

Samenvatting en conclusies

Biomassa kan een rol in de vermindering van broeikasgas-emissies spelen, zowel door conventionele materialen te substitueren als door bio-brandstoffen te leveren. In geïndustrialiseerde landen wordt momenteel echter slechts weinig biomassa gebruikt voor deze toepassingen. Een belangrijke reden hiervoor is dat de productiekosten van biomassatoepassingen vaak hoog zijn, onder andere door de relatief lage beschikbaarheid van landbouwgrond. Voor de introductie van biomassa op de korte tot middellange termijn zijn dus efficiëntere en meer kosteneffectieve routes nodig. Deze routes kunnen de ontwikkeling van aantrekkelijke multifunctionele biomassasystemen en de verplaatsing van biomassaproductie naar gunstigere gebieden, b.v. Centraal-Oost-Europa, zijn. Multifunctionele biomassasystemen behelzen de concepten 'multiproductgebruik' en 'cascadering'. Multiproductgebruik wordt gedefinieerd als het gebruik van de geproduceerde biomassa voor verschillende toepassingen, terwijl cascadering het opeenvolgend gebruik van biomassa voor meerdere toepassingen is, dat wil zeggen, materialen, materiaalrecycling en het terugwinnen van energie. Belangrijke parameters voor de efficiency van multifunctionele biomassasystemen zijn de besparing op niet-hernieuwbaar energieverbruik, de vermindering van broeikasgas-emissies, het gebruik van (landbouw-)grond en de totale kosten van het systeem. Slechts weinig onderzoekers hebben multifunctionele biomassasystemen op deze punten kwantitatief geanalyseerd. Daarom is de centrale onderzoeksvraag van dit proefschrift: *wat is, kwantitatief het potentieel van multifunctionele biomassasystemen om de kosten en landgebruik-efficiency van de besparing op niet-hernieuwbare energie en de vermindering van broeikasgas-emissies te verbeteren?* Twee aspecten spelen een belangrijke rol in het beantwoorden van deze centrale vraag. Ten eerste moeten methodes om kosten, landgebruik, broeikasgas-emissies en niet-hernieuwbaar energieverbruik te berekenen, worden aangepast voor de evaluatie van multifunctionele biomassasystemen. In het bijzonder verdienen vraagstukken van allocatie van milieuimpacts en kosten en systeemuitbreiding, van het meenemen van de tijdsdimensie in berekeningen, en van het meenemen van marktprijsveranderingen door grootschalige introductie van biomassasystemen hierbij aandacht. Ten tweede hangen de potentiële voordelen van een multifunctioneel biomassasysteem af van het specifieke systeem in kwestie; om veelbelovende systemen te kunnen identificeren moeten de mechanismen van deze afhankelijkheid worden bestudeerd.

In dit proefschrift worden broeikasgas-emissies, niet-hernieuwbaar energiegebruik, gebruik van landbouwgrond en kosten van multifunctionele biomassasystemen gekwantificeerd. Hiervoor worden meerdere case studies van multifunctionele biomassasystemen die in eerste instantie veelbelovend lijken uitgevoerd. De case studies zijn gesitueerd in Europa en concentreren zich op Polen. Op deze manier kan het potentieel van biomassa-productie in Centraal-Oost-Europa worden onderzocht, waar staten (momenteel) over grote hoeveelheden landbouwgrond beschikken, potentieel gemiddelde tot hoge gewas-opbrengsten kunnen bereiken, en relatief lage kosten van land en arbeid kennen.

Hoofdstuk 2 onderzoekt het concept van multiproductgebruik van landbouwgewassen, dat wil zeggen, het gedeeltelijk gebruiken van een gewas voor energieproductie en gedeeltelijk voor materiële toepassingen. Multiproductgebruik van gewassen kan wellicht tot toegevoegde inkomsten leiden, evenals tot additionele verminderingen van broeikasgas-emissies. In dit hoofdstuk worden de voordelen van multiproductsystemen boven eenvoudige bio-energiesystemen onderzocht. De efficiëntie van de multiproductsystemen wordt uitgedrukt in kosten van primaire bio-brandstoffen en in verminderingen van broeikasgas-emissies per hectare biomassa-productie. Deze analyse wordt door middel van een case study uitgevoerd, en de gevoeligheid van de resultaten wordt middels een Monte-Carlo analyse onderzocht. De beschouwde gewassen zijn tarwe, hennep en kortemloop populier. De multiproductsystemen worden voor Nederland en voor Polen onderzocht. De vermindering van broeikasgas-emissies van deze systemen bedraagt tussen 0,2 en 2,4 Mg CO_{2eq} per hectare per jaar in Polen en tussen 0,9 en 7,8 Mg CO_{2eq} per hectare per jaar in Nederland. De kosten van primaire bio-brandstof voor deze systemen liggen tussen -4,1 en -1,7€/GJ in Nederland en tussen 0,1 en 9,8 €/GJ in Polen. De resultaten laten zien dat de economische aantrekkelijkheid van multiproductgewassen sterk van de marktprijzen van materialen, van de kosten van biomassa-productie en van de gewasopbrengsten afhangt. De netto vermindering van broeikasgas-emissies per hectare landgebruik per jaar wordt daarentegen sterk beïnvloed door de specifieke vermindering van broeikasgas-emissies van de materiaaltoepassing, van het referentie-energiesysteem en van de broeikasgas-emissies gedurende de biomassa-productie. Multiproductgebruik van gewassen kan de kosten van primaire bio-brandstoffen beduidend verminderen. Dit geldt echter niet algemeen, maar hangt af van het gewas en de materiaaltoepassing. De netto broeikasgas-emissie per hectare per jaar wordt door de toepassing van multiproductgebruik niet verminderd in de systemen die in dit hoofdstuk geanalyseerd zijn. Derhalve is multiproductgebruik van gewassen niet a-priori een mogelijkheid om de prestaties van bio-energiesystemen te verbeteren.

Hoofdstuk 3 heeft een tweeledig doel: (1) het ontwikkelen van een coherent methodologisch kader voor het vergelijken van verschillende biomassa-cascade-systemen in termen van kosten, landgebruik en CO₂-emissieverminderingen, en (2) het identificeren van belangrijke parameters en aspecten, die de efficiëntie van het cascadegebruik van biomassa beïnvloeden. Voor het tweede doeleinde wordt de in dit hoofdstuk ontwikkelde methode op een case study toegepast. Op basis van literatuurgegevens worden cascades voor hout van korte-omloop populier met elkaar vergeleken. De resultaten van deze cascades variëren sterk, namelijk, van een opbrengst voor de vermindering van CO₂-emissies van 200 €/Mg CO₂ tot kosten van 2200 €/Mg CO₂, en van netto verminderingen van CO₂-emissies van 28 Mg CO₂ tot netto toename van CO₂-emissies van 8 Mg CO₂ per hectare per jaar biomassa-productie. De toepassing van een netto-contante-waarde methode om CO₂-emissies en kosten te bepalen beïnvloedt de uitkomsten voor lange-termijn cascades aanzienlijk. In dit geval zijn de kosten en de CO₂-emissiereductie lager. Dikwijls zijn cascades geschikt om zowel de vermindering van CO₂-emissies per hectare gebruikte landbouwgrond van biomassagebruik te vergroten als de kosten van CO₂-emissiereducties te verlagen. Dit hangt echter sterk af van de biomassatoepassingen die in de cascades gecombineerd worden. Parameters die de resultaten sterk beïnvloeden zijn de marktprijzen en het gecumuleerde energiegebruik van de gesubstitueerde referentiematerialen en -energiedragers, en de efficiency van biomassaproductie. De onderzoeksmethode die in dit hoofdstuk wordt voorgesteld is geschikt om het landgebruik, de vermindering van CO₂-emissies en de economische prestaties van biomassa-cascades te kwantificeren. Bovendien kan deze methode worden gebruikt om de mogelijke effecten van de tijdsdimensie op de aantrekkelijkheid van specifieke cascades in beeld te brengen.

Hoofdstuk 4 vergelijkt besparingen op het niet-hernieuwbaar energiegebruik en verminderingen van broeikasgas-emissies voor de productie van kunststoffen uit biomassa met de productie van bio-energie voor hetzelfde doel op basis van het landgebruik. Gezien de politieke doelstelling om het gebruik van biomassa in de energievoorziening te verhogen en de huidige inspanningen om grootschalig kunststoffen uit biomassa te produceren, zou de hoeveelheid beschikbaar landbouwgrond voor de productie van non-food-gewassen een beperking kunnen gaan vormen. Vanwege het belang dat vraagstellingen rondom energie en broeikasgas-emissies in het huidige milieubeleid hebben, is het derhalve wenselijk om het gebruik van landbouwgrond in de vergelijking van verschillende biomassa-systemen mee te nemen. In de afgelopen jaren zijn talrijke levenscyclus-analyses van kunststoffen uit biomassa uitgevoerd, maar slechts enkele van deze studies houden rekening met landgebruik. Daarom breidt dit hoofdstuk bestaande levencyclusanalyses uit door landgebruik in de analyse van de besparing van energie en de vermindering van broeikasgas-emissies mee te nemen. De resultaten tonen dat een vergelijking van ener-

giebesparingen en vermindering van broeikasgas-emissies van kunststoffen uit biomassa op basis van de hoeveelheid gebruikte landbouwgrond tot een andere rangorde leidt dan een vergelijking op basis van de hoeveelheid geproduceerde kunststof. Als landgebruik de basis van de vergelijking is, presteren de productie van natuurvezel-composieten en thermoplastisch zetmeel beter dan de productie van bio-energie uit energiegewassen, terwijl de productie van polymelkzuur vergelijkbaar en de productie van polyhydroxyalkaonaten slechter presteren. Indien het gebruik van landbouwresiduen voor energieproductie in de analyse wordt meegenomen, verbeteren de energiebesparingen en de CO₂-emissiereducties van de kunststoffen uit biomassa sterk. Bovendien lijkt het waarschijnlijk dat de productie van kunststoffen uit biomassa op de middellange termijn nog efficiënter zal worden. De productie van kunststoffen uit biomassa biedt dus, gezien de mogelijk geringe beschikbaarheid van landbouwgrond, interessante mogelijkheden om aan de vermindering van het gebruik van niet-hernieuwbare energiedragers en de vermindering van CO₂-emissies bij te dragen.

Hoofdstuk 5 analyseert de potentiële kwantitatieve voordelen van multifunctionele bioraffinaderij-systemen met betrekking tot de vermindering van broeikasgas-emissies, besparingen op het niet-hernieuwbaar energiegebruik en de verlaging van kosten. Tevens wordt de afhankelijkheid van deze voordelen van de schaal van productie en van marktvolumes onderzocht. Voor dit onderzoek wordt een case study van bioraffinaderijssystemen voor polymelkzuurproductie uitgevoerd. De systemen behelzen een multifunctioneel gebruik van biomassa, dat wil zeggen, gebruik van landbouwresiduen voor energieopwekking, gebruik van bijproducten, recycling, en herwinning van energie uit afval. De prestaties van deze systemen worden per kilogram geproduceerd polymelkzuur en per hectare biomassaproductie geëvalueerd. De berekeningen zijn gebaseerd op gegevens van Polen, onder de aanname dat zowel biomassa- als polymelkzuurproductie in een Europese energie- en materiaalmarkt zijn ingebed. Eerst worden de prestaties van de verschillende bioraffinaderijssystemen middels een ketenanalyse bottom-up onderzocht. Vervolgens worden marktprijzen van polymelkzuurproducten, bijproducten en land met behulp van de prijselasticiteit afgeleid van de productiecapaciteit. Aldus worden de kosten van de bioraffinaderijssystemen bepaald, gerelateerd aan de vraag naar landbouwgrond en materialen. Alle in dit hoofdstuk beschouwde bioraffinaderijssystemen voor polymelkzuurproductie leiden tot netto besparingen op het gebruik van niet-hernieuwbare energiedragers van 70 tot 220 GJ per hectare per jaar en tot netto verminderingen van broeikasgas-emissies van 3 tot 17 Mg CO_{2eq} per hectare per jaar. De meeste beschouwde bioraffinaderijssystemen resulteren in netto kosten van het totale systeem oplopend tot 4600 € per hectare per jaar. Daarentegen leidt polymelkzuurproductie uit korte-omloop hout tot een netto winst van ca. 1100 € per hectare per jaar mits een hoogwaardige product, in dit geval

kunstvezel, een groot aandeel van de productie uitmaakt. Multifunctionaliteit is noodzakelijk om energiebesparing en vermindering van broeikasgas-emissies van bioraffinaderijsystemen voor polymelkzuurproductie te waarborgen. Echter, aan de vermindering van kosten draagt het multifunctioneel gebruik van biomassa nauwelijks bij. De prijselasticiteit van materialen beïnvloedt de kosten van bioraffinaderijsystemen sterk. De prijselasticiteit van land zou een belangrijke rol kunnen spelen als biomassasystemen op grote schaal worden geïntroduceerd.

Hoofdstuk 6 evalueert de mogelijke invloed van grootschalige introductie van biomassa-materiaal- en -energiesystemen en hun marktvolumes op marktprijzen van land, materiaal en energie. Ook wordt de terugkoppeling van deze effecten naar de kosten van broeikasgas-emissiereductie beoordeeld. In dit hoofdstuk worden daartoe kosten-aanbod-curves voor broeikasgas-emissiereductie opgezet voor biomassagebruik op grote schaal. Dit wordt gedaan middels een methode die een bottom-up analyse van biomassatoepassingen, biomassa-aanbod-curves, en marktprijzen van land, biomaterialen en bio-energie-dragers combineert. Deze marktprijzen hangen af van de schaal van het biomassagebruik en van het marktvolume van materialen en energiedragers en ze worden geschat met behulp van prijselasticiteiten. De methode wordt gedemonstreerd door middel van een case study gericht op Polen met als zichtjaar 2015. In deze case study wordt gebruik gemaakt van verschillende scenario's voor economische ontwikkeling en handel in Europa die het aanbod van biomassa en de markten van land, materialen en energiedragers beïnvloeden. De beschouwde technologieën zijn de productie van vezelplaat, polymelkzuur, elektriciteit en methanol. Voor deze technologieën geldt dat in de scenario's de kosten van broeikasgas-emissiereducties sterk met de schaal van biomassaproductie stijgen. Er is gevonden, dat de invloed van een grootschalige introductie van het gebruik van biomassa op de aanbodkosten van biomassa en de marktprijzen van land, materiaal en energiedragers het potentieel van de vermindering van broeikasgas-emissies bij kosten onder 50 €/Mg CO_{2eq} met ca. 13-70% verlagen, afhankelijk van de verschillende scenario's. De productie van biomateriaal blijkt slechts weinig bij te dragen tot goedkope vermindering van broeikasgas-emissies. Dit is toe te schrijven aan de tamelijk kleine materiaalmarkten, die zorgen voor een sterke prijsdaling van biomaterialen bij grootschalige productie. De kosten van broeikasgas-emissiereductie hangen sterk van de biomassa-aanbod-curves, de prijselasticiteit van land en de marktvolumes van bio-energie-dragers af. Onze analyse toont aan dat met dergelijke effecten rekening moet worden gehouden bij het ontwikkelen van strategieën voor implementatie van biomassagebruik. De schattingen van prijselasticiteiten in de wetenschappelijke literatuur zijn echter onzeker, en marktvolumes van biomassatoepassingen hangen af van hun concurrerend vermogen. Om deze onzekerheden het hoofd te

bieden wordt een combinatie van een bottom-up analyse met een analyse van markten geadviseerd.

Samenvattend: we hebben diverse multifunctionele biomassasystemen en hun potentiële voordelen met betrekking tot vermindering van broeikasgas-emissie, besparingen op het gebruik van niet-hernieuwbare energiedragers, landgebruik en systeemkosten geanalyseerd. De resultaten voor de verschillende systemen variëren aanzienlijk, van geen tot duidelijke voordelen van multifunctioneel biomassagebruik. De efficiëntie van multifunctionele biomassasystemen wordt door vele factoren beïnvloed. Enerzijds hangen deze factoren af van de structuur van het biomassasysteem, zoals het soort geproduceerde materiaal en energiedrager, of de efficiëntie en de kosten van de productie. Anderzijds hangen deze factoren ook af van externe omstandigheden, zoals marktvolumes en prijzen van materialen, of de CO₂-intensiteit van het referentiesysteem.

De meeste multifunctionele biomassasystemen die wij beschouwd hebben verhogen echter de efficiëntie van biomassagebruik voor wat betreft kosten, vermindering van broeikasgas-emissies en landbouwgrondgebruik. In vergelijking met bio-energieproductie verminderen de multiproductsystemen die onderzocht zijn in hoofdstuk 2 de primaire kosten van bio-brandstof met ongeveer 5 tot ruim 50 €/GJ_{LHV}, waarbij de grootste vermindering alleen bereikt wordt met een zeer hoogwaardige materiële toepassing (ter vergelijking: de primaire kosten van bio-brandstof in de bio-energiesystemen zijn ca. 2–15 €/GJ_{LHV}, terwijl de prijzen voor steenkool ca. 2 €/GJ_{LHV} zijn). Voor wat betreft broeikasgas-emissies verlagen deze multiproductsystemen de reductie daarvan met 3–10 Mg CO_{2eq} per hectare per jaar biomassateelt. De resultaten betreffende de cascades van korte-omloop hout die in hoofdstuk 3 onderzocht zijn hebben een grote bandbreedte. Door cascadering veranderen, in vergelijking met bio-energieproductie, de vermeden broeikasgas-emissies met ca. -13 tot 23 Mg CO₂ per hectare per jaar, en de kosten van broeikasgas-emissiereducties met ca. -300 tot 2000 €/Mg CO₂. Ter vergelijking: het gebruik van korte-omloop hout voor bio-elektriciteitsproductie resulteert in vermeden emissies van ca. 5 Mg CO₂ per hectare per jaar en in kosten van ongeveer 100 €/Mg CO₂. Het gebruik van landbouwresiduen voor energieproductie, zoals onderzocht in hoofdstuk 4, verhoogt de efficiëntie van de productie van kunststof uit biomassa. Dat wil zeggen, de vermindering van broeikasgas-emissies stijgt met waarden tot 15 Mg CO_{2eq} per hectare per jaar. Tot slot leidt multifunctioneel biomassagebruik in de bioraffinaderijsystemen voor polymelkzuurproductie, zoals geanalyseerd in hoofdstuk 5, tot een efficiëntieverhoging van 4-12 MgCO_{2eq} per hectare per jaar en 0-200 €/Mg biomassa input.

Daarnaast kan geconcludeerd worden dat binnen de structuur van biomassasystemen de materiële hoofdtoepassing de grootste invloed op de prestaties van multifunctionele biomassasystemen heeft. Bovendien kan het gebruik van landbouwresiduen voor energieproductie de prestaties van biomassasystemen beduidend verbeteren. De waardering van multifunctionele biomassasystemen hangt uiteraard sterk af van de referentiesystemen. Het soort materiaal en energiedrager dat wordt gesubstitueerd en het afvalverwerkingsysteem blijken essentieel, zowel voor de kosten als voor de vermindering van broeikasgas-emissies van biomassasystemen.

In het geval van biomaterialen met een relatief lange levensduur kan de tijdsdimensie van de koolstofopslag in deze materialen een belangrijke rol spelen. Wanneer bijvoorbeeld tijd middels een netto-contante-waardemethode in de berekeningen meegenomen wordt, verminderen de netto broeikasgas-emissiereducties van biomassacascades. Ook beïnvloeden de marktprijzen van land, materialen en energiedragers de economische prestaties van multifunctionele biomassasystemen sterk. Het onderzoek in hoofdstuk 6 wijst aan dat met een toenemend gebruik van biomassa voor materialen en energie, de kosten van deze opties voor broeikasgas-emissiereductie kunnen stijgen. Omdat veel multifunctionele biomassasystemen toch al tamelijk hoge kosten voor broeikasgas-emissiereductie met zich meebrengen, zou daardoor het economische potentieel van deze systemen om broeikasgas-emissies te verminderen verder worden beperkt. Dit geldt vooral voor biomaterialen met relatief kleine markten. Voorts moet worden opgemerkt dat marktmechanismen de soorten referentietoepassingen die worden gesubstitueerd kunnen beïnvloeden (bijvoorbeeld, de soort fossiele energiedrager).

Uit de analyses in dit proefschrift kunnen ook methodologische lessen worden getrokken. Er kan worden geconcludeerd dat het meenemen van landbouwgrondgebruik in de vergelijking van biomassasystemen waardevolle inzichten in de rangschikking van deze systemen op hun effectiviteit kan verschaffen. Omdat vaak biomaterialen, waarvoor voor de productie land gebruikt wordt, gesubstitueerd worden in het referentiesysteem, is het noodzakelijk ook in het referentiesysteem dit landgebruik in rekening te brengen. De benadering die in dit proefschrift wordt gehanteerd, dat wil zeggen, de aanname dat op dat land anders biomassa voor energie-opwekking geproduceerd zou worden, is geschikt om een vergelijking van biomassasystemen mogelijk te maken. Evenwel zou overeenstemming in de wetenschap over een standaardmethodologie voor het omgaan met dit probleem wenselijk zijn. Ook zou er een standaardmethodologie ontwikkeld moeten worden voor het meenemen van de tijdsdimensie in de berekening van broeikasgas-emissiebalansen, omdat biomateriaalsystemen koolstof relatief lang kunnen opslaan. Onze analyse, die een netto-contante-waardemethode gebruikt, toont de potentieel grote invloed van de tijd

op de resultaten aan. Tenslotte beïnvloedt de schaal van biomassaproductie en -gebruik zowel de kosten als de broeikasgas-emissiebalans van biomassasystemen. Dit is toe te schrijven aan veranderingen van prijzen en van gesubstitueerde referentietoepassingen. De combinatie van een bottom-up analyse en een eenvoudige analyse van de vraag naar land-, materiaal- en energie die in dit proefschrift wordt voorgesteld, toont belangrijke strekkingen van de afhankelijkheid van biomassasysteemkosten van de schaal van biomassagebruik.

Ter conclusie: mits zorgvuldig ontworpen, rekening houdend met referentiesystemen en met land-, materiaal- en energiemarkten, zijn multifunctionele biomassasystemen een goede keuze om biomassa efficiënt te gebruiken voor wat betreft de vermindering van broeikasgas-emissies, gebruik van (landbouw-)grond en totale systeemkosten. De beste multifunctionele biomassasystemen die in dit proefschrift zijn onderzocht, verhogen de broeikasgas-emissiereductie per eenheid gebruikte landbouwgrond met een factor vijf in vergelijking met enkelvoudig gebruik van biomassa, en verlagen de totale systeemkosten eveneens met een factor vijf. Nochtans, voor de evaluatie van (multifunctionele) biomassasystemen bij grootschalig biomassagebruik moeten de interacties tussen biomassagebruik en land-, materiaal- en energiemarkten beter begrepen worden. Daarom zou verder onderzoek naar optimale biomassasystemen voor vermindering van broeikasgas-emissies bottom-up informatie over complexe biomassasysteem moeten combineren met kennis van marktmechanismen uit top-down analyses.