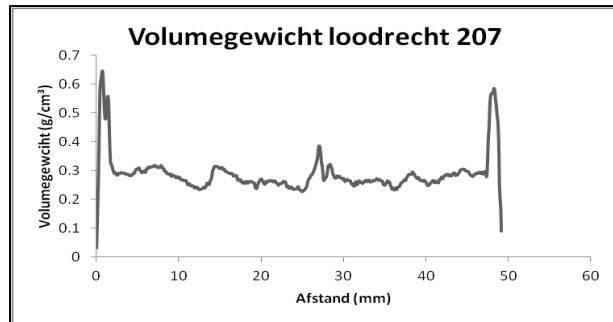
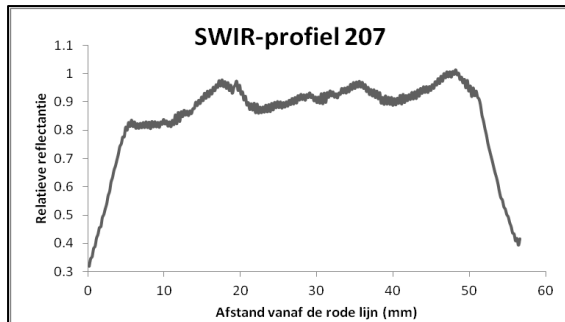
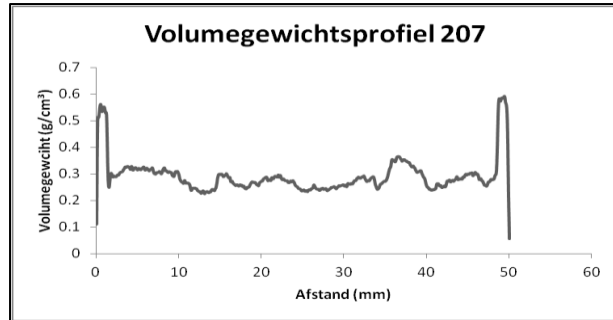
Soort: Wilg
 Vochtgehalte: 147.83 %
 Calorische waarde hout: 19.03 MJ/kg
 Calorische waarde schors: 18.32 MJ/kg
 Oppervlakte schijf: 21.46 cm²
 Oppervlakte hout: 18.05 cm²
 Oppervlakte schors: 3.41 cm²

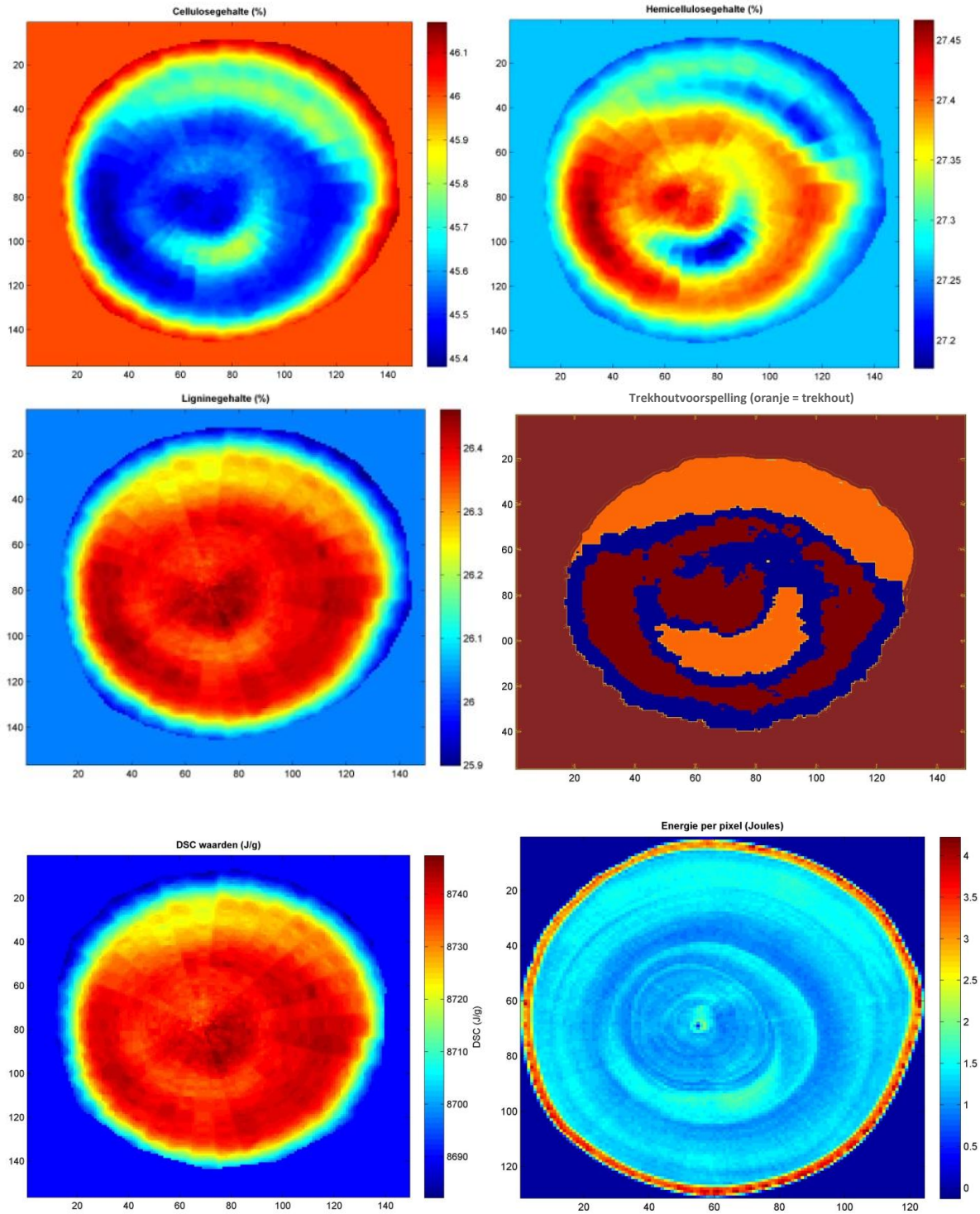




Schijf 207

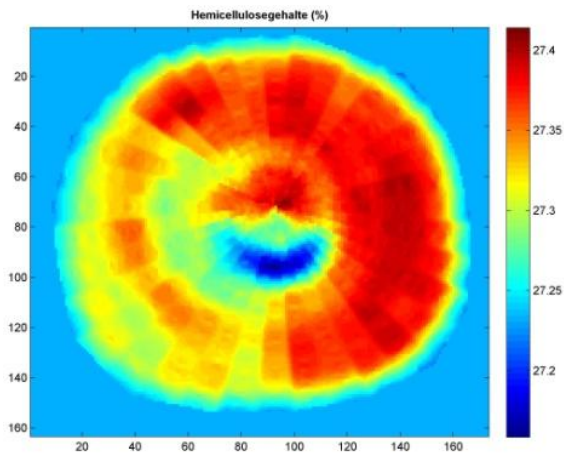
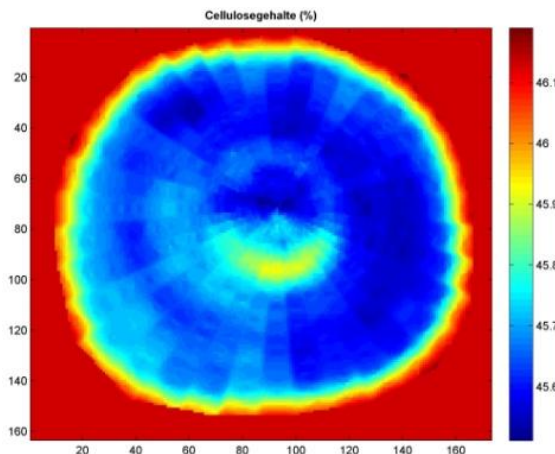
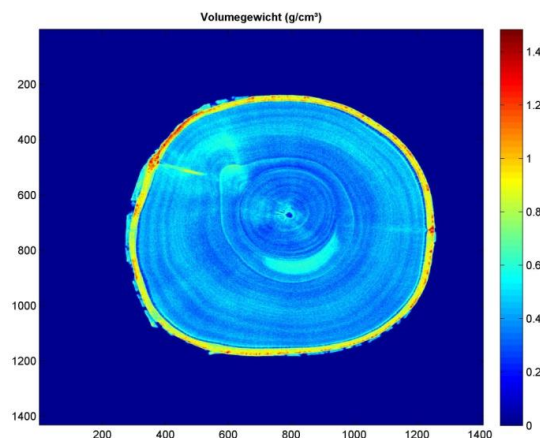
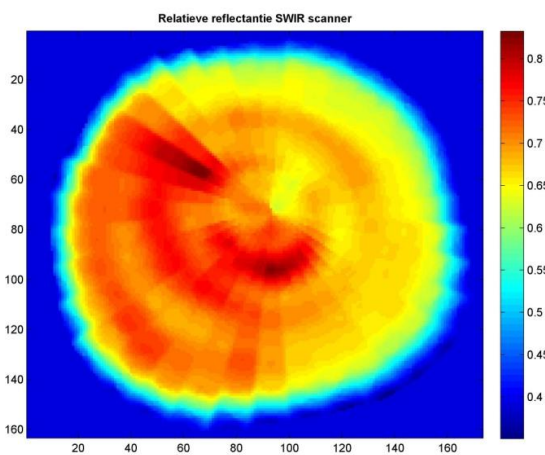
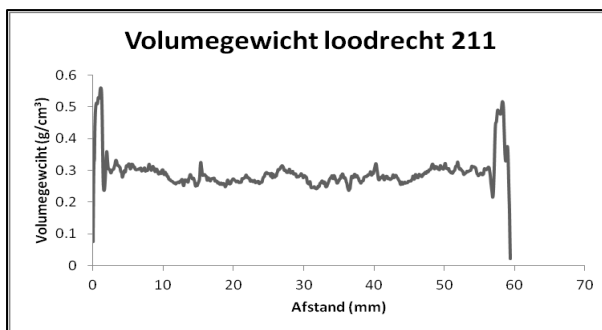
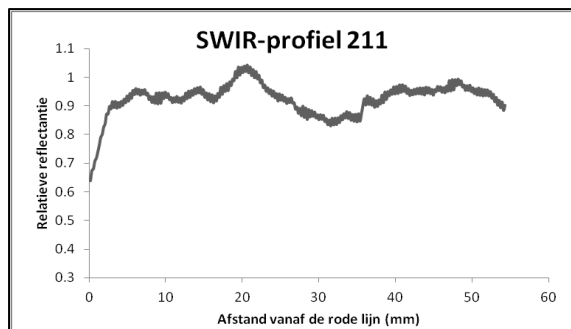
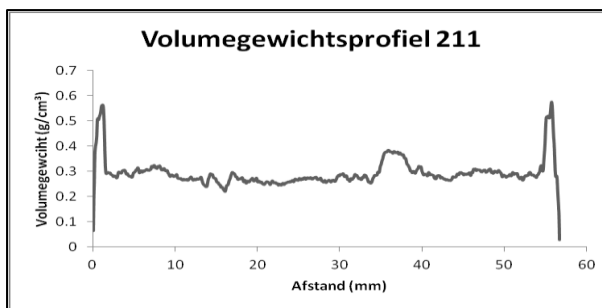
Soort: Wilg
Vochtgehalte: 187.72 %
Calorische waarde hout: 18.98 MJ/kg
Calorische waarde schors: 18.49 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 20.69 cm²
Oppervlakte hout: 17.44 cm²
Oppervlakte schors: 3.25 cm²

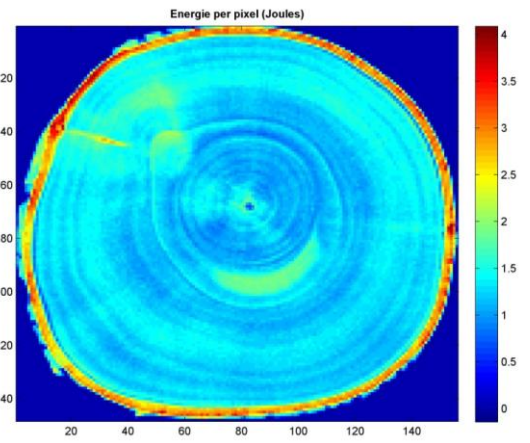
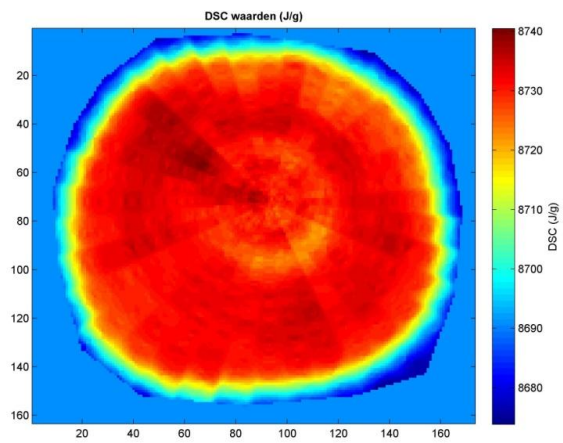
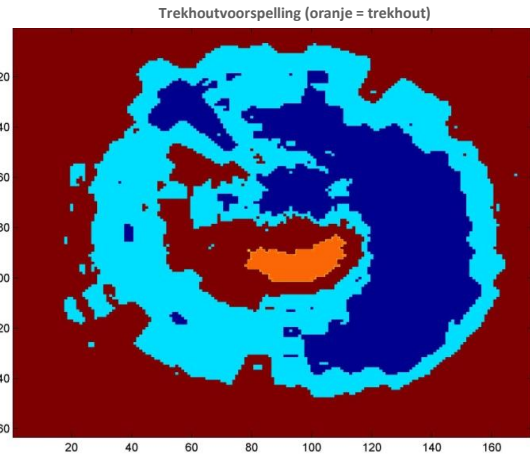
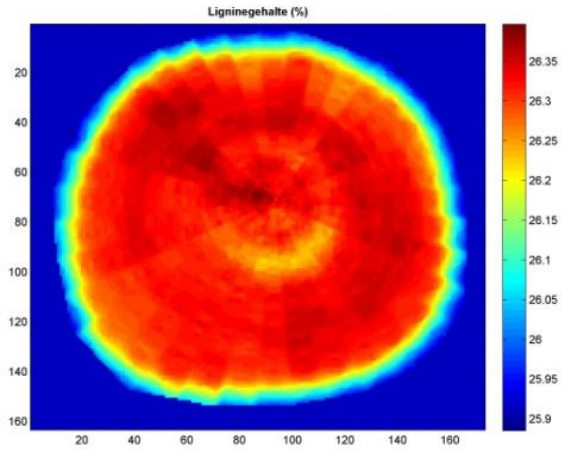




Schijf 211

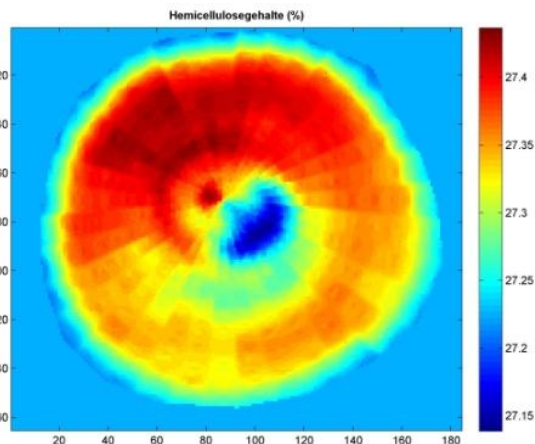
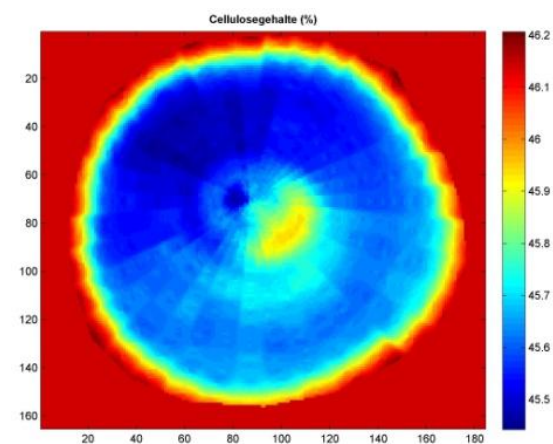
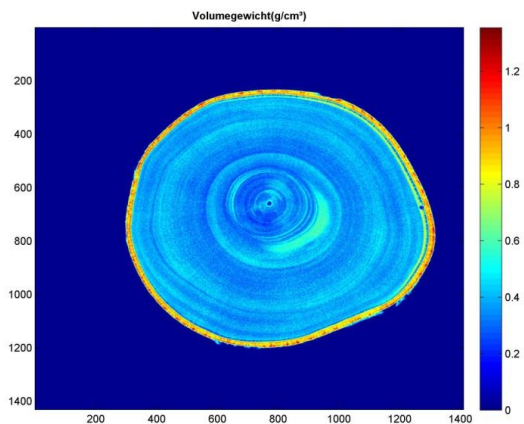
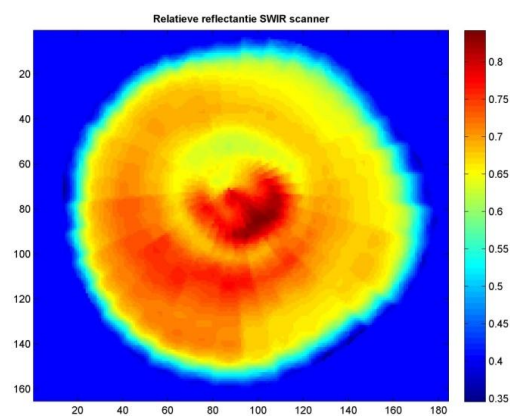
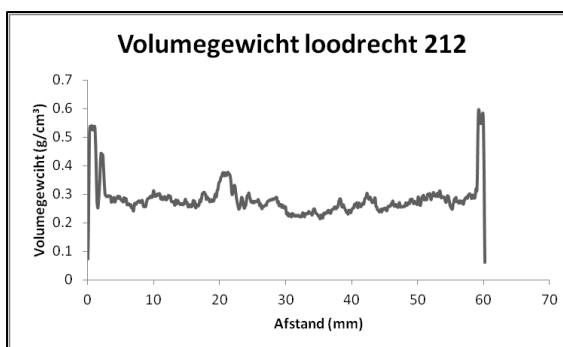
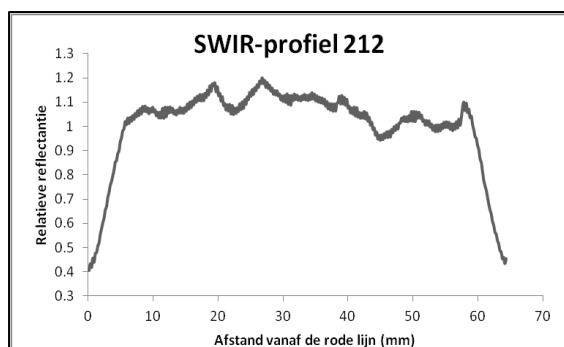
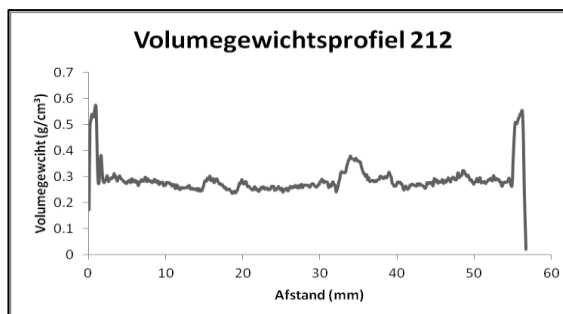
Soort: Wilg
 Vochtgehalte: 135.13 %
 Calorische waarde hout: 19.46 MJ/kg
 Calorische waarde schors: 20.30 MJ/kg
 Oppervlakte schijf: 28.78 cm²
 Oppervlakte hout: 23.81 cm²
 Oppervlakte schors: 4.97 cm²

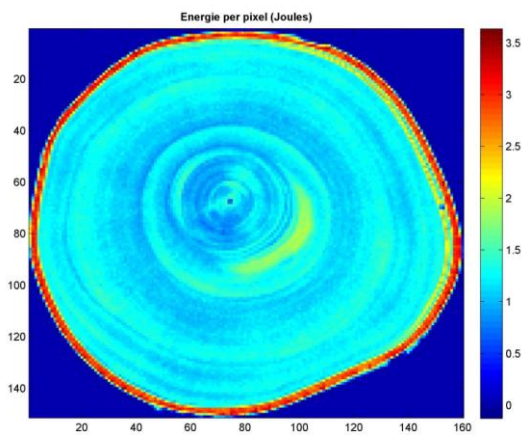
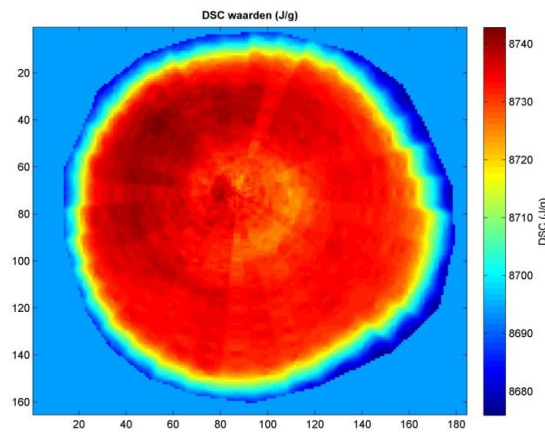
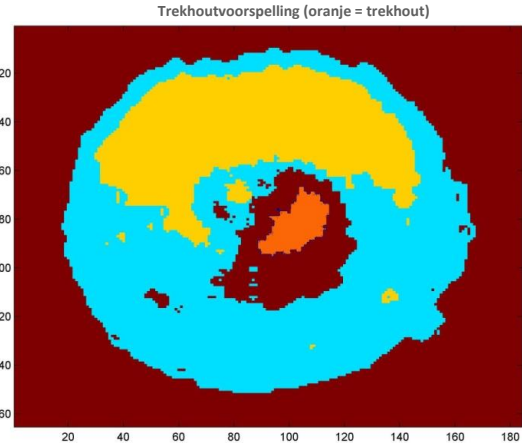
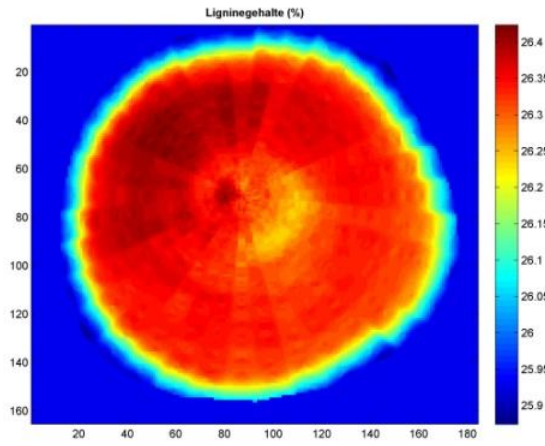




Schijf 212

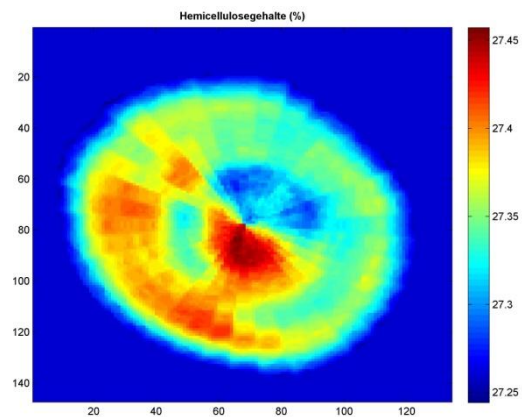
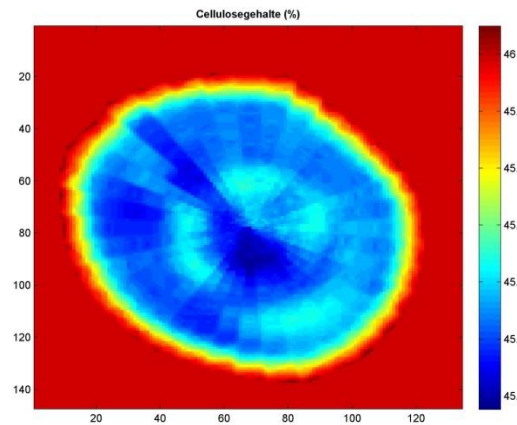
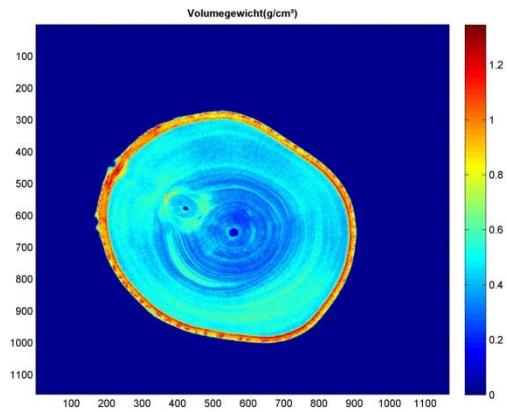
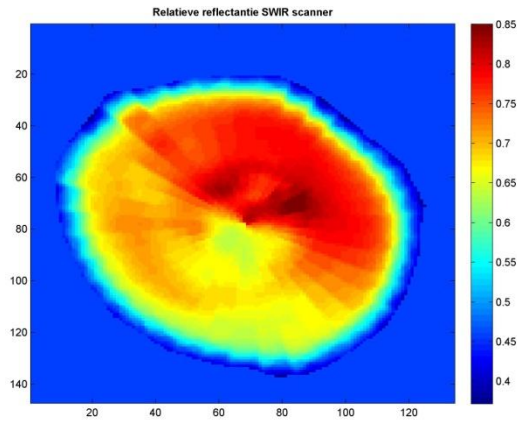
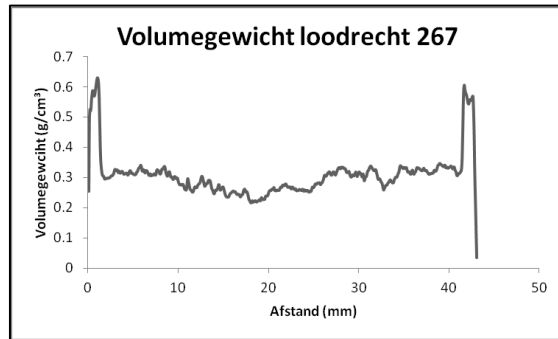
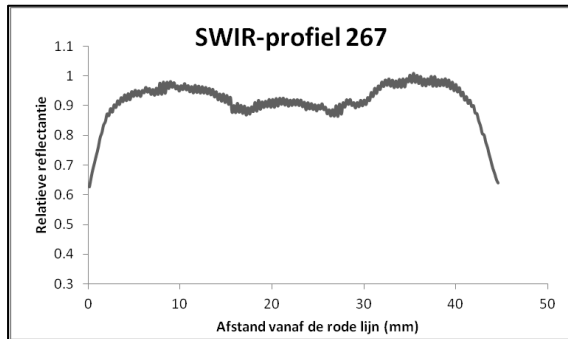
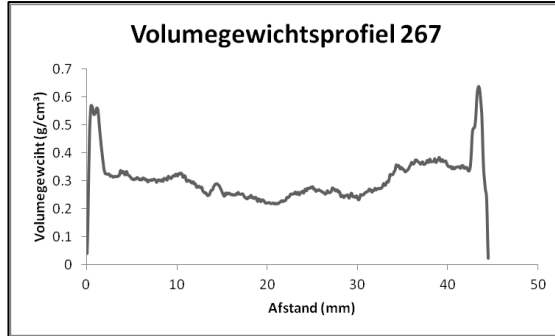
Soort: Wilg
Vochtgehalte: 160.96 %
Calorische waarde hout: 19.20 MJ/kg
Calorische waarde schors: 18.81 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 29.04 cm²
Oppervlakte hout: 24.88 cm²
Oppervlakte schors: 4.16 cm²

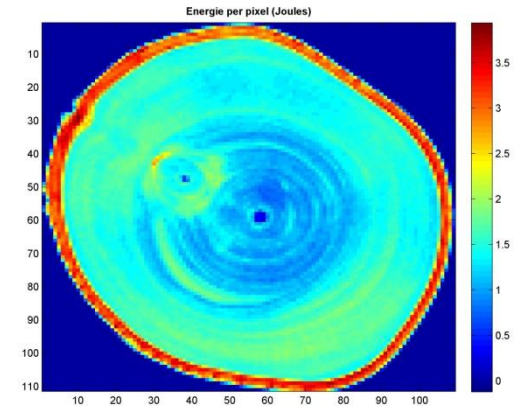
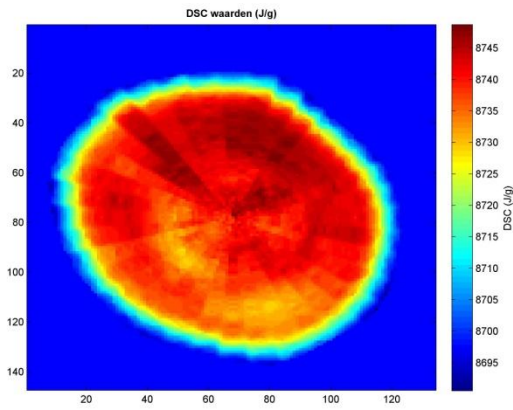
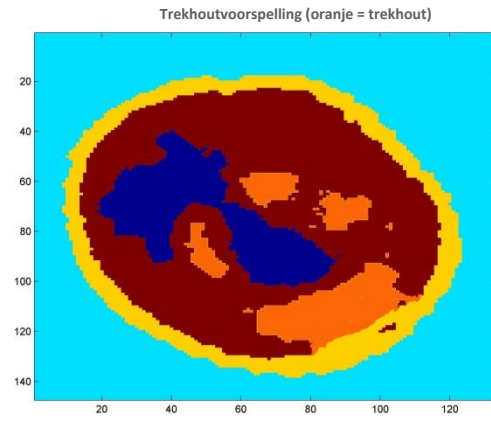
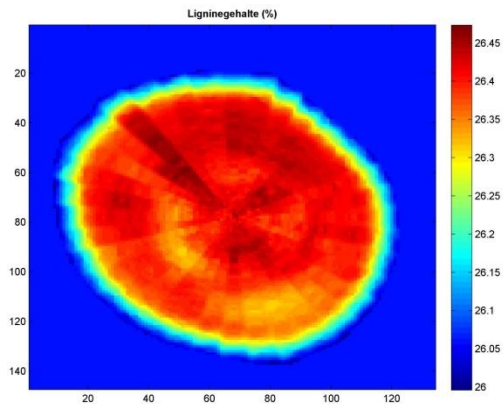




Schijf 267

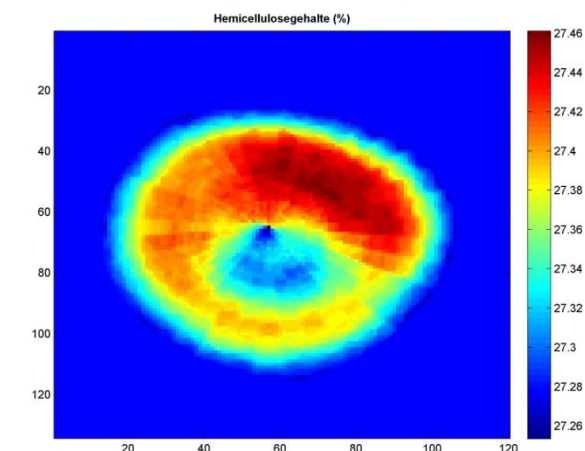
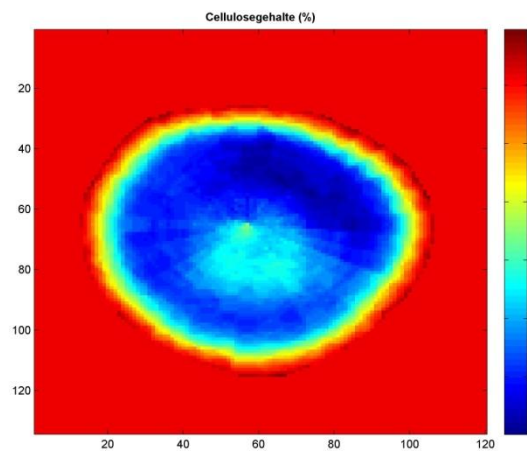
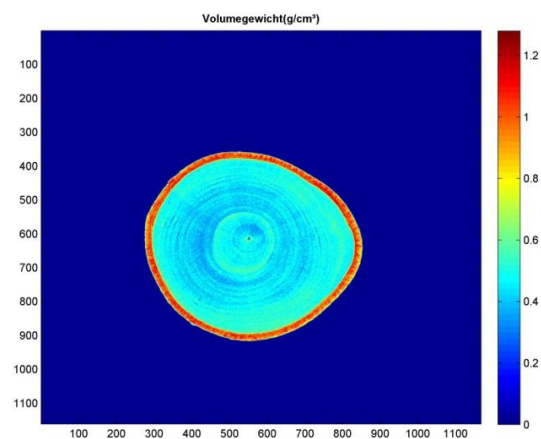
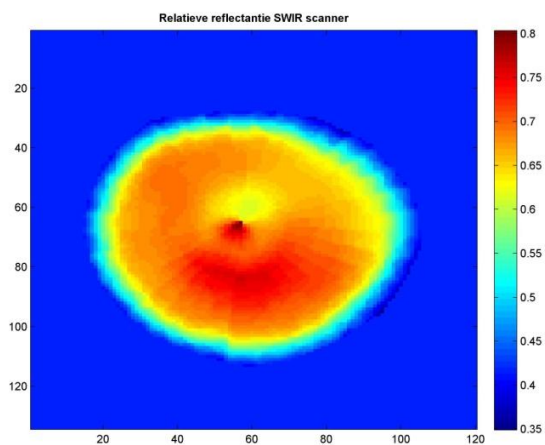
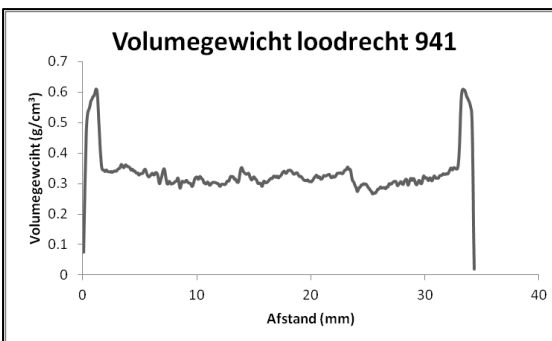
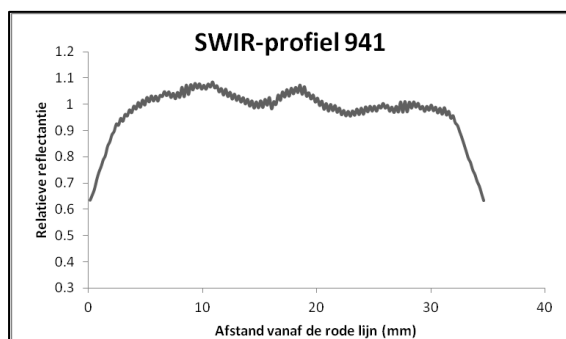
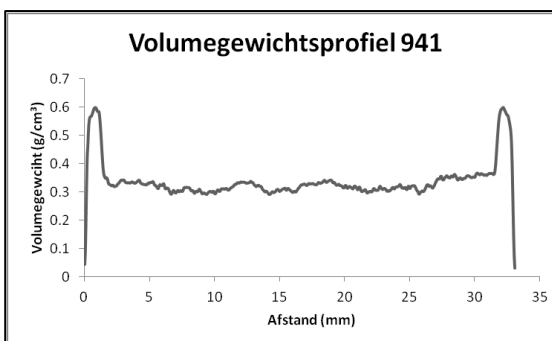
Soort: Wilg
 Vochtgehalte: 125.08 %
 Calorische waarde hout: 19.17 MJ/kg
 Calorische waarde schors: 18.11 MJ/kg
 Oppervlakte schijf: 27.12 cm²
 Oppervlakte hout: 21.57 cm²
 Oppervlakte schors: 5.55 cm²

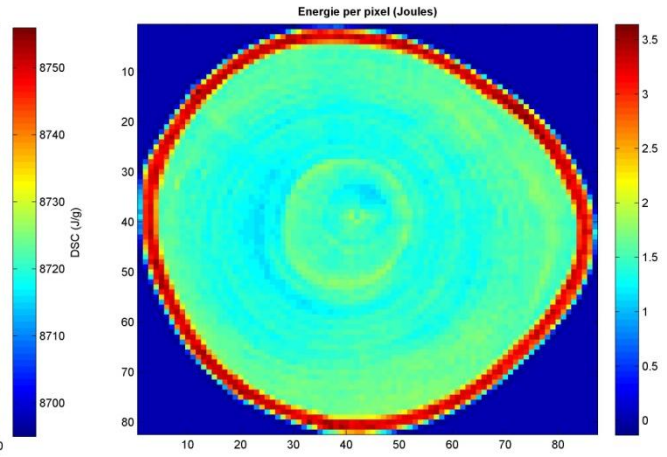
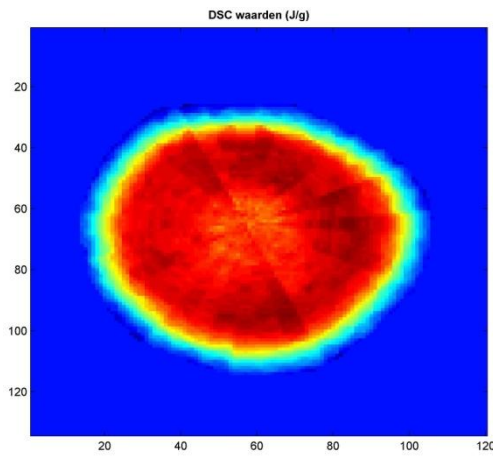
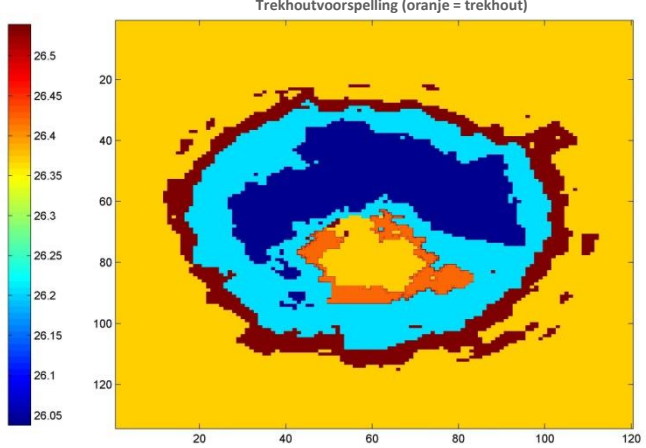
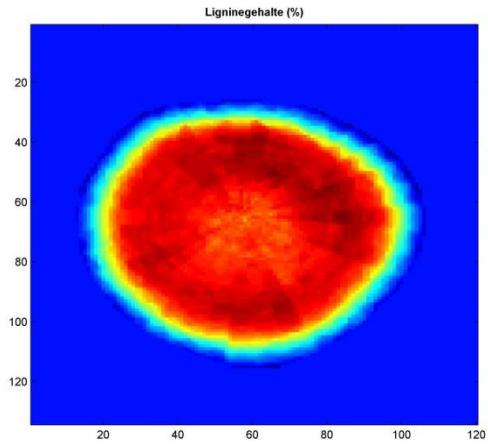




Schijf 941

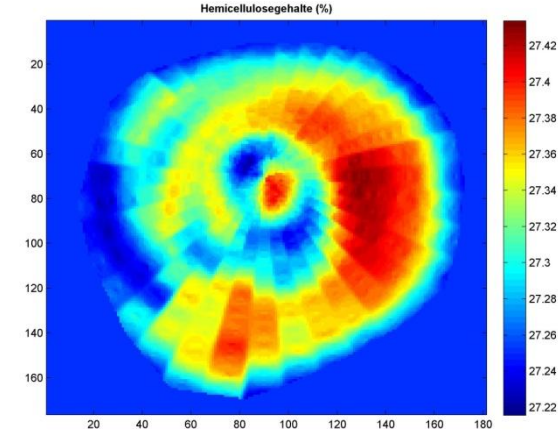
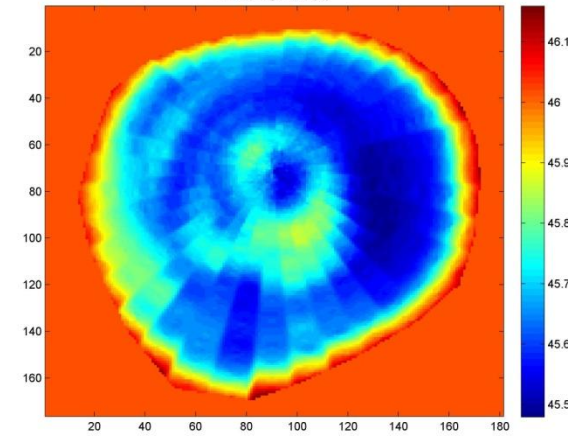
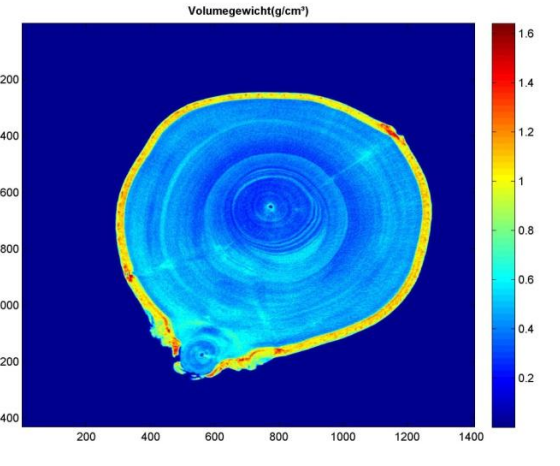
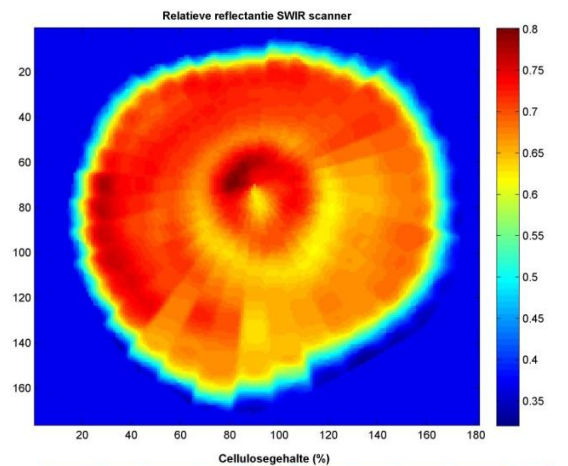
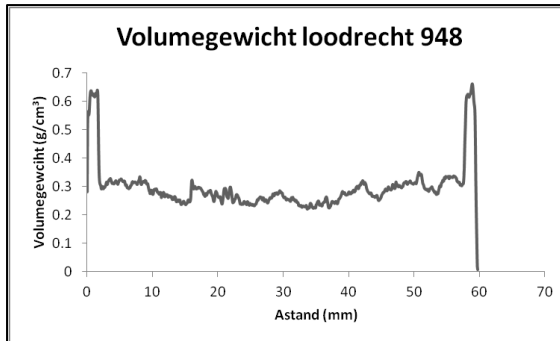
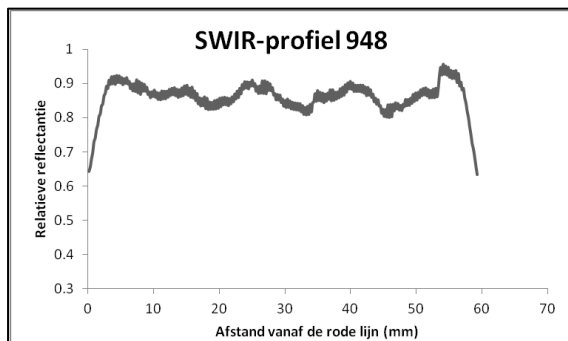
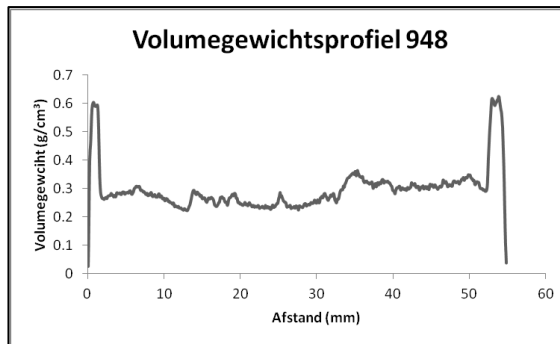
Soort: Wilg
Vochtgehalte: 129.79 %
Calorische waarde hout: 19.22 MJ/kg
Calorische waarde schors: 19.26 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 9.84 cm²
Oppervlakte hout: 7.74 cm²
Oppervlakte schors: 2.10 cm²

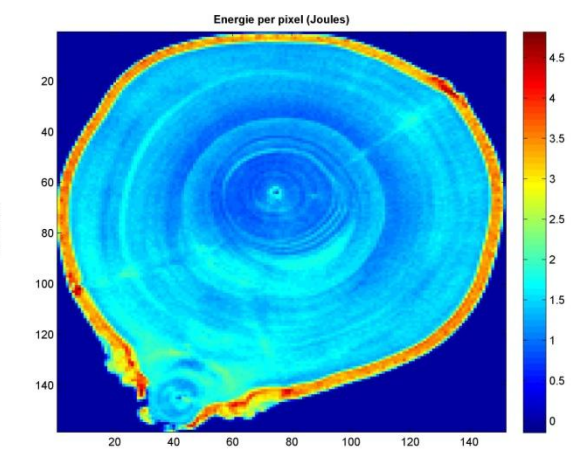
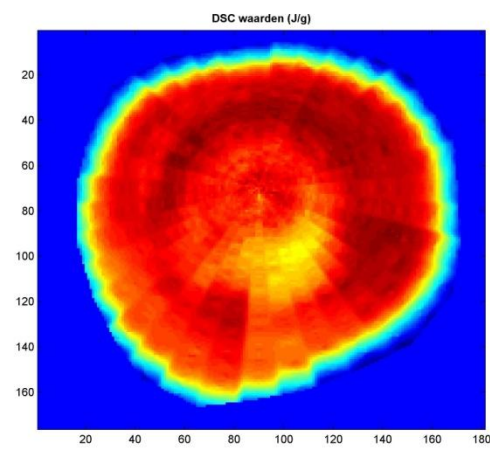
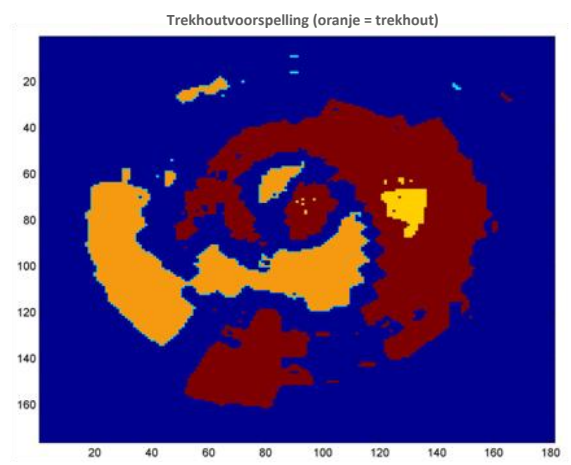
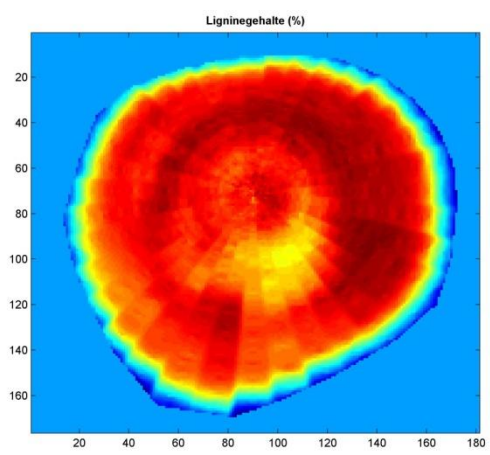




Schijf 948

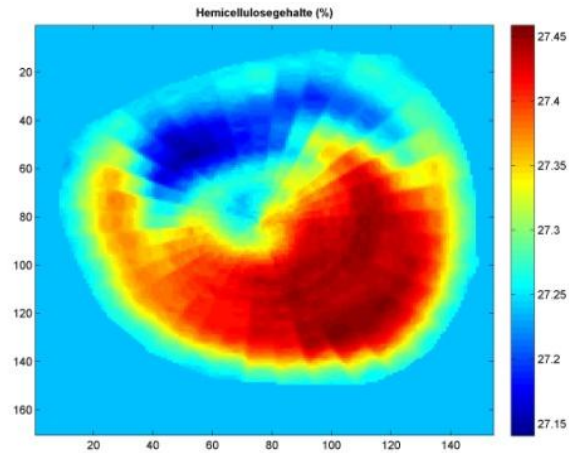
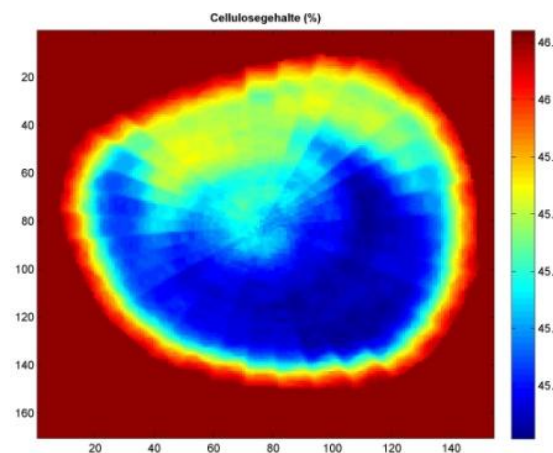
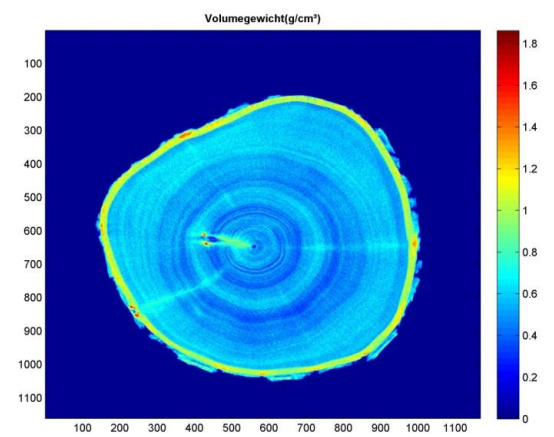
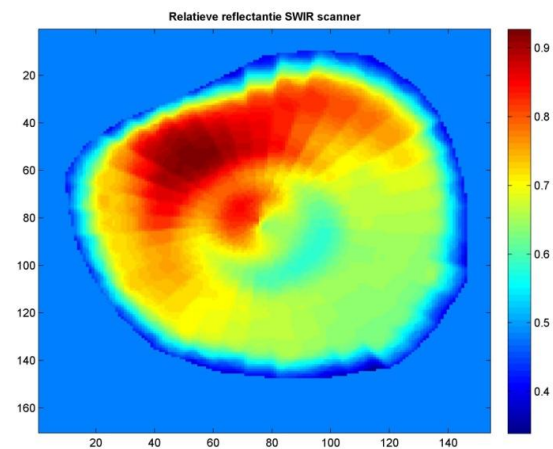
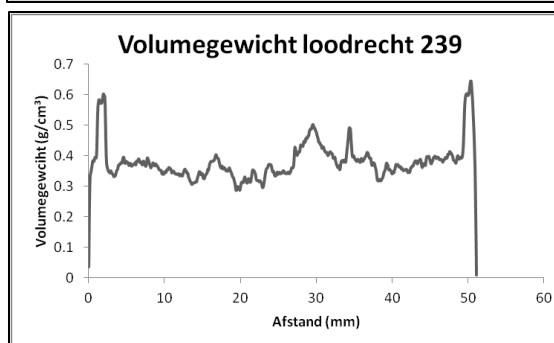
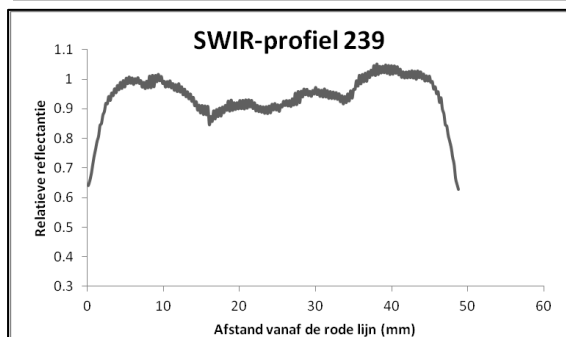
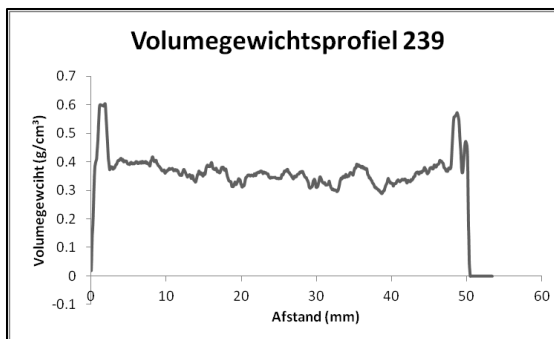
Soort: Wilg
 Vochtgehalte: 171.88 %
 Calorische waarde hout: 19.33 MJ/kg
 Calorische waarde schors: 19.87 MJ/kg
 Oppervlakte schijf: 9.84 cm²
 Oppervlakte hout: 7.74 cm²
 Oppervlakte schors: 2.10 cm²

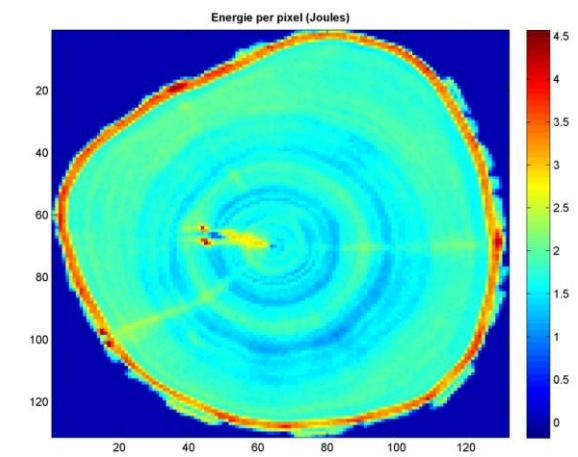
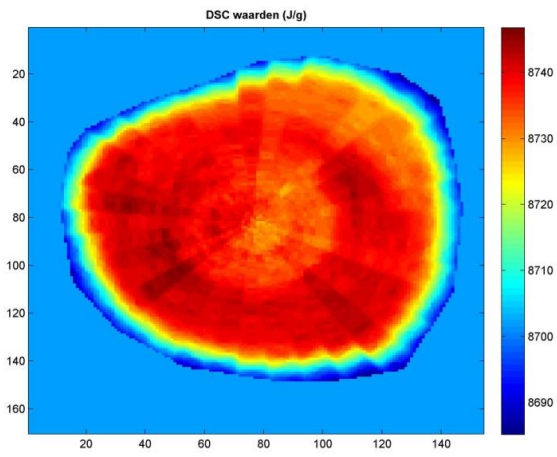
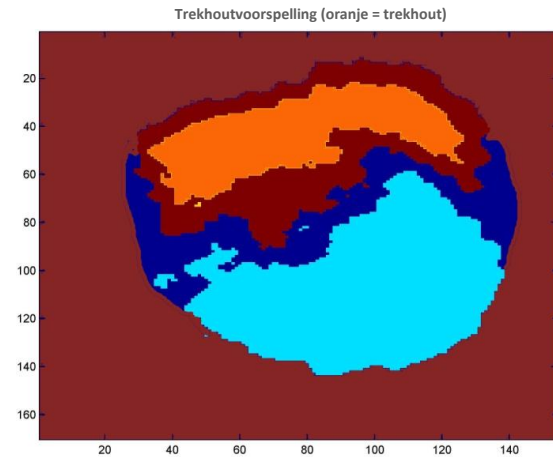
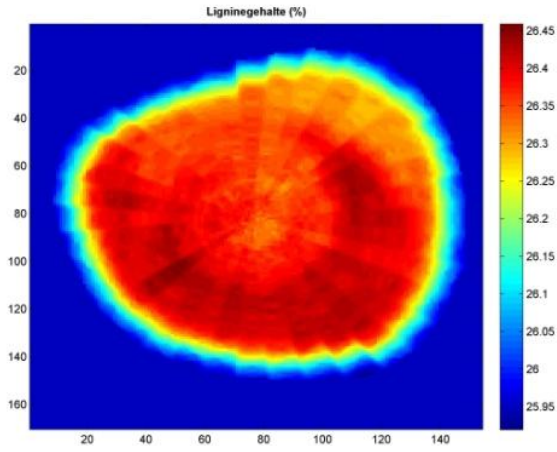




Schijf 239

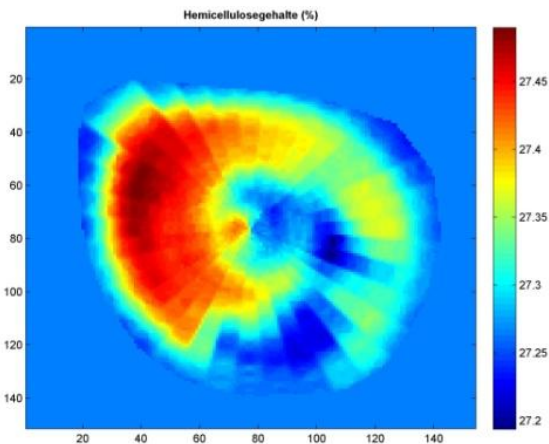
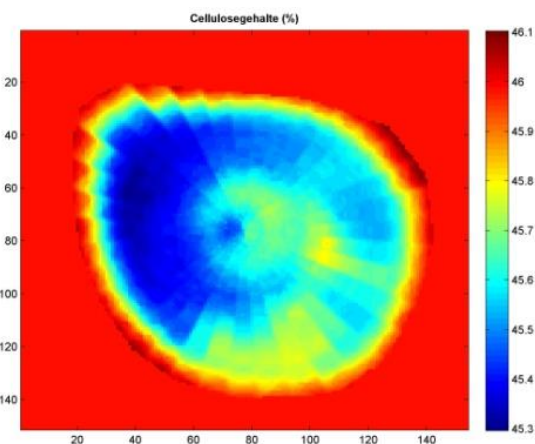
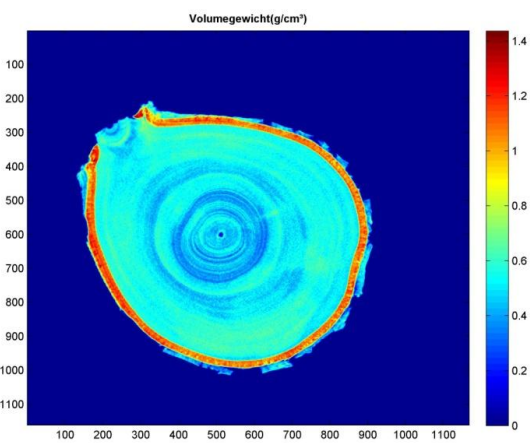
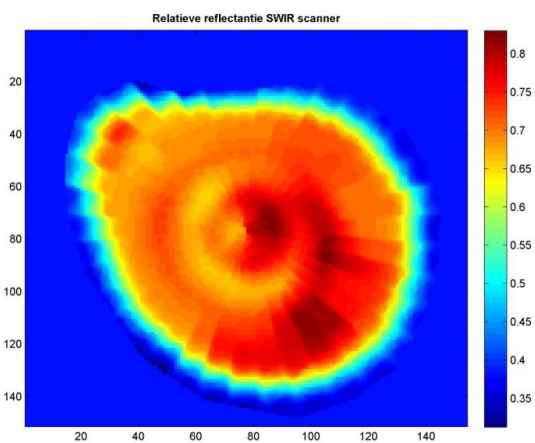
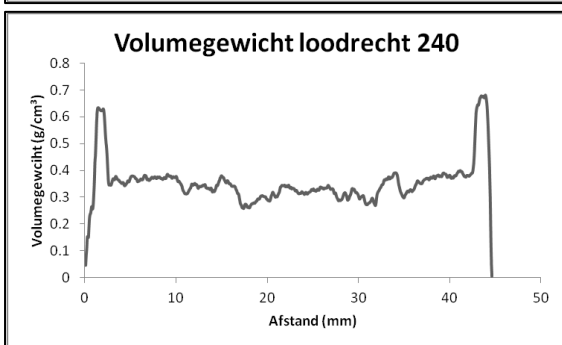
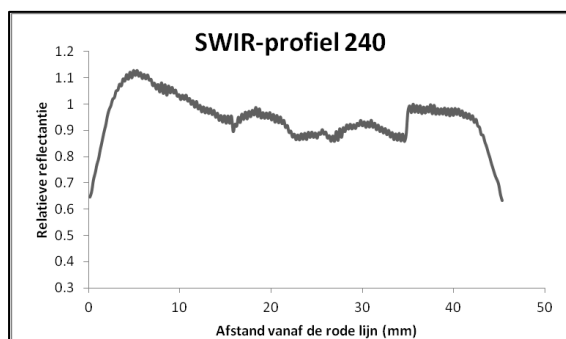
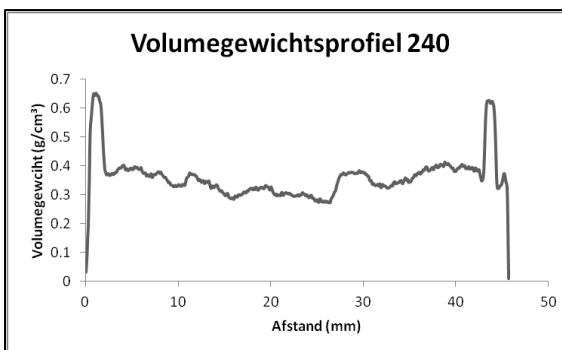
Soort: Wilg
 Vochtgehalte: 121.10 %
 Calorische waarde hout: 18.84 MJ/kg
 Calorische waarde schors: 16.94 MJ/kg
 Oppervlakte schijf: 20.82 cm²
 Oppervlakte hout: 17.26 cm²
 Oppervlakte schors: 3.56 cm²

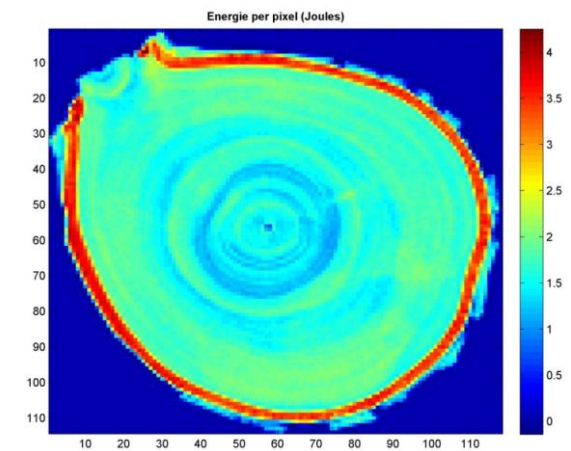
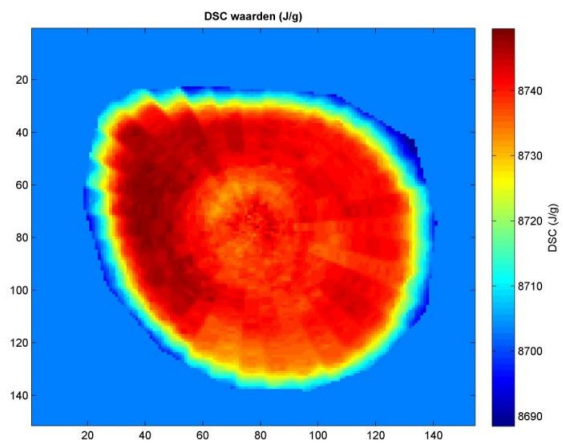
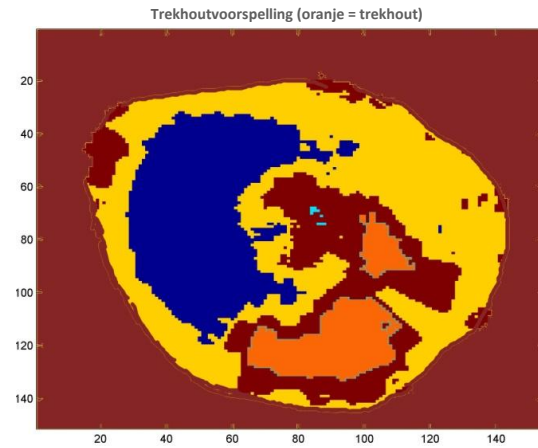
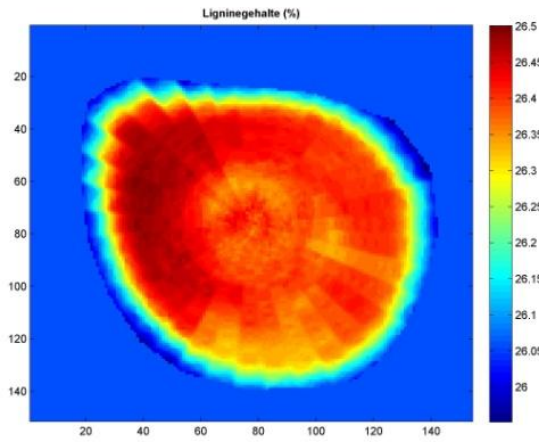




Schijf 240

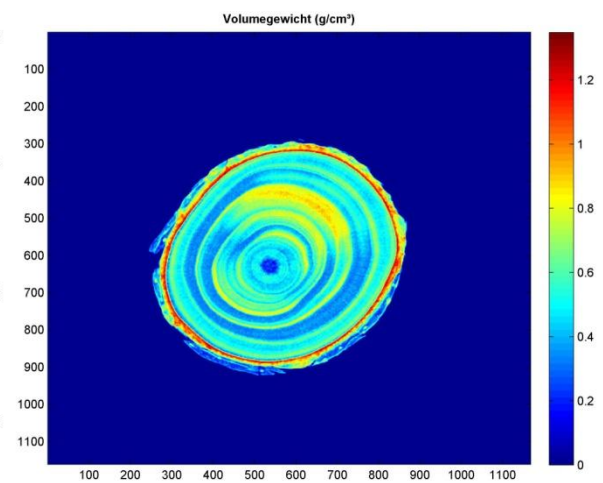
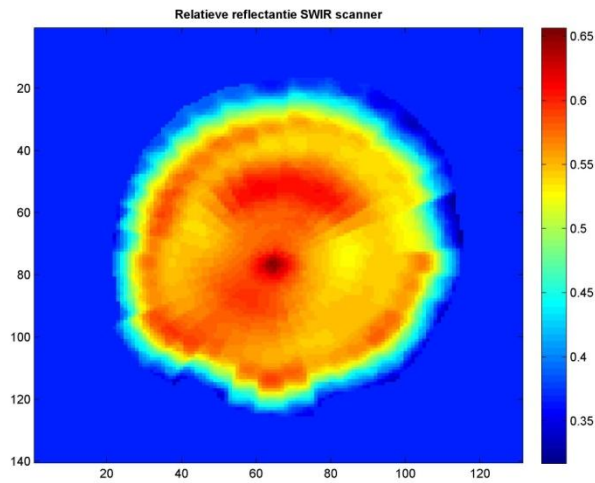
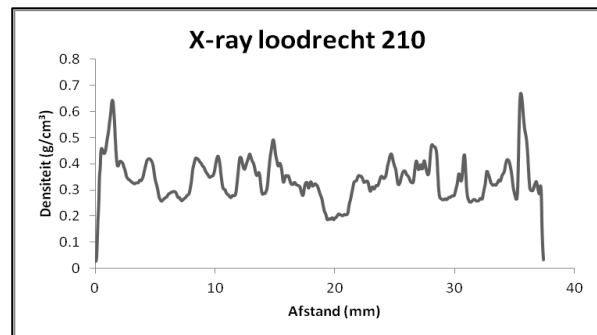
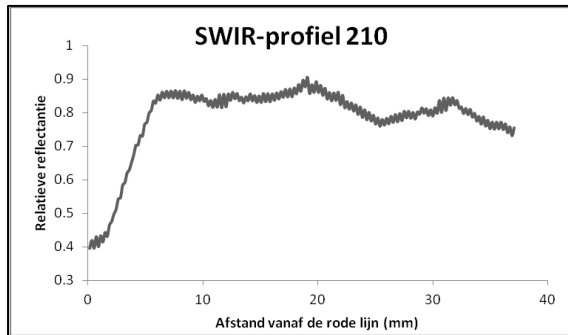
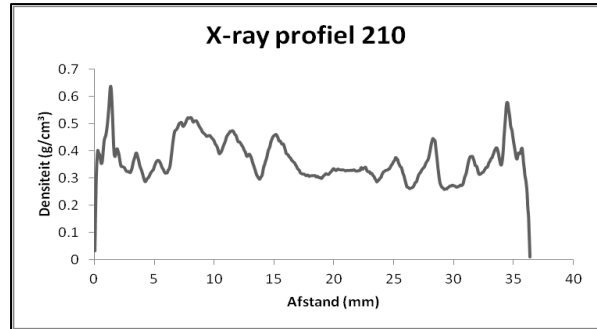
Soort: Wilg
Vochtgehalte: 107.07 %
Calorische waarde hout: 19.52 MJ/kg
Calorische waarde schors: 18.06 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 16.10 cm²
Oppervlakte hout: 13.11 cm²
Oppervlakte schors: 3.00 cm²





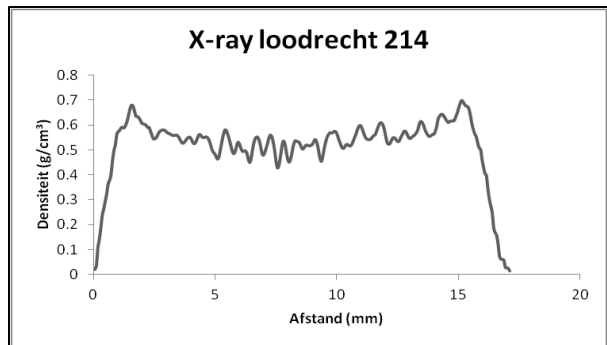
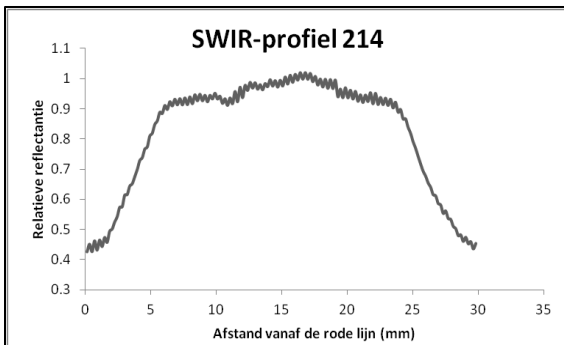
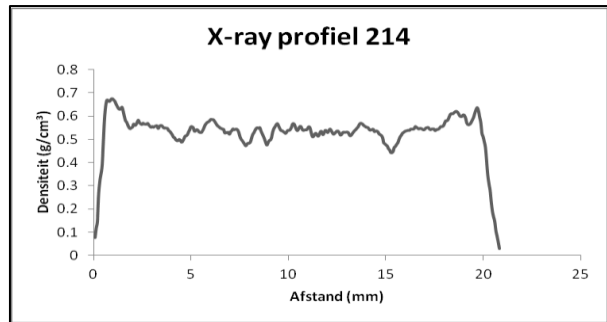
Schijf 210

Soort: Den
Vochtgehalte: 153.96 %
Calorische waarde hout: 20.94 MJ/kg
Calorische waarde schors: 21.40 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 10.43 cm²
Oppervlakte hout: 8.10 cm²
Oppervlakte schors: 2.34 cm²



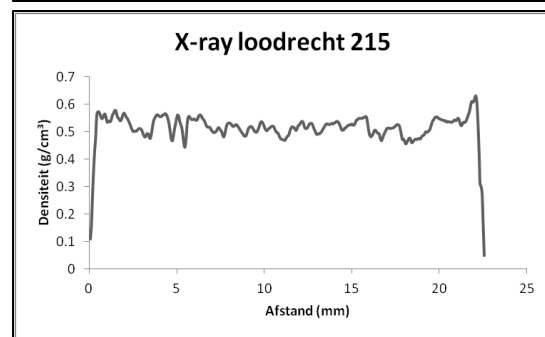
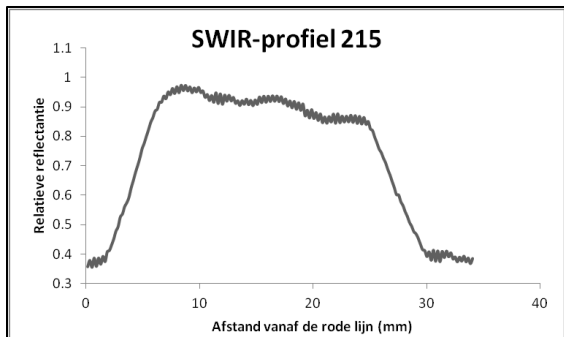
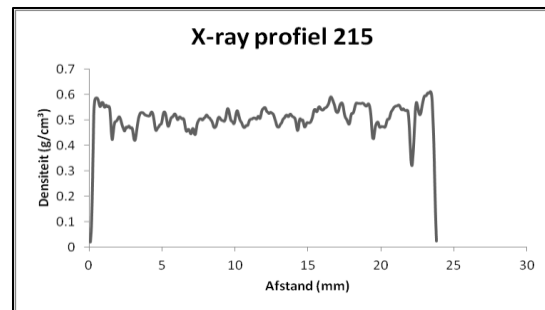
Schijf 214

Soort: Eik
Vochtgehalte: 78.91 %
Calorische waarde hout: 19.17 MJ/kg
Calorische waarde schors: 19.59 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 4.52 cm²
Oppervlakte hout: 3.00 cm²
Oppervlakte schors: 1.52 cm²



Schijf 215

Soort: Eik
Vochtgehalte: 80.94 %
Calorische waarde hout: 19.10 MJ/kg
Calorische waarde schors: 16.87 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 3.88 cm²
Oppervlakte hout: 2.82 cm²
Oppervlakte schors: 1.06 cm²



Schijf 216

Soort: Eik

Vochtgehalte: 77.82 %

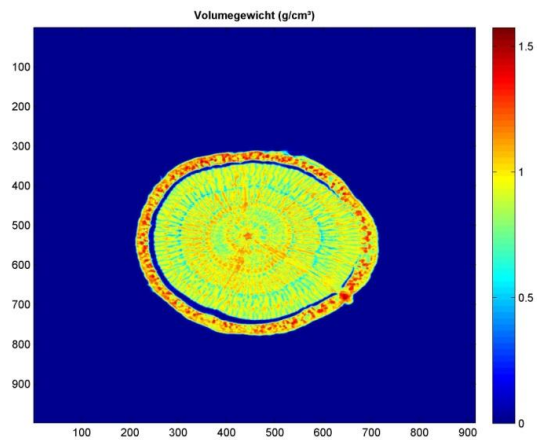
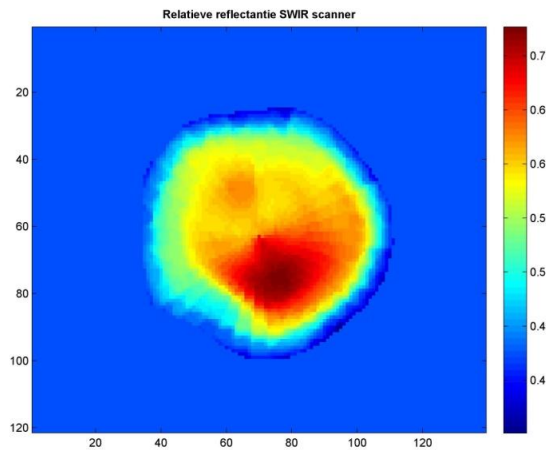
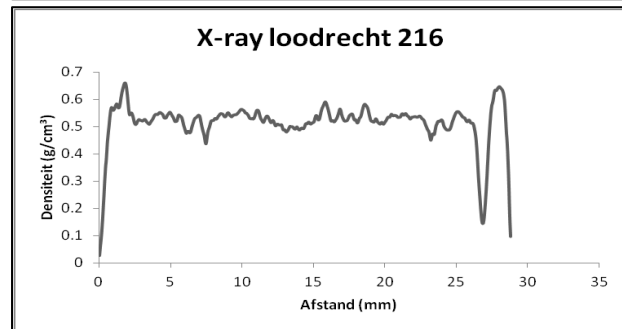
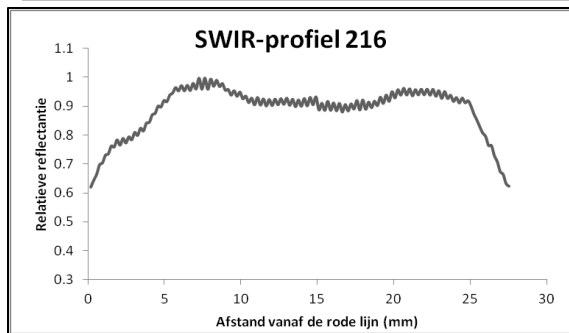
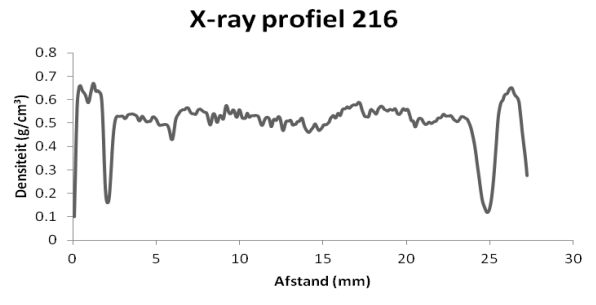
Calorische waarde hout: 18.88 MJ/kg

Calorische waarde schors: 19.16 MJ/kg

Oppervlakte schijf: 6.23 cm²

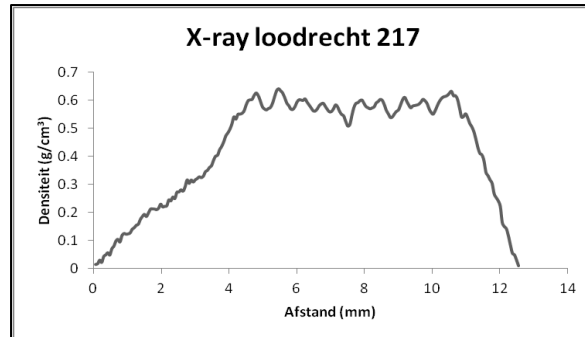
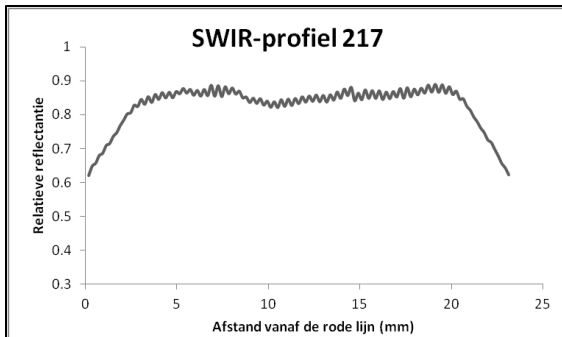
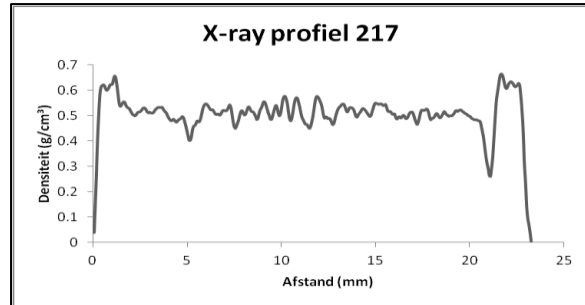
Oppervlakte hout: 4.49 cm²

Oppervlakte schors: 1.74 cm²



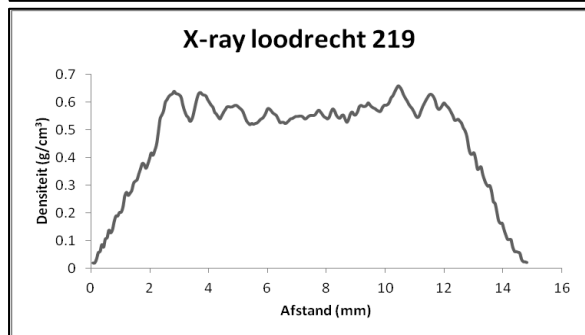
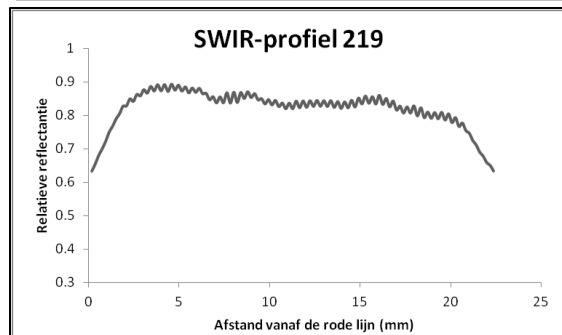
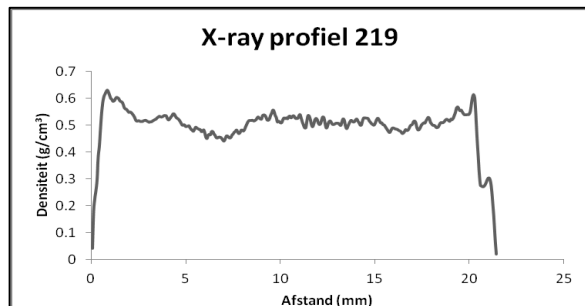
Schijf 217

Soort: Eik
Vochtgehalte: 76.80 %
Calorische waarde hout: 18.97 MJ/kg
Calorische waarde schors: 19.35 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 4.79 cm²
Oppervlakte hout: 3.44 cm²
Oppervlakte schors: 1.35 cm²



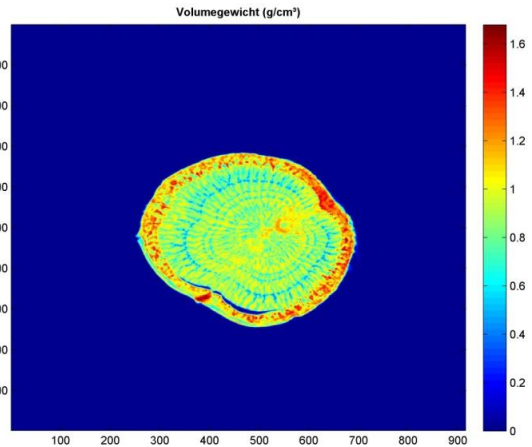
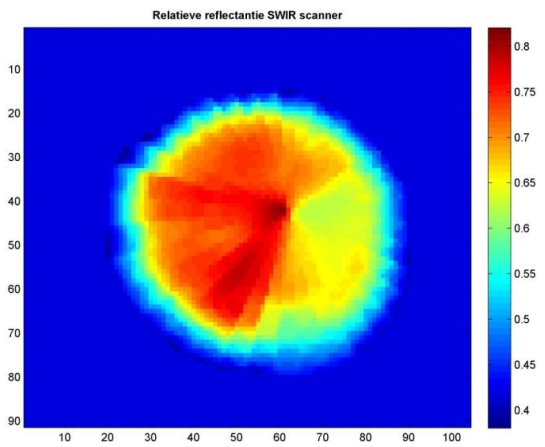
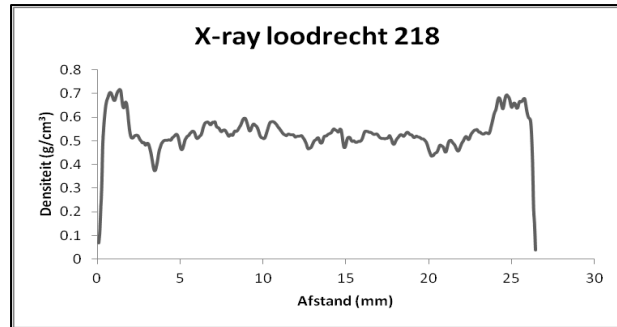
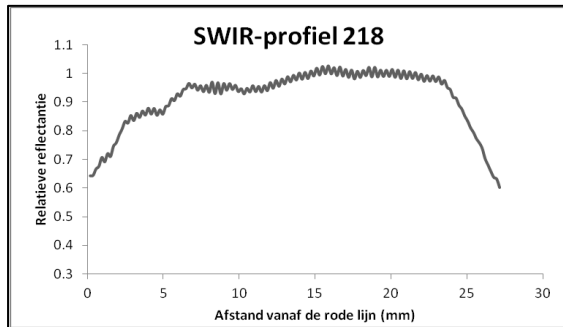
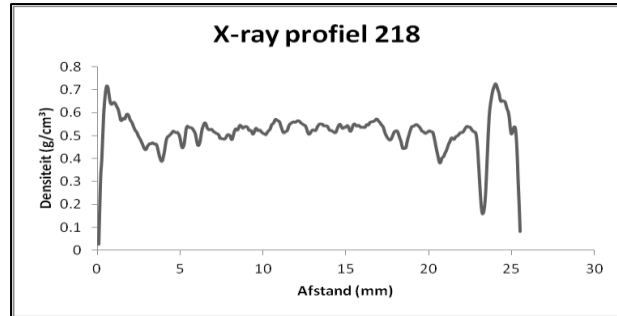
Schijf 219

Soort: Eik
Vochtgehalte: 75.60 %
Calorische waarde hout: 18.66 MJ/kg
Calorische waarde schors: 20.57 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 5.10 cm²
Oppervlakte hout: 3.78 cm²
Oppervlakte schors: 1.32 cm²



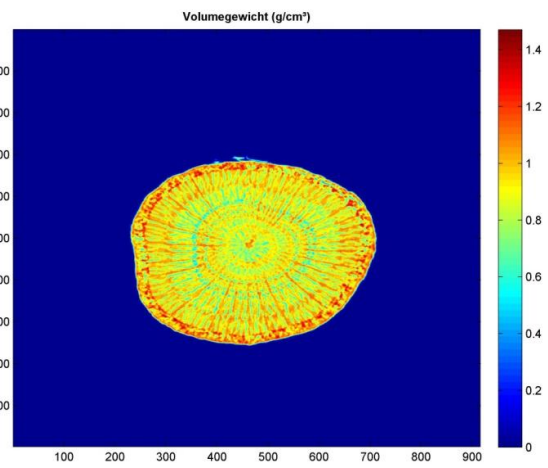
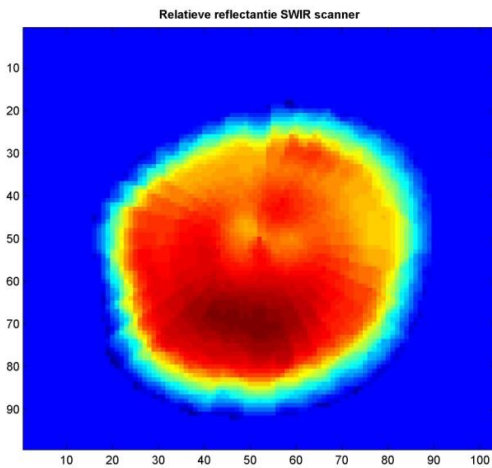
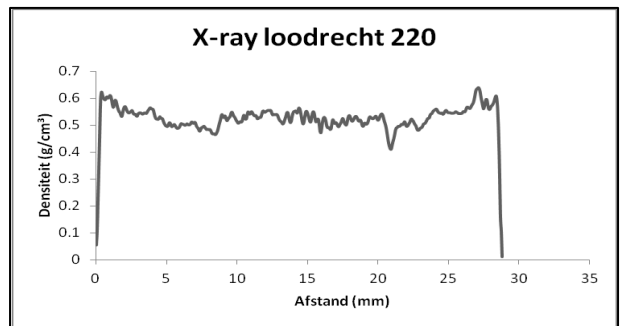
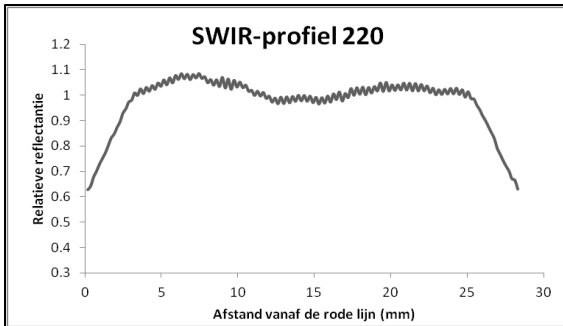
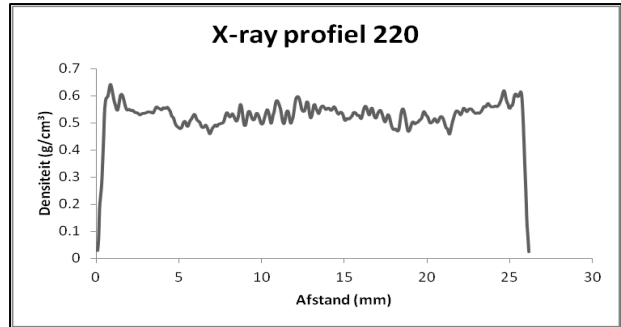
Schijf 218

Soort: Eik
Vochtgehalte: 75.63 %
Calorische waarde hout: 18.58 MJ/kg
Calorische waarde schors: 20.73 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 4.79 cm²
Oppervlakte hout: 3.16 cm²
Oppervlakte schors: 1.63 cm²



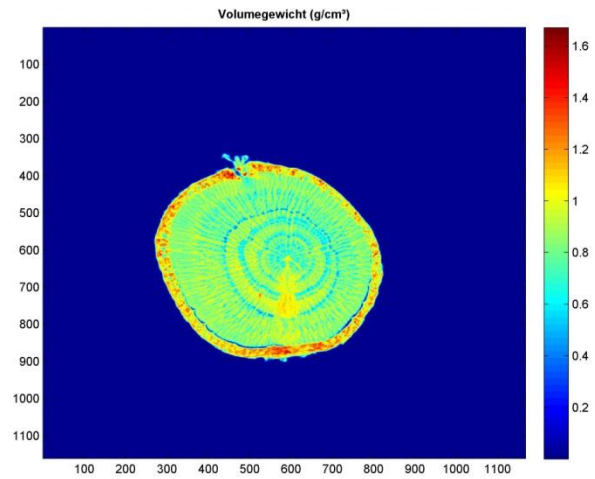
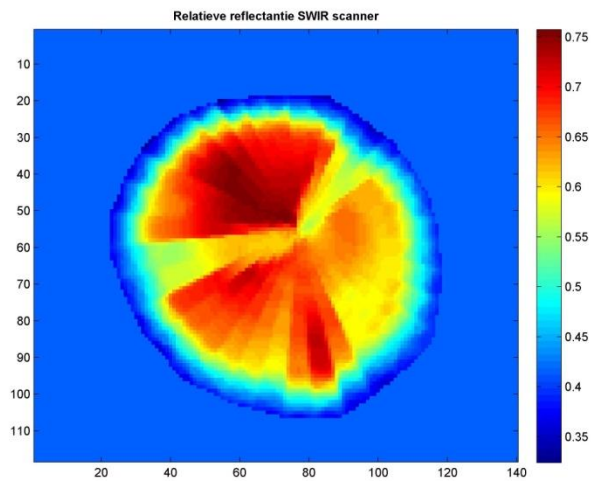
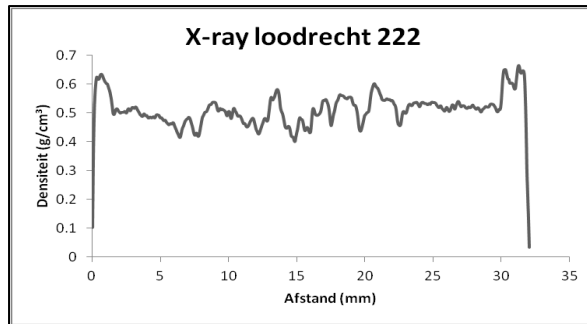
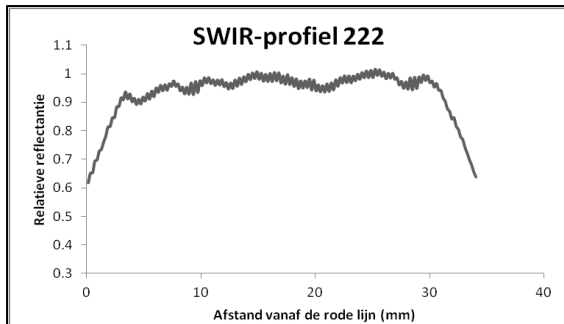
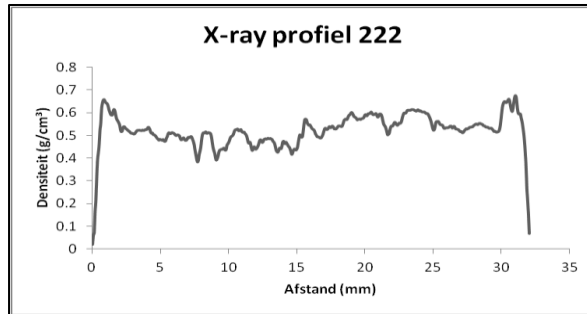
Schijf 220

Soort: Eik
Vochtgehalte: 75.64 %
Calorische waarde hout: 18.54 MJ/kg
Calorische waarde schors: 18.20 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 6.75 cm²
Oppervlakte hout: 5.01 cm²
Oppervlakte schors: 1.74 cm²



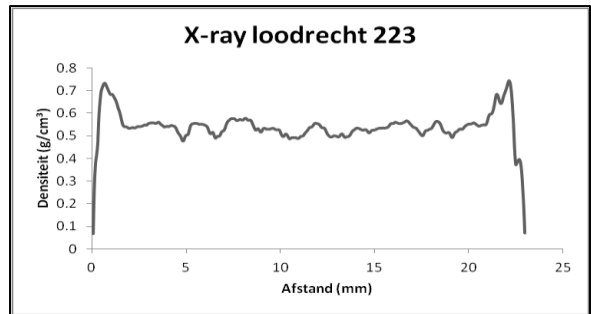
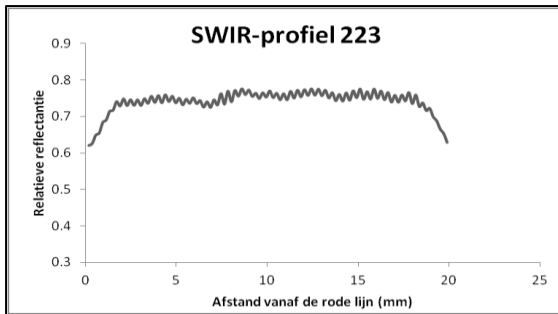
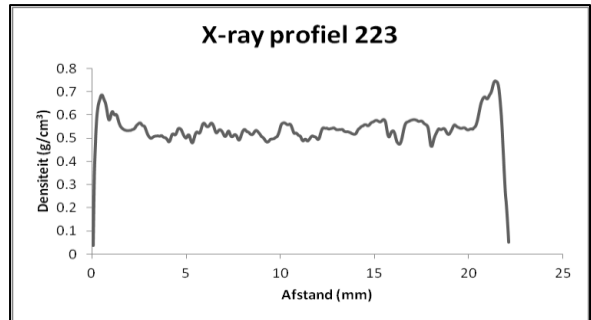
Schijf 222

Soort: Eik
Vochtgehalte: 74.47 %
Calorische waarde hout: 18.55 MJ/kg
Calorische waarde schors: 20.46 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 9.14 cm²
Oppervlakte hout: 7.02 cm²
Oppervlakte schors: 2.12 cm²



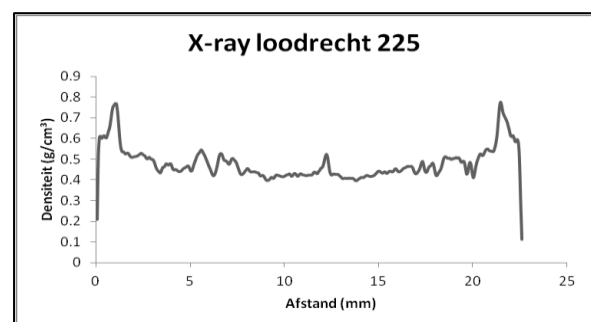
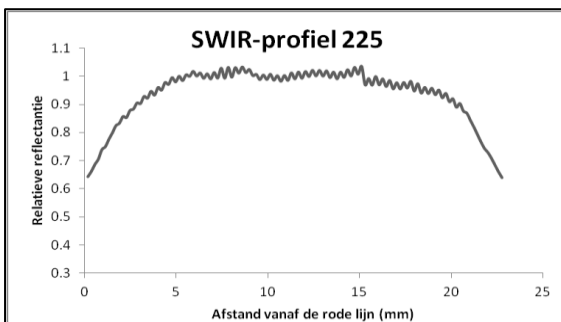
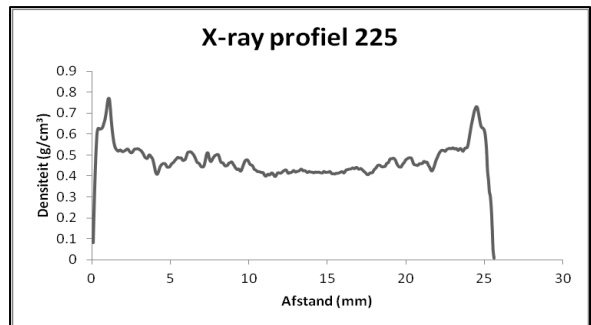
Schijf 223

Soort: Eik
Vochtgehalte: 77.83 %
Calorische waarde hout: 18.79 MJ/kg
Calorische waarde schors: 19.12 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 4.46 cm²
Oppervlakte hout: 3.25 cm²
Oppervlakte schors: 1.21 cm²



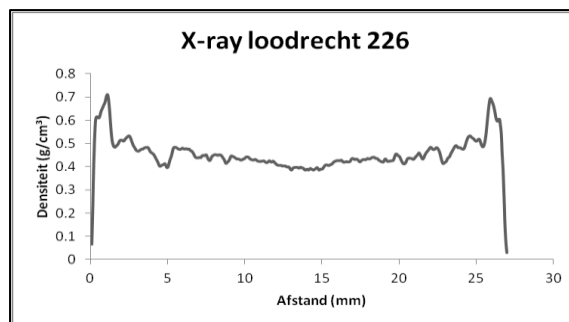
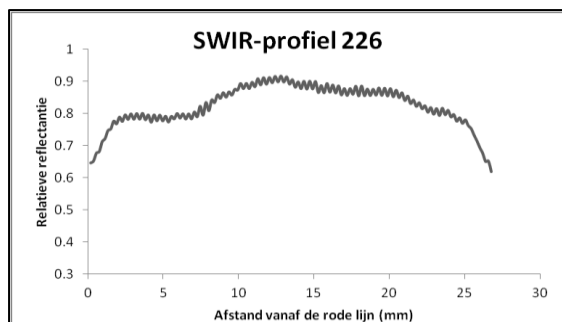
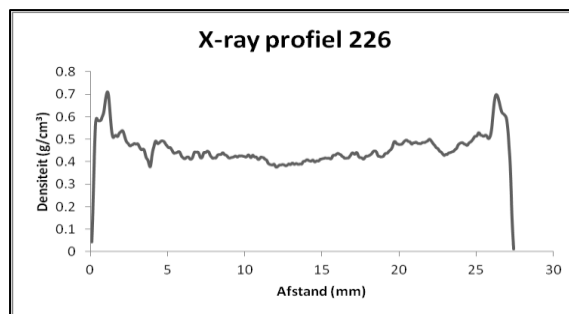
Schijf 225

Soort: Es
Vochtgehalte: 61.07 %
Calorische waarde hout: 19.10 MJ/kg
Calorische waarde schors: 19.79 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 4.46 cm²
Oppervlakte hout: 3.25 cm²
Oppervlakte schors: 1.21 cm²



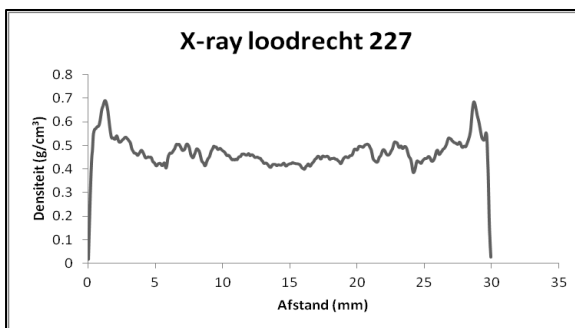
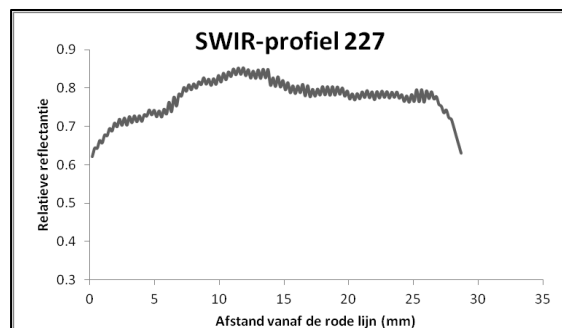
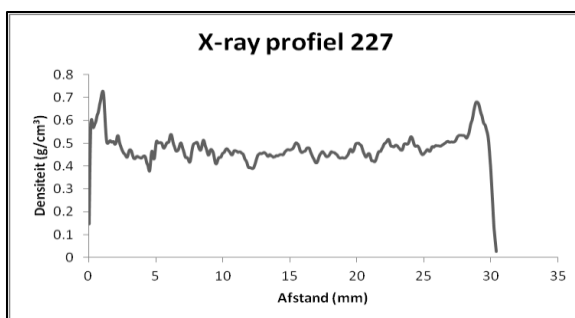
Schijf 226

Soort: Es
Vochtgehalte: 56.83 %
Calorische waarde hout: 19.26 MJ/kg
Calorische waarde schors: 16.13 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 6.17 cm²
Oppervlakte hout: 5.00 cm²
Oppervlakte schors: 1.17 cm²



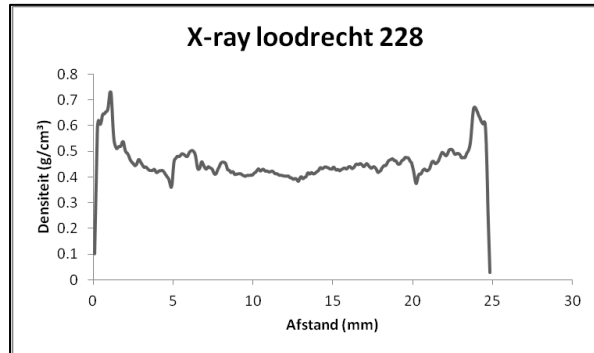
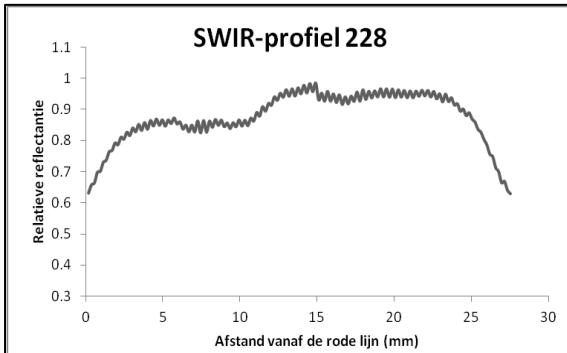
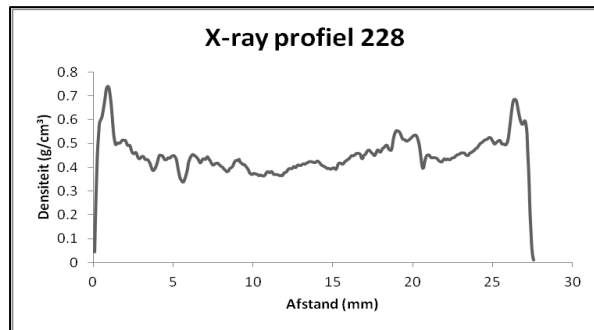
Schijf 227

Soort: Es
Vochtgehalte: 59.54 %
Calorische waarde hout: 19.10 MJ/kg
Calorische waarde schors: 16.95 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 7.59 cm²
Oppervlakte hout: 5.71 cm²
Oppervlakte schors: 1.87 cm²



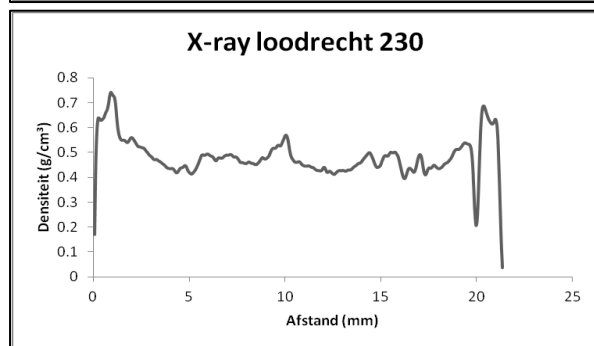
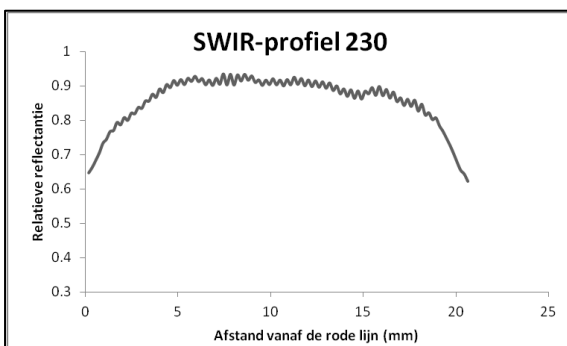
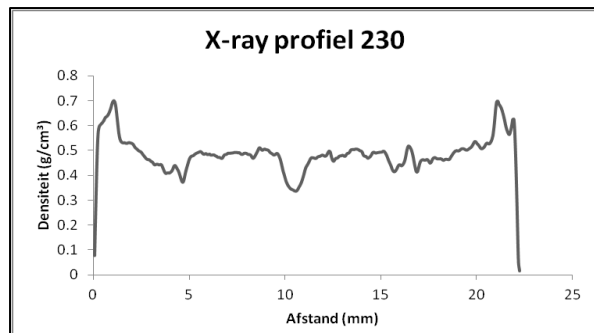
Schijf 228

Soort: Es
Vochtgehalte: 61.40 %
Calorische waarde hout: 19.07 MJ/kg
Calorische waarde schors: 18.42 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 5.44 cm²
Oppervlakte hout: 4.07 cm²
Oppervlakte schors: 1.37 cm²



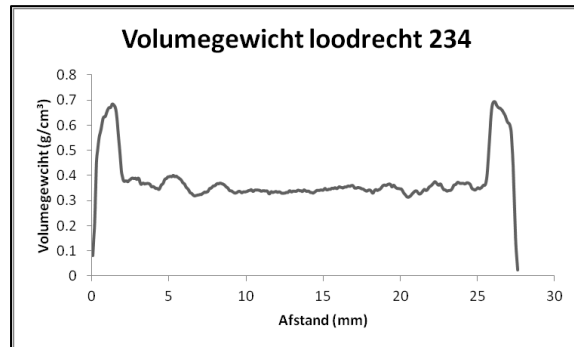
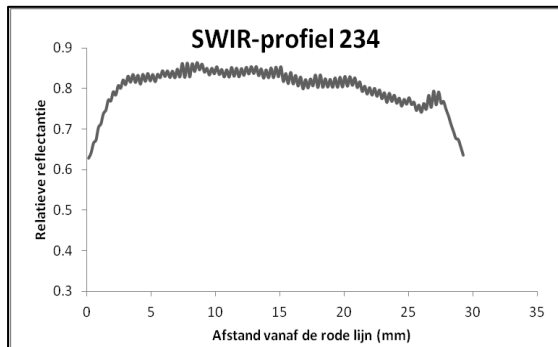
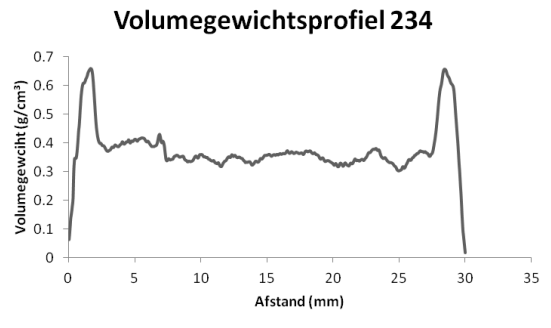
Schijf 230

Soort: Es
Vochtgehalte: 67.40 %
Calorische waarde hout: 19.83 MJ/kg
Calorische waarde schors: 17.85 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 3.54 cm²
Oppervlakte hout: 2.50 cm²
Oppervlakte schors: 1.04 cm²



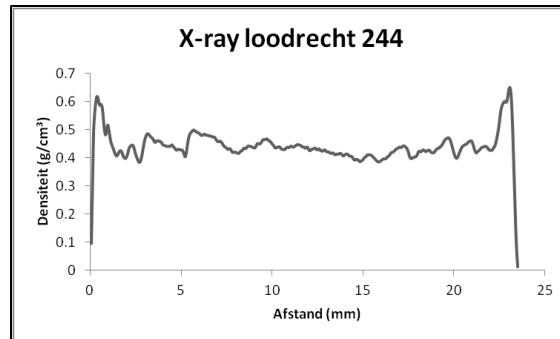
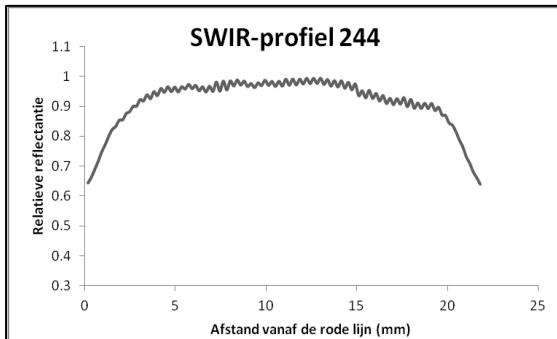
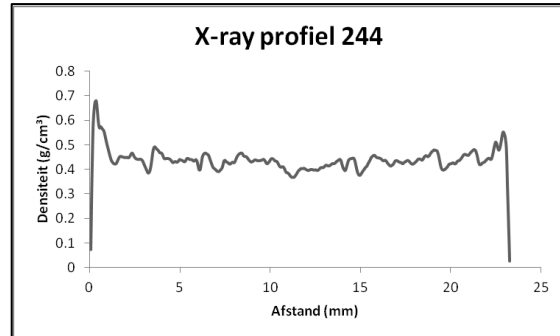
Schijf 234

Soort: Wilg
Vochtgehalte: 93.24 %
Calorische waarde hout: 18.93 MJ/kg
Calorische waarde schors: 18.72 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 6.44 cm²
Oppervlakte hout: 4.96 cm²
Oppervlakte schors: 1.48 cm²



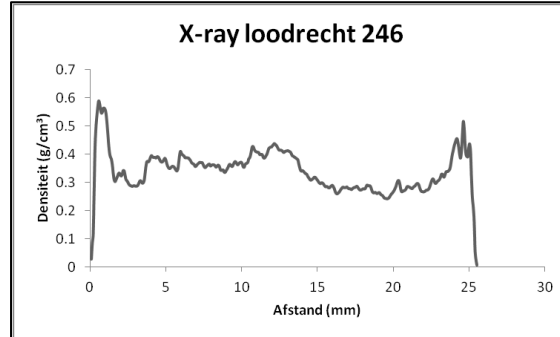
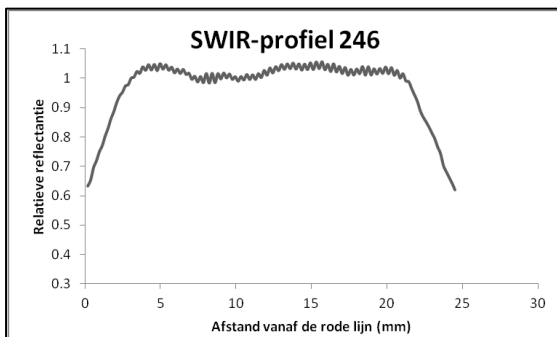
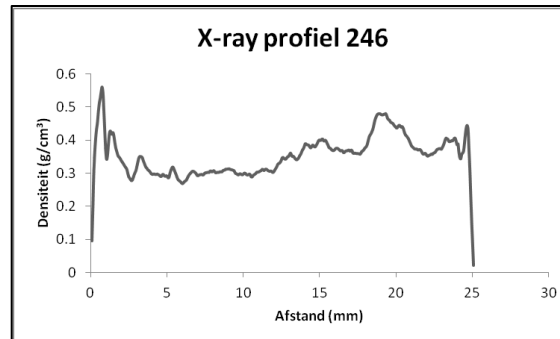
Schijf 244

Soort: Beuk
Vochtgehalte: 21.04 %
Calorische waarde hout: 19.42 MJ/kg
Calorische waarde schors: 18.78 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 3.48 cm²
Oppervlakte hout: 2.96 cm²
Oppervlakte schors: 0.52 cm²



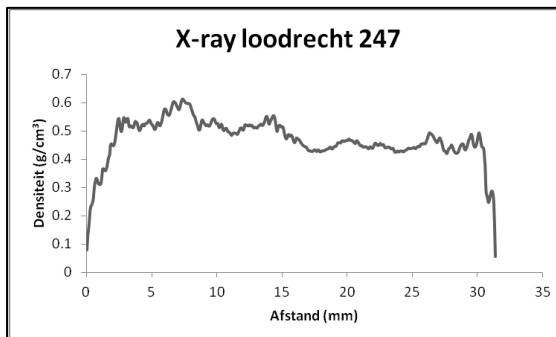
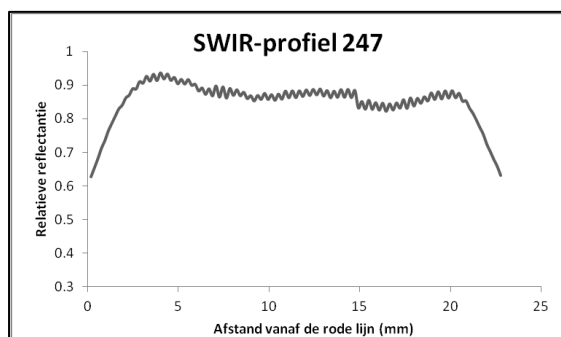
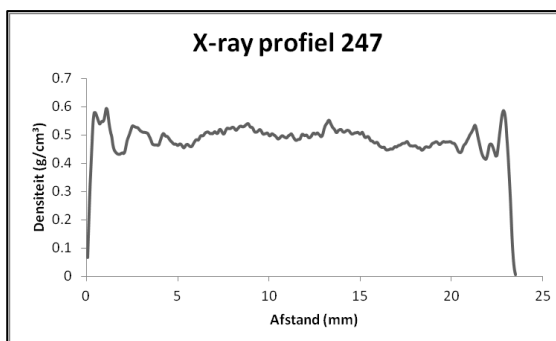
chijf 246

Soort: Beuk
Vochtgehalte: 16.50 %
Calorische waarde hout: 18.95 MJ/kg
Calorische waarde schors: 20.35 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 4.00 cm²
Oppervlakte hout: 3.65 cm²
Oppervlakte schors: 0.35 cm²



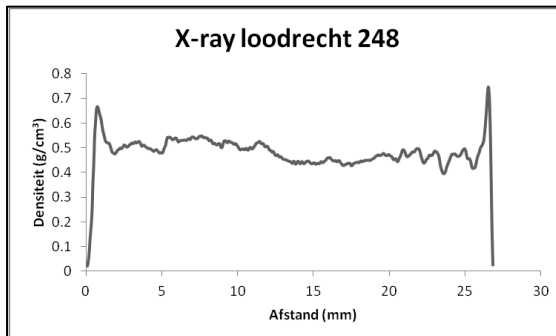
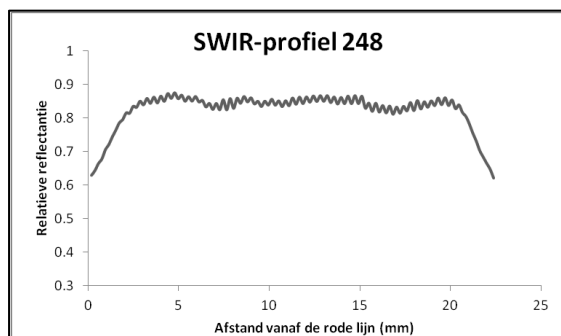
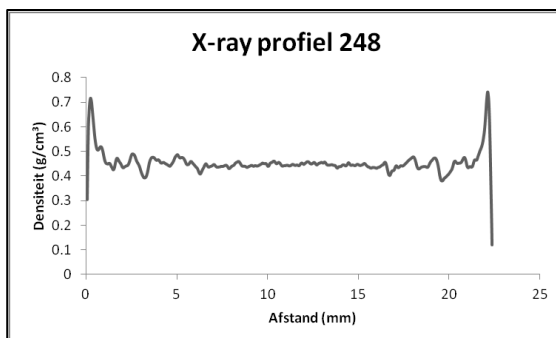
Schijf 247

Soort: Beuk
Vochtgehalte: 76.22 %
Calorische waarde hout: 19.27 MJ/kg
Calorische waarde schors: 20.84 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 4.10 cm²
Oppervlakte hout: 3.60 cm²
Oppervlakte schors: 0.50 cm²



Schijf 248

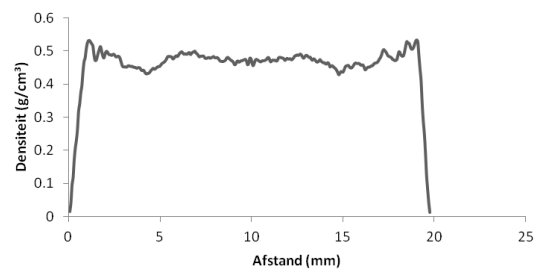
Soort: Beuk
Vochtgehalte: 20.04 %
Calorische waarde hout: 17.45 MJ/kg
Calorische waarde schors: 19.08 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 4.13 cm²
Oppervlakte hout: 3.61 cm²
Oppervlakte schors: 0.52 cm²



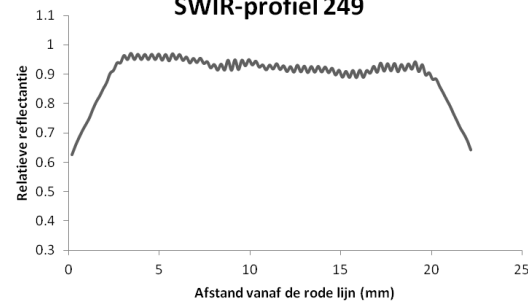
Schijf 249

Soort: Beuk
Vochtgehalte: 71.84 %
Calorische waarde hout: 18.05 MJ/kg
Calorische waarde schors: 16.03 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 3.79 cm²
Oppervlakte hout: 3.22 cm²
Oppervlakte schors: 0.58 cm²

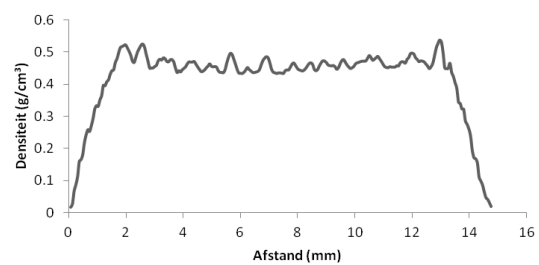
X-ray profiel 249



SWIR-profiel 249



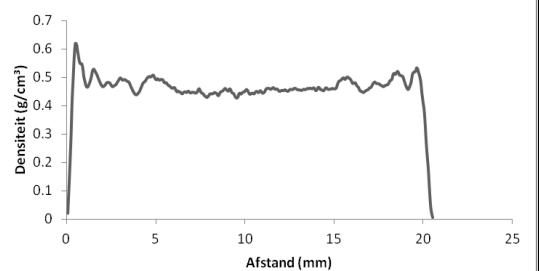
X-ray loodrecht 249



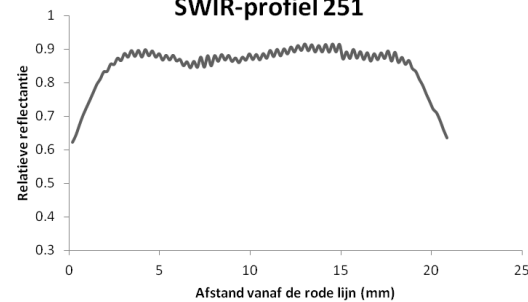
Schijf 251

Soort: Beuk
Vochtgehalte: 82.49 %
Calorische waarde hout: 18.01 MJ/kg
Calorische waarde schors: 18.75 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 3.84 cm²
Oppervlakte hout: 3.41 cm²
Oppervlakte schors: 0.43 cm²

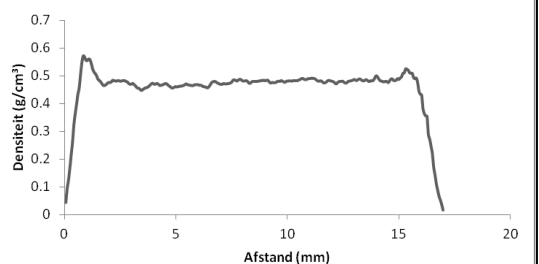
X-ray profiel 251



SWIR-profiel 251

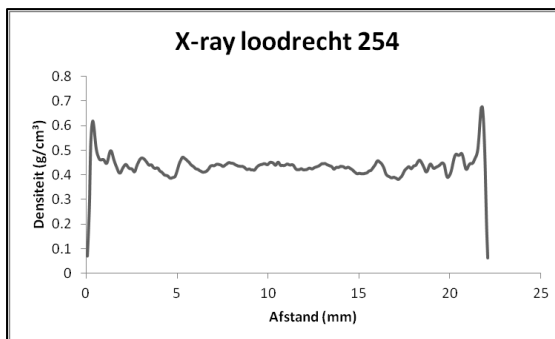
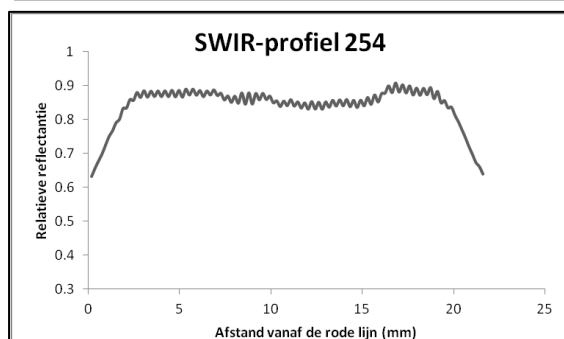
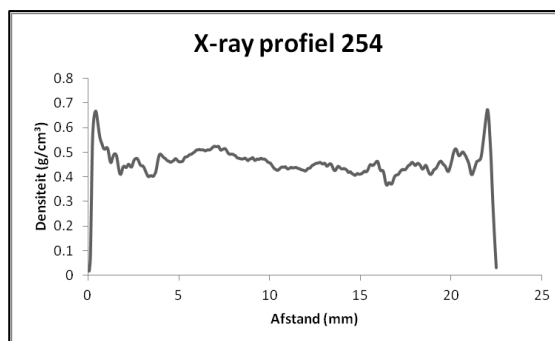


X-ray loodrecht 251



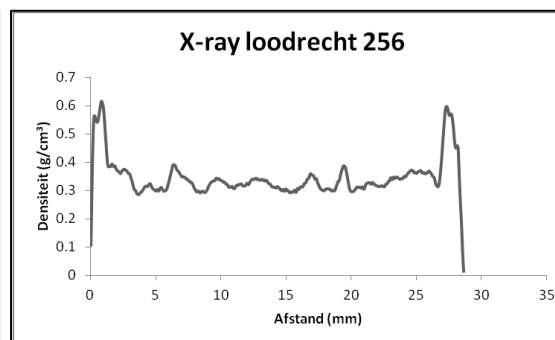
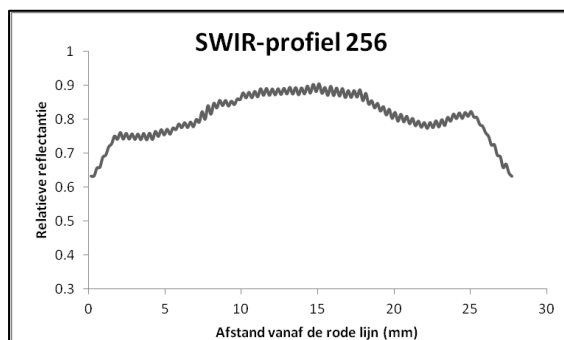
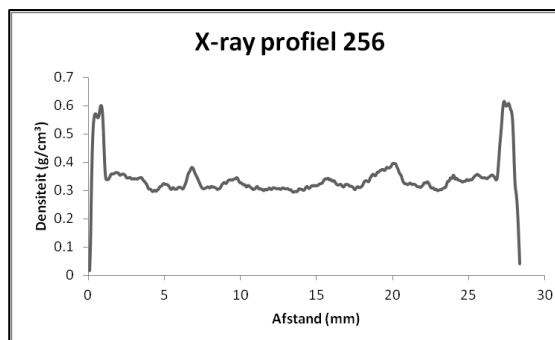
Schijf 254

Soort: Beuk
Vochtgehalte: 71.23 %
Calorische waarde hout: 17.23 MJ/kg
Calorische waarde schors: 20.36 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 4.06 cm²
Oppervlakte hout: 3.61 cm²
Oppervlakte schors: 0.45 cm²



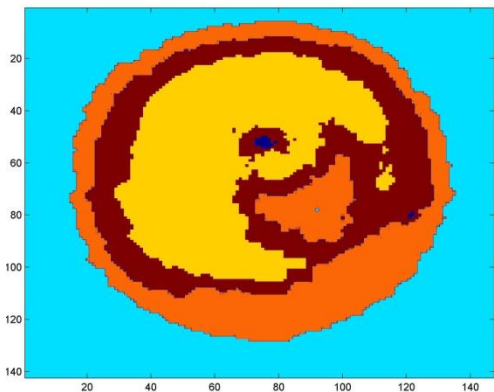
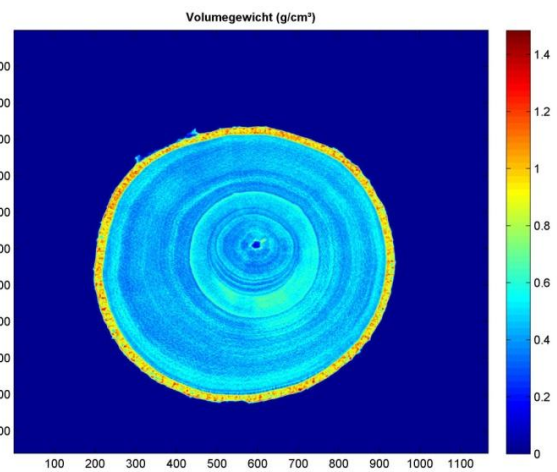
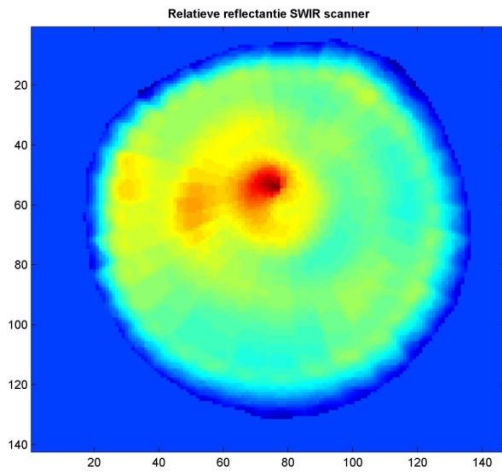
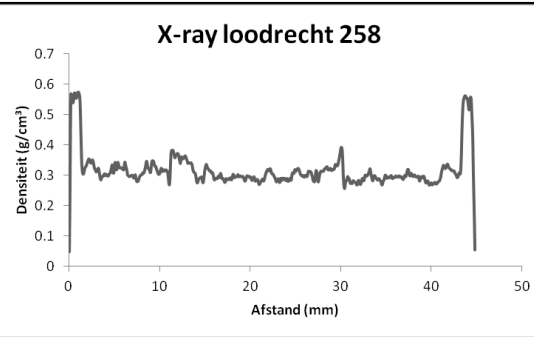
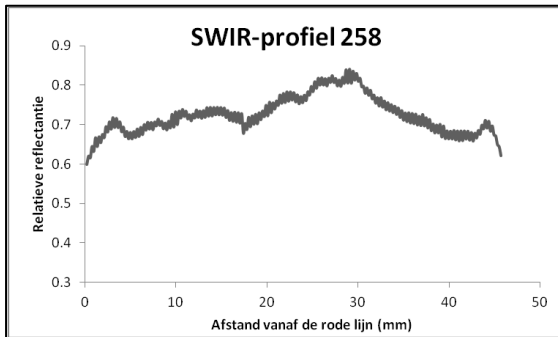
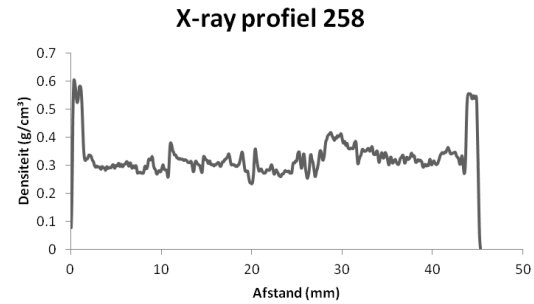
Schijf 256

Soort: Populier
Vochtgehalte: 145.98 %
Calorische waarde hout: 19.30 MJ/kg
Calorische waarde schors: 18.89 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 6.42 cm²
Oppervlakte hout: 5.13 cm²
Oppervlakte schors: 1.29 cm²



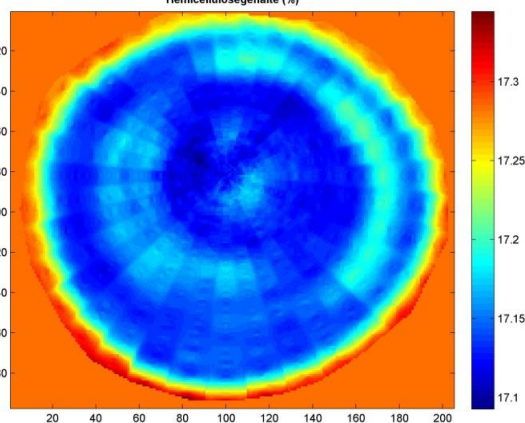
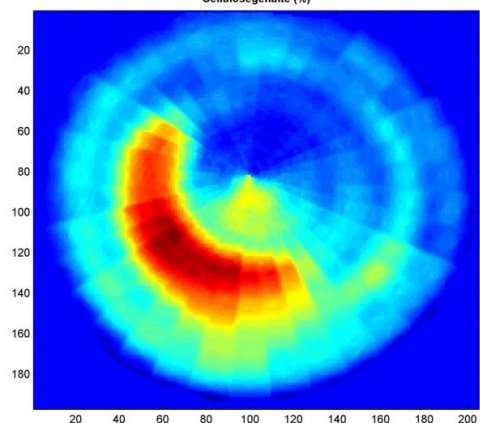
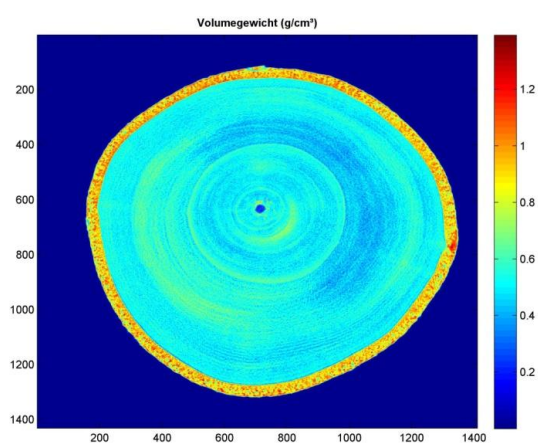
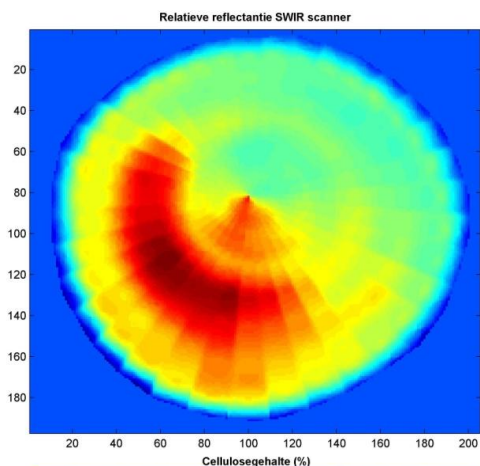
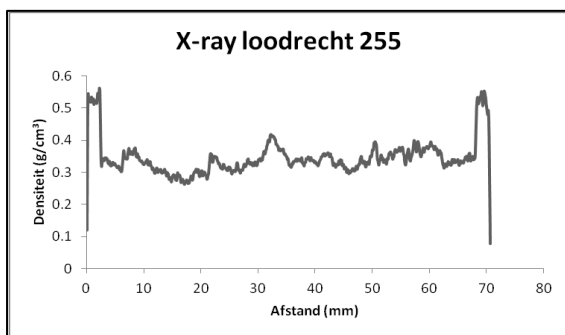
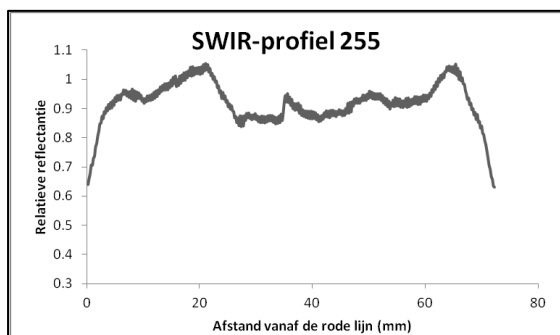
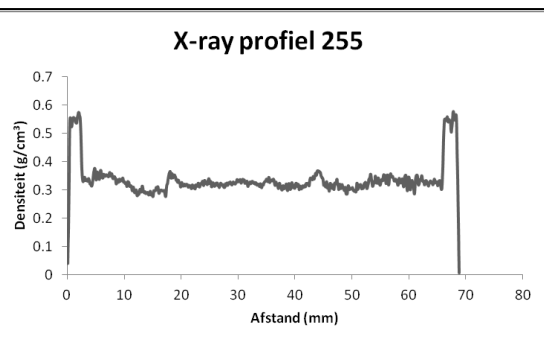
Schijf 258

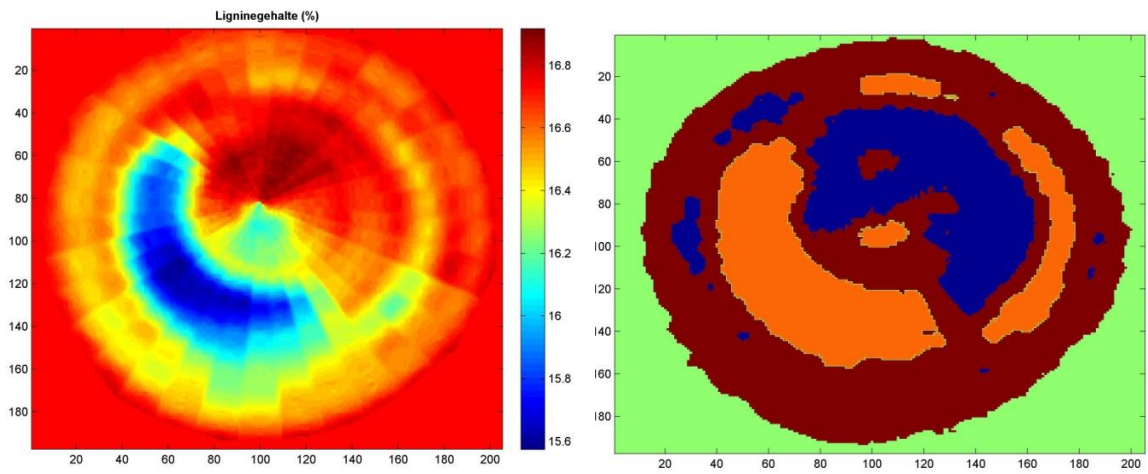
Soort: Populier
Vochtgehalte: 148.92 %
Calorische waarde hout: 18.97 MJ/kg
Calorische waarde schors: 19.07 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 17.47 cm²
Oppervlakte hout: 14.41 cm²
Oppervlakte schors: 3.06 cm²



Schijf 255

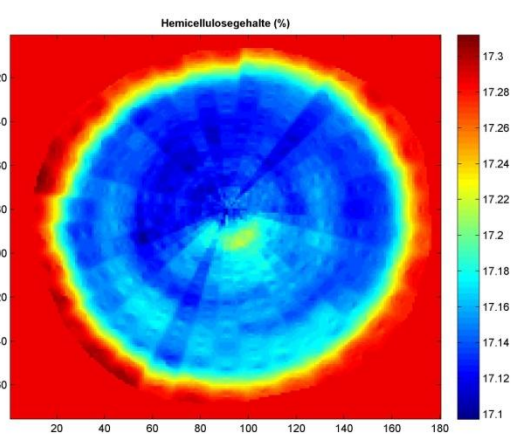
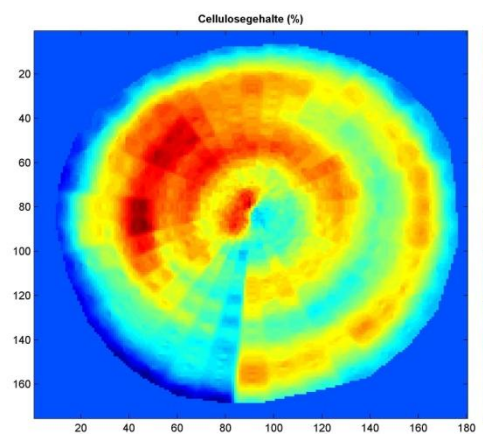
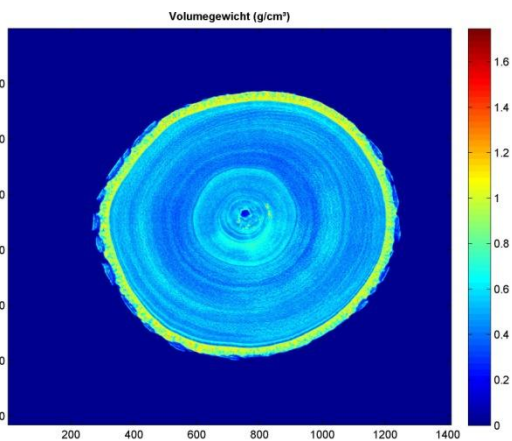
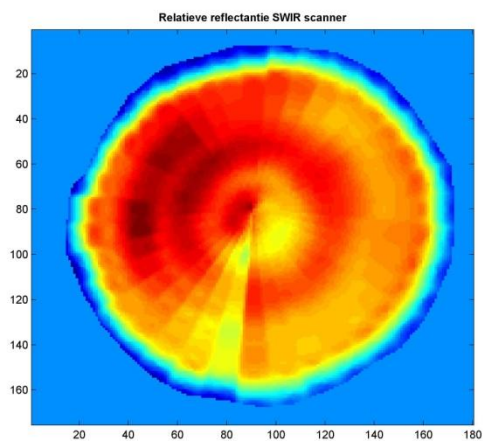
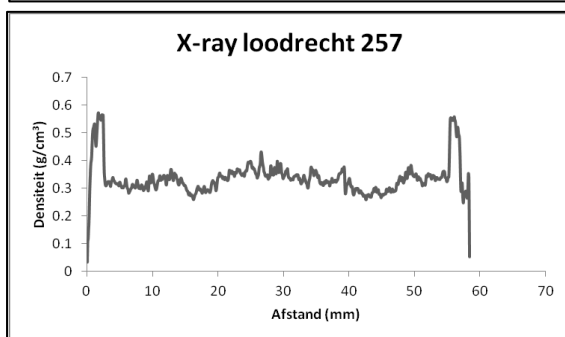
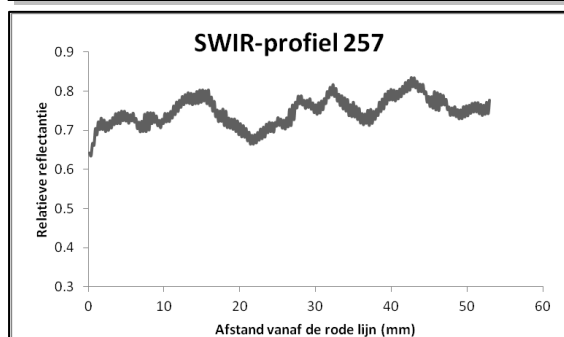
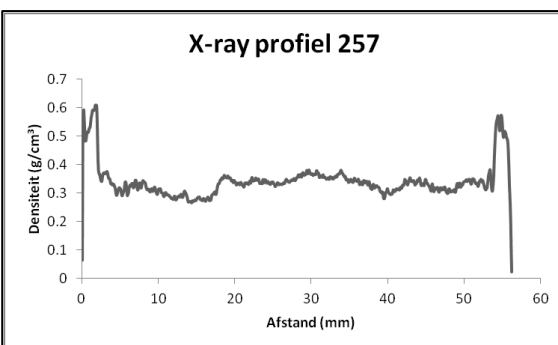
Soort: Populier
 Vochtgehalte: 127.07 %
 Calorische waarde hout: 19.06 MJ/kg
 Calorische waarde schors: 17.57 MJ/kg
 Oppervlakte schijf: 4.06 cm²
 Oppervlakte hout: 3.61 cm²
 Oppervlakte schors: 0.45 cm²

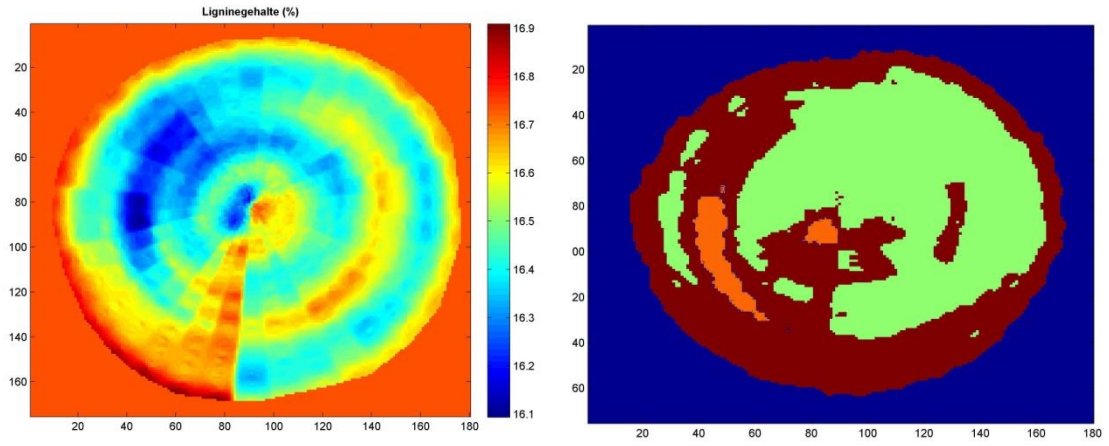




Schijf 257

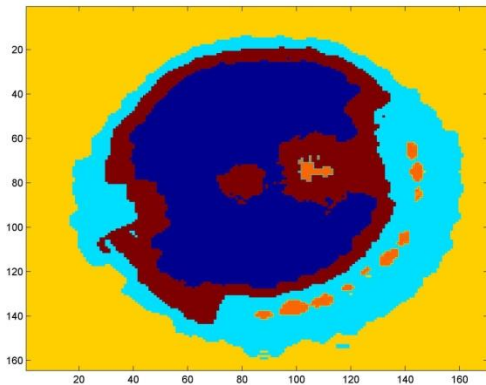
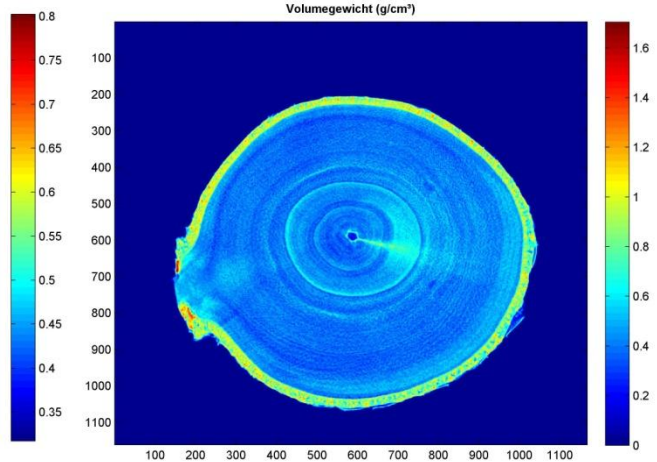
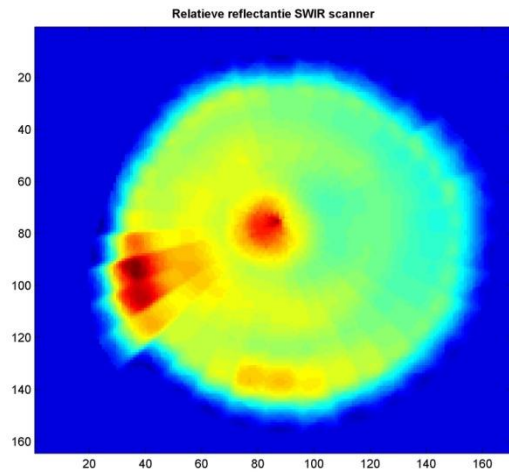
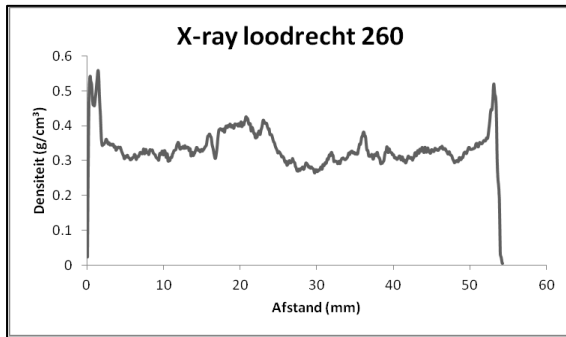
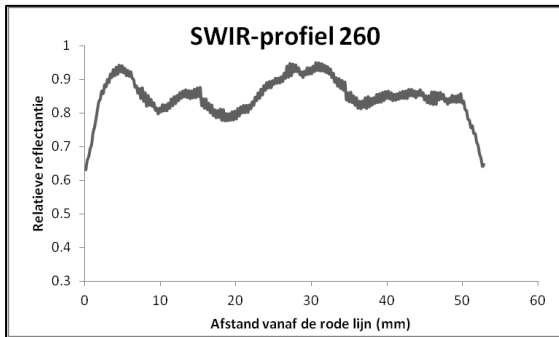
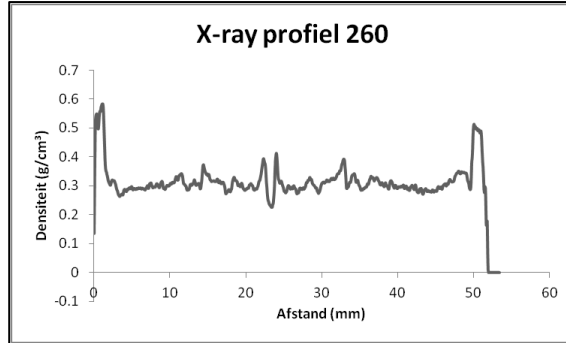
Soort: Populier
 Vochtgehalte: 139.08 %
 Calorische waarde hout: 19.31 MJ/kg
 Calorische waarde schors: 18.55 MJ/kg
 Oppervlakte schijf: 27.32 cm²
 Oppervlakte hout: 20.84 cm²
 Oppervlakte schors: 6.48 cm²





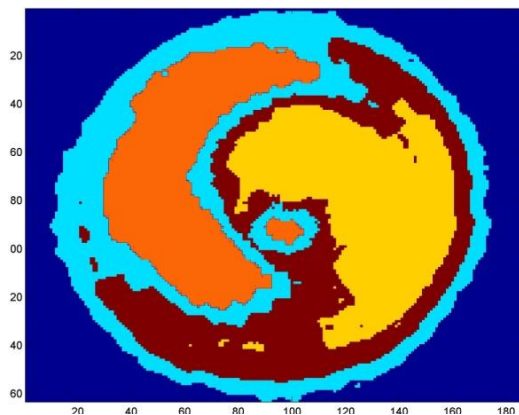
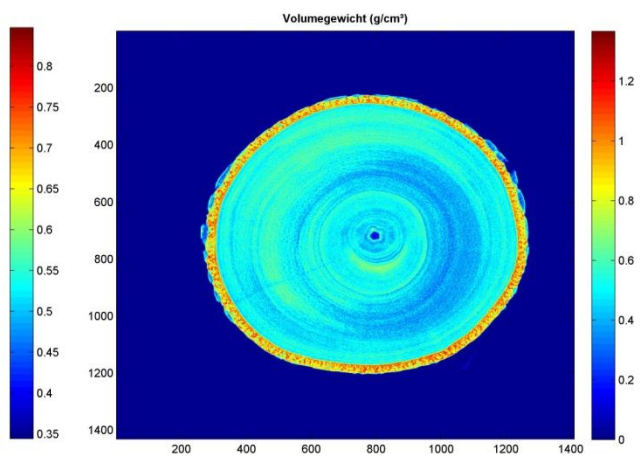
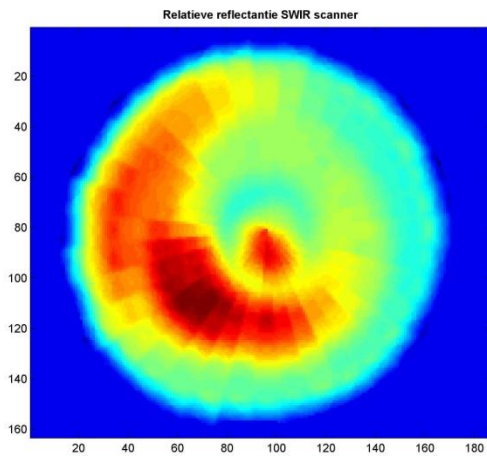
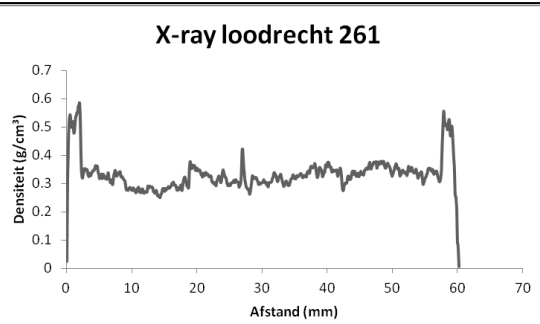
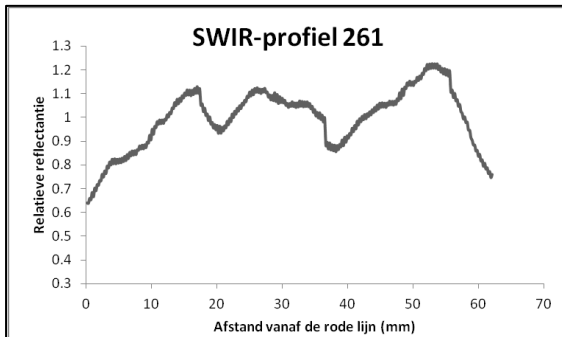
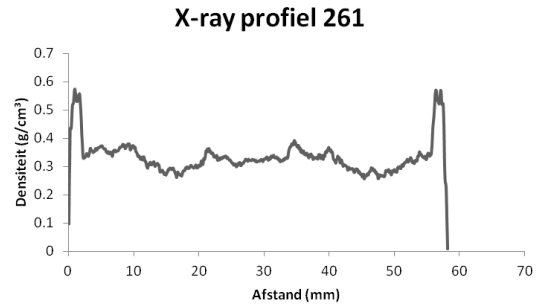
Schijf 260

Soort: Populier
Vochtgehalte: 160.28 %
Calorische waarde hout: 19.41 MJ/kg
Calorische waarde schors: 19.83 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 20.45 cm²
Oppervlakte hout: 16.74 cm²
Oppervlakte schors: 3.71 cm²



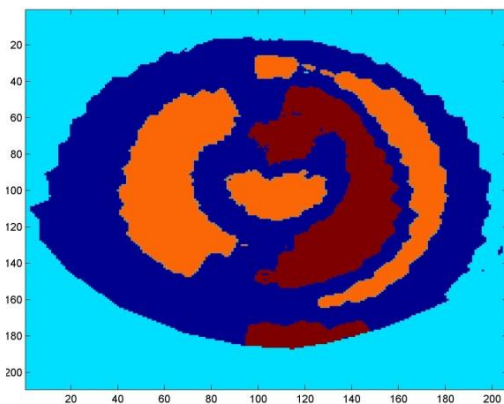
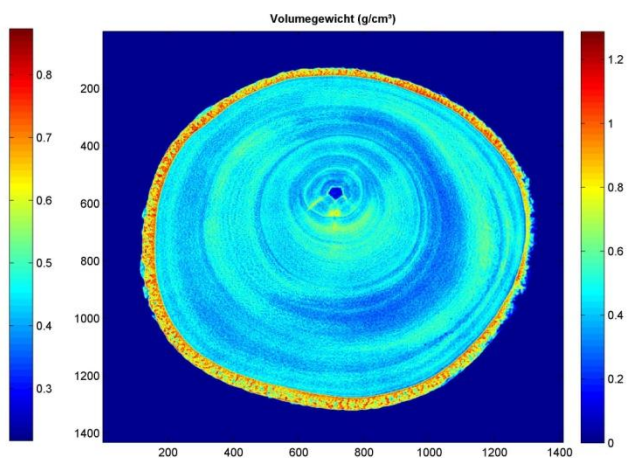
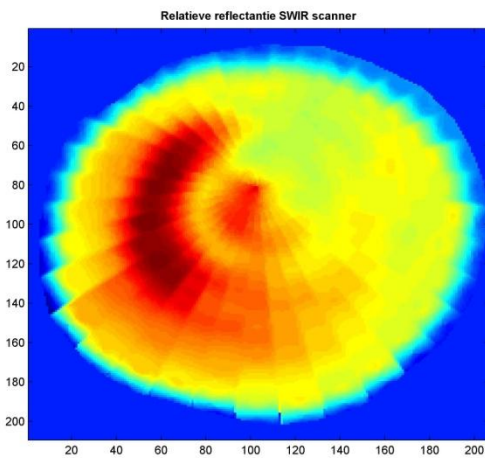
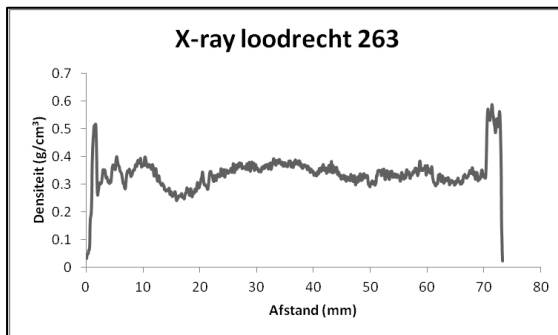
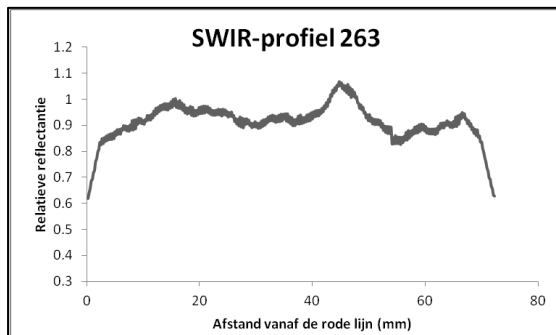
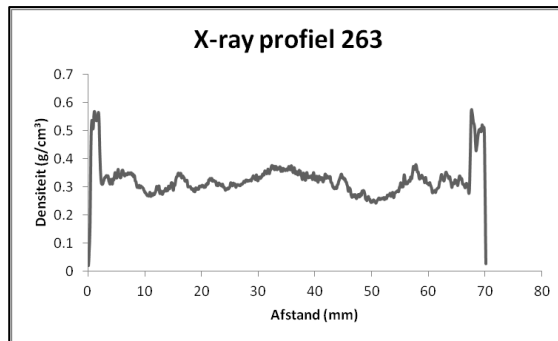
Schijf 261

Soort: Populier
Vochtgehalte: 160.90 %
Calorische waarde hout: 19.01 MJ/kg
Calorische waarde schors: 21.43 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 28.90 cm²
Oppervlakte hout: 23.41 cm²
Oppervlakte schors: 5.49 cm²



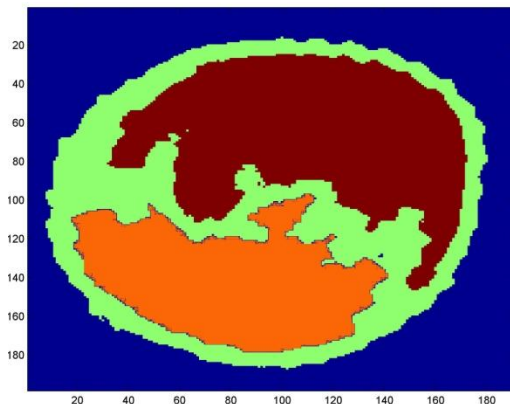
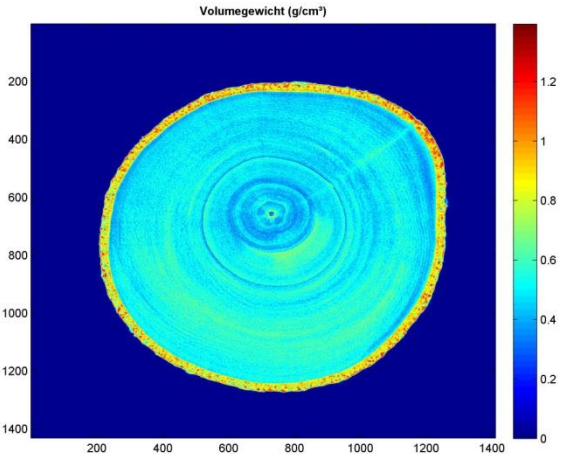
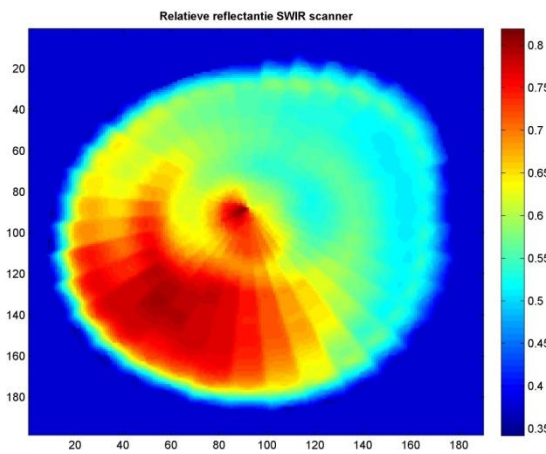
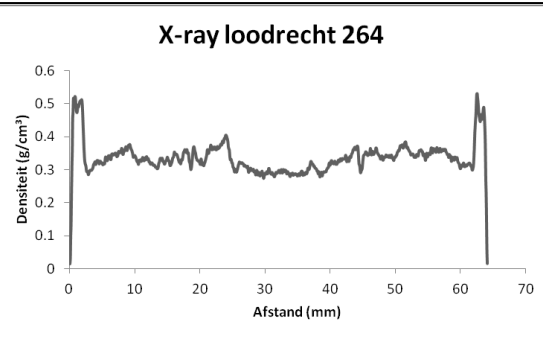
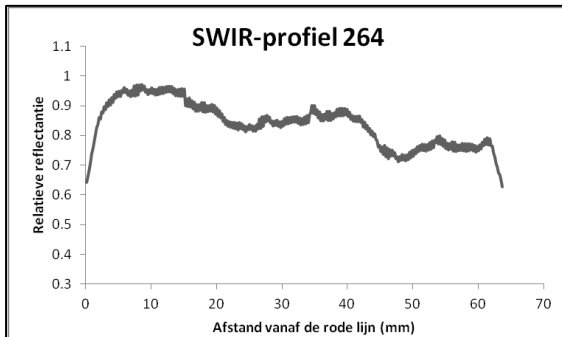
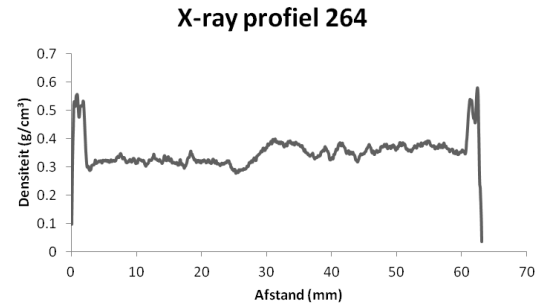
Schijf 263

Soort: Populier
Vochtgehalte: 121.54 %
Calorische waarde hout: 18.60 MJ/kg
Calorische waarde schors: 19.07 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 42.36 cm²
Oppervlakte hout: 34.67 cm²
Oppervlakte schors: 7.69 cm²



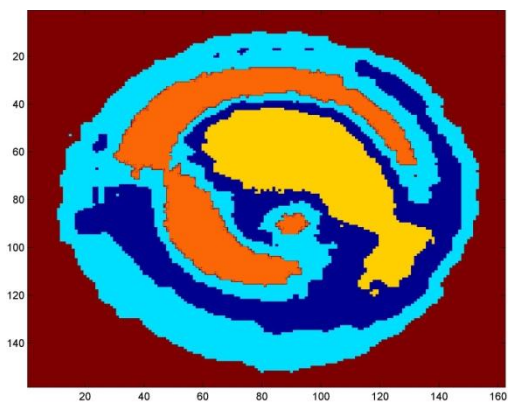
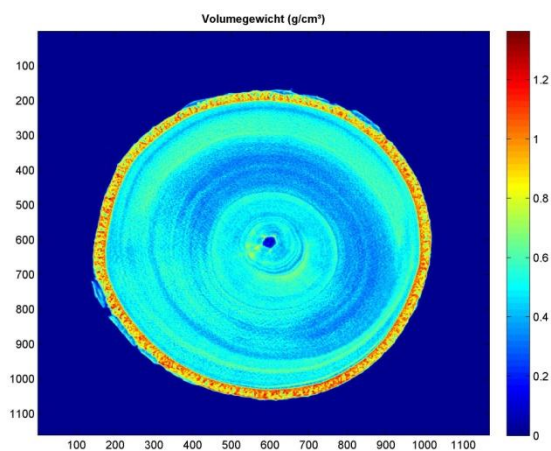
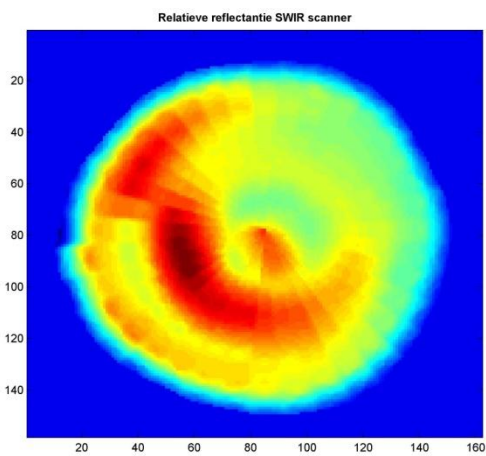
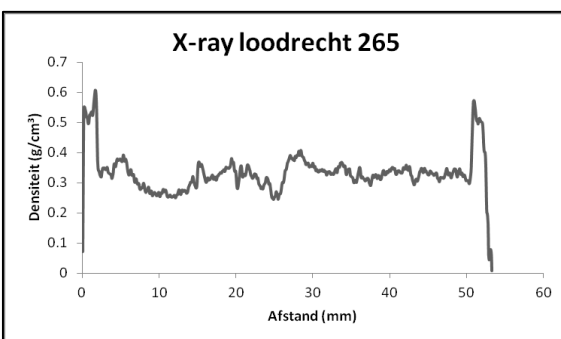
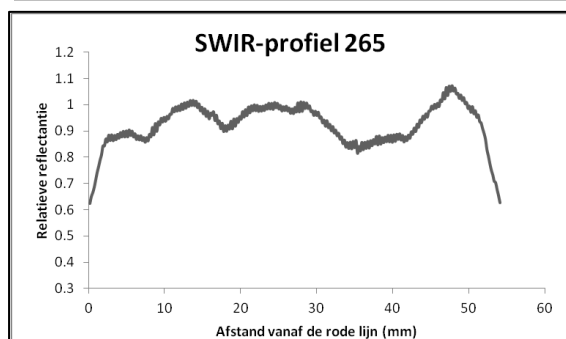
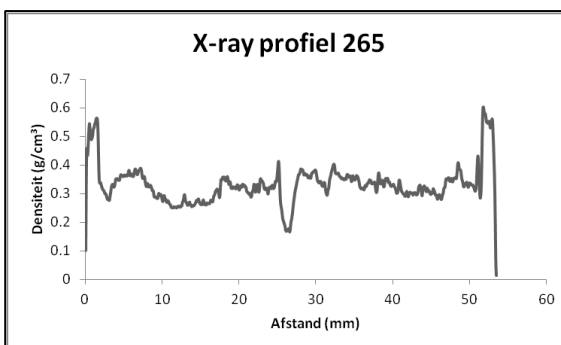
Schijf 264

Soort: Populier
Vochtgehalte: 141.17 %
Calorische waarde hout: 19.09 MJ/kg
Calorische waarde schors: 19.95 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 33.02 cm²
Oppervlakte hout: 27.73 cm²
Oppervlakte schors: 5.29 cm²



Schijf 265

Soort: Populier
Vochtgehalte: 135.31 %
Calorische waarde hout: 19.05 MJ/kg
Calorische waarde schors: 19.42 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 23.05 cm²
Oppervlakte hout: 18.04 cm²
Oppervlakte schors: 5.00 cm²



Schijf 266

Soort: Populier
Vochtgehalte: 152.49 %
Calorische waarde hout: 18.89 MJ/kg
Calorische waarde schors: 18.98 MJ/kg
Oppervlakte schijf: 12.11 cm²
Oppervlakte hout: 9.49 cm²
Oppervlakte schors: 2.62 cm²

