



TECHNIEKEN EN STRATEGIEËN VOOR DE OOGST VAN HOUTIGE BIOMASSA (B3)

**RESULTATEN VAN DE TERREINEXPERIMENTEN
UITGEVOERD IN "BOSLAND"**

Jeroen Osselaere
Pieter Vangansbeke

Colofon

Dit rapport is een gezamenlijke uitgave van het Agentschap voor Natuur en Bos en van Inverde

Koning Albert II-laan 20 bus 8, 1000 Brussel

www.natuurenbos.be – www.inverde.be

Contact: info@inverde.be

Dit rapport is opgemaakt in het kader van het KOBE-project. KOBE staat voor KennisOndersteuning bij Beheer en Economie van natuur-, groen- en bosdomeinen. KOBE is een samenwerkingsproject tussen het Agentschap voor Natuur en Bos en Inverde. Dit rapport is een werkdocument, en weerspiegelt niet noodzakelijk de standpunten of de werking van het Agentschap voor Natuur en Bos en Inverde.

Auteur(s): Jeroen Osselaere en Pieter Vangansbeke,
Werkten mee aan dit rapport: Jeroen Osselaere (UGent), Pieter Vangansbeke (VITO), Joris Vandervelden (ANB), Johan Agten (ANB), Michel Broeckmans (ANB), Wouter Vanlerberghe (Inverde), Bert Geeraerts (Inverde), Vandervelden Paul (Algemene bosbouw Vandervelden bvba), Houbrechts (Houbrechts bosontginning bvba)

Foto's en schema's: Jeroen Osselaere, Pieter Vangansbeke en Bert Geeraerts

Uitgave: augustus 2013

Dit rapport is ook beschikbaar op de website van het Inverde-expertisecentrum (www.inverde.be) en op het ANB-intranet (<http://teamIne.vlaanderen.be/anb/intranet/Paginas/default.aspx>)

Overname van tekst uit dit rapport kan mits correcte bronvermelding.
Citeren als: Osselaere Jeroen, Vangansbeke Pieter (2013). Technieken en strategieën voor de oogst van houtige biomassa: resultaten van de terreinexperimenten uitgevoerd in Bosland.
Dit KOBE-eindrapport is een aangepaste versie van de thesis van Jeroen Osselaere en kwam tot stand met de medewerking en ondersteuning van het Agentschap voor Natuur en Bos en Inverde.

Inhoudsopgave

1. INLEIDING.....	7
2. PROEFPERCELEN EN METHODEN	8
2.1 BESCHRIJVING VAN HET STUDIEGEBIED	8
2.1.1 Bosland	8
2.1.2 Beschrijving van de percelen voor de proeven met de kaalslag	9
2.1.3 Beschrijving van de percelen voor de proeven met de dunningen.....	9
2.1.4 Beschrijving van het perceel voor de proeven met de opslag	10
2.2 SELECTIE VAN DE BIOMASSA OOGSTKETENS.....	11
2.2.1 Selectieprocedure	11
2.2.2 Kaalslag.....	11
2.2.3 Dunning.....	12
2.2.4 Ruiming van opslag.....	14
2.3 MEETCAMPAGNE	15
2.3.1 Voor de oogst.....	15
2.3.2 Tijdens de oogst	15
2.3.3 Na de oogst	16
2.4 ECONOMISCHE ANALYSE	17
2.5 CO ₂ BALANS.....	17
3 RESULTATEN	17
3.1 KAALSLAGEN.....	18
3.1.1 Dendrometrische gegevens	18
3.1.2 Biomassa oogstketens	19
3.1.3 Economische analyse.....	22
3.1.4 Kwaliteit van de houtsnippers	26
3.1.5 Statistische vergelijking	27
3.1.6 CO ₂ Balans.....	28
3.2 DUNNINGEN.....	29
3.2.1 Dendrometrische gegevens	29
3.2.2 Biomassa oogstketens	31
3.2.3 Economische analyse.....	34
3.2.4 Kwaliteit van de houtsnippers	37
3.2.5 Statistische vergelijking	38
3.2.6 CO ₂ Balans.....	39
3.3 RUIMING OPSLAG	39
4 DISCUSSIE.....	40
4.1 KAALSLAG.....	40
4.1.1 Dendrometrische gegevens	40
4.1.2 Biomassa oogstketens	40
4.1.3 Economische analyse.....	42

4.1.4	Kwaliteit van de houtsnippers	43
4.1.5	CO ₂ Balans	44
4.2	DUNNINGEN	45
4.2.1	Dendrometrische gegevens	45
4.2.2	Biomassa oogstketens	45
4.2.3	Economische analyse.....	47
4.2.4	Kwaliteit van de houtsnippers	48
4.2.5	CO ₂ Balans.....	49
4.3	RUIMING OPSLAG	49
5	SAMENVATTING	51
6	LITERATUURLIJST	53

1 Inleiding

Hoewel in de terreinexperimenten van de projecten B6-Logistiek houtige biomassa en B9-Wijze biomassaverkoop, parameters zoals verbruik en geoogste hoeveelheden gemeten werden, hadden deze experimenten en de gebruikte oogstsystemen en oogstmachines telkens andere terreinomstandigheden en had de geoogste houtige vegetatie verschillende ontwikkelingsfasen. Uit de ervaringen opgedaan uit deze projecten stelden we bovendien vast dat bepaalde kennisvragen nog preciezer uitgewerkt konden worden. Bijkomende en nieuwe vragen kwamen hieruit naar voren: welke invloed hebben bepaalde factoren zoals het verschil in aftopdiameter, is er een beduidend verschil bij in of uit het bestand verchippen,...

Met het project B3-Technieken en strategieën voor de oogst van houtige biomassa en de daaraan gekoppelde terreinexperimenten hebben we de impact van deze invloeden beter willen inschatten en onderzocht hoe bepaalde wijzigingen in oogstmachine of oogststelsel een invloed kunnen hebben op de hoeveelheid geoogste biomassa/uur, verbruik/ton biomassa... en uiteindelijk ook op de prijs die zal geboden worden.

De exploitatie van houtige biomassa is nog een relatief jonge tak binnen de natuur- en bossector in Vlaanderen. Momenteel zijn dan ook veel machines gewone standaard bos- en landbouwmachines. Dit heeft als belangrijkste nadeel dat de houtige biomassa niet altijd op de meest rendabele manier wordt geoogst waardoor er een lagere prijs voor de biomassa geboden wordt of er zelf een kostenplaatje aan de exploitatie van de houtige biomassa hangt. Dit project had dan ook als bijkomend doel op zoek te gaan naar nieuwe oogstmachines en -systemen en te onderzoeken in hoeverre deze bruikbaar zijn voor de Vlaamse biomassasector. Gezien het om een kleine markt gaat, is de inzetbaarheid van bepaalde machines en de daaraan gekoppelde rendabiliteit niet noodzakelijk dezelfde als in andere landen en regio's. Door het sterk versnipperde bosareaal en het onregelmatig aanbod houtige biomassa per gebied is het gebruik van specifieke, vaak grotere oogstmachines niet vanzelfsprekend.

Om dit project en de daaraan gekoppelde experimenten goed voor te bereiden was er een aanvangsoverleg met de projectmedewerkers waar de potentiële machines en oogstsystemen werden bekeken. Hieruit werden dan voorstellen geformuleerd voor het uitwerken van de terreinexperimenten. Deze voorstellen werden dan op een volgend overlegmoment voorgelegd aan de klankbordgroep van dit project die hierover advies gaf en wiens opmerkingen verwerkt werden in de uiteindelijke experimenten. Er werd gekozen om de experimenten op te delen in drie groepen, volgens de meest voorkomende terreinen waar er biomassa geoogst kan worden: eerste dunning, kaalslag en kroonhout, en ruimen van opslag. Om extra technische informatie te verwerven over de inzetbaarheid, hoeveelheid oogstbare biomassa van de in deze experimenten opgenomen machines en om de beschikbaarheid van deze machines in Vlaanderen of in de buurlanden te onderzoeken werd er door Joris Vandervelden, Jeroen Osselaere en Bert Geeraerts een bezoek gebracht aan de KWF-Tagung 2012. Dit is een toonaangevende bosbouwbeurs in Duitsland met veel aandacht voor "houtige biomassa" en waar de belangrijkste fabrikanten en verkopers van machines voor het oogsten en verwerken van houtige biomassa aanwezig zijn. Met de opgedane kennis werd door Joris een bestek uitgeschreven en een lijst van potentiële leveranciers en exploitanten opgesteld. Het overgrote deel van de terreinexperimenten ging door in "Bosland", Limburg.

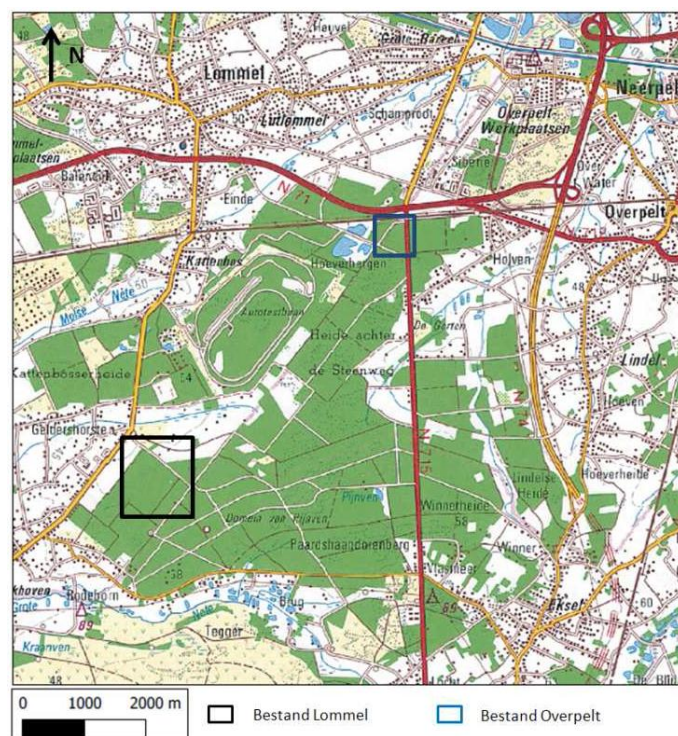
Dit onderzoek kadert in de thesisstudie van Jeroen Osselaere (UGent) en heeft raakvlakken met de doctoraatsstudie over Ecosysteemdiensten van Pieter Vangansbeke (VITO).

2 PROEFPERCELEN EN METHODEN

2.1 BESCHRIJVING VAN HET STUDIEGEBIED

2.1.1 Bosland

Bosland (Bosland, 2012) is een samenwerkingsproject van het ANB, drie gemeenten (Lommel, Overpelt en Hechtel-Eksel), Toerisme Limburg en Regionaal Landschap Lage Kempen en strekt zich uit over de volledige oppervlakte van deze drie gemeenten. Bosland is het grootste aaneengesloten natuur- en boscomplex van Vlaanderen, en telt een totale oppervlakte van meer dan 10000 ha. Het militair domein "Kamp Beverlo" en de uitgestrekte bossen van Pijnven, vormen samen het centrale kerngebied van Bosland (Figuur 1). Bosland telt ongeveer 5500 ha bos, waarvan 4500 ha in het bezit zijn van de Vlaamse overheid en de drie gemeenten. Tot het einde van de 19 eeuw bestond het gebied voornamelijk uit heide met stuifduinen, wat het gevolg was van de traditionele landbouwcultuur, die bestond uit begrazing met schapen en het plaggen van open terreinen. Door de modernisering van de landbouw omstreeks 1850, werden deze gronden waardeloos voor de landbouw en werden ze bebost met grove den (*Pinus sylvestris*) en Corsicaanse den (*Pinus nigra var. Corsicana*). Dit werd ook gestimuleerd door de opkomende mijnbouw in Limburg, die het hout kon gebruiken als stuthout voor de mijngangen. Tot op vandaag zijn de invloeden van toen nog zichtbaar op het bosbeeld, zo bestaat het bos voor ongeveer 90% uit een aanplant van naaldhout. Onder invloed van het decreet duurzaam bosbeheer (2003) van de Vlaamse overheid en met steun van Europese projecten, wordt er gestreefd naar een gevarieerd aanbod van functies op alle mogelijke gebieden. Dit in tegenstelling tot enkele decennia terug toen enkel de economische functie van Bosland centraal stond. Nu wordt bijvoorbeeld getracht om door middel van kleine en grootschalige kaalslagen, de typische heidevegetatie en -fauna terug een kans te geven om zich te vestigen in het gebied.



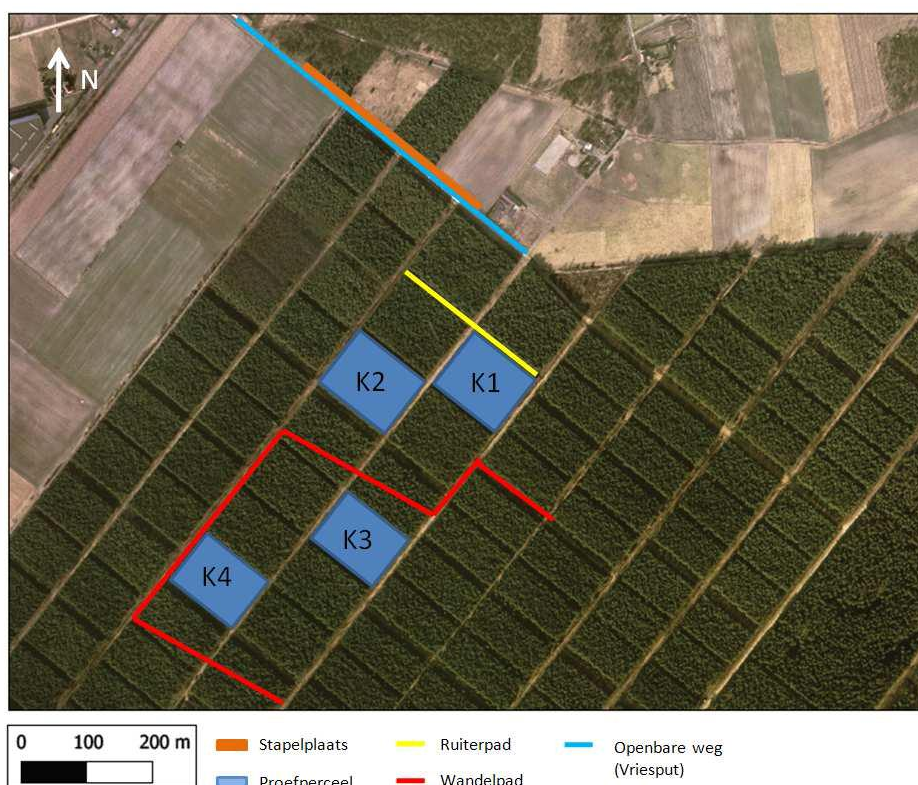
Figuur 1: Overzichtskartaal van de regio met aanduiding van locatie van de bestanden

De experimenten die werden uitgevoerd in het kader van het project zijn gelegen in het centrale boscomplex van Bosland. In het totaal werden acht percelen opgenomen in onze experimenten, vier voor de kaalslagen en vier voor de dunningen.

2.1.2 Beschrijving van de percelen voor de proeven met de kaalslag

De percelen zijn gelegen in het westen van het domeinbos Pijnven en bevinden zich nabij de straat Vriesput op het grondgebied van Lommel. De aanplant bestaat hoofdzakelijk uit Corsicaanse den (*Pinus Nigra*) uit 1965. "De 120 hectare" zo omschreef Johan Agten, de boswachter van het gebied, het gebied waarbinnen de proefpercelen van de kaalslag zijn gelegen. De totale oppervlakte van dit deelgebied is onderverdeeld in gelijke percelen met een grote van ongeveer een hectare.

Na een overlegmoment met de betrokken verantwoordelijken van het gebied werden 16 proefpercelen tot onze beschikking gesteld. Waaruit vier percelen werden gekozen op basis van gelijkaardig grootte en zo dat de hinder op de recreatie in het gebied minimaal was (Figuur 2).



Figuur 2: Detailkaart van de bestanden voor het onderzoek in de kaalslagen

2.1.3 Beschrijving van de percelen voor de proeven met de dunningen

De eerste dunningen werden uitgevoerd in een gebied ten noorden van het Pijnven, nabij enkele zandwinningsputten (Figuur 3). De onregelmatige oppervlaktes van alle percelen aanwezig in het bestand, zorgde dat de keuze van de percelen niet gebeurde op basis van oppervlakte, maar eerder op basis van de bereikbaarheid van de stapelplaatsen. Het complex is eigendom van de gemeente Overpelt maar is sinds 2006 overgedragen naar het ANB en heeft dus de status van domeinbos verworven. De aanplanting is oorspronkelijk gebeurd in 1922 met grove den waarbij er vooraf een grondbewerking werd uitgevoerd. Deze bestond uit het bemesten met metaalslakken (800 kg/Ha) en Kaliniet (230 kg/ha). In 1976 werd het volledige bestand vernietigd door een brand, waarna er in 1979 een volledige herbebossing plaats vond met hoofdzakelijk Corsicaanse den met een lichte bijmenging van ruwe berk (*Betula pendula*) aan de randen.



Figuur 3: Detailkaart van de bestanden voor het onderzoek in de dunningen

2.1.4 Beschrijving van het perceel voor de proeven met de opslag

Het beheren van brandwegen en bosranden tegen ongewenste opslag van vliegdennen en Amerikaanse vogelkers (*Prunus serotina*) is een dure en tijdrovende operatie. Omwille van deze reden toont het ANB interesse in het testen van enkele machines die toelaten om deze biomassa op een snelle en efficiënte manier te oogsten en eventueel te vermarkten. Op lange termijn wordt gestreefd naar een systeem waarbij een evenwicht bereikt wordt tussen de kosten van het oogsten en de verkoopwaarde van de biomassa. De geselecteerde testlocatie bevond zich in Lommel nabij de Nederlandse grens en bestond hoofdzakelijk uit opslag van grove den met een bijmenging van Amerikaanse vogelkers. Deze locatie werd afgewezen door de exploitant omwille van de te grote dimensies van de opslag, die niet verwerkbaar waren door de gekozen oogstmachines. De uiteindelijke testlocatie bevond zich in het NATO-schietveld van Houthalen-Helchteren bij boswachter Michel Broeckmans. De te ruimen vegetatie bestond voornamelijk uit jonge vliegdennen.

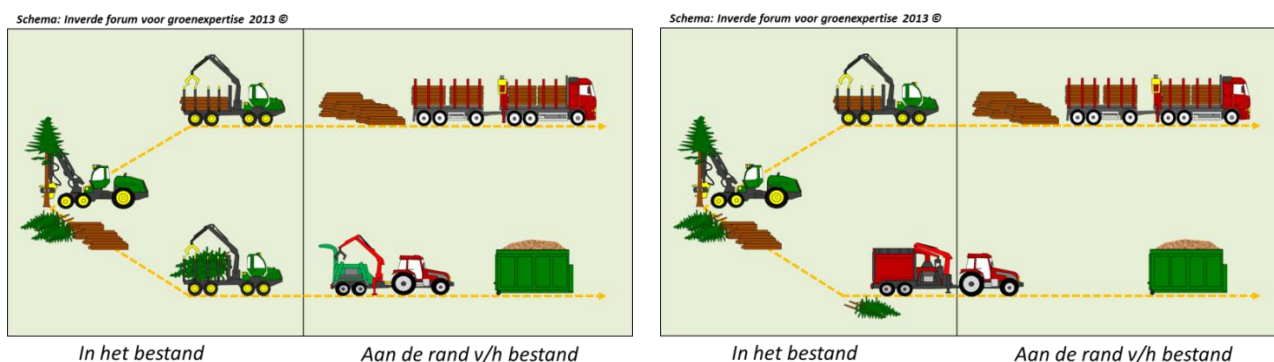
2.2 SELECTIE VAN DE BIOMASSA OOGSTKETENS

2.2.1 Selectieprocedure

De opzet van de experimenten kwam tot stand na een uitgebreide analyse van alle technieken die toepasbaar zijn voor Vlaanderen. De nodige kennis werd hiervoor opgedaan uit gespecialiseerde magazines, wetenschappelijke artikels en een bezoek aan de KWF-beurs in Duitsland. Eens er een voorstel voor de proeven was uitgewerkt werden deze voorgelegd aan een klankbordgroep. Deze groep bestond uit geïnteresseerden uit verschillende sectoren zoals de bosexploitanten, mensen uit de houtindustrie en uit de energiesector. Na dit overlegmoment werden de finale ketens vastgelegd.

2.2.2 Kaalslag

Als eerste experiment werden vier kaalslagen uitgevoerd in het bestand nabij de Vriesput. In de eerste plaats werd het hout geogst met behulp van een harvester (John Deere 1170E), waarbij het hout en de biomassa strikt gescheiden werd en op rijen gelegd werd. De enige parameter die hierbij gewijzigd werd tussen de percelen was de aftopdiameter. Bij percelen K1 en K3 werd gestreefd naar een afgetopte diameter van 12 cm, bij K2 en K4 naar 7 cm. Een verschil van aftopdiameter zou naast de impact op de totale oogstbare biomassa ook een invloed kunnen hebben op de verdere verwerkingstijden (uitrijden en hakselen) en de vervuilingsgraad van de houtsnippers. In de volgende stap werd het geogste hout uitgereden uit de bestanden en opgeslagen op een nabijgelegen stapelplaats, deze locatie was toegankelijk voor vrachtwagens die het hout kwamen opladen. Het uitrijden van zowel het hout als de biomassa werd gedaan door een forwarder (John Deere 1010E). Om de eventuele voor- en nadelen te testen van het hakselen in het bestand werd beslist om de biomassa enkel in percelen K1 en K2 uit te rijden tot aan de rand (cf. Marchi et al. 2009). Het hakselen aan de rand van de weg (K1 en K2) werd vervolgens uitgevoerd door een met een tractor aangedreven hakselaar (Valtra T191 met Jenz HEM420), het hakselen in het bestand (K3 en K4) gebeurde door een terreinhakselaar achter een tractor (Valtra N141 met een Greentec hakselaar). De terreinhakselaar was niet uitgerust met bosbouwbanden, waardoor er geopteerd werd om bepaalde stukken preventief een behandeling te geven met een bosfrees (Fendt 936-FAE bosfrees). Onderstaande schema's geven een gedetailleerd overzicht van alle productieketens voor de kaalslagen.

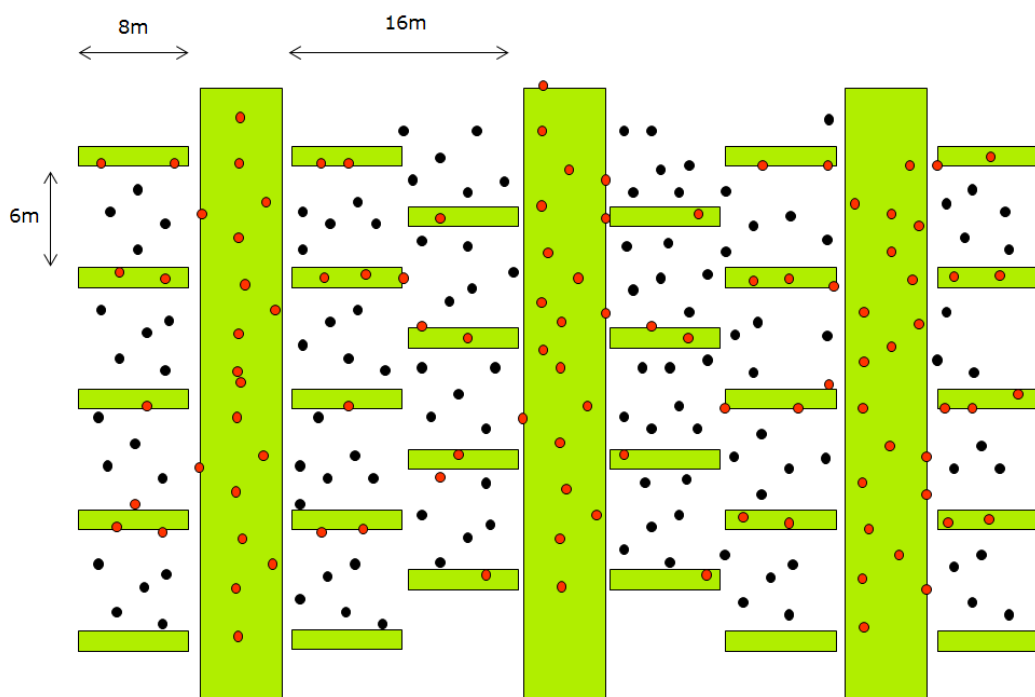


Figuur 4 (links): Productieketen voor de kaalslag op perceel K1 (aftopdiameter 12cm) en op perceel K2 (aftopdiameter 7cm), hakselen met Jenz HEM420 aan de rand van het bestand (Inverde, 2013).

Figuur 5 (rechts): Productieketen voor de kaalslag op perceel K3 (aftopdiameter 12cm) en op perceel K4 (aftopdiameter 7cm), hakselen met een Greentec hakselaar in het bestand (Inverde, 2013)

2.2.3 Dunning

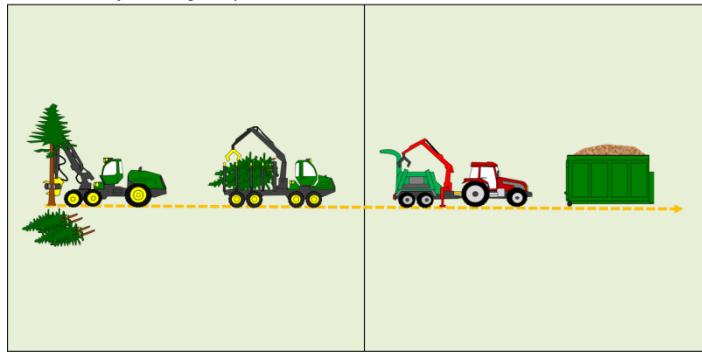
De tweede reeks experimenten omvat een eerste dunning in vier percelen van de gemeente Overpelt. Het dunnen van een bestand is dikwijls een niet rendabele maar toch noodzakelijk beheeringreep. Omwille van deze reden werden sterk verschillende proeven opgesteld om zo een optimale methode te vinden, die de economische balans meer in evenwicht kan brengen. Uit onderzoek is gebleken dat een systematische dunning met behulp van corridors de meest aangewezen methode is voor het uitvoeren van een eerste machinale dunning (Bergström et al. 2010). De corridor dunning uitgevoerd in de percelen in Overpelt bestond uit een ruimingspiste die om de 16 meter werd aangeduid. Dwars op deze ruimingspiste werd vervolgens aan beide zijden een gang aangeduid van 1 meter breed en 8 meter diep (Figuur 6). Alle bomen die binnen deze aangeduide zone vielen werden gemarkeerd. De onderlinge afstand tussen deze gangen bedroeg 6 meter. Deze gangen werden geschrinkt aangeduid om zo het doorkijkeffect in het perceel te verminderen, zodat de eventuele impact op de recreatie enigszins beperkt bleef.



Figuur 6: schematische voorstelling van de aanpak van de corridor dunning in de percelen te Overpelt

In drie van de vier geselecteerde proefpercelen (D 1-3), werd de dunning uitgevoerd door een harvester (John Deere 1170E), in het laatste perceel (D4) door een rupskraan (Hyundai R145) uitgerust met een knipkop. Op de klankbordgroep kwam de vraag van de houtverwerkende sector (Bert Wierbos (Norbord)) om tijdens een van de experimenten ook te kijken naar potentiële waarde van deze bestanden in het leveren van industriehout naast de gebruikelijke biomassa. Om dit te onderzoeken werd in een perceel (D3) ook industriehout geoogst. Na het oogsten werd de biomassa uitgereden naar een stapelplaats nabij de weg, op deze plaats was er voldoende ruimte aanwezig voor de hakselaar en het plaatsen van containers. Het uitrijden van de biomassa en het hout werd in D1 en D3 uitgevoerd door een forwarder (John Deere 1010E). Het uitrijden van de biomassa die geoogst werd door middel van de aangepaste rupskraan (D4) gebeurde met behulp van tractor met uitrijwagen (Valtra 8950). In perceel D2 werd het hakselen uitgevoerd in het bestand wat het uitvoeren ervan overbodig maakte. Onderstaande schema's geven een overzicht van alle proeven uitgevoerd in de dunningen.

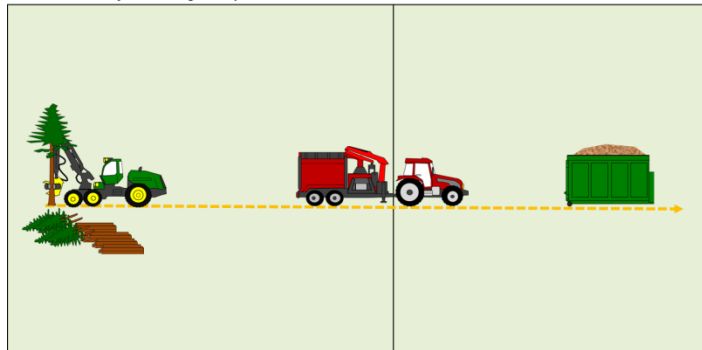
Schema: Inverde forum voor groenexpertise 2013 ©



In het bestand

Aan de rand v/h bestand

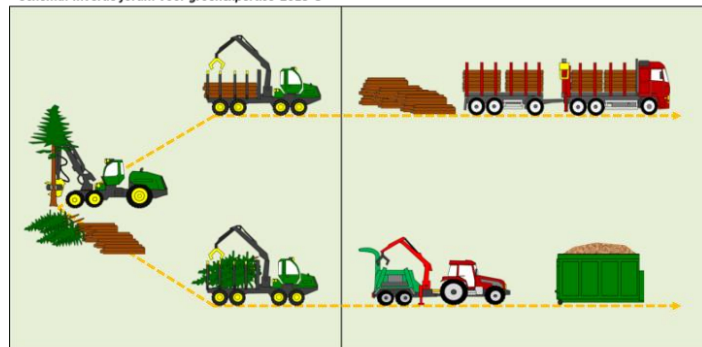
Schema: Inverde forum voor groenexpertise 2013 ©



In het bestand

Aan de rand v/h bestand

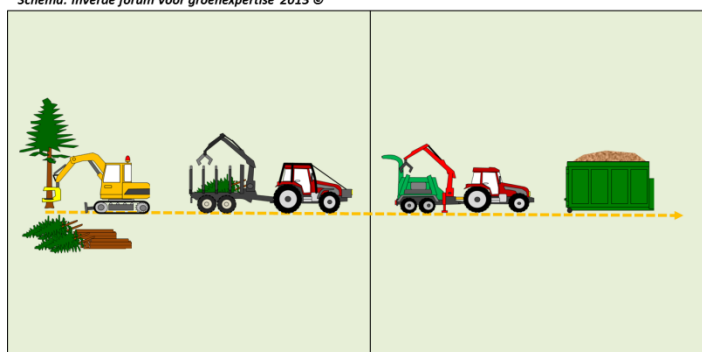
Schema: Inverde forum voor groenexpertise 2013 ©



In het bestand

Aan de rand v/h bestand

Schema: Inverde forum voor groenexpertise 2013 ©



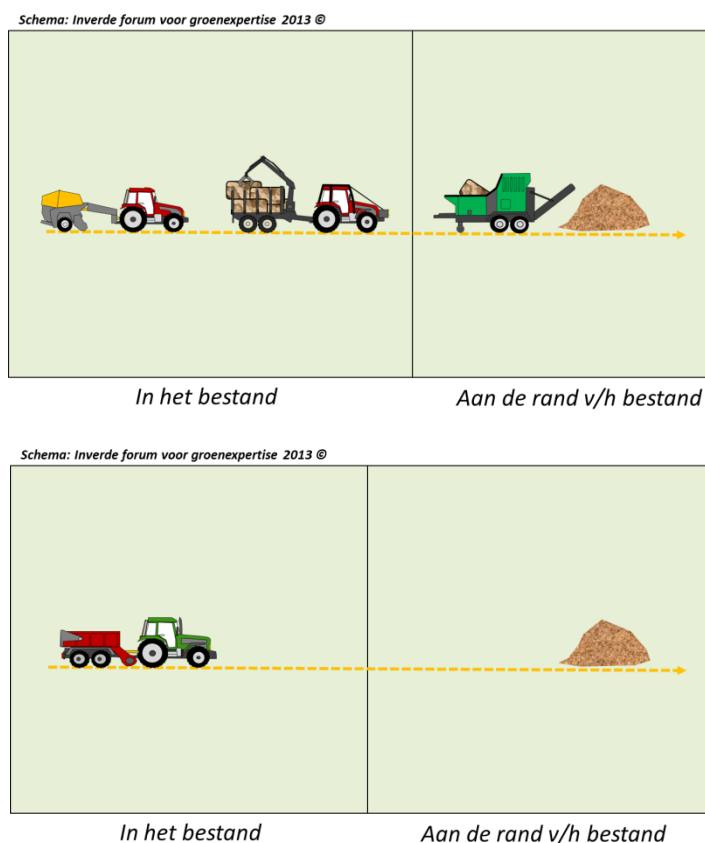
In het bestand

Aan de rand v/h bestand

Figuur 7: Schematische voorstellingen van de experimentele productieketens voor de dunningen in de percelen te Overpelt, van boven naar onder D1-D4 (Inverde 2013).

2.2.4 Ruiming van opslag

Het ruimen van de brandgangen werd gedaan door middel van de Biobaler. Deze machine is afkomstig uit Canada en werkt volgens het principe van een klepelmachine die het materiaal verkleint en vervolgens samenperst tot een baal. De werking van deze machine is gelijkaardig aan deze van een balenpers voor hooi en stro die frequent gebruikt wordt in de landbouw. Deze balen worden vervolgens opgepikt door een uitrijwagen en gehakseld in een shredder. Een tweede machine die ingezet kan worden bij het ruimen van opslag is de Biomass collector. Het gebruik van deze machine biedt als voordeel dat het materiaal rechtstreeks wordt verkleind tot houtsnippers en wordt opgevangen in een verzamelbak, wat het later opruimen van het materiaal op het terrein onnodig maakt (Figuur 8).



Figuur 8: Schematische voorstelling van de productieketens voor het oogsten van opslag uit brandgangen. Bovenaan Biobaler, onderaan Biomass collector (Inverde 2013)

2.3 MEETCAMPAGNE

2.3.1 Voor de oogst

Een eerste stap in het onderzoek bestond uit een grondige analyse van alle percelen. In de eerste plaats werd dit gedaan door middel van het uitzetten van proefvlakken waarbinnen verschillende parameters werden bekeken. Een proefvlak had een totale oppervlakte van 400m met behulp van een lintmeter. Er werd gestreefd naar een totaal bemonsteringspercentage van 8 tot 12 procent van een perceel. Dit werd gerealiseerd door het uitzetten van drie proefvlakken per perceel volgens sampling methode. Om de randeffecten van het bestand niet in rekening te hoeven nemen werd geopteerd om een minimale afstand te bewaren van 5 meter tussen het proefvlak en de perceelsrand. Indien de proefvlakken door de willekeurige toekenning naast elkaar gelegen waren werd ook hier een onderlinge afstand van 5 meter aangehouden.

Binnen deze proefvlakken werden verschillende parameters bepaald. In de eerste fase werd de diameter op borsthoogte van alle bomen opgemeten. Dit gebeurde met behulp van een meetklem waarbij telkens twee metingen werden uitgevoerd per boom en vervolgens het gemiddelde werd genoteerd. Hierbij werd er een onderscheid gemaakt tussen levende en dode bomen. In de dunningen werd dit uitgebreid met twee extra categorieën, dit voor gemarkeerde en niet gemarkeerde bomen. Naast de dode staande biomassa werd ook de liggende biomassa geïnventariseerd, hierbij werd alle dode biomassa verzameld en gewogen waarvan de diameter groter was dan vijf centimeter binnen elk proefvlak. Vervolgens werd een representatief staal genomen van alle dode biomassa waarbij er werd gestreefd naar een gewicht die ongeveer 10 procent was van het geïnventariseerde materiaal. Deze gegevens werden gebruikt voor het opstellen van een bestandsfiche, waarmee de diameter van de modelboom (mediaan) en de kwartielbomen geselecteerd werden voor elke reeks bestanden (Vriesput en Overpelt). Vervolgens werden zowel in de percelen nabij de Vriesput als in de percelen in Overpelt bomen opgespoord die overeen kwamen met de modelboom en de kwartielbomen. Deze bomen werden geveld, wat het mogelijk maakte om exacte hoogtemetingen uit te voeren en naalden te verzamelen die zich op een derde van de levende top bevonden. Om een volledig beeld te verkrijgen van de nutriëntenstatus van de boom en de eventuele afvoer van nutriënten te kunnen bepalen bij het oogsten werden ook stamschijven genomen. De eerste stamschijf bevond zich op een hoogte van 1 meter ongeacht de hoogte van de boom. De overige stamschijven werden genomen door de resterende lengte onder te verdelen in vijf secties en in het midden een stamschijf te nemen.

Om alle proefvlakken en subplots te kunnen herlokalisieren na de experimenten werden van alle punten de coördinaten met een GPS vastgelegd. Naast de GPS coördinaten werden de punten ook voorzien van een metalen piket, om later eventueel deze punten te kunnen lokaliseren met een metaaldetector.

2.3.2 Tijdens de oogst

Bij het opvolgen van de proeven werd het brandstofverbruik van elke machine bij elk perceel bijgehouden. Dit werd gedaan door na elke proef bij te tanken, door middel van een externe dieseltank voorzien van een pomp met meter. Hiernaast werden ook tijdsmetingen verricht, onder meer de totale werktijd werd gemeten, alsook de tijd die gebruikt werd voor pauzes en mechanische defecten. Uit de boordcomputer van de harvester werden de gegevens omtrent het geoogst volume hout gelezen.

Om ook een beter beeld te verkrijgen van de impact van het gebruik van kleinere aftopdiameter en hieraan gekoppelde kleinere dimensies van hout en biomassa, werden individuele cyclussen van de forwarder of uitrijwagen bijgehouden. Een cyclus werd onderverdeeld in 4 deelactiviteiten en afzonderlijk gemeten, het laden van de biomassa (inclusief verrijden naar andere hopen biomassa), het rijden met een volle/lege kar en als laatste het uitladen van de biomassa.

De laatste stap in het verwerken tot bruikbare biomassa was het hakselen. Om een duidelijk beeld te krijgen van de totale productie per minuut, werd (Jenz 420 hakselaar) de tijd per individuele container en het bijhorende gewicht bijgehouden. Bij de Greentec hakselaar was dit niet mogelijk gezien deze een eigen opvangcontainer had, waarna deze leeggemaakt werd in een afvoercontainer. In dit geval werd de totale afgevoerde biomassa bijgehouden. Om de invloed van de verschillende ketens op de houtsnipper kwaliteit (diameterverdeling, vochtgehalte en vervuiling) te testen, werd uit elke container een representatief staal van de houtsnippers genomen tijdens de proef.

2.3.3 Na de oogst

De opvolging van de experimenten bestond in de eerste plaats uit het opnieuw lokaliseren van de proefvlakken en de subplots. Binnen elk proefvlak werd opnieuw de dode houtige biomassa geïnventariseerd met een diameter hoger dan 5cm. In de dunningen werd ook de resterende staande opstand geïnventariseerd. De kwaliteitscontrole van de houtsnippers gebeurde volgens een vastgelegde procedure voorgesteld in verschillende normen. De verzamelde houtsnippers werden in het labo een dag gedroogd op een temperatuur van 65°C, dit om eventuele broei van de natte houtsnippers te voorkomen in de periode tussen het hakselen en de analyse van de houtsnippers.

De diameterdistributie werd onderzocht volgens de NEN-EN 15149-1 norm. Om eventuele verstoring van de diameterfracties tijdens het drogen uit te sluiten, werd het materiaal verzameld in een ton en vervolgens in een horizontale beweging gerold. Op deze manier ontstond er een gradiënt van de verschillende fracties in de ton, wat een representatieve staalname toeliet. Dit staal werd vervolgens ook gewogen.

De volgende stap bestond uit het scheiden van de verschillende fracties van dit staal. Hiervoor werden verschillende zeven gebruikt met steeds verkleinende diameters. De diameters van de zeven bedroeg opeenvolgend 45mm, 32mm, 16mm, 8mm en 3mm conform aan de ISO 3310-2 norm. Het zeven gebeurde manueel, waarbij het zeven volgehouden werd tot de massa op elke zeef constant bleef. Vervolgens werd de massa van elke fractie bepaald. Verdere analyses, zoals bepalen van het gehalte droge stof en asrest, vereisten kleine hoeveelheden houtsnippers. Omwille van deze reden werden twee kleine stalen samengesteld uit de bekomen fracties die een gelijke deeltjesverhouding vertoonden als het oorspronkelijke staal.

Het droge stofgehalte werd bepaald door de stalen te plaatsen in een oven op 105°C (+-2°C) tot constant gewicht bereikt werd. De gevolgde procedure voor het drogen is conform aan de NEN-EN 14774-2 norm. Het droge stofgehalte werd dan berekend als de massa van de droge stof in verhouding met de massa van het verse staal.

$$\text{Vochtgehalte (\%)} = \frac{\text{Massa voor} - \text{Massa na}}{\text{Massa voor}} \times 100$$

Het asgehalte werd bepaald door de massa te bepalen van het residu na het verhitten van het staal in strikt gecontroleerde omstandigheden van tijd en temperatuur (tot 550 ± 10°C). Hierbij werd de NEN-EN 14775 norm gehanteerd. Gezien de houtsnippers te grof waren om deze analyse uit te voeren, werd het staal in het labo voor houttechnologie vooraf met behulp van een hamermolen verkleind tot spaanders van 1,5x1,5mm.

Gezien de beperkte periode van deze thesis en de vele stalen die dienen geanalyseerd te worden, was het niet meer mogelijk om de nutriëntenanalyses van alle stalen te doen. Deze analyses zullen worden opgevolgd door Pieter Vangansbeke in het kader van zijn doctoraatsstudie. De centrale focus van deze masterscriptie ligt op de efficiëntie en rendabiliteit van de oogstketens.

2.4 ECONOMISCHE ANALYSE

Het einddoel van dit project is het bundelen van de verzamelde kennis, en dit vervolgens te vertalen in een actief beleid voor het beheer van de domeinbossen. De nieuwe technieken en inzichten omtrent het oogsten van houtige biomassa, biedt opportuniteiten om kosteninefficiënte beheermaatregelen mogelijks kostenneutraal of winstgevend te maken wat vervolgens meer ruimte biedt aan de beheerder voor andere beheermaatregelen. Naast het gebruik van deze informatie binnen het ANB is het ook de bedoeling om de resultaten te delen met privébedrijven uit de bosbouwsector.

Uit economische standpunt bekeken zijn bedrijven vooral geïnteresseerd in de totale kostprijs per productie eenheid, in dit geval de kostprijs per ton biomassa. Hoewel de efficiëntie van het productieproces dikwijls kan gekoppeld worden aan een reductie in kostprijs, hoeft dit niet steeds zeer uitgesproken te zijn. Omwille van deze reden, werd ook een economische analyse uitgevoerd. De economische analyse bestond in de eerste plaats uit het verzamelen van gegevens omtrent de kostprijs per machine-/werkuur. In de eerste plaats werd dit gedaan door een bevraging van de betrokken exploitant bij dit project. Indien de gegevens van specifieke machines niet voorhanden waren werden deze overgenomen uit het MIP project ¹ (Gybels et al. 2012). Het MIP project startte in 2010 in de provincie Limburg, en had tot doel potentiële bronnen van houtige biomassa uit parken en bossen van de provincie Limburg in kaart te brengen. Algemeen kan geconcludeerd worden dat de gegevens van de bevraging in het kader van ons onderzoek zeer nauw aansloten bij de gegevens van het MIP project.

2.5 CO₂ BALANS

Energieopwekking door middel van biomassa wordt aanzien als een bron van groene energie. Biomassa ontstaat door het vastleggen van atmosferische CO₂ in organische verbindingen met behulp van licht. Bij het verbranden komt de opgeslagen CO₂ weer vrij evenals de energie die opgeslagen was in de organische verbinding. De verbranding van biomassa heeft dus geen invloed op het CO₂ gehalte in de atmosfeer. Het machinaal oogsten van biomassa gaat echter gepaard met het gebruik van fossiele brandstoffen. Om inzicht te krijgen in de netto CO₂ winst bij het gebruik van biomassa wordt de CO₂ balans opgesteld. De CO₂ balans bekijkt de netto CO₂ winst bij het gebruik van biomassa. Hiervoor wordt de energie inhoud van de biomassa gelijk gesteld aan de hoeveelheid CO₂ die zou vrijkomen voor eenzelfde hoeveelheid energie uit fossiele brandstoffen (aardgas; wordt het meest gebruikt voor energieopwekking in centrales) en verminderd met de CO₂ vrijgesteld door de machinale oogst.

¹ MIP project, Houtige biomassa voor energie in Limburg, http://www.inverde.be/content/pdf/eindrapport_lowres.pdf

3 RESULTATEN

3.1 KAALSLAGEN

3.1.1 Dendrometrische gegevens

In de eerste plaats is het belangrijk om de correcte oppervlakte te weten van elk perceel, deze werd berekend met behulp van de gps coördinaten van de hoekpunten en metingen van de lengte van de zijden met het meetlint. De berekening toonde aan dat percelen K1 en K2 een onderling vergelijkbare grote hebben, alsook K3 en K4 (Tabel 1).

In een volgende stap werd door middel van de berekende oppervlakte en de gemeten diameterverdelingen in de proefvlakken van elk perceel, een schatting gemaakt van het volume van de totale opstand. De schatting kwam tot stand na een extrapolatie van de volumes uit de opgemeten proefvlakken. Het volume in een proefvlak werden geschat volgens de volumetabellen van Berben (Berben et al. 1983). De resultaten hiervan worden weergegeven in kubieke meter per hectare, wat een betere vergelijking van de onderlinge percelen mogelijk maakt. Naast het volume, werd ook het grondvlak per ha bepaald.

Tabel 1: Dendrometrische gegevens van de percelen in Lommel.

	K1	K2	K3	K4
Oppervlakte(ha)	1,15	1,17	0,89	0,92
Volume (m³/ha)	409,86	444,80	395,74	406,03
Grondvlak (m²/ha)	43,61	47,15	41,87	40,06

Uit de opgemeten proefvlakken kan onder meer de diameterverdeling van de percelen worden afgeleid. De diameterverdeling tussen de percelen is erg gelijkaardig, daarom werd de verzamelde data van alle percelen gebruikt om de mediaandiameter en de kwartieldiameter te bepalen voor het volledige bestand in Lommel (Tabel 2).

De berekende waarden werden vervolgens gebruikt om bomen in het bestand op te sporen met een zelfde diameter. Op deze bomen werden dan hoogtemetingen verricht. De gemiddelde hoogte van de drie mediaanbomen (19,98 m) werd gebruikt als dominante hoogte in de volumeberekening.

Tabel 2: Gegevens van de diameter- en hoogteverdeling van modelbomen in het bestand in Lommel.

	Diameter (cm)	Hoogte (m)
Kwartiel 1	22	17,2
Mediaan A	26	20,43
Mediaan B	26	21,6
Mediaan C	26	17,9
Kwartiel 3	31	20

3.1.2 Biomassaogstketen

3.1.2.1 Oogst

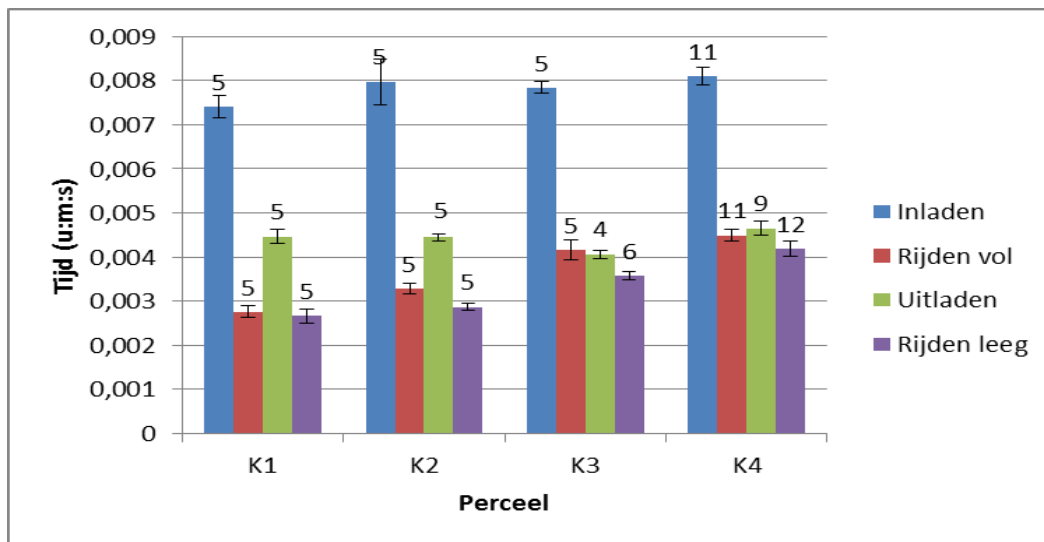
De eerste stap in het verloop van de experimenten, was het oogsten van de percelen. Tabel 3 geeft de resultaten weer van de parameters die zijn opgemeten, de belangrijkste hierbij zijn de effectieve oogsttijd per perceel, het geoogst volume en het verbruik.

Tabel 3: Resultaten van de opgemeten parameters tijdens de oogst met een harvester in Lommel.				
	K1	K2	K3	K4
Effectieve tijd (u:m:s/ha)	17:09:19	14:51:02	13:37:43	15:23:41
Geoogst volume (m³/ha)	349,3	364,4	341,8	365,5
Verbruik (l/ha)	195,7	209,4	175,3	207,6

3.1.2.2 Uitrijden hout

In alle percelen in Lommel werd het hout uitgereden met een forwarder en gestapeld nabij de weg. De verzamelde gegevens omtrent het uitrijden, zoals verbruik en het aantal werkuren worden weergegeven in (Tabel 4). De tijd van elke stap van de cyclus bij het uitrijden, werd nauwkeurig bijgehouden, de gemiddelde resultaten voor elk deelproces voor elk perceel worden in figuur 9 weergegeven.

Tabel 4: Resultaten van de opgemeten parameters tijdens het uitrijden van rondhout in Lommel.				
	K1	K2	K3	K4
Effectieve tijd (u:m:s/ha)	11:15:43	13:33:47	11:50:07	14:57:50
Pauze/mechanische defecten (u:m:s/ha)	2:27:46	0:52:01	0:52:01	0:52:01
Verbruik (l/ha)	139,4	139,4	139,4	139,4
Onderhoud machines (u:m:s/ha)	0:25:16	0:25:16	0:25:16	0:25:16



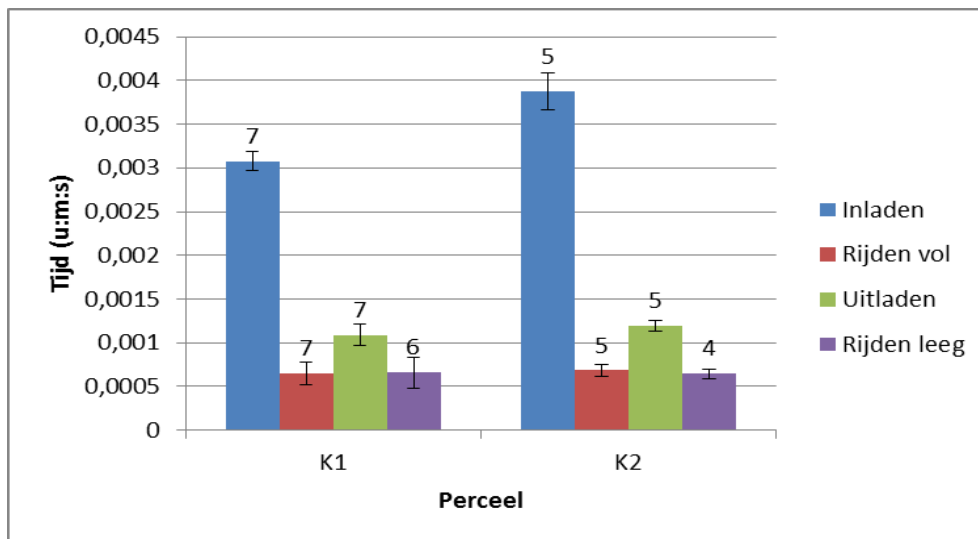
Figuur 9: Gemiddelde waarde van de individuele stappen in een cyclus voor het uitrijden van rondhout, de foutenbalken zijn een weergave van de standaard error (SE) waarden, de getallen boven de balk geven het aantal metingen weer.

3.1.2.3 Uitrijden biomassa

Het proces dat volgde na het uitrijden van het rondhout, is het uitrijden van de biomassa. Dit werd enkel gedaan in de percelen K1 en K2, in de overige percelen werd het materiaal ter plaatse gehakseld. Tabel 5 geeft de resultaten van de gemeten parameters tijdens dit proces weer. Net zoals bij het uitrijden van het hout wordt de gemiddelde tijdsduur van elk deelproces van het uitrijden berekend (Figuur 10).

Tabel 5: Resultaten van de opgemeten parameters tijdens het uitrijden van oogstresten in Lommel.

	K1	K2
Effectieve tijd (u:m:s/ha)	5:03:18	4:56:35
Pauze/mechanische defecten (u:m:s/ha)	0:18:03	0:31:41
Verbruik (l/ha)	60,7	64,1
Onderhoud machines (u:m:s/ha)	0:02:55	/



Figuur 10: Gemiddelde waarde van de individuele stappen in een cyclus voor het uitrijden van oogstresten, de foutenbalken zijn een weergave van de SE waarden, het aantal waarnemingen is aangegeven boven de kolom.).

3.1.2.4 Hakselen

De laatste stap in de geteste ketens bestond uit het hakselen van de biomassa, in de proefpercelen K1 en K2 gebeurde dit aan de rand, in de overige percelen in het perceel zelf. Tabel 6 geeft een overzicht van de resultaten van de metingen voor elk proefperceel. De verrichte metingen zijn de tijdsmetingen, het verbruik en de totale hoeveelheid gehakselde biomassa.

Tabel 6: Resultaten van de opgemeten parameters van het hakselen in de percelen in Lommel.

	K1	K2	K3	K4
Effectieve tijd (u:m:s/ha)	4:25:13	4:07:52	7:40:40	7:42:41
Pauze/mechanische defecten (u:m:s/ha)	3:58:16	2:53:30	/	/
Verbruik (l/ha)	149,4	143,0	137,1	145,4
Onderhoud machines (u:m:s/ha)	93721,7	85750,9	91505,6	87021,7

Finaal wordt er naar de productiviteit van het hakselen in het bestand en aan de rand van de weg gekeken. Hierbij wordt de effectieve hakseltijd uitgedrukt ten opzichte van de totale hoeveelheid geproduceerde biomassa (Tabel 7). Het gebruik van een kleinere aftopdiameter zorgt voor een stijging van de productietijd per geproduceerde ton, ongeacht de locatie van het hakselen. Het al dan niet hakselen in het bestand heeft sterke implicaties op de productietijd, de productietijd is hoger indien het materiaal in het bestand wordt gehakseld.

Tabel 7: Productietijd per ton houtsnippers voor het hakselen in het perceel en aan de rand van de weg.

	Hakselen uit het bestand	Hakselen in het bestand
Effectieve hakseltijd (u:m:s/ton) met Ø12	0:02:50	0:05:02
Effectieve hakseltijd (u:m:s/ton) met Ø7	0:02:53	0:05:19

3.1.3 Economische analyse

In de eerste plaats werd door middel van rondvraag de kostprijs per uur bekomen voor de verschillende machines, deze prijs werd berekend door de bosexploitant. In deze prijsberekening zit de kostprijs van de operator en het verbruik, de aankoopprijs en het onderhoud van de machine. Voor de Jenz hakselaar worden twee tarieven gehanteerd, dit naar gelang het gebruik. De kostprijs van de wachttijd ligt een stuk lager, omdat dit enkel de kostprijs bevat van de operator en slechts een kleiner gedeelte van de machinekost. Tabel 8 toont het resultaat van de bevraging en de aanvulling met gegevens vanuit het MIP-project.

Tabel 8: Kostprijs per machine-uur van de verschillende machines gebruikt in Lommel.

Machine	Kostprijs €/u
Jenz-420 incl. Tractor (wachttijd)	50
Jenz-420 incl. Tractor (hakseltijd)	155
Greentec hakselaar	130
Fendt met FAE bosfrees	145
Harvester (MIP-project)	120
Forwarder (MIP-project)	50

3.1.3.1 Kosten

Algemeen kan binnen de kosten een scheiding worden gemaakt tussen de kosten die verbonden zijn aan de exploitatie van het OSB-hout en de kosten verbonden aan de exploitatie van de houtsnippers (Tabel 9 en Tabel 10). Tijdens de duur van de proeven ondervonden de machines regelmatig mechanische problemen. Deze mechanische problemen staan niet in verband met de productieketen en kunnen dus een vertekend beeld opleveren indien ze worden meegerekend in de economische analyse. Omwille van deze reden wordt enkel verder gerekend met de effectieve werktijden. Hierop wordt echter een uitzondering gemaakt bij het hakselen, dit omwille van de uitgesproken invloed die de logistieke keten heeft op het uitvoeren van dit proces.

De belangrijkste machines bij het oogsten van het OSB-hout zijn de harvester en de forwarder. Om deze reden wordt de kostprijs van het oogsten van OSB-hout berekend op basis van de kosten van deze machines.

Tabel 9: Overzicht van de kostprijs per hectare bij het oogsten van OSB-hout in de kaalslagen in Lommel.

	K1	K2	K3	K4
Harvester:				
Effectieve tijd (u:m:s/ha)	17:09:19	14:51:02	13:37:43	15:23:41
Kostprijs (€/ha)	2058,63	1782,08	1635,43	1847,36

Forwarder (hout):				
Effectieve tijd (u:m:s/ha)	11:15:43	13:33:47	11:50:07	14:57:50
Kostprijs (€/ha)	563,10	678,15	591,76	748,18
Totaal:				
Effectieve tijd (u:m:s/ha)	28:25:02	28:24:50	25:27:50	30:21:30
Kostprijs (€/ha)	2621,73	2460,24	2227,19	2595,54

Het oogsten van houtsnippers, kan afhankelijk van de uitgevoerde experimenten worden opgedeeld in het uitrijden en het hakselen. Het uitrijden gebeurde enkel in de percelen K1 en K2, waar het hakselen aan de rand van de weg gebeurt. In de overig percelen werd het hakselen uitgevoerd in het perceel. Zoals reeds vermeld in paragraaf 2.2.2 was de Greentec hakselaar niet uitgerust met geschikte banden. Dit vereiste een extra behandeling met de bosfrees. Indien deze methode verder zou worden toegepast zou deze machine kunnen uitgerust worden met aangepaste banden, wat het frezen overbodig zou maken. Daarom wordt deze kost in de verdere analyse niet opgenomen.

Tabel 10: Overzicht van de kostprijs per hectare bij het oogsten van houtsnippers in de kaalslagen in Lommel.

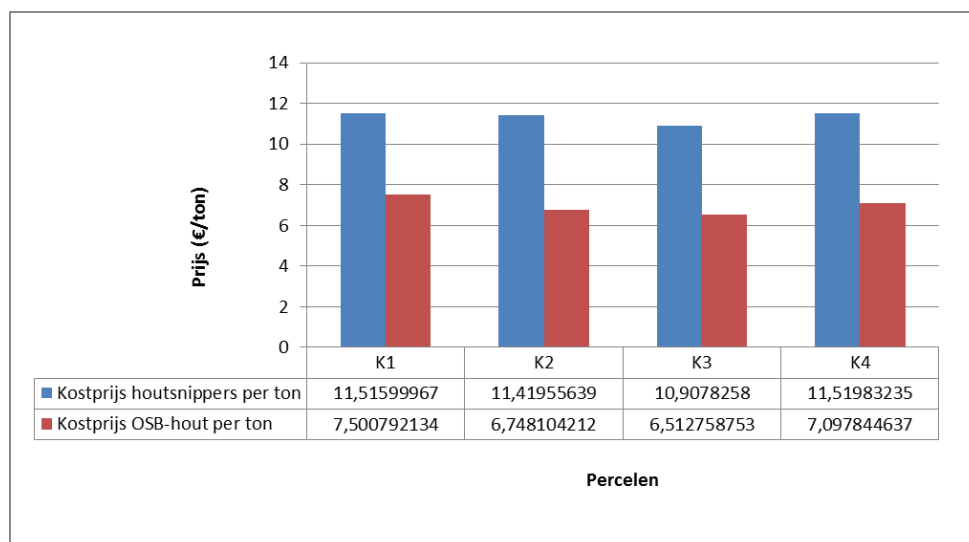
	K1	K2	K3	K4
Forwarder (biomassa):			Voorbehandeling bosfrees:	
Effectieve tijd (u:m:s/ha)	3:54:43	3:53:12	0:52:49	0:51:05
Kostprijs (€/ha)	195,60	194,34	127,62	123,46
Hakselaar:				
Tijd (u:m:s/ha) (effectief)	4:25:13	4:07:52	7:40:40	7:42:41
Tijd (u:m:s/ha) (pauze)	3:58:16	2:53:30	/	/
Kostprijs (€/ha)	883,70	784,90	998,12	1002,48
Totaal:				
Effectieve tijd (u:m:s/ha)	12:18:12	10:54:34	7:40:40	7:42:41
Kostprijs (€/ha)	1079,30	979,24	998,12	1002,48

Bij het produceren van houtsnippers zijn in de eerste twee percelen, twee processen betrokken, het uitrijden en het verhakselen van het materiaal. Om de productiviteit van de geteste ketens nog beter te vergelijken werden alle tijden van de betrokken processen opgeteld en vervolgens gedeeld door totale hoeveelheid houtsnippers die geproduceerd zijn per perceel. De bekomen resultaten van deze analyse tonen aan dat de productietijd per ton het laagst is bij de percelen waarbij het materiaal in het bestand werd verwerkt (Tabel 11).

Tabel 11: Totale productietijd per ton natte houtsnippers in de kaalslagen in Lommel.

	K1	K2	K3	K4
Uitrijden van de Biomassa ([u:m:s]/ha)	3:54:43	3:53:12	/	/
Hakselen, effectieve tijd (u:m:s/ha)	4:25:13	4:07:52	7:40:40	7:42:41
Biomassa (kg/ha)	93722	85751	91506	87022
Productietijd/ton (u:m:s/ha)	0:05:20	0:05:37	0:05:02	0:05:19

Het geogst volume binnen een hectare vertoont enige variatie tussen de percelen, dit kan aanleiding gegeven tot het nemen van foute conclusies indien er wordt gekeken naar de kostprijs per hectare. Om dit te vermijden werden de kosten van zowel de oogst van OSB-hout en de oogst van biomassa ook uitgezet op de hoeveelheid OSB-hout en de totale hoeveelheid biomassa (Figuur 11).



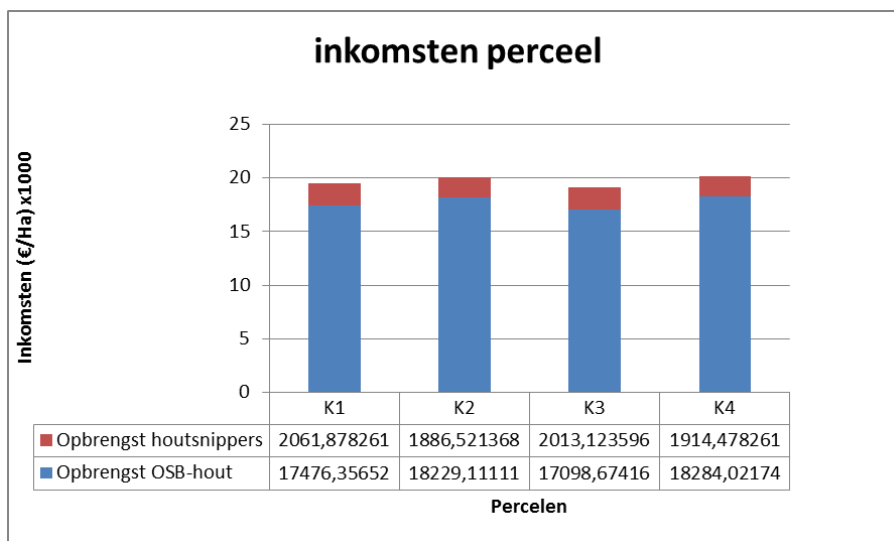
Figuur 11: Productiekost per ton voor houtsnippers en OSB-hout voor de percelen in Lommel.

3.1.3.2 Inkomsten

Naast de kosten die verbonden zijn aan de ontginning van de percelen, bracht de verkoop van het OSB-hout en houtige biomassa ook inkomsten op. In totaal werd uit de kaalslagsystemen 1.469,3 ton OSB-hout geogst, goed voor een totale opbrengst van €73.465. De eenheidsprijs bedroeg hier €50 per ton OSB-hout afgeleverd aan Norbord, het grootste houtverwerkend bedrijf in de provincie Limburg. De totale afname van industriehout door Norbord bedraagt op jaarbasis 400.000 m³ met een verhouding van 75% Sylvester- Corsicaden, 15% fijnspar, 10% Lariks/Douglas (Wierbos 2011). Het hout werd tijdens het stapelen niet gescheiden, omwille van deze reden kan niet exact bepaald worden wat de opbrengst is per perceel. Desondanks kan er een goede schatting gemaakt worden van de totale opbrengst per perceel, op basis van de verhouding van het geogste hout.

De prijs van de houtsnippers is variabel. De belangrijkste factor die de prijs bepaalt is het al dan niet rechtstreeks afleveren van de houtsnippers bij de verbruiker. In onze studie bleek dit de

energiecentrale van Ham (4 Energy Invest) te zijn. De verkoopprijs van houtsnippers bedroeg €30 euro per ton als de houtsnippers van het bos direct worden afgeleverd aan de poorten van de energiecentrale. Indien deze eerst naar een opslagpunt (terreinen Vandervelden) diende getransporteerd te worden en vervolgens naar de centrale, bracht dit een extra kost van €8 per ton met zich mee. Wat de opbrengst per ton naar €22 brengt. Gezien slechts enkele containers rechtstreeks zijn afgevoerd naar een centrale wordt de prijs van €22 per ton aangenomen. Een overzicht van de totale inkomsten uit OSB-hout en houtsnippers per perceel wordt gegeven in figuur 12.



Figuur 12: Cumulatieve weergave van de inkomsten uit OSB-hout en houtsnippers van de kaalslagen.

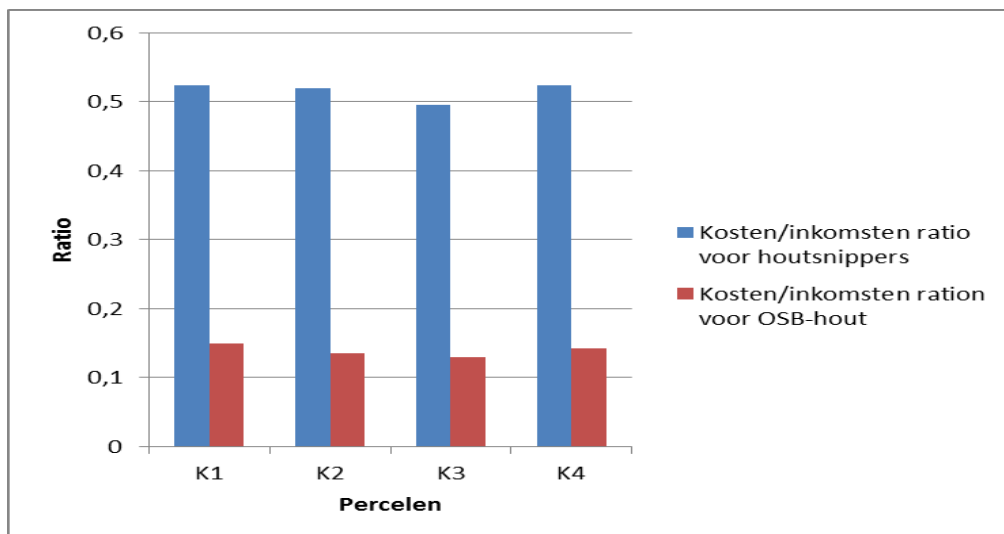
3.1.3.3 Balans

In tabel 12 wordt een overzicht gegeven van de financiële analyse met als eindresultaat de netto winst per perceel, uitgedrukt in euro per hectare. De netto winst per hectare is voor alle percelen gelijkaardig, een lichte meerwaarde per hectare is waar te nemen bij een kleinere aftopdiameter

Tabel 12: Netto winst van de oogst van hout en biomassa uit de percelen in Lommel.

	K1	K2	K3	K4
Inkomsten (€/ha)	19538,23	20115,63	19111,80	20198,50
OSB	17476,36	18229,11	17098,67	18284,02
Biomassa	2061,88	1886,52	2013,12	1914,48
Kosten (€/ha)	3701,03	3439,48	3225,31	3598,02
OSB	1079,30	979,24	998,12	1002,48
Biomassa	2621,73	2460,24	2227,19	2595,54
Netto (€/ha)	15837,21	16676,15	15886,48	16600,48

De ratio tussen de kosten en de inkomsten die verbonden zijn aan het oogsten van de verschillende producten voor de percelen wordt weergegeven in figuur 13. De verhouding tussen kosten en inkomsten per ton geproduceerd materiaal (OSB-Hout en Biomassa) is het laagst bij industriehout, en levert de hoogste netto winst per geproduceerde ton.



Figuur 13: Verhouding tussen kosten en inkomsten voor de verschillende geoogste producten (OSB-hout en Biomassa) uit de kaalslag in de percelen in Lommel.

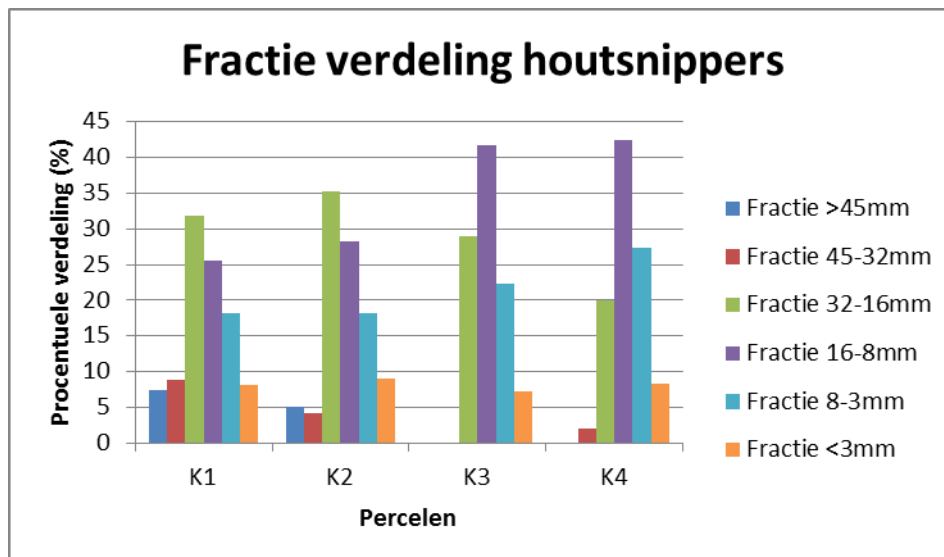
3.1.4 Kwaliteit van de houtsnippers

In dit laatste onderdeel wordt de resultaten weergegeven van de testen op de houtsnippers. De geteste parameters zijn asrest, vochtgehalte (Tabel 13) en de fractieverdeling van de houtsnippers (Figuur 14). De waarden bekomen uit de analyse van de houtsnippers vertonen weinig variatie in vochtgehalte. Verschillen in asrest zijn echter wel waar te nemen. De hoogste asrestwaarden worden verkregen indien het materiaal aan de rand van het bestand wordt gehakseld. De invloed van de aftopdiameter is iets beperkter, maar algemeen kan een stijging worden waargenomen in de vervuiling van de houtsnippers bij een kleinere aftopdiameter.

Tabel 13: Resultaten van de analyse van de asrest en het vochtgehalte van de houtsnippers van de percelen in Lommel.

	K1	K2	K3	K4
Asrest	2,77	3,90	1,12	1,42
Vochtgehalte (%)	58,25	58,25	58,25	61,05

Op basis van de fractieverdeling kan een duidelijk onderscheid worden gemaakt tussen beide hakselaars. Het aandeel aan grote houtsnippers (>32mm) is groter bij het gebruik van de JENZ hakselaar dan bij de Greentec, waar dit eerder verschoven is naar de kleinere fracties. Een verschuiving van de fractieverdeling naar de kleinere assortimenten is waar te nemen bij het gebruik van kleinere aftopdiameters, onafhankelijk van de gebruikte hakselaar.



Figuur 14: Fractieverdeling houtsnippers voor de percelen in Lommel, K1 en K2 (Jenz), K3 en K4 (Greentec).

3.1.5 Statistische vergelijking

Om een correcte beoordeling mogelijk te maken van de gemeten waarden werden enkele statistische testen uitgevoerd met SPSS (versie 21). De normaliteit van de data werd getest met behulp van een Shapiro-Wilk test omwille van het kleine aantal meetwaarden. Indien de data normaal verdeeld waren werden de gemiddelden van beide groepen getest met een T-test, indien niet werd er gebruik gemaakt van de Mann-Whitney U test.

Eerst werd de invloed van de aftopdiameter op het laden en lossen van het rondhout door middel van een forwarder getest. De resultaten van deze analyses tonen aan dat er significante verschillen zijn in de laad- en lostijden van het rondhout bij verschillende aftopdiameter (Tabel 14).

Tabel 14: Resultaten van de statistische analyses voor de invloed van aftopdiameter op laad- en lostijden voor rondhout.

	Shapiro-Wilk test	Onafhankelijke T-test	Mann-Whitney U test
Invloed van aftopdiameter op laadtijd van rondhout	P=0,07	P=0,01	Nt
Invloed van aftopdiameter op uitladen van rondhout	P=0,02	Nt	P=0,029

Een vergelijkbare analyse werd uitgevoerd op de meetwaarden voor het laden en lossen van de biomassa. De resultaten worden weergegeven in onderstaande Tabel 15.

Tabel 15: Resultaten van de statistische analyses voor de invloed van aftopdiameter op laad- en lostijden voor biomassa.

	Shapiro-Wilk test	Onafhankelijke T-test	Mann-Whitney U test
Invloed van aftopdiameter op laadtijd van biomassa	P=0,69	P=0,014	Nt
Invloed van aftopdiameter op uitladen van biomassa	P=0,98	P=0,28	Nt

3.1.6 CO₂ Balans

Het brandstofverbruik van alle processen betrokken bij de productie van de houtsnippers werden opgeteld om de totale CO₂ uitstoot te bepalen. De processen die hiervoor in rekening werden gebracht zijn: het uitrijden van de biomassa en het verhakselen. Het brandstofverbruik van de harvester werd niet in rekening gebracht daar de houtsnippers een nevenproduct vormen van het geogoste OSB-hout. De energiewaarde per ton biomassa bedraagt 2,3 Mwh (Eriksson & Gustavsson 2008). Uit deze waarde werd vervolgens de CO₂ uitstoot berekend voor het bekomen van een equivalente hoeveelheid energie uit aardgas. Deze waarde bedroeg voor aardgas, 56 kg CO₂/Gj. (Gybels et al. 2012).

Tabel 16: CO2 balans voor oogstketens in de percelen in Lommel.

	K1	K2	K3	K4
CO₂ Uitstoot (kg)	596,14	597,51	322,08	316,27
CO₂ Equivalent aardgas (kg)	49975,43	46520,37	37762,10	37122,22
Netto (kg)	49379,29	45922,86	37440,02	36805,95
Ratio (CO₂-uitstoot/ CO₂ Equivalent) %	1,2	1,3	0,9	0,9

3.2 DUNNINGEN

3.2.1 Dendrometrische gegevens

De ligging van de percelen en de hiermee samengaan de wegeninfrastructuur in het bos maakt dat de percelen in Overpelt een meer onregelmatige oppervlakte hebben in vergelijking met de percelen in Lommel. Dit vertaalt zich ook in de opgemeten oppervlaktes (Tabel 17).

Tabel 17: Dendrometrische gegevens van de percelen in Overpelt.				
	D1	D2	D3	D4
Oppervlakte(ha)	1,05	1,00	1,35	1,55
Volume (m³/ha)	272,48	315,84	327,83	305,01
Grondvlak (m²/ha)	41,1	47,06	48,10	44,56

Doormiddel van de opgemeten proefpercelen werd een schatting gemaakt van het te oogsten houtvolume en de diameterverdeling van elk perceel. Hiernaast werd het dunningspercentage en het dunningsvolume van elk bestand bepaald door gebruik te maken van de verdeling van de gemarkeerde en ongemarkeerde bomen binnen de proefvlakken van het elk perceel. Algemeen kan geconcludeerd worden dat er een gemiddeld dunningspercentage over de 4 percelen wordt bekomen van 20,5 procent van het bestand volume (Tabel 18).

Tabel 18: Resultaten van het dunningspercentage van het bestand in Overpelt.				
	D1	D2	D3	D4
Dunningspercentage (%/ha)	20,1	24,9	21,2	15,8

Met behulp van de diameterverdeling van alle proefvlakken werden de kwartiel- en mediaandiameters bepaald. Vervolgens werden hoogtemetingen gedaan op bomen uit het bestand met een overeenkomstige diameter. De opgemeten hoogtes van de individuele bomen liggen zeer dicht bij elkaar, ondanks de grote onderlinge verschillen in diameter (Tabel 19). De gemiddelde hoogte van de mediaanbomen (13,87 m) werd gebruikt als dominante hoogte voor de volumeberekening.

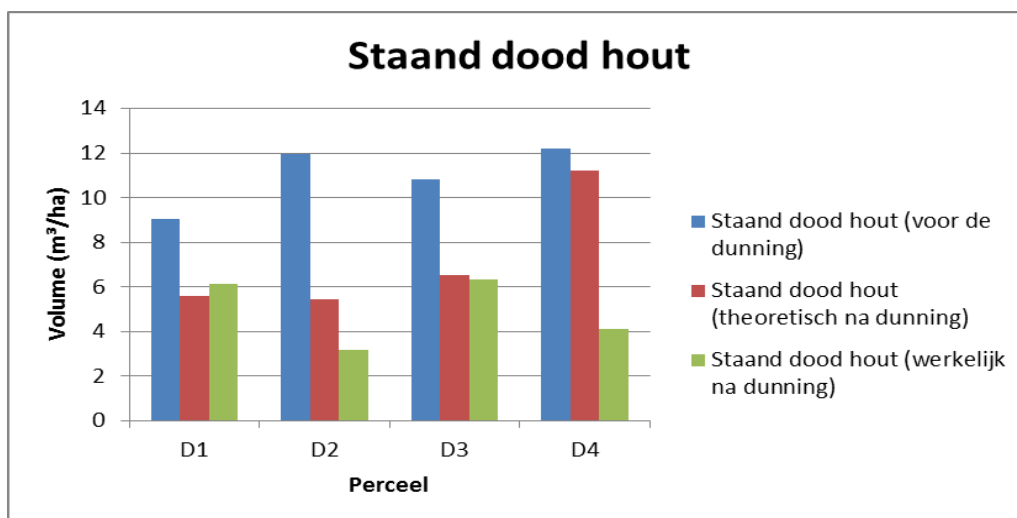
Tabel 19: Gegevens van de diameter- en hoogteverdeling van de modelbomen in het bestand in Overpelt.		
	Diameter (cm)	Hoogte (m)
Kwartiel 1	11	13,90
Mediaan A	15	13,80
Mediaan B	15	13,60
Mediaan C	15	14,20
Kwartiel 3	20	14,30

De dode biomassa in het bestand kan opnieuw worden opgedeeld in liggende en staande biomassa (Tabel 20). De hoeveelheid staand dood hout zal na de dunning afnemen. Op basis van de gemarkeerde bomen kan deze hoeveelheid worden geschat. Om eventuele afwijkingen

van de berekende hoeveelheid waar te nemen werd een nieuwe inventarisatie uitgevoerd na de oogst. Figuur 15 toont een duidelijk verschil aan tussen het theoretische aandeel staand dood hout na de dunning en de reële situatie. In drie van vier geteste percelen is het aandeel staand dood hout lager dan berekend.

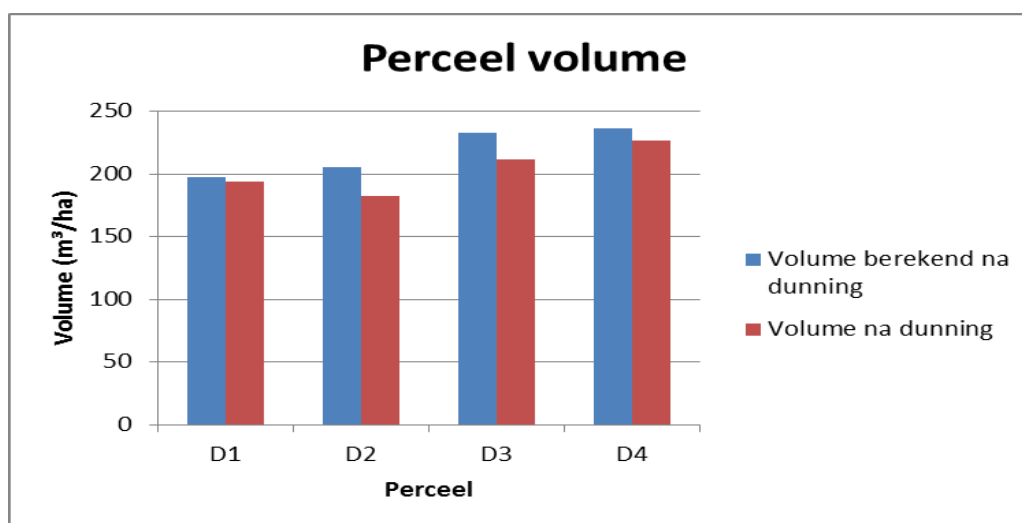
Tabel 20: Hoeveelheid staand (m³/ha) en liggend (kg/ha) dood hout in de percelen in Overpelt voor het uitvoeren van de dunning.

	D1	D2	D3	D4
Liggend dood hout (kg/ha)	4594,58	4245,83	6436,25	4178,75
Staand dood hout (voor) (m ³ /ha)	9,05	11,98	10,83	12,22



Figuur 15: Volume van het staand dood hout voor de percelen in Overpelt voor de dunning, in theorie na de dunning en in werkelijkheid na de dunning.

De inventarisatie achteraf maakt het ook mogelijk om eventuele afwijkingen in het geogste volume waar te nemen. Om dit in beeld te brengen werd het werkelijk volume gemeten dat na de dunning aan levende bomen achter bleef in de proefvlakken en vergeleken met het berekende volume op basis van de inventarisatie van de niet aangeduide bomen voor de dunning (Figuur 16). In alle proefpercelen bleek het resterende volume aan biomassa lager te liggen dan voorzien aan de hand van de gemarkeerde bomen.



Figuur 16: Staand volume van de percelen na dunning en de theoretische volume na dunning in Overpelt.

3.2.2 Biomassa oogstketens

3.2.2.1 Oogst

De oogst van de houtige biomassa werd in de percelen D1-D3 uitgevoerd door een harvester; in D4 met een rupskraan uitgerust met een knipkop. De effectieve werktijd van beide machines en het verbruik worden weergegeven in tabel 21. Het geoogst volume per perceel, geregistreerd door de boordcomputer van de harvester, was volgens de operator niet betrouwbaar in de dunningen en werd hierdoor niet meegenomen in de resultaten. De afwijking is het gevolg van meerdere manipulaties die worden uitgevoerd tijdens het oogsten van een stam. Het meerdere malen verplaatsen van de harvesterkop op de stam maakt dat bij elke grijpbeweging de diameter wordt geregistreerd als een geveld boom. Omwille van deze reden wordt niet gewerkt met het volume, maar met de hoeveelheid afgevoerde biomassa (OSB-hout en houtsnippers) uitgedrukt in ton.

Tabel 21: Resultaten van de opgemeten parameters tijdens de oogst met een harvester/kraan met knipkop in Overpelt.

	D1	D2	D3	D4
Effectieve tijd (u:m:s/ha)	6:33:27	7:50:13 +1:52:34*	5:57:41	7:30:58
Geoogst volume (m³/ha)	82,86	93,00 +22,26*	79,26	136,77
Verbruik (l/ha)	94,97	110,40 +26,11*	102,86	109,73
*Extra berekende harvester tijd, verbruik en massa				

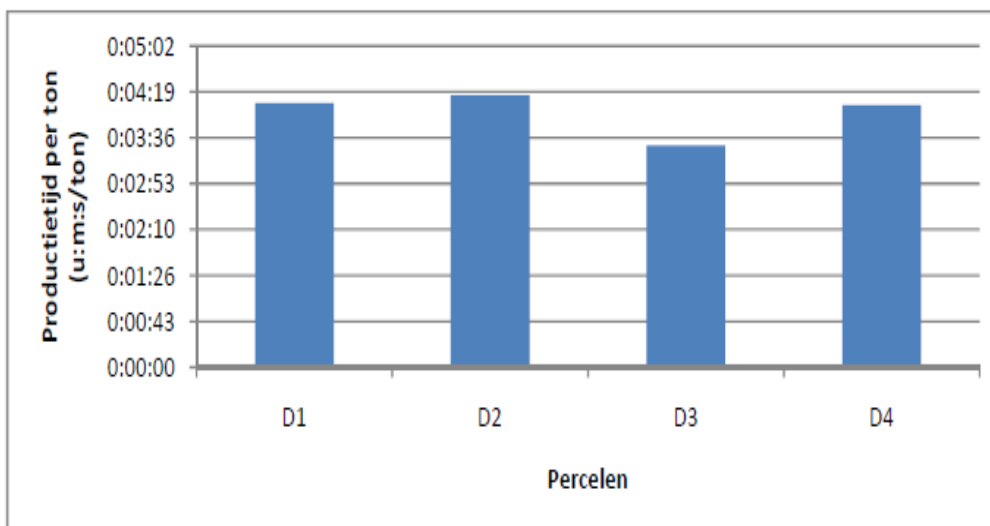
Door gebruik te maken van de Greentec hakselaar in het bestand diende er een extra rij bomen per ruimingspiste te worden verwijderd. Het verbreden van de ruimingspiste gebeurde motor-manueel met assistentie van een 3t kraan, die hielp bij het vallen in de juiste richting en het verwijderen van de stammen uit de ruimingspistes (Tabel 22).

In totaal werden er 176 bomen extra verwijderd. Met behulp van de mediaan werd een schatting gemaakt van het volume hout dat extra werd verwijderd. Dit volume bedroeg 23,21m³. Vervolgens werd met behulp van de dichtheitsgegevens het gewicht bepaald van het extra geoogst volume (Oliva et al. 2006). Op basis hiervan werd een schatting gemaakt van de extra tijd en verbruik dat nodig zou geweest zijn indien de harvester deze zelfde hoeveelheid diende te oogsten in het bestand.

Tabel 22: Resultaten van de gemeten parameters tijdens de motor-manuele velling in Overpelt.

Effectieve tijd(u:m:s)	5:59:00
Pauze/ Mechanische defecten (u:m:s)	1:03:00
Verbruik(l)	35

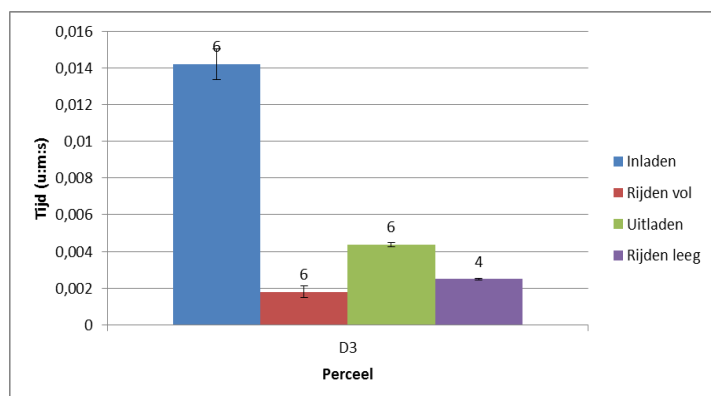
Om de impact van de verschillende oogstmachines op de keten te bekijken wordt de productietijd per ton bepaald. Hieruit blijkt dat de productietijd voor de harvester en de rupskraan gelijkaardig is indien er enkel biomassa wordt geoogst. Een daling in de productietijd wordt vast gesteld indien er naast biomassa ook OSB-hout wordt geoogst (Figuur 17).



Figuur 17: Productietijd per ton voor de oogstmachines in Overpelt; D1-D3:Harvester (John Deere 1170E) D4: Rupskraan (Hyundai R145).

3.2.2.2 Uitrijden hout

Het uitrijden van het OSB-hout gebeurde enkel in perceel D3. Hierbij werd een totaal hoeveelheid van 81,74 ton uitgereden doormiddel van een forwarder (Figuur 18). Het laden van het OSB-hout in het bestand is de cruciale stap in de uitrijcyclus en duurt ongeveer 20 minuten, wat ongeveer dubbel zolang is als bij de percelen in Lommel. Dit in tegenstelling tot de lostijd die een gelijkaardige waarde vertoont.



Uitrijden OSB-hout D3	
Tijd (u:m:s/ha) Pauze/ Mechanische	3:08:09
Defecten (u:m:s)/ha)	/
Verbruik (l/ha)	36,30
Onderhoud machine (u:m:s/ha)	0:03:48

Figuur 18: Resultaten van opgemeten parameters bij het uitrijden van rondhout in perceel D3 bij de dunning in Overpelt.

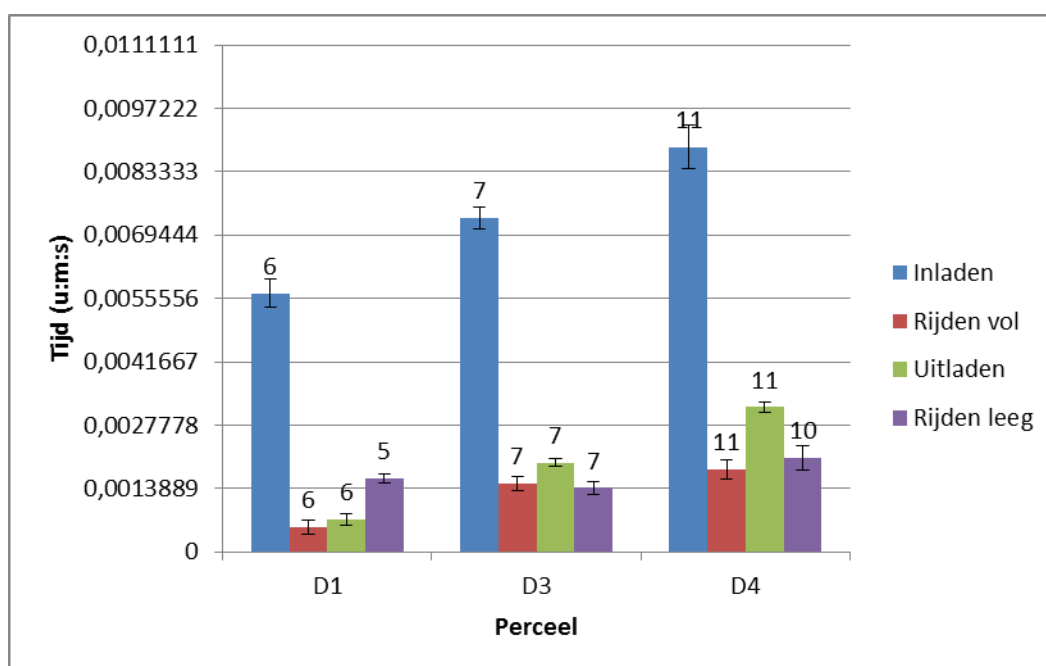
3.2.2.3 Uitrijden biomassa

De volgende stap in de productieketen bestaat uit het uitrijden van de biomassa. In de percelen D1 en D3 werd dit uitgevoerd door een forwarder, in D4 door een uitrijwagen. De belangrijkste parameters die werden opgemeten zijn het brandstofverbruik, de effectieve werkuren en de onderlinge tijdsmetingen van de cyclussen (Tabel 23).

De oogstresten van perceel D1 en D4 zijn in principe gelijkaardig. De tijd en het verbruik liggen echter een stuk hoger in het perceel (D4) waar het uitrijden gebeurde met behulp van een uitrijwagen. Dit onderscheid is voornamelijk te merken in de langere laad- en lostijden van de oogstresten (Figuur 19)

Tabel 23: Resultaten van de opgemeten parameters bij het uitrijden van de oogstresten in Overpelt.

	D1	D3	D4
Effectieve tijd (u:m:s/ha)	4:22:51	3:42:13	7:42:11
Pauze/mechanische defecten (u:m:s/ha)	0:38:06	0:25:56	0:34:35
Verbruik (l/ha)	41,43	39,63	63,87
Onderhoud machines (u:m:s/ha)	0:08:47	0:12:36	0:07:06



Figuur 19: Gemiddelde tijdsduur van de individuele stappen in een cyclus voor het uitrijden van oogstresten, de foutenbalken zijn een weergave van de SE waarden, de cijfers boven de balken geven het aantal metingen weer.

3.2.2.4 Hakselen

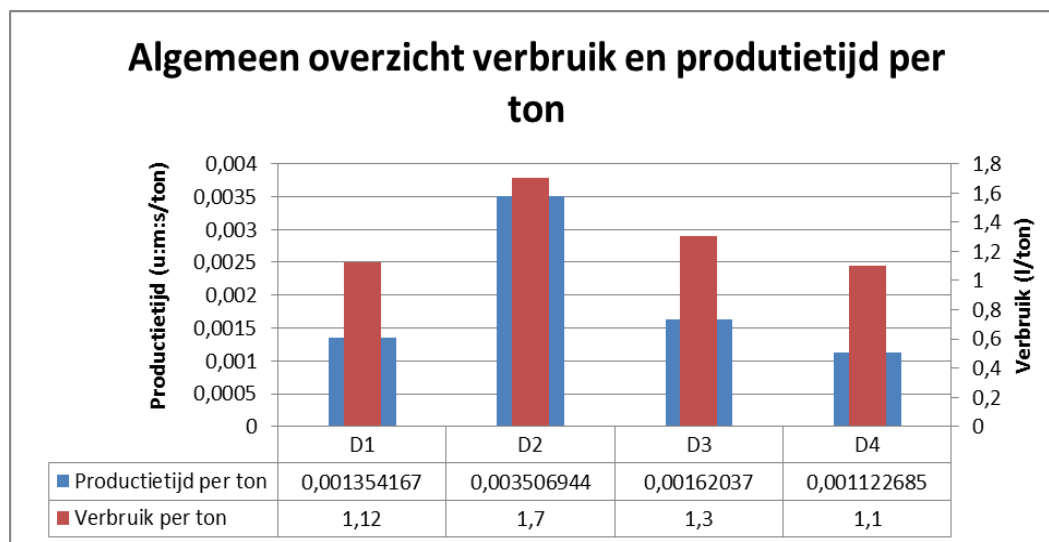
De laatste stap van elke productieketen was het verwerken van het dunningsmateriaal tot houtsnippers. In drie van de vier proeven gebeurde dit op de conventionele manier aan de stapelplaats. In het overige perceel (D2) werd het hakselen in het bestand uitgevoerd door de Greentec (Tabel 24). Er zijn sterke verschillen te merken in de hoeveelheid materiaal die uit de percelen werd afgevoerd. Het verwijderen van een extra bomenrij in perceel D2 zorgt voor een hogere hoeveelheid biomassa. De lagere waarde in het derde perceel is te wijten aan het verwijderen van het OSB-hout.

Tabel 24: Resultaten van de opgemeten parameters bij het hakselen in de percelen in Overpelt.

	D1	D2	D3	D4
Effectieve tijd (u:m:s/ha)	3:05:43	11:29:26	1:38:31	2:57:25
Pauze/mechanische defecten (u:m:s/ha)	5:03:49	0:29:34	1:54:04	5:15:29

Verbruik (l/ha)	106,45	232,00	54,88	120,65
Biomassa(kg/ha)	94971,43	136520	42311,11	109729

Om een goede vergelijking mogelijk te maken werd de productietijd voor elke hakselaar berekend. Dit werd gedaan door de effectieve tijd te delen door de geproduceerde hoeveelheid biomassa (Figuur 20).



Figuur 20: Algemeen overzicht van de productietijd en het verbruik per ton biomassa van de hakselaars voor de percelen in Overpelt.

3.2.3 Economische analyse

Gelijkaardig aan de economische analyse van het bestand in Lommel, wordt opnieuw de kostprijs van elke machine per uur bepaald. De lijst van de kaalslagen wordt uitgebreid met enkele extra machines die werden gebruikt bij de experimenten voor de dunningen (Tabel 25).

Tabel 25: Kostprijs per machine-uur van de verschillende machines gebruikt in de dunningen in Overpelt.

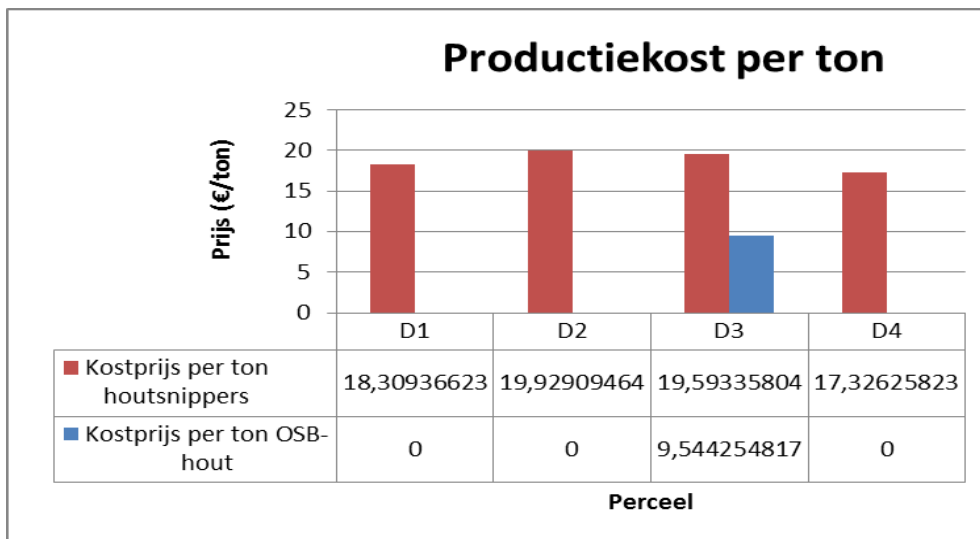
Machine	Kostprijs €/u
Jenz-420 incl. Tractor (wachttijd)	50
Jenz-420 incl. Tractor (hakseltijd)	155
Greentec hakselaar	130
Fendt met FAE bosfrees	145
Harvester	120
Forwarder	50
Uitrijkar-tractor	80
Rupskraan-knipkop	75

4.2.3.1 Kosten

De kost van de ketens wordt opnieuw onderverdeeld in de verschillende stappen: het oogsten, het transport en het hakselen. Ook bij deze berekeningen werd enkel gerekend met de effectieve werktijd, dit om vertekeningen van technische defecten of pauze uit te sluiten, dit met uitzondering van de hakseltijden (Tabel 26).

Tabel 26: Overzicht van de oogstkosten voor OSB hout en houtsnippers.				
	D1	D2	D3	D4
Harvester/kraan met knipkop				
Effectieve tijd (u:m:s/ha)	6:33:27	9:41:27	5:57:41	7:30:58
Kostprijs (€/ha)	786,89	1162,89	715,36	563,71
Forwarder (OSB-hout):				
Effectieve tijd (u:m:s/ha)	Nt	Nt	3:08:09	Nt
Kostprijs (€/ha)	Nt	Nt	156,79	Nt
Uitrijmachine (Oogstresten):				
Effectieve tijd (u:m:s/ha)	4:22:51	Nt	3:42:13	7:42:11
Kostprijs (€/ha)	219,05	Nt	185,19	616,25
Hakselaar:				
Tijd (u:m:s/ha) (effectief)	3:05:43	11:59:00	1:38:31	2:57:25
Tijd (u:m:s/ha) (pauze)	5:03:49	Nt	1:54:04	5:15:29
Kostprijs (€/ha)	732,93	1557,83	349,57	721,24
Totaal:				
Effectieve tijd (u:m:s/ha)	9:05:50	21:40:27	16:20:39	23:26:03
Kostprijs (€/ha)	1738,87	2720,72	1406,90	1901,19

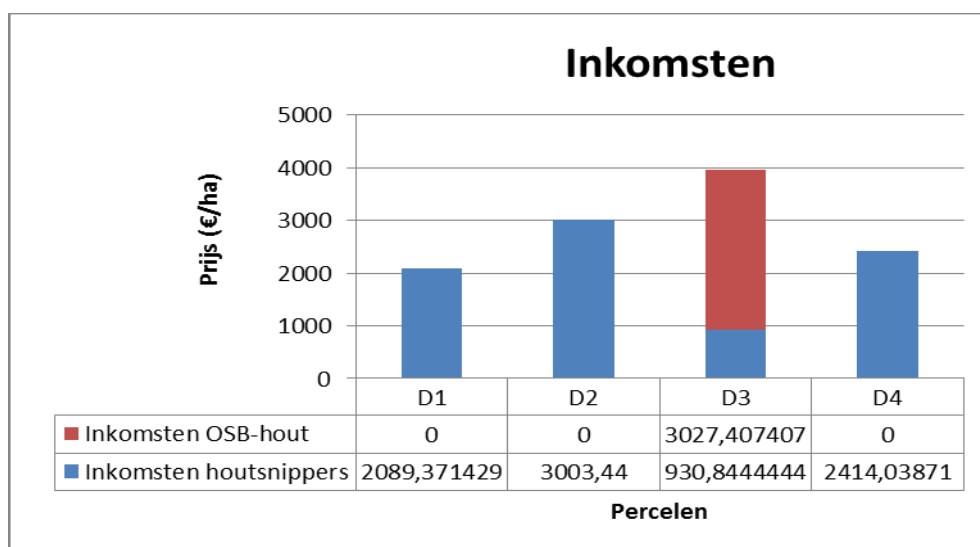
De kosten en inkomsten zijn sterk gerelateerd aan elkaar, hogere volumes aan biomassa leveren hogere inkomsten op maar brengen ook hogere exploitatiekosten met zich mee. Gezien de variatie in de bestandsvolumes en dunningspercentages werden de kosten verbonden aan de exploitatie uitgezet ten opzichte van de hoeveelheid geoogst materiaal. Op deze manier werd de productiekost per ton verkregen. In het derde perceel werd naast biomassa ook hout geoogst, om een correcte weergave te verkrijgen van de kostprijs per ton van OSB-hout en biomassa werd de prijs van de harvester in een gelijke verhouding verdeeld over de twee oogstproducten. Dit is dus in tegenstelling tot de berekening bij de kaalslagen waar het hoofdproduct OSB-hout was en dus de volledige kostprijs van de harvester werd ingerekend in de prijs van het OSB-hout en niet in die van de biomassa (dat als nevenproduct werd beschouwd) (Figuur 21)



Figuur 21: Overzicht van de productiekosten per ton OSB-hout en biomassa in de percelen in Overpelt.

3.2.3.2 Inkomsten

De opbrengst van de percelen bestond hoofdzakelijk uit de verkoop van biomassa. Slechts in één perceel werd er ook OSB-hout geoogst (D3). Zowel de verkoopprijs voor biomassa als voor OSB-hout werden gelijk genomen als deze van de kaalslag, namelijk €50 per ton voor OSB-hout en €22 per ton voor biomassa. De resultaten van de opbrengst worden weergegeven in figuur 22. Deze tabel toont aan dat de inkomsten per ha voor houtsnippers hoger ligt in D2 dan de overige percelen, dit is het gevolg van de extra rij bomen die verwijderd werd.



Figuur 22: Overzicht van de productiekosten per ton OSB-hout en biomassa in de percelen in Overpelt.

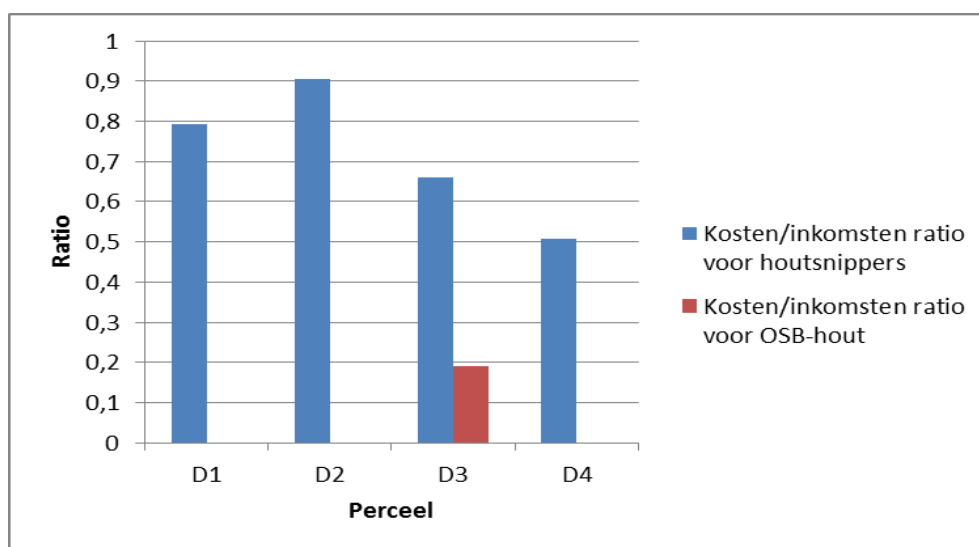
3.2.3.3 Balans

Tot slot wordt de nettoprijs berekend per hectare, hierbij worden de inkomsten uit het OSB-hout en de biomassa samengenomen (Tabel 27). De hoogste netto winst per hectare wordt bereikt wanneer naast houtsnippers ook OSB-hout wordt geogst.

Tabel 27: Netto winst van de oogst van hout en biomassa uit de percelen in Overpelt.

	D1	D2	D3	D4
Totale inkomsten (€/ha)	2089,37	3003,44	3958,25	2414,04
Kosten (€/ha)	1738,87	2720,72	1406,90	1901,19
Netto (€/ha)	350,50	282,72	2551,35	512,85

Uit onderstaande grafiek (Figuur 23) blijkt dat er een sterke variatie is in het ratio tussen de kosten en de inkomsten voor houtsnippers, dit in tegenstelling tot de percelen in Lommel. Algemeen kan gesteld worden dat de waarden een stuk hoger liggen dan deze voor de percelen in Lommel. Het perceel waar het hakselen werd uitgevoerd in het bestand vertoont een hoge waarden van 0,91 wat erop wijst dat de winstmarge voor dit perceel zeer gering is. Ook het ratio voor het OSB-hout afkomstig van de percelen in Overpelt ligt iets hoger dan de waarden bekomen van de percelen in Lommel.



Figuur 23: Verhouding tussen kosten en inkomsten voor de verschillende geogste producten (OSB-hout en Biomassa) uit de dunning in de percelen in Overpelt.

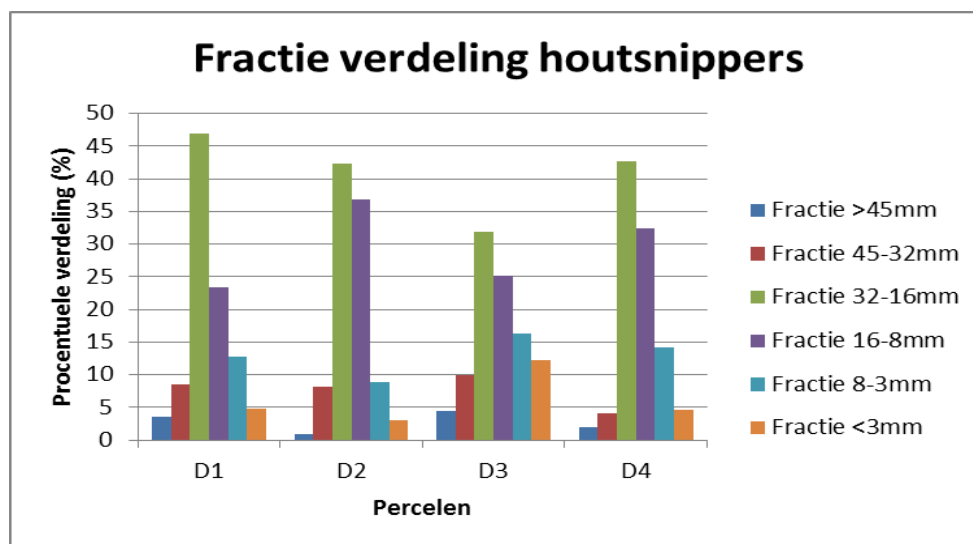
3.2.4 Kwaliteit van de houtsnippers

De analyse van de houtsnippers werd herhaald in de stalen van de percelen waar er een dunning werd uitgevoerd (Tabel 28 en figuur 24). Opnieuw worden er grote verschillen waargenomen in de asrest van de houtsnippers, hierbij vertoont het perceel waar naast biomassa ook OSB-hout geogst wordt de hoogste waarde. De laagste waarden wordt bekomen bij het gebruik van een rupskraan met uitrijwagen en wanneer het materiaal in het bestand wordt gehakseld. Ook de percelen in Overpelt vertonen geen extreme verschillen in vochtgehaltes van de houtsnippers.

Tabel 28: Resultaten van de analyse van de asrest en het vochtgehalte van de houtsnippers van de percelen in Overpelt.

	D1	D2	D3	D4
Asrest	2,04	0,63	8,10	0,74
Vochtgehalte (%)	57,53	60,72	55,41	58,74

Een hoger aandeel aan grotere houtsnippers is vast te stellen in alle proefpercelen, dit in vergelijking met de resultaten bekomen uit de proefpercelen in Lommel. Een gelijkmatige verspreiding in de diameterfractie kan worden opgemerkt in het derde perceel, dit is ook het perceel met het hoogste aandeel in de kleine fractie.



Figuur 24: Fractieverdeling houtsnippers voor de percelen in Overpelt, D1,D3 en D4 (Jenz), D2 (Greentec).

3.2.5 Statistische vergelijking

Bij het testen van de mogelijke verschillen tussen de ketens werd er opnieuw gebruik gemaakt van SPSS (versie 21). De gebruikte testen zijn dezelfde als deze die gebruikt werden bij de kaalslagen.

In eerste instantie werd de invloed van de uitrijmachine getest op de laad- en lostijden voor de biomassa. De resultaten worden weergegeven in onderstaande tabel 29.

Tabel 29: Resultaten van de statistische analyses voor de invloed van de uitrijmachines op laad- en lostijden voor biomassa.

	Shapiro-Wilk test	Onafhankelijke T-test	Mann-Whitney U test
Laadtijd biomassa (Forwarder/uitrijwagen)	P=0,739	P=0,00057	Nt
Lostijd Biomassa (Forwarder/uitrijwagen)	P=0,011	Nt	P=0,0001

Om te achterhalen of er een invloed is bij het uitrijden van biomassa indien er naast biomassa ook OSB-hout wordt geoogst worden de laad- en lostijden tussen perceel D1 en D3 vergeleken. In beide percelen wordt de biomassa uitgereden met behulp van een forwarder. De resultaten van deze testen worden weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 30: Resultaten van de statistische analyses voor de laad- en lostijden tussen perceel D1 en D3 voor biomassa.

	Shapiro-Wilk test	Onafhankelijke T-test
Laadtijd biomassa (Perceel D1/D3)	P=0,85	P=0,002
Lostijd biomassa (Perceel D1/D3)	P=0,23	P=0,20

3.2.6 CO2 Balans

Voor het berekenen van de CO₂ balans werd opnieuw het totale verbruik berekend en omgezet naar CO₂ uitstoot. In het derde perceel (D3) werd er naast biomassa ook hout geoogst, daar de biomassa in dit perceel niet als nevenproduct werd beschouwd werd het verbruik van de harvester proportioneel verdeeld over beide producten (OSB-hout en biomassa). Het theoretisch berekende verbruik voor het oogsten van de extra rij bomen in perceel D2 werd ook in rekening gebracht in onderstaande tabel 31.

Tabel 31: CO2 balans voor oogstketens in de percelen in Overpelt.

	D1	D2	D3	D4
CO₂ Uitstoot (kg)	639,59	916,08	336,83	1364,88
CO₂ Equivalent aardgas (kg)	44586,81	61040,82	25539,49	76046,17
Netto (kg)	43947,21	60124,75	25202,66	74681,29
Ratio (CO₂-uitstoot/CO₂ Equivalent) %	1,4	1,5	1,3	1,8

3.3 RUIMING OPSLAG

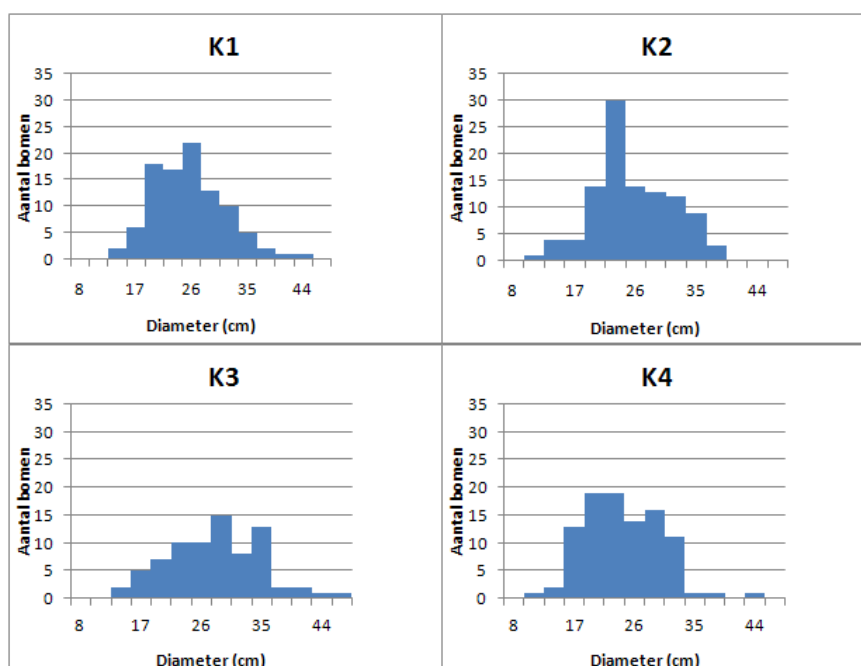
Wegens aanhoudende operationele problemen bij het gebruik van de Biobaler op het terrein, zijn er geen metingen uitgevoerd. De tweede testmachine, de Biomass collector, was niet tijdig beschikbaar voor het uitvoeren van de proef waardoor ook hier geen gegevens konden worden verzameld. In het kader van het MIP project, werd de Biomass collector al getest, voor het ruimen van takhout na een exploitatie. Uit deze studie bleek dat het gebruik van de Biomass collector zeer duur was en dat deze opstelling een slechte kwaliteit aan houtsnippers opleverde. De specifieke opbouw van de machine zorgt voor een grote bijmenging van bodem in de houtsnippers, wat het noodzakelijk maakte om de houtsnippers op te zuiveren.

4 DISCUSSIE

4.1 KAALSLAG

4.1.1 Dendrometrische gegevens

De dendrometrische gegevens van de onderlinge percelen zijn gelijkaardig, een licht onderscheid is te merken in K2, dit perceel heeft een hoger grondvlak wat het hogere oogstvolume uit dit perceel verklaart. Het hogere grondvlak van het perceel is vermoedelijk het gevolg van een mildere dunning gedurende de ontwikkeling van het bestand. Dit vertaalt zich ook in gemiddeld kleinere dimensies van het hout zoals te zien is in figuur 25. De invloed van bodemkwaliteit en -condities kunnen hierbij worden uitgesloten gezien de beperkte onderlinge afstand tussen de percelen.



Figuur 25: Diameterverdeling van de percelen in Lommel.

De hoeveelheid dood hout, zowel staand als liggend ($\varnothing > 5\text{cm}$), is zeer beperkt. Gemiddeld genomen over de vier verschillende percelen is er $2,70\text{m}^3$ dood staand hout aan te treffen, en $1.417,15\text{ kg}$ dode liggende biomassa per hectare. Een accurate omzetting van het aantal kg naar m^3 was niet mogelijk aangezien er nog geen gegevens beschikbaar zijn over het vochtgehalte van het verzamelde materiaal. Desondanks kan geconcludeerd worden dat de totale hoeveelheid dode biomassa in de percelen ver onder het streefdoel (4% van het totale bestandsvolume) ligt zoals voorgeschreven is in het decreet duurzaam bosbeheer (Vlaamse Regering 2003).

4.1.2 Biomassa oogstketens

Bij de bespreking en de vergelijking van de verschillende geteste oogstketens zal in de eerste plaats gekeken worden naar de onderlinge deelprocessen zoals oogst, transport en als laatste het hakselen.

4.1.2.1 Oogst

Een eerste belangrijke conclusie die kan worden genomen is dat de aftopdiameter geen invloed heeft op de tijdsduur en het verbruik per m^3 geoogst hout. Kleinere aftopdiameters zorgen echter voor een hogere opbrengst, door het groter volume aan rondhout dat geoogst kan worden. De verkoopwaarde van rondhout per ton ligt een stuk hoger dan dit van biomassa

terwijl de productiekost lager ligt. Desondanks zijn kleinere aftopdiameters niet aan te raden, omdat dit resulteert in kleinere dimensies van het hout. Deze kleinere dimensies zijn niet gewenst bij grote afnemers van rondhout, wegens de technische problemen die kunnen optreden bij de verdere verwerking in hun installaties. Hiernaast kunnen ook problemen ontstaan tijdens de exploitatie, voornamelijk in de processorkop. Deze problemen kwamen niet voor tijdens de experimenten maar werden aangegeven door de operator van de harvester.

4.1.2.2 Uitrijden van rondhout en oogstresten

Het transport van het rondhout uit de bestanden duurde gemiddeld 2,18 minuten per afgevoerde m³ rondhout. Deze waarde neemt per proefperceel toe (K1-K4). Bij nadere analyse kon dit worden toegewezen aan de langere afstand van de perceelrand tot aan de stapelplaats, met een langere rijtijd tot gevolg. Dit effect is niet zichtbaar bij K3 door de kortere gemiddelde lostijd van het hout bij de stapelplaats. Ondanks de langere transportafstand is er geen duidelijke trend zichtbaar in het verbruik per kubieke meter hout. Kleinere aftopdiameters zorgen voor een significant verschil in laad- en lostijd, kleinere aftopdiameters zorgen voor langere laad- en lostijden van het rondhout. De oorzaak van de langere laad- en lostijden bij het gebruik van kleinere aftopdiameters is het gevolg van het moeilijker stapelen van kleine diameters van het rondhout zowel op de forwarder als op de stapelplaats. Bij het stapelen van hout is het belangrijk dat het hout (de kop van het hout) in één vlak ligt. Dit om het maximale transporteerbaar volume van de forwarder te kunnen gebruiken en om de stabiliteit van de houtstapel op de stapelplaats te verzekeren.

De aftopdiameter van het rondhout heeft ook een impact op de productiviteit van het uitrijden van de overige biomassa. Een kleinere aftopdiameter leidt tot een verhoogde hoeveelheid klein materiaal, die weinig tot niet verbonden is met elkaar. Meerdere kraanbewegingen zijn dus noodzakelijk om dezelfde hoeveelheid biomassa te verzamelen, dit zorgt voor een significant verschil in laadtijd en een hoger verbruik per uitgevoerde ton. Er kan geen significant verschil worden aangetoond bij het uitladen van het materiaal. Bij het inladen van het materiaal in de forwarder wordt het materiaal in de eerste plaats samengedrukt door de grijper van de kraan, wat de densiteit van het losse materiaal verhoogd. Hiernaast wordt het materiaal ook regelmatig samengedrukt om het volume verder te reduceren om op deze manier meer materiaal te kunnen transporteren per cyclus. Deze handelingen hebben tot gevolg dat de voorheen relatief losse biomassa meer verweven zit en er dus bij elke kraan beweging meer biomassa kan worden afgeladen. Een tweede factor die een rol speelt is de plaatsing van de biomassa. Gezien de aard van het materiaal en de verdere verwerking (hakselen), diende dit niet nauwkeurig te worden uitgeladen wat het uitladen een stuk sneller maakte. Dit is in sterk contrast met het uitladen van het rondhout waar dit zeer goed diende gestapeld te worden om het laden van de vrachtwagens niet te bemoeilijken.

4.1.2.3 Hakselen

De laatste stap in elke keten is het hakselen. Om een vlot verloop van dit proces te garanderen dient in de eerste plaats de logistieke aanvoer van lege containers en het verwijderen van de volle containers geoptimaliseerd te worden. Het niet tijdig aanleveren van nieuwe containers kan het proces onderbreken, onafhankelijk van de productiviteit van gebruikte machine. De gemiddelde productietijd voor een ton biomassa bedraagt bij het hakselen in het bestand 5,18 minuten. Hakselen aan de rand van het perceel vraagt slechts 2,88 minuten per ton. Hierbij werd enkel gekeken naar de effectieve productietijd van de machines (exclusief logistieke wachttijden). Deze kortere productietijd is voornamelijk het gevolg van de continue invoer van materiaal, gezien dit reeds samen op een locatie verzameld is, waardoor de machine zich minder dient te herpositioneren en de houtsnippers rechtstreeks in de containers worden gebracht. Net zoals bij het uitrijden van de biomassa is ook hier het effect van een kleinere aftopdiameter zichtbaar in de productietijd. Algemeen kan gesteld worden dat kleinere aftopdiameters zorgen voor een langere hakseltijd per geproduceerde ton.

Het kleinere verschil in productietijd bij het hakselen aan de rand van het bestand is vermoedelijk te wijten aan het feit dat het materiaal reeds verzameld is en hierdoor meer gebundeld is, wat de invoer in de machine vergemakkelijkt en het aantal kraanbewegingen beperkt. Evenzeer kan het effect van een kleine aftopdiameter worden waargenomen in het brandstofverbruik van beide machines, een kleinere aftopdiameter leidt tot een hoger brandstofverbruik per geproduceerde ton biomassa.

4.1.2.4 Vergelijking van de oogstketens

Om een correcte vergelijking te maken tussen beide systemen, wordt de totale balans gemaakt van alle processen die een rol spelen in de productie van houtsnippers. In de geteste systemen bestaat dit uit het uitrijden en het hakselen. Tabel 7, p. 22 geeft een overzicht van de effectieve tijd van elk onderdeel, vervolgens wordt ook de totale productietijd per ton weergegeven. Uit deze tabel kan geconcludeerd worden dat het hakselen in het bestand in beide gevallen efficiënter is dan de standaardmethode die wijd verspreid is in Vlaanderen, waarbij de biomassa aan de rand wordt verwerkt. Deze bevindingen zijn een contrast met de gegevens die Marchi et al. 2009 voor een gelijkaardige proef in een kaalslagsysteem vond. Een mogelijke verklaring voor deze resultaten is de manier waarop de overige biomassa in het bestand is gestapeld. Uit fotografisch materiaal van de proeven van Marchi et al. kan worden opgemaakt dat de overige biomassa verspreid was over het hele perceel. Dit is sterk contrasterend met de proefopstelling uit de experimenten uitgevoerd in Lommel. De oogstresten in de kaalslagen in Lommel lagen op parallelle lijnen doorheen het bestand, dit maakte het materiaal eenvoudig toegankelijk voor de machine wat een reductie betekend in het aantal kraancyclussen en herpositioneringen van de machine.

Algemeen kan worden geconcludeerd dat de langere effectieve hakseltijd per geproduceerde ton bij het in het bestand hakselen toch voordelig kan zijn als de aanvoer en afvoer van containers niet vlot verloopt. Een bijkomend voordeel bij het hakselen in het bestand is de tijdelijke buffercapaciteit die de machine biedt, op deze manier kunnen kleine vertragingen van de logistieke keten worden opgevangen, waardoor er weinig tot geen wachttijden ontstaan.

4.1.3 Economische analyse

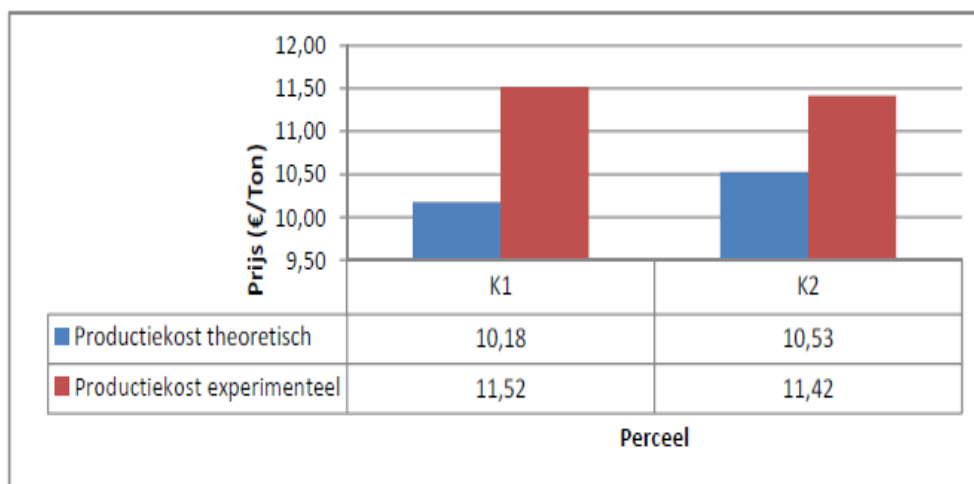
Uit de analyse van de kosten verbonden aan de beide methoden, kan worden vastgesteld dat de conventionele methode (hakselen aan de rand van het bestand) niet de goedkoopste methode is. In het derde perceel ligt de productiekost een stuk lager dan bij de conventionele methode. Dit gaat niet op voor het laatste perceel waar er ook in het bestand werd gehakseld, dit is het gevolg van de langere hakseltijd per ton. Deze langere tijd kan veroorzaakt zijn door de kleinere dimensies van de biomassa, maar kan ook het gevolg zijn van het slecht functioneren van de operator wegens ziekte. Deze bevinding werd bekomen door het interview met de operator na het uitvoeren van het hakselen (Osselaere & Vangansbeke 2012).

In beide percelen kan er een daling van de productiviteit worden vastgesteld bij het gebruik van kleinere aftopdiameters. Het verschil bedraagt bij het hakselen aan de rand van de weg drie seconden (+2,1%) en bij het hakselen in het bestand 17 seconden (+5,6%). De sterke tijdstoename tussen de twee laatste ketens (D3-D4) is vermoedelijk niet enkel te wijten aan de kleinere aftopdiameter, en kan mogelijk deels worden toegewezen aan het minder functioneren van de operator. Studies tonen aan dat de operator een sterke invloed heeft op de productiviteit van het uitgevoerde proces (K. Kärhä & Vartiamaäki 2006). Indien dit wordt doorgerekend in de prijsanalyse, kan worden geconcludeerd dat ook het hakselen in het perceel voor kleinere diameters voordeliger is.

Een factor die een sterke invloed heeft op de productiekost is de wachttijd van de hakselaar. Uit de gevoerde experimenten bleek dat de wachttijd voor het hakselen aan de rand van het bestand respectievelijk 47,3% en 41,2% bedraagt voor K1 en K2 ten opzichte van de totale aanwezige tijd. De kleinere wachttijd in perceel K2 maakt dat ondanks de hogere productietijd per ton van zowel de hakselaar als de forwarder, de kost per geproduceerde ton lager ligt dan dit van perceel K1. Uit Italiaans en Fins onderzoek blijkt de wachttijd gemiddeld 25% te zijn van de totale aanwezige tijd van de hakselaar (Spinelli & R. J. M. Visser 2009). De meetwaarden

van de terreinexperimenten liggen ver boven dit gemiddelde en het optimaliseren van de logistieke afvoer van de containers is dus een absolute must.

Om effect van deze logistieke keten op de productiekost te bekijken wordt met behulp van de effectieve hakseltijden voor beide percelen een nieuwe totaaltijd berekend, waarbij de wachttijd terug wordt gebracht naar 25%. De nieuwe berekende productiekosten (uitrijden en hakselen) ligt een stuk lagere dan de oorspronkelijke en zelf lager dan de waarden voor het hakselen in het bestand, wat aantoont dat de logistieke keten een sterk bepalende factor is bij de keuze van de productieketen (Figuur 26).



Figuur 26: Theoretische kostberekening bij een wachttijd van 25% bij het gebruik van Jenz hakselaar aan de bestandsrand van de kaalslagen in Lommel.

Kostenanalyses uitgevoerd in andere landen tonen aan dat de productiekost voor het hakselen langs de weg tussen de €8,3 en 12,3 ligt per ton biomassa afhankelijk van de terreincondities en de gebruikte machines (Marchi et al. 2009; Röser et al. 2011). De productiekost voor het hakselen in het bestand bedraagt 17,1 tot 18,3 euro per ton wat beduidend hoger ligt dan de waarden die bekomen werden uit de experimenten. Mogelijks kan het verschil verklaard worden door de betere ontsluiting van de percelen op de proeflocatie waardoor grote verliezen van de productie door het niet kunnen hakselen wegens het uitrijden van de houtsnippers werden vermeden.

4.1.4 Kwaliteit van de houtsnippers

Het vochtgehalte van de houtsnippers van de verschillende percelen vertoont weinig variatie. Dit is ook te verwachten gezien het hakselen gebeurde in de zelfde periode, en alle bomen zich in het zelfde groeistadium bevonden.

In tegenstelling tot het vochtgehalte, vertonen de gegevens voor de asgehaltes een sterke variatie naar gelang de uitgevoerde experimenten. De mate van de asrest van het staal is een maat voor de vervuiling van de houtsnippers en deze vervuiling kan gekoppeld worden aan de gebruikte methode. Een hogere vervuilingsgraad is een negatief gegeven in het biomassaverhaal, het leidt tot een hoger slijtage en verbruik van hakselaars en zorgt voor hogere kosten in biomassacentrales voor de afvalverwerking van de assen (Nati et al. 2010). Kleinere aftopdiameters zorgen voor een verhoogde vervuilingsgraad van de houtsnippers. Dit is het meest uitgesproken bij het hakselen aan de rand van het bestand. Het hakselen in het terrein produceert houtsnippers met de laagste graad van vervuiling, dit is vermoedelijk het gevolg van een beperkter aantal manipulaties die het materiaal moeten ondergaan. De Oostenrijkse norm (bijlage 10.3) voor de classificatie van houtsnippers volgens kwaliteit voorziet twee categorieën (<1% en >1% van de totale initiële massa), alle houtsnippers bekomen uit de percelen bevinden zich in de laatste en minst waardevolle categorie A2.

De Greentec hakselaar (in het bestand) produceert kleinere houtsnippers in vergelijking met de Jenz (aan de rand van het bestand), dit door het gebruik van een kleiner scherm in de hakselaar. In een studie van Nati 2010 wordt het verband aangetoond tussen de productiviteit en de grootte van het scherm. Een kleiner scherm geeft aanleiding tot lagere productiviteit. Vermoedelijk kan een deel van de hogere productietijd van de Greentec hakselaar hieraan worden toegeschreven. Het gebruik van een groter scherm zou dus voor een verdere daling kunnen zorgen in de productiekost voor het hakselen in het bestand, door de stijging van de productiviteit. De invloed van de aftopdiameter is duidelijk zichtbaar in de geproduceerde fracties van beide hakselaars, kleinere aftopdiameters leiden tot een hoger aandeel kleine houtsnippers, wat beperkingen kan opleveren voor de verkoopbaarheid van het product. Kleine houtsnippers kunnen voor technische problemen zorgen in kleine energie centrales. Ondanks het gebruik van twee verschillende types hakselaars vallen de houtsnippers binnen een zelfde categorie op basis van de houtsnippergrootte volgens de Oostenrijkse norm, G50. De acceptabele diameterverdeling voor houtsnippers is gelegen tussen de 3-63mm. Een hoge aanwezigheid van deeltjes met een diameter die buiten dit bereik valt, kan voor een daling in de verkoopwaarde van het product zorgen. Uit onderzoek bleek dat het afzeven van deze fracties een meerwaarde genereert (4,7€/ton) op het eindproduct en dit tegen een zeer geringe investeringskost (Spinelli et al. 2011).

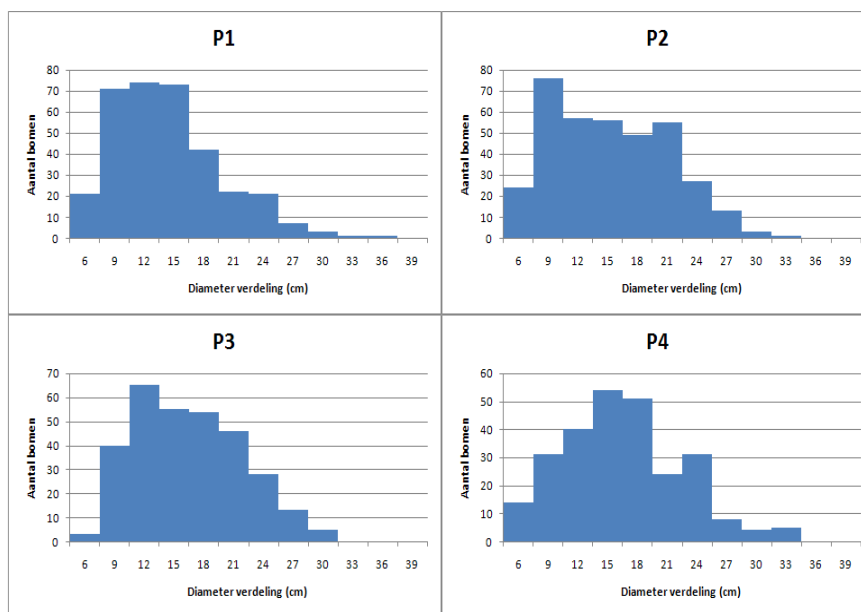
4.1.5 CO₂ Balans

De resultaten tonen aan dat het gebruik van biomassa als energiebron zorgt voor een sterke daling aan fossiele CO₂ uitstoot. De laagste ratiowaarden worden gevonden indien de biomassa wordt gehakseld in het bestand, dit is ten gevolge van het uitsparen van brandstof door het niet uitrijden van de biomassa naar de rand van het perceel door een forwarder.

4.2 DUNNINGEN

4.2.1 Dendrometrische gegevens

De diameterverdeling bekomen uit de opmetingen vertoont een grotere spreiding dan in de percelen gelegen in Lommel. De oorzaak van deze spreiding kan worden toegewezen aan de grotere uitval van bomen in sommige percelen, dit door de natuurlijk zelfdunning als gevolg van lichtcompetitie. Deze uitval zorgt voor een minder scherpe aflijning van de Gaussiaanse curve van de diameterverdeling (Figuur 27). Het afsterven van vele bomen in de percelen vertaalt zich ook in een grotere hoeveelheid dood hout, zowel liggend als staand. Het uitvoeren van de dunning zorgt voor een sterke daling van de hoeveelheid staand dood hout. In de meeste gevallen is het volume staand dood hout dat blijft staan na de dunning kleiner dan het volume dat berekend werd uit het aandeel niet aangeduide dode stammen in de eerste inventarisatie. Dit kan het gevolg zijn van een te hoog aantal bomen die werd verwijderd door de operator van de oogstmachine, of door het omvallen van deze dode bomen tijdens het uitvoeren van de dunning.



Figuur 27: Diameterverdeling van de percelen in Overpelt.

Een tweede opvallende vaststelling is dat het resterende volume aan vitale bomen in alle percelen lager ligt dan de berekende waarde, dit verschil is het grootst bij percelen D2 en D3. De hogere afwijking bij D2 is te wijten aan de extra dunning die werd uitgevoerd om het hakselen in het bestand mogelijk te maken. Indien deze waarde wordt gecorrigeerd op basis van de hoeveelheid extra bomen die werd verwijderd (176), bedraagt dit verschil nog slechts 0,38m³ per ha. Het verschil in D3 is vermoedelijk te wijten aan de slechtere aansluiting van de ruimingspiste op de bestaande wegeninfrastructuur. Dit zorgde ervoor dat machines moeilijk konden draaien waardoor er extra bomen werden geruimd om voldoende plaats te bieden.

4.2.2 Biomassa oogstketens

4.2.2.1 Oogst

Een eerste waarneming bij het oogsten bij dunningen met een harvester in Overpelt, is de hogere tijdsduur per ton geoogst hout ten opzichte van het kaalslagsysteem. Gemiddeld gezien bedraagt dit voor D1 en D2 0:04:12 per ton, dit is 63% hoger dan de gemiddelde tijd bekomen in een kaalslagsysteem. Ook het verbruik stijgt met 54% per ton geoogst materiaal ten opzichte van de kaalslag in Lommel.

De laagste productietijd per ton wordt gevonden in het perceel waar er naast biomassa ook OSB-hout wordt geoogst, dit is mogelijks het gevolg van de kortere lengtes van het hout. De

lengte van een stam OSB-hout bedroeg drie meter, dit maakte dat er gemiddeld twee stukken stam per boom konden worden geogst. De resterende lengte van de oogstrest was dus eerder beperkt wat het herpositioneren van de oogstrest in het bestand vergemakkelijkte.

Een rupskraan uitgerust met een knipkop vertoont een gelijkaardige efficiëntie in tijd als een harvester bij het uitvoeren van een dunning zonder OSB-oogst (Figuur 17). Echter het brandstofverbruik ligt tot 45% hoger. De grote krachtontwikkeling die de machine kan realiseren maakt het mogelijk om de geogste bomen nauwkeurig de positioneren, ongeacht de valrichting, dit in tegenstelling tot een harvester. Een daling in de benodigde tijd per ton geogst hout zou kunnen gerealiseerd worden indien er gebruik gemaakt wordt van een Multi Stam oogstkop, dit zou een reductie betekenen in het aantal kraancyclussen wat een impact heeft op het verbruik en de werkingstijd per ton (Eberhardinger 2010). In tegenstelling tot de rest van de uitgevoerde proeven is er een lagere productietijd van de harvester waar te nemen als er naast houtige biomassa ook OSB-hout wordt geogst, de productietijd per ton bedraagt hier 3,48 minuten.

4.2.2.2 Uitrijden van rondhout en oogstresten

Het uitrijden van het OSB-hout in perceel D3 verliep gedurende het experiment zeer moeizaam. De hoge dichtheid aan bomen rond de hopen hout bemoeilijkte de kraanbewegingen en een goede stapeling van het hout op de forwarder. Dit vertaalt zich in langere laadtijden, gemiddeld genomen duurde dit 20,46 minuten in tegenstelling tot het kaalslagsysteem waar dit slechts 11,27 minuten was. Hiermee werd ook een toename in het verbruik vastgesteld van 46% per ton OSB-hout ten opzichte van de kaalslagen.

Het uitrijden van de overige houtige biomassa gebeurde door middel van een forwarder en een uitrijwagen. In de eerste plaats kan een significant verschil worden waargenomen in de laadtijd van het materiaal tussen beide uitrijmachines. Het laden van de houtige biomassa verloopt sneller bij de forwarder. De hoofdoorzaak hiervan is de betere wendbaarheid van de forwarder in de uitrijpistes door de beperktere lengte van de machine. Dit maakt een sneller transport tussen de hopen biomassa mogelijk. Ook het uitladen van het materiaal op de stapelplaats vertoont een significant verschil tussen beide machines. Dit laat vermoeden dat naast de betere wendbaarheid van de forwarder, wat voornamelijk een rol speelt bij het inladen, er ook structurele (kraanlengte, grijpbak) verschillen aan de basis liggen van de beter efficiëntie van de forwarder. Uit het interview kon worden geconcludeerd dat de invloed van de operator op de productiviteit van beide machines te verwaarlozen is, gezien beide operatoren reeds verschillende jaren ervaring hebben met deze machines.

Het oogsten van OSB-hout heeft een nadelige invloed op de efficiëntie van het uitrijden van de overige houtige biomassa. Een significante stijging is waar te nemen in de tijd nodig voor het laden van het materiaal tussen beide percelen. Dit is het gevolg van de kleinere dimensies van de te laden biomassa. Er kon geen significant verschil worden aangetoond bij het uitladen van de biomassa. Deze bevinding is dus sterk gelijkaardig aan dit van de kaalslagen, waar de dimensies van de oogstresten ook geen invloed hadden op de snelheid van het uitladen. Er werd ook een stijging waargenomen in de tijd voor het rijden naar en van het perceel, dit is deels te verklaren door de grotere afstand die diende overbrugd te worden naar de stapelplaats maar is hoofdzakelijk te wijten aan de slechtere ligging van de uitrijpistes. Een gewijzigd plantverband in het perceel leidde tot een minder goede aansluiting op de bestaande weginfrastructuur, wat de bewegingsmogelijkheden van de machine sterk beperkte.

4.2.2.3 Hakselen

De laatste stap in het produceren van biomassa is het hakselen van het verzamelde materiaal. In het algemeen kan een lichte daling in productietijd en verbruik worden waargenomen voor beide machines in vergelijking met de percelen in Lommel. De productietijd bij het hakselen in het bestand bedraagt 5,05 minuten per ton wat gelijkaardig is aan dit van de kaalslag waar dit 5,18 minuten is, gemiddeld gezien over K3 en K4. Deze betere tijd in de dunning kan worden toegewezen aan de aard van de biomassa. In de percelen van Overpelt (dunning) werden de volledige bomen gehakseld, waardoor er procentueel meer stamhout en minder kroonhout aanwezig is in vergelijking met de percelen in Lommel (kaalslag). De laagste productietijd en

verbruik is vast te stellen in perceel D4. Uit het interview met de operator kan dit worden gekoppeld aan een volledig onderhoud van de machines, waarbij de tegenmessen werden vervangen en enkele aanpassingen aan de invoer kraan werden uitgevoerd. De productietijd per ton biomassa van perceel D3, het perceel waar OSB-hout geogst werd, ligt iets hoger. De hogere tijd is het gevolg van een hogere percentage kruinhout, wat meerdere kraanbewegingen vereist om het materiaal naar de invoer van de hakselaar te brengen.

4.2.3 Economische analyse

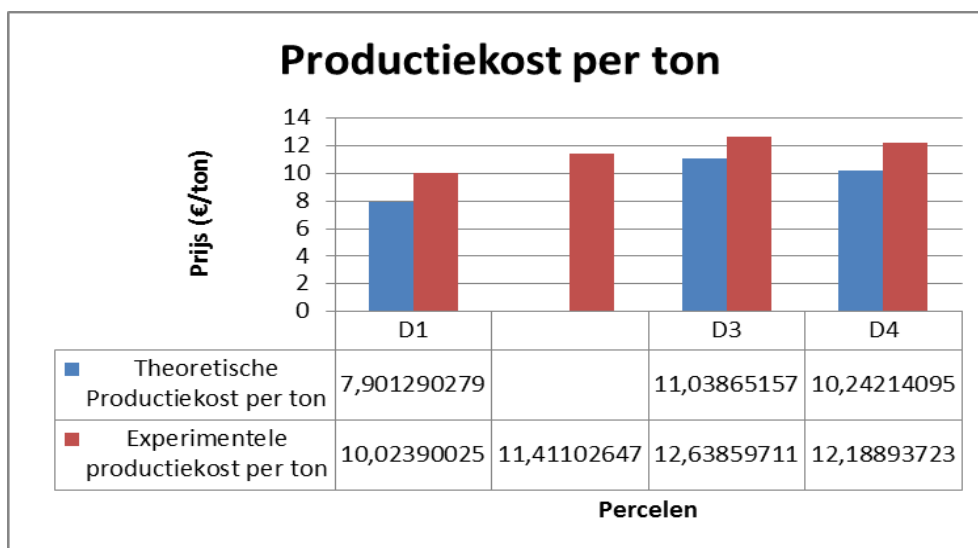
Het laatste onderdeel van de discussie is de economische analyse van alle geteste ketens, hieruit kunnen we concluderen dat de netto winst het hoogst is, als er naast biomassa ook OSB-hout wordt geogst. Dit door de grote meerwaarde van het OSB-hout ten opzichte van biomassa.

De oogstkost per ton is het laagst als men gebruik maakt van een rupskraan die uitgerust is met een knipkop, dit door de lagere kost per uur en een gelijkaardige efficiëntie als de harvester.

Het uitrijden van de van de oogstresten met behulp van een uitrijwagen is dubbel zo duur als met een forwarder. De kost per ton uitgereden materiaal bedraagt bij de forwarder €2,31, bij de uitrijwagen is dit €5,62.

Gelijkaardig aan de conclusies in de kaalslagen kan gesteld worden dat de logistiek van de keten, de aan- en afvoer van containers, bij het hakselen een belangrijke rol speelt in de kostprijs, dit hoofdzakelijk door de wachttijden die kunnen ontstaan. De gemiddelde wachttijd voor de hakselaar aan de rand bedraagt voor de percelen in Overpelt 60%.

Om de invloed van de logistieke keten te bekijken op de productiekost, werd ook hier een theoretische berekening gemaakt waarbij de totale wachttijd slecht 25% bedraagt van de totale tijd (Figuur 28). De hogere productiekost in het perceel waar naast biomassa ook OSB-hout wordt geogst is het gevolg van de kleinere dimensies van de oogstresten, wat zorgt voor langere uitrijtijden en hakseltijden. De biomassa in de percelen D1 en D4 hadden een gelijke grootte, de hogere productiekost in perceel D4 is het gevolg van de langere uitrijtijden van de uitrijwagen. In het algemeen kan worden geconcludeerd dat de laagste productiekost voor het produceren van houtsnippers verkregen wordt indien de houtige biomassa wordt uitgereden naar de rand van het bestand met een forwarder en vervolgens wordt gehakseld. Hierbij valt op dat de productiekost per ton houtsnippers lager ligt dan de experimenten in het kaalslagsysteem, dit door het hoger aandeel stamhout.



Figuur 28: Productiekost per ton houtsnippers.

Tot slot wordt te totale kostprijs per uitgevoerd experiment bekeken. Hieruit kan in de eerste plaats geconcludeerd worden dat de laagste prijs per ton geoogst hout en biomassa bereikt wordt indien er naast biomassa ook OSB hout wordt geoogst (Tabel 32). Deze sterke daling van de totale productiekost is het gevolg van de verkoop van het hout. Deze afgevoerde hoeveelheid houdt dient niet verder verwerkt te worden en de kostprijs van het uitrijden is kleiner dan het uitrijden van de biomassa en vervolgens het hakselen. Indien het hout als OSB-hout wordt verkocht en dus niet dient gehakseld te worden, zorgt dit voor een aanzienlijke daling in de kostprijs van de totale keten. Om dit te illustreren werd berekend wat de productiekost zou zijn als ook al het OSB hout versnipperd werd. Deze geschatte totale productiekost bedroeg €18,52 per ton wat gelijkaardig is aan dit van perceel D1. Het uitrijden van de oogstresten na het oogsten van OSB-hout blijkt economisch zinvol en draagt bij tot een hogere winst.

Tabel 32: Resultaten van de opgemeten parameters van het hakselen in de percelen in Lommel.

	D1	D2	D3	D4
Productiekost/ton (OSB+Biomassa)	18,31	19,93	13,68	17,33

Ondanks de hogere uitrijkosten die verbonden zijn aan het transporteren van de biomassa met een uitrijwagen uit het bestand, ligt de productiekost voor het laatste perceel het laagst. De vergelijking van de productiviteit van een rupskraan met knipkop in vergelijking met de harvester en de lagere kostprijs per uur zorgt voor een lagere totale kostprijs. Indien de laatste methode zou geoptimaliseerd worden, door het vervangen van de uitrijwagen door een forwarder, zou dit een verdere daling van de productie kost met zich meebrengen van €17,33 naar €15,66. De methode waarbij de Greentec hakselaar wordt gebruikt in het terrein lijkt niet aangewezen voor dunningen door de hogere productiekost per geproduceerde ton biomassa.

4.2.4 Kwaliteit van de houtsnippers

Het vochtgehalte van de houtsnippers uit de verschillende dunningen ligt zeer dicht bij elkaar, de kleine verschillen die te merken zijn kunnen worden toegewezen aan de terrein omstandigheden. Gedurende de experimenten was het vochtig (door neerslag), dit zorgde voor een oppervlakkige bevochtiging van de biomassa.

Hakselen in het bestand geeft ook in deze proefopstelling aanleiding tot een lagere vervuilingsgraad van de houtsnippers. Het oogsten van OSB-hout heeft een negatieve invloed op het asgehalte van de houtsnippers, de bekomen waarde ligt een stuk hoger en bedraagt ongeveer 8% van de initiële massa. Veldobservaties in het perceel D3 toonde aan dat het verzamelen van de houtige biomassa in het gedunde bestand moeilijk verliep (Figuur 19). Meerdere kraanbewegingen waren noodzakelijk, waarbij er bij elke grijpbeweging contact werd gemaakt met de bodem en een beperkte hoeveelheid materiaal werd verzameld. Een bijkomende factor die de hogere mate van vervuiling kan verklaren is, de hogere proportie aan naalden in de biomassa vanwege de kleine dimensies van de biomassa. In het laatste perceel, waarbij gebruik wordt gemaakt van de rupskraan, kan een lage waarde voor de asrest worden waargenomen. De rupskraan kan een grote kracht ontwikkelen wat een positief effect had op het positioneren van het hout naast de ruimingspistes. Het maakte het mogelijk om het hout in verticale positie te verplaatsen, waardoor er nauwelijks contact was met de bodem. Dit in tegenstelling tot het gebruik van een harvester waarbij het hout in een horizontale positie wordt verplaatst en hierbij over de bodem wordt getrokken. Algemeen levert het hakselen in het bestand en oogsten met een rupskraan een betere kwaliteit op, dit vertaalt zich ook in een hoogste categorie voor de classificatie van houtsnippers op basis van asrest, A1 volgens de Oostenrijkse norm (<1% van de initiële massa).

Het groter aandeel stamhout in de biomassa, bekomen uit de dunningen vertaalt zich ook naar een grotere proportie aan grotere houtsnippers in vergelijking met de kaalslagen. De enige uitzondering hierop is het perceel waar naast biomassa ook OSB-hout werd geoogst, hier is het

aandeel kleine houtsnippers hoger. Opnieuw kan het effect van het kleinere scherm van de Greentec hakselaar worden waargenomen in de grootteverdeling van de houtsnippers. De proportie kleine tot middelgrote houtsnippers ligt hier hoger dan bij de Jenz hakselaar, desondanks vallen alle houtsnippers geproduceerd door de beide machines onder de G50 klasse volgens de Oostenrijkse norm.

4.2.5 CO₂ Balans

Een eerste vaststelling is dat de ratio tussen de CO₂ uitstoot en de equivalente hoeveelheid CO₂ voor aardgas een stuk hoger ligt in de dunningen dan in de kaalslagen. Desondanks blijft er een hoge netto uitsparing van fossiel CO₂ bij het gebruik van biomassa als energiebron. De hoogste ratio waarde wordt bekomen in het laatste perceel, dit is hoofdzakelijk het gevolg van het hogere verbruik van de rupskraan in vergelijking met een harvester. De hogere waarde voor het hakselen in het bestand kan deels worden verklaard door het hogere verbruik van de hakselaar per geproduceerde ton biomassa. Vermoedelijk is er ook een lichte overschatting gemaakt van het brandstof verbruik van de harvester, wat de sterke toename in het ratio tussen de kaalslagen en de dunning mee kan verklaren. Onderzoek toonde aan dat de waarden voor deze ratio zich situeren tussen 1-3%, afhankelijk van de gebruikte keten (Marchi et al. 2009; Eriksson & Gustavsson 2008). Algemeen ligt deze waarde hogere bij dunningen, wat ook door de experimenten in Overpelt wordt bevestigd.

4.3 RUIMING OPSLAG

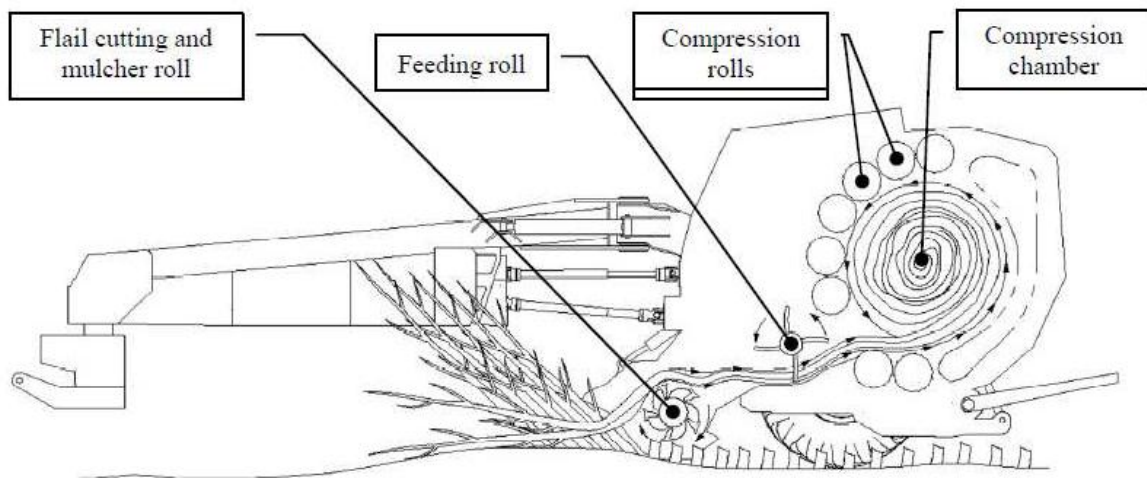
In de resultatensectie werd reeds aangehaald dat het gebruik van de Biobaler tijdens de experimenten geen bruikbare gegevens opleverde. De oorzaak van dit probleem kan terug worden gebracht naar twee factoren, enerzijds de beperkte ervaring van de operator en anderzijds de terreincondities. Tijdens de experimenten werd gebruik gemaakt van een demomachine, die ter beschikking werd gesteld door de invoerder. De tractor werd voorzien door de exploitant. De Biobaler is een complexe machine waarbij de operator veel parameters moet bijregelen tijdens het uitvoeren van de handeling, onder meer de snelheid van de invoerrollen, de hoogte van de frees en als belangrijkste factor de snelheid van de machine. Het continu bijregelen van de machine is noodzakelijk gezien de ongelijke invoer van materiaal die dikwijls grote variatie vertoont in functie van het type van materiaal (zachte vs harde materialen) die dienen verwerkt te worden. De complexiteit van de machine maakt dat een operator reeds enige ervaring moet hebben vooraleer er op een productieve manier kan worden gewerkt. Dit experiment was de eerste ervaring van de operator met de Biobaler, wat mogelijk aan de basis lag van de tegenvallende resultaten.

Een tweede factor die het succes van dit experiment ondermijnde, was de terreinconditie. Dit experiment werd uitgevoerd tijdens de winter wat maakte dat op de testlocatie delen van het materiaal bedekt waren onder sneeuw. Het niet correct bijregelen van de machine en het samenklittend effect van de sneeuw zorgde voor ophopingen van biomassa ter hoogte van de invoerrollen, waardoor de machine herhaaldelijk moest stoppen om dit te verwijderen.

Ook de grootte van het materiaal dat verwerkt wordt heeft een belangrijke invloed op de productiviteit van de machine. In onze test locatie bestond dit uit lage opslag wat het oprapen en transporteren naar de perskamer bemoeilijkte. Het zorgde onder meer voor opstopping ter hoogte van de invoerrollen (Figuur 29).

Ondanks de tegenvallende veldexperimenten in Houthalen-Helchteren, toonden eerdere studies aan dat het ruimen van opslag met behulp van de Biobaler een rendabel alternatief kan vormen. Hierbij varieert de productie kost per ton biomassa tussen de €18,34-27,50. De kostprijs wordt beïnvloed door twee factoren, in de eerste plaats de dichtheid van de aanwas, hogere dichtheden produceren meer balen per afgelegde afstand. Een tweede factor is de grootte van het perceel, in kleine percelen dient de machine zich meer te herpositioneren waardoor kostbare tijd verloren gaat. De processen die volgen na het produceren van de balen

zijn het uitrijden en het verhakselen van de biomassa, deze kost bedraagt €6,12 per ton. Dit brengt de totale kost tussen de €24,46-33,62. (Langholtz et al. 2011). De verkoops prijs per ton houtsnippers bedraagt in de experimenten €22, deze prijs is dus niet voldoende om het ruimen van opslag kosten neutraal te maken in Vlaanderen.



Figuur 29: Schematische tekening van de werking van Biobaler (Savoie et al. 2013).

5 SAMENVATTING

In dit laatste hoofdstuk zullen de belangrijkste bevindingen uit deze masterscriptie herhaald worden. Daarnaast zullen ook enkele mogelijkheden voor verder onderzoek naar voren geschoven worden.

Deze masterscriptie was een detailonderzoek in het kader van het project "B3-Technieken en strategieën voor de oogst van houtige biomassa" in samenwerking met de Universiteit Gent omtrent het bepalen van optimale strategieën voor het oogsten van biomassa. Dit onderzoek kan ook gezien worden als een uitbreiding van het MIP-project "Houtige biomassa voor energie in Limburg"¹ dat ook enkele casestudies bevatte omtrent het oogsten van biomassa in de regio Limburg. Het grote verschil met de gevoerde casestudies in het MIP-project is de mate van het vooronderzoek en de meer gedetailleerde opvolging tijdens de experimenten. Bij het MIP-project lag de focus op de potentiële waarde voor het aanleveren van biomassa uit verschillende test gebieden, hierbij was de uiteindelijke oogstketen die hiervoor gebruikt werd minder van belang. Hiernaast worden de verzamelde gegevens van het vooronderzoek in dit project verder gebruikt voor een impactanalyse op de nutriëntencyclus binnen het studiegebied.

Uit de analyse van de kaalslagen kan in de eerste plaats worden geconcludeerd dat kleinere aftopdiameters een negatief effect hebben op de productiviteit van de oogstketens en hiermee samen horend het verbruik van het uitrijden en hakselen. Dit omwille van de langere laadtijd van zowel de forwarder als van de hakselaar. Deze lagere productiviteit wordt economisch echter meer dan gecompenseerd door de hogere opbrengst van het hoger aandeel OSB hout en het lager aandeel overige biomassa. De kleinere dimensies van de biomassa zorgt wel voor een hogere vervuilingsgraad van de houtsnippers. Deze vervuiling kan sterk beperkt worden door het aantal handelingen die het materiaal ondergaat te beperken. Dit is het geval bij het hakselen in het bestand, waar het uitrijden overbodig is. De efficiëntie van het hakselen is in de eerste plaats sterk afhankelijk van de vlotheid in de aanvoer en afvoer van containers. Enige vertraging in dit proces leidt tot wachttijden van de hakselaar, wat de kostprijs gevoelig doet oplopen. Uit experimenten kon geconcludeerd worden dat in het bestand hakselen zowel naar efficiëntie als economie de meeste voordelen biedt in kaalslagsystemen. Het hakselen in het bestand verloopt trager per geproduceerde ton ten opzichte van het hakselen aan de rand, dit wordt echter gecompenseerd doordat het niet noodzakelijk is om de biomassa te verzamelen naar de rand van het bestand. De tragere productiecapaciteit biedt ook voordelen indien de afvoer van de biomassa niet vlot verloopt. Tijdens de experimenten duurde het vullen van een container ongeveer even lang als het aanbrengen van een nieuwe. Dit in tegenstelling tot het hakselen aan de rand waarbij dit in de helft van de tijd werd uitgevoerd en bijgevolg de hakselaar de overige tijd stil stond. Kleine vertragingen in de logistieke keten konden eenvoudig worden opgevangen bij het hakselen in het bestand, gezien deze keten over een eigen opslagcapaciteit beschikt. De efficiëntie van het hakselen in het terrein kan nog verbeterd worden als er een groter scherm zou gebruikt worden bij de Greentech hakselaar.

Bij de experimenten uitgevoerd in de dunningen werden zeer diverse ketens onderzocht waarbij een brede waaier aan bosbouwmachines werd uitgetest. Dit maakt het mogelijk om enkele machines en systemen onderling te vergelijken. Een belangrijke eerste conclusie die kan worden gesteld is, dat het oogsten van OSB-hout dient te gebeuren indien de dimensies van het hout voldoende groot zijn. De gecombineerde oogst van OSB-hout en biomassa leidt economisch tot de meest gunstige situatie en eventuele conflicten met de rondhoutindustrie om grondstoffen worden vermeden. Indien de percelen er zich niet toe lenen om OSB-hout te oogsten naast overige biomassa, kan volgens de bekomen resultaten beter gebruik gemaakt worden van een rupskraan met knipkop. De efficiëntie van beide machines (harvester en rupskraan) is gelijk, maar de kostprijs per werkuur voor de rupskraan ligt een stuk lager, wat een sterke reductie betekend in kostprijs per geproduceerde ton.

¹ MIP project, Houtige biomassa voor energie in Limburg, http://www.inverde.be/content/pdf/eindrapport_lowres.pdf

Het uitrijden van biomassa in dunningen wordt het best uitgevoerd door een forwarder. De kleinere dimensies en betere wendbaarheid van de machine leidt tot een efficiëntere werking en een kostenreductie ten opzichte van een uitrijwagen. Het uitrijden van de biomassa en hakselen aan de rand van het bestand bleek uit de proeven het kostenefficiëntst te zijn. Tot slot kan geconcludeerd worden dat de netto-opbrengst bij het oogsten van biomassa uit dunningen eerder gering is, gezien de lage kostprijs van de houtsnippers.

Na het uitvoeren van deze masterscriptie is er nog ruimte voor verder onderzoek op dit onderwerp, en op de eventuele impact van de oogst. Gezien het belang van groene energie in de huidige maatschappij zal er een continue evolutie zijn in de ontwikkeling van nieuwe machines voor de sterk groeiende markt in de Scandinavische landen. Het gebruik in experimenten zou kunnen aantonen of ook hier in de Vlaamse boscontext een toekomstige rol is weggelegd voor deze machines in de oogst van biomassa. Tot slot zou verder onderzoek omtrent het optimaliseren van de logistieke keten sterk aan te raden zijn, gezien de sterke implicaties op de kostenstructuur en de keuze van hakselaar.

6 LITERATUURLIJST

- Abdallah, R., Auchet, S. & Méausoone, P.J., 2011. Experimental study about the effects of disc chipper settings on the distribution of wood chip size. *Biomass and Bioenergy*, 35(2), pp.843–852.
- Akselsson, C. et al., 2007. Impact of Harvest Intensity on Long-Term Base Cation Budgets in Swedish Forest Soils. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 7(1-3), pp.201–210.
- Alakangas, E., Eubionet & C E N, 2006. Classification of biomass origin in European solid biofuel standard.
- Ampoorter, E. et al., 2012. Impact of mechanized harvesting on compaction of sandy and clayey forest soils: results of a meta-analysis. *Annals of Forest Science*, 69(5), pp.533–542.
- Belbo, H., 2010. Comparison of two working methods for small tree harvesting with a multi tree felling head mounted on farm tractor. *Silva Fennica*, 44(October 2009), pp.453–464.
- Berben, J., Baeyens, L. & Palm, R., 1983. Dendrometrische studie van de Corsicaanse den (*Pinus nigra* Arn. var. *Corsicana*),
- Bergström, D., Bergsten, U. & Nordfjell, T., 2010. Comparison of Boom-Corridor Thinning and Thinning From Below Harvesting Methods in Young Dense Scots Pine Stands. *Silva Fennica*, 44(May), pp.669–679.
- Eberhardinger, A., 2010. Energieholzernte innovativ. *LWF aktuell*, 74, pp.16–18.
- Egnell, G. et al., 2007. Environmental aspects on stump-harvest – compilation of knowledge and knowledge gaps, Egnell, G., 2011. Is the productivity decline in Norway spruce following whole-tree harvesting in the final felling in boreal Sweden permanent or temporary? *Forest Ecology and Management*, 261(1), pp.148–153.
- Eriksson, L.N. & Gustavsson, L., 2008. Biofuels from stumps and small roundwood— Costs and CO₂ benefits. *Biomass and Bioenergy*, 32(10), pp.897–902.
- EU, 2005. Commissie van de Europese Gemeenschappen: actieplan biomassa, Eurowaste, www.eurowast.be.
- Fife, D.N., Nambiar, E.K.S. & Saur, E., 2008. Retranslocation of foliar nutrients in evergreen tree species planted in a Mediterranean environment. *Tree physiology*, 28(2), pp.187–96.
- Galloway, J. et al., Global Nitrogen Cycle – Review Article (*Biogeochemistry*, in press). *Biogeochemistry*, pp.1–69.
- Goris, R. et al., Natuurvriendelijke houtexploitatiewijzen voor bossen op kwetsbare bodems,
- Gybels, R. et al., 2012. Houtige biomassa voor energie in Limburg,
- Hedin, J. et al., 2008. Forest fuel piles as ecological traps for saproxylic beetles in oak. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 23(4), pp.348–357. Available at:

- Heikkilä, J., Sirén, M. & Äijälä, J.O., 2007. Management alternatives of energy wood thinning stands. *Biomass and Bioenergy*, 31(5), pp.255–266.
- Helmisaari, H.-S. et al., 2011. Logging residue removal after thinning in Nordic boreal forests: Longterm impact on tree growth. *Forest Ecology and Management*, 261(11), pp.1919–1927.
- Houghton, J., 2005. Global warming. *Reports on Progress in Physics*, 68(6), pp.1343–1403.
- House, M. et al., 2002. Effects of Lime and Wood Ash on Soil-solution Chemistry, Soil Chemistry and Nutritional Status of a Pine Stand in Northern Germany. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 17(3), pp.225–237.
- Inverde (2013), Kobe-infomarkt
- Iwald, J. et al., 2013. Acidifying effect of removal of tree stumps and logging residues as compared to atmospheric deposition. *Forest Ecology and Management*, 290, pp.49–58.
- Jacobson, S., 2003. Addition of Stabilized Wood Ashes to Swedish Coniferous Stands on Mineral Soils – Effects on Stem Growth and Needle Nutrient Concentrations. *Silva Fennica*, 37(September 2002), pp.437–450.
- James, S., Dennell, R. & Gilbert, A., 1989. Hominid use of fire in the Lower and Middle Pleistocene: A review of the evidence. *Current Anthropology*, 30(1), pp.1–26.
- Jenz, Jenz. Available at: www.Jenz.de.
- Jirjis, R., 1995. Storage and drying of wood fuel. *Biomass and Bioenergy*, 9(1-5), pp.181–190.
- Johansson, J. et al., 2006. Transport and handling of forest energy bundles—advantages and problems. *Biomass and Bioenergy*, 30(4), pp.334–341.
- Kärhä, K. & Vartiamaäki, T., 2006. Productivity and costs of slash bundling in Nordic conditions. *Biomass and Bioenergy*, 30(12), pp.1043–1052.
- Kärhä, Kalle, 2012. Comparison of Two Stump-Lifting Heads in Final Felling Norway Spruce Stand. *Silva Fennica*, 46(May).
- Kärhä, Kalle & Mutikainen, A., 2009. Testing two novel stump-lifting heads in a final felling norwayspruce stand. *SILVA FENNICA*, Review Ver.
- Kataja-aho, S. et al., 2012. Responses of soil carbon and nitrogen transformations to stump removal. *Silva Fennica*, 46(February), pp.169–179.
- Komptech, 2009. Brochure Komptech: Stationaire machines,
- Komptech, <http://www.komptechusa.com>.
- Laitila, J. & Asikainen, A, 2006. Energy wood logging from early thinnings by harwarder method. *Baltic Forestry*, pp.94–102.
- Laitila, J., Ranta, T. & Asikainen, A, 2008. Productivity of Stump Harvesting for Fuel. *International Journal of Forest Engineering*, 19(December 2007), pp.37–47.

- Langeveld, H., Sanders, J. & Meeusen, M., 2010. The Biobased Economy: Biofuels, Materials and Chemicals in the Post-oil Era,
- Langholtz, M. et al., 2011. Demonstration of the BioBaler harvesting system for collection of small diameter woody biomass Prepared
- Lorensi, J. et al., 2011. Evaluation of two round baling systems for harvesting understory biomass. *Biomass and Bioenergy*, 35(5), pp.2163–2170.
- M.L McKinney, R.S., 2007. *Environmental Science: Systems And Solutions*,
- Marchi, E. et al., 2009. Comparing Terrain and Roadside Chipping in Mediterranean Pine Salvage Cuts. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 32(2), pp.587–598.
- Murphy, J.M. & Raper, S.C.B., 2007. Global Climate Projections. *Science*, 59(10), pp.747–845.
- Nati, C., Spinelli, R. & Fabbri, P., 2010. Wood chips size distribution in relation to blade wear and screen use. *Biomass and Bioenergy*, 34(5), pp.583–587.
- Oliva, a. G. et al., 2006. Effect of growth conditions on wood density of Spanish *Pinus nigra*. *Wood Science and Technology*, 40(3), pp.190–204.
- Osselaere, J. & Vangansbeke, P., 2012. Interview.
- Peterson, D.L. et al., 2005. Forest Structure and Fire Hazard in Dry Forests of the Western United States. , (February).
- Piene, H., 1978. Effects of increased spacing on carbon mineralization rates and temperature in a stand of young balsam fir. *Canadian Journal of Forest Research*, 8(4), pp.398–406.
- Pothier, D., 2002. Twenty-year results of precommercial thinning in a balsam fir stand. *Forest Ecology and Management*, 168(1-3), pp.177–186.
- Rantala, J., Saarinen, V.-M. & Hallongren, H., 2010. Quality, productivity and costs of spot mounding after slash and stump removal. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 25(6), pp.507–514.
- Reinhart Ceulemans et al., Brochure Biomassa,
- Reynolds, C., 1998. Woodfuel chipping: field trials. Technical Note-Technical Development Branch, ..., (Plate 1), p.12.
- Ringdahl, O., Hellström, T. & Lindroos, O., 2012. Potentials of possible machine systems for directly loading logs in cut-to-length harvesting. *Canadian Journal of Forest Research*, 42(5), pp.970–985.
- Röser, D. et al., 2011. Productivity and cost of mechanized energy wood harvesting in Northern Scotland. *Biomass and Bioenergy*, 35(11), pp.4570–4580. Available at:.
- Saarinen, V.-M., 2006. The effects of slash and stump removal on productivity and quality of forest regeneration operations—preliminary results. *Biomass and Bioenergy*, 30(4), pp.349–356.
- Savoie, P. et al., 2013. Harvest of Short-Rotation Woody Crops in Plantations with a Biobaler. *Energy and Power Engineering*, 05(02), pp.39–47. Available at:.

- Spinelli, R. et al., 2011. Performance of a mobile mechanical screen to improve the commercial quality of wood chips for energy. *Bioresource technology*, 102(15), pp.7366–70..
- Spinelli, R., Schweier, J. & De Francesco, F., 2012. Harvesting techniques for non-industrial biomass plantations. *Biosystems Engineering*, 113(4), pp.319–324.
- Spinelli, R. & Visser, R.J.M., 2009. Analyzing and estimating delays in wood chipping operations. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), pp.429–433.
- Thiffault, E. et al., 2011. Effects of forest biomass harvesting on soil productivity in boreal and temperate forests — A review. , 309, pp.278–309.
- Toivanen, T. et al., 2012. The effect of forest fuel harvesting on the fungal diversity of clear-cuts. *Biomass and Bioenergy*, 39, pp.84–93.
- Visser, R. & Spinelli, R., 2011. Determining the shape of the productivity function for mechanized felling and felling-processing. *Journal of Forest Research*, 17(5), pp.397–402.
- Vito, Biomass & ODE, 206AD. Bio-energie: Omzetten van vaste biomassa in hernieuwbare warmte en,elektriciteit,
- Vlaamse Regering, 2003. Besluit van de Vlaamse Regering tot vaststelling van de criteria voor duurzaam bosbeheer voor bossen gelegen in het Vlaamse Gewest.
- Webster, P., 2005. Technical development; Internal project information note. *Forest research*, (June), p.25.
- Wierbos, B., 2011. Visie van de rondhoutverwerkende industrie: Koolstof vastleggen in producten,p.22.
- WNA, World Nuclear Association. <http://world-nuclear.org/>.
- Zhang, S., Chauret, G. & Tong, Q., 2009. Impact of precommercial thinning on tree growth, lumber recovery and lumber quality in *Abies balsamea*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 24(5), pp.425–433.