

# Duurzaamheid van biobased producten



Energiegebruik en broeikasgasemissie  
van producten met suikers als grondstof

HARRIËTTE BOS, SJAAK CONIJN, WIM CORRÉ, KOEN MEESTERS, MARTIN PATEL

# Duurzaamheid van biobased producten

Energiegebruik en broeikasgasemissie van  
producten met suikers als grondstof

Harriëtte Bos

Sjaak Conijn

Wim Corré

Koen Meesters

Martin Patel

Uitgegeven in de reeks "Groene Grondstoffen".

Eerdere uitgaven:

1. Technologie voor gezondheid en milieu; agenda voor duurzame en gezonde industriële toepassingen van organische nevenstromen en agro-grondstoffen in 2010, Sietze Vellema en Barbara de Klerk-Engels (2003).
2. Nieuwe composteerbare verpakkingsmaterialen voor voedseltoepassingen, Christiaan Bolck, Michiel van Alst, Karin Molenveld, Gerald Schennink en Maarten van der Zee (2003).
3. Markten voor groene opties: ervaringen in verpakkingen, verven en isolatiematerialen, Sietze Vellema (samenstelling) (2003).
4. Groene grondstoffen in productie; recente ontwikkelingen op de markt, Harriëtte Bos en Bert van Rees (2004).
5. Technologische innovatie in de keten; groene grondstoffen in ontwikkeling, Harriëtte Bos en Marc van den Heuvel (2005).
6. Bioplastics, Christiaan Bolck (2006).
7. Weekmakers; groene grondstoffen bieden nieuwe mogelijkheden, Karin Molenveld (2006).
8. Doorbreken van de innovatieparadox; 9 voorbeelden uit de biobased economy., Christiaan Bolck en Paulien Harmsen (2007).
9. Agrificatie en de Biobased Economy; Een analyse van 25 jaar beleid en innovatie op het gebied van Groene Grondstoffen, Harriëtte Bos (2008).
10. Bioraffinage; Naar een optimale verwaarding van biomassa, Bert Annevelink en Paulien Harmsen (2010).

## Voorwoord

In dit boekje worden de resultaten van een studie gepresenteerd die is uitgevoerd in het kader van het beleidsondersteunend onderzoek in het thema BO-12.05-002 Biobased Economy. In deze studie is onderzocht hoe de duurzaamheid van verschillende biobased producten die uit fermenteerbare suikers kunnen worden gemaakt zich tot elkaar verhoudt. Daarbij is gekeken naar het gebruik van niet-hernieuwbare energie en de uitstoot van broeikasgassen tijdens het gehele productieproces, inclusief het telen van de gewassen. Fermenteerbare suikers kunnen uit verschillende gewassen worden gewonnen, in deze studie zijn vijf verschillende gewassen met elkaar vergeleken.

Eén van de achtergronddoelen van de studie was om landbouwkundige data beter op te nemen in duurzaamheidstudies. Daarom is gebruik gemaakt van de teeltdata die met behulp van het E-Crop model van Wageningen UR Plant Research International worden bepaald. Dit model is gebaseerd op werkelijke input en output gegevens van teelten van de verschillende gewassen. Deze data zijn gebruikt als input voor het model van de Universiteit van Utrecht Copernicus instituut, waarmee de productie van de verschillende eindproducten kan worden doorgerekend.

In de studie zijn verschillende invalshoeken gekozen, waarbij in het ene geval er voor wordt gekozen de co-producten te verzamelen en om te zetten in energie, en in het andere geval de huidige landbouwpraktijk wordt aangenomen, waarbij co-producten deels op het land blijven liggen. Hierdoor wordt een genuanceerd beeld gecreëerd, waarbij de invloed van de verschillende parameters helder naar voren komt.

Verder wordt het effect getoond van verschillende manieren om de data te presenteren: I) het gebruik van fossiele energie per kilo geproduceerd product, II) de hoeveelheid fossiele energie die je minder gebruikt door een ton fossiel product te vervangen door een ton biobased product, III) de hoeveelheid fossiele energie die je minder gebruikt per hectare ingezette landbouwgrond door een fossiel product te vervangen door een biobased product.

Deze drie manieren van presenteren leiden schijnbaar tot verschillende conclusies. De achtergrond van deze verschillen komt in deze publicatie uitgebreid aan bod. We hopen hiermee ook een handvat aan te reiken om andere duurzaamheidstudies ten opzichte van elkaar beter te kunnen interpreteren.

Onze dank gaat uit naar Peter Besseling en Paulien Harmsen voor het zorgvuldig lezen en van commentaar voorzien van eerdere versies van de tekst.

## Inhoudsopgave

1.	Inleiding .....	7
	Vergelijking tussen de gewassen .....	8
	Vergelijking tussen producten .....	9
	Hoeveel oogsten we? .....	10
2.	De onderzochte systemen .....	11
	De grondstoffen.....	11
	De producten.....	16
3.	Methodologie.....	21
	Afbakening van het systeem .....	21
	Wat doen we met de co-producten? .....	22
	Data voor de modellering .....	23
4.	Resultaten .....	25
	Introductie.....	25
	Aannames .....	26
	Stap 1: De productie van fermenteerbare suikers.....	27
	Stap 2: De drie eindproducten .....	30
	Stap 3: Vermeden energiegebruik en broeikasgasuitstoot .....	32
	Stap 4: De resultaten per hectare .....	34
	Discussie .....	38
5.	Conclusies.....	41
	Literatuur .....	43
	Overzicht van gebruikte termen .....	44
	Appendix, de (vermeden) broeikasgasuitstoot .....	45
	Stap 1: De productie van fermenteerbare suikers.....	45
	Stap 2: De drie eindproducten .....	47
	Stap 3: Vermeden energiegebruik en broeikasgasuitstoot .....	49
	Stap 4: De resultaten per hectare .....	51

## 1. Inleiding

Nederland wil de komende jaren versterkt inzetten op de ontwikkeling van de biobased economy. Daarbij ligt de focus niet alleen op het gebruik van biomassa voor brandstoffen en energie, maar vooral ook op chemicaliën en materialen. Door het gebruik van biomassa kan het gebruik van fossiele energie zoals olie worden verminderd en de CO<sub>2</sub> uitstoot worden verlaagd. Er is relatief veel bekend van de duurzaamheidswinst van bioenergie en biobrandstoffen, waarbij voor biobrandstoffen de duurzaamheid in sommige gevallen niet veel beter is dan voor de fossiele brandstoffen. De verwachting is dat met name bij het gebruik van biomassa voor chemicaliën de te bereiken duurzaamheidswinst groot kan zijn. Er zijn echter nog niet veel data op dit gebied beschikbaar. Daarom is door Wageningen UR en de Universiteit van Utrecht gezamenlijk een studie uitgevoerd waarbij een duurzaamheidvergelijking is gemaakt van een aantal biobased producten die uit fermenteerbare suikers kunnen worden gemaakt.

Fermenteerbare suikers zijn suikers die door micro-organismen kunnen worden omgezet in andere stoffen (dat heet fermentatie). Hiervoor kunnen verschillende soorten suiker worden gebruikt, zoals glucose (druivensuiker), dat gemaakt kan worden uit zetmeel uit tarwe of maïs, maar bijvoorbeeld ook sacharose (tafelsuiker) dat uit suikerbieten wordt gemaakt. Wanneer gebruik wordt gemaakt van zetmeel of sacharose als grondstof wordt dit 1<sup>e</sup> generatie technologie genoemd. Met de zogeheten 2<sup>e</sup> generatie technologieën kan ook een mengsel van glucose en andere suikers worden gewonnen uit cellulose (uit stro of hout).

Met fermentatieprocessen kunnen uit de suikers veel verschillende stoffen worden gemaakt zoals ethanol (alcohol), wat onder andere gebeurt bij het brouwen van bier, maar ook bijvoorbeeld azijnzuur en melkzuur.

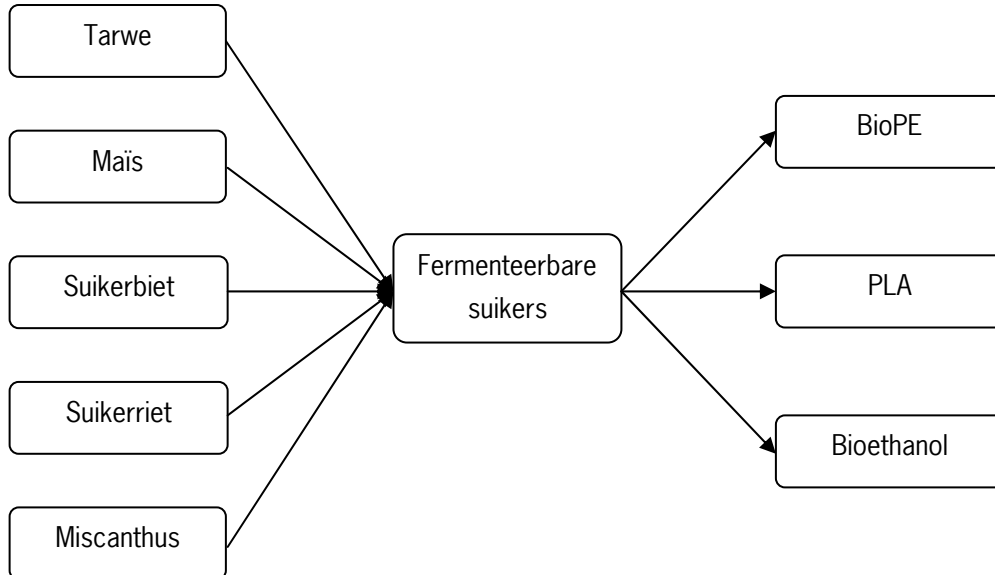
In de studie is door middel van de LCA (Levenscyclusanalyse) methodiek onderzocht hoeveel reductie in gebruik van niet-hernieuwbare energie en in emissie van broeikasgassen het gebruik van biobased producten kan opleveren ten opzichte van vergelijkbare producten uit fossiele bron.

LCA is een wetenschappelijke methode om de impact op het milieu van verschillende producten met elkaar te vergelijken. Hierbij kan de hele levenscyclus van het product worden meegenomen, dus van de productie van de grondstof tot en met de afvalfase. In deze studie is echter alleen de productiefase van de onderzochte producten meegenomen, de gebruiksfase en de afvalfase zijn buiten beschouwing gelaten.

In deze studie zijn drie verschillende biobased producten, polymelkzuur, bioethanol en bioPE met elkaar vergeleken die elk uit fermenteerbare suikers kunnen worden geproduceerd. De producten die worden vergeleken worden momenteel werkelijk op (semi-)commerciële schaal geproduceerd en zijn dus reële opties voor de biobased economy. Bovendien zijn vijf verschillende gewassen onderzocht (tarwe, maïs, suikerbiet, suikerriet en Miscanthus) waaruit de fermenteerbare suikers kunnen worden geproduceerd die als grondstof voor de drie producten kunnen dienen. Doordat alle potentiële productieroutes via fermenteerbare suikers lopen zijn alle combinaties met elkaar te vergelijken en krijgen we duidelijk inzicht in de relatieve performance van de verschillende opties.

### Vergelijking tussen de gewassen

De gewassen die met elkaar zijn vergeleken zijn tarwe, korrelmaïs, suikerbiet, suikerriet en Miscanthus. Miscanthus is een 3 meter hoge grasachtige plant die veel houtige biomassa produceert. Voor tarwe, korrelmaïs, suikerbiet en Miscanthus is uitgegaan van teelt in



*Figuur 1.1. Opzet van de studie: door te werken via één knooppunt (fermenteerbare suikers) zijn de verschillende gewassen en verschillende toepassingen met elkaar te vergelijken.*

Nederland, voor suikerriet is teelt in Brazilië aangenomen. De benodigde fermenteerbare suikers worden gewonnen uit het zetmeel, de suiker of de cellulose die door de gewassen wordt geproduceerd. Bij tarwe en mais wordt de zetmeel uit de korrels geëxtraheerd en deze wordt vervolgens via hydrolyse omgezet in fermenteerbare suiker. Bij suikerbiet en suikerriet wordt de fermenteerbare suiker (sacharose) direct uit de plant geëxtraheerd. Voor Miscanthus is aangenomen dat met behulp van 2<sup>e</sup> generatie technologie de cellulose kunnen worden omgezet in fermenteerbare suikers. Deze 2<sup>e</sup> generatie technologie is wel beschikbaar maar wordt op commerciële schaal nog beperkt toegepast.

### **Vergelijking tussen producten**

De drie producten die zijn bestudeerd zijn polymelkzuur (PLA), biopolyethyleen (BioPE) en bioethanol.

PLA is een bioafbreekbaar bioplastic dat steeds meer toepassing vindt in verpakkingen, flessen, en als vezel in kleding, tapijten en andere consumentenproducten.

Voor biopolyethyleen (BioPE) wordt momenteel een commerciële fabriek gebouwd door Braskem in Brazilië. BioPE is qua eigenschappen identiek aan fossiel polyethyleen (PE), maar wordt geproduceerd uit ethyleen dat uit bioethanol wordt gemaakt in plaats van uit aardolie. Polyethyleen is de meest toegepaste kunststof, bijna 30 % van alle plastics is polyethyleen. PE wordt gebruikt voor het vervaardigen van plastic zakken, voor alle mogelijke huishoudelijke apparatuur, in auto's etcetera.

Bioethanol kan worden gebruikt als (gedeeltelijke) vervanger van benzine, maar het kan ook als grondstof dienen voor de chemische industrie en vervangt dan petrochemisch ethanol.

De drie producten zijn onderling met elkaar vergeleken en zijn ook vergeleken met hun fossiele tegenhanger(s):

- PLA is vergeleken met polyethyleentereftalaat (PET), waaruit de bekende PET-fles wordt gemaakt, maar bijvoorbeeld ook fleecetruien.
- BioPE (niet bioafbreekbaar bioplastic) is vergeleken met LDPE (low density polyethyleen één van de commerciële polyethyleentypes)
- Bioethanol is vergeleken met petrochemisch ethanol en met benzine.

## Hoeveel oogsten we?

In de huidige landbouwpraktijk wordt van sommige gewassen alleen dat deel van het gewas geoogst wat voor voeding of veevoer is te gebruiken. Het andere deel blijft op het land achter. Het deel wat achterblijft, zoals het stro van tarwe en de stengels van mais, zou echter ook gebruikt kunnen worden om er bio-energie (of andere producten) van te maken. Van Miscanthus wordt het volledige gewas (behalve de wortels) geoogst, omdat Miscanthus over het algemeen wordt gebruikt voor energieopwekking. Miscanthus kan ook gebruikt worden voor de productie van fermenteerbare suikers via de 2<sup>e</sup> generatie technologie en ook in dit geval worden alle bovengrondse delen van het gewas geoogst.

In een duurzaamheidsanalyse leidt het verschil in hoeveelheid geoogst materiaal automatisch tot grote verschillen tussen de gewassen. Dit komt doordat van het ene gewas een veel grotere hoeveelheid van de biomassa die wordt geproduceerd kan worden gebruikt in het eindproduct dan van het andere gewas. Om de gewassen op een meer gelijkwaardige manier met elkaar te kunnen vergelijken is in deze studie verondersteld dat een zo groot mogelijk deel van het gewas wordt geoogst en dat alle co-producten die op het land of later in de productieketen vrijkomen, worden omgezet in bruikbare energievormen. Hierbij is ook aangenomen dat de afvalwarmte die vrijkomt bij de productie van de eindproducten nuttig kan worden gebruikt.

Verwijderen van de co-producten van het land heeft vanzelfsprekend een effect op de hoeveelheid bodemorganische stof, dit is in deze studie niet meegenomen maar zal later worden onderzocht. Ter vergelijking is ook doorgerekend wat de te bereiken reductie in broeikasgas uitstoot en het gebruik van niet hernieuwbare energie is wanneer wel de huidige gangbare landbouwpraktijk wordt aangenomen.

In de huidige gangbare landbouwpraktijk bepaalt vooral de economische waarde van de restproducten of ze geoogst worden of op het land achterblijven. Zo wordt tarwestro grotendeels verzameld en ingezet voor strooisel in stallen. Het blad van suikerbiet blijft achter op het veld omdat er nu geen economisch rendabele bestemming voor is. Op dit moment is veel onderzoek gericht op de mogelijkheden om interessante stoffen uit bietenblad te winnen om daarmee de oogst van bietenblad rendabel te maken.

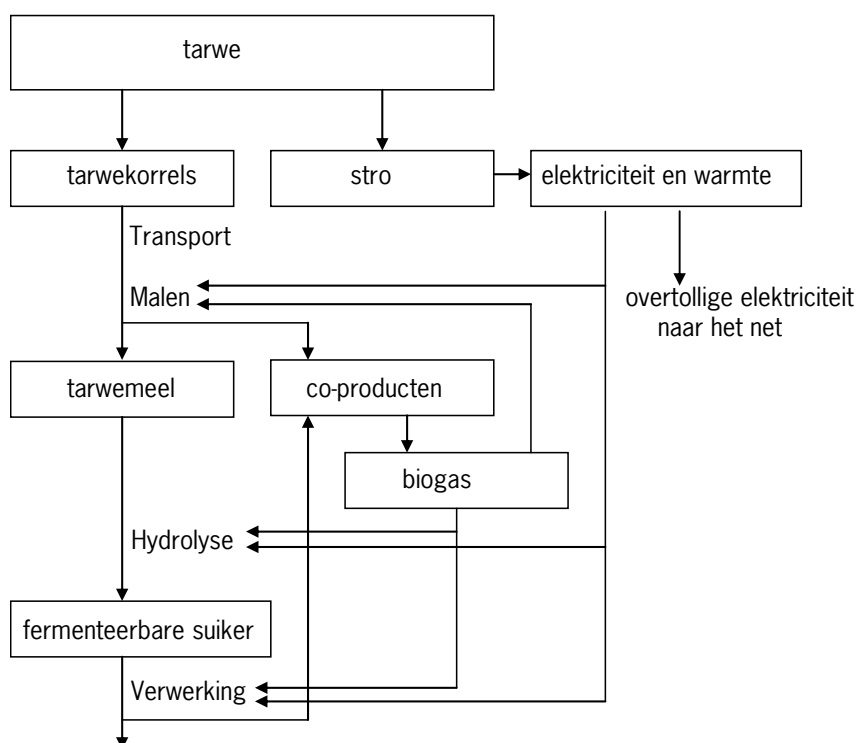
In deze studie is de veronderstelling gemaakt dat op termijn de volledige oogst van reststromen rendabel is te maken. Ook de omzetting van Miscanthus via 2<sup>e</sup> generatie technologie naar fermenteerbare suikers is momenteel nog niet rendabel maar zal dat naar verwachting op termijn wel worden.

## 2. De onderzochte systemen

### De grondstoffen

Vijf gewassen waaruit fermenteerbare suikers kunnen worden gemaakt zijn met elkaar vergeleken: tarwe, maïs, suikerbiet, suikerriet en Miscanthus. De productie vanuit het gewas naar fermenteerbare suiker is weergegeven in figuur 2.1 tot en met 2.5. Voor tarwe, maïs, suikerbiet en Miscanthus is aangenomen dat de teelt in Nederland plaatsvindt, voor suikerriet is teelt in Brazilië aangenomen.

Tarwe (figuur 2.1) is een gewas dat in Nederland veel wordt verbouwd. Het heeft lage teeltkosten, een vrij stabiele opbrengst en prijs en is goed toe te passen in de rotatie.

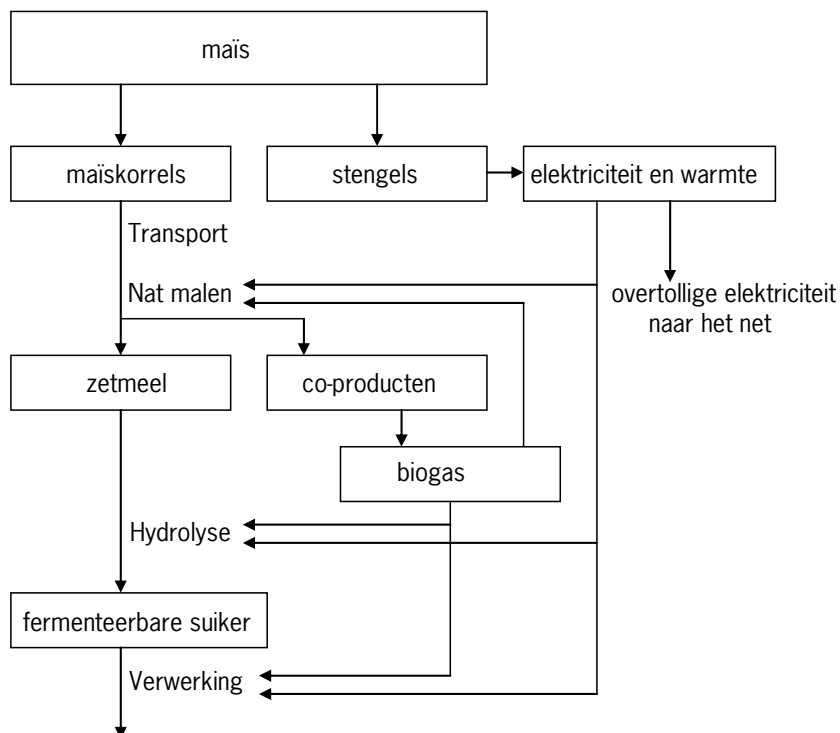


Figuur 2.1. Stroomdiagram voor de productie van fermenteerbare suiker uit tarwe, waarbij aangenomen is dat alle co-producten worden omgezet in energie.

Normaal wordt een deel van het stro op het land gelaten maar voor onze studie hebben we aangenomen dat het wordt verzameld en gebruikt voor de productie van energie.

De tarwekorrels worden over het algemeen droog gemalen om de zemelen te scheiden van het tarwemeel. Het meel bevat naast zetmeel ook eiwitten en andere componenten. Het zetmeel kan worden omgezet tot fermenteerbare suikers. De zemelen en overige restproducten uit het meel worden gebruikt voor de productie van biogas door vergisting. Het biogas wordt omgezet in warmte en elektriciteit om te worden ingezet in het proces.

Korrelmaïs (figuur 2.2) werd oorspronkelijk niet verbouwd in Nederland omdat het zaad onder de Nederlandse klimaatomstandigheden niet rijpt. Recent zijn echter nieuwe variëteiten ontwikkeld die beter aangepast zijn aan ons klimaat. Maïs kan een hogere opbrengst per hectare geven dan tarwe, aan de andere kant zijn de teeltkosten van het gewas ook hoger.



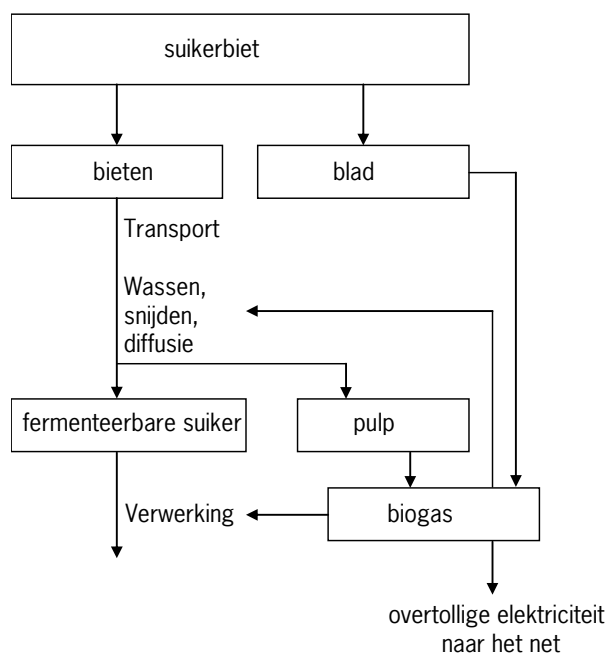
*Figuur 2.2. Stroomdiagram voor de productie van fermenteerbare suiker uit maïs, waarbij aangenomen is dat alle co-producten worden omgezet in energie.*

Normaal worden de stengels op het land gelaten, maar voor deze studie is aangenomen dat ze worden verzameld en worden ingezet voor de productie van warmte en electriciteit.

De korrels worden doorgaans nat gemalen om het zetmeel van de andere componenten te scheiden. Het zetmeel wordt gehydrolyseerd tot fermenteerbare suikers, de co-producten worden omgezet in biogas door vergisting en het biogas wordt omgezet in electriciteit en warmte.

Het suikerbiet areaal in Nederland is momenteel snel aan het krimpen door toename in opbrengst per hectare en afnemende bescherming door markt liberalisatie. Aangezien suikerbiet een zeer hoge opbrengst per hectare en een hoog suikergehalte heeft kan het een interessant gewas zijn voor de biobased economy. Het blad wordt over het algemeen op het land gelaten, maar voor deze studie is aangenomen dat het wordt verzameld en wordt omgezet in biogas via vergisting (figuur 2.3).

Bieten worden gewassen en gesneden, waarna in diffusietorens de suiker met warm water wordt geëxtraheerd uit de pulp. Na filteren bevat dit zogenaamde dunsap 15% suiker en 2 %

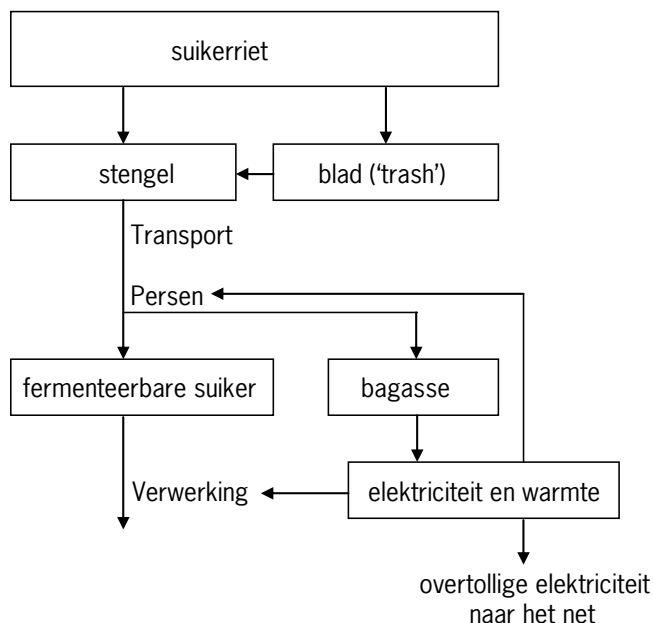


*Figuur 2.3. Stroomdiagram voor de productie van fermenteerbare suiker uit suikerbiet, waarbij aangenomen is dat alle co-producten worden omgezet in energie.*

andere componenten. De suiker is sucrose (tafelsuiker), een disacharide dat direct gefermenteerd kan worden. De pulp wordt meestal gebruikt als veevoer, maar kan ook worden omgezet in biogas via vergisting, zoals in deze studie is aangenomen. Het biogas kan worden omgezet in warmte en elektriciteit.

Suikerriet (figuur 2.4) kan niet in het Nederlandse klimaat worden verbouwd, daarom is uitgegaan van teelt in Brazilië. Suikerriet is een meerjarig gewas met een groeicyclus van meestal zes jaar met vijf oogsten. De stengels worden met de hand of mechanisch afgesneden en de bladeren worden verwijderd. Het is ook mogelijk om de bladeren mee te oogsten en de verwachting is dat dit zal gaan gebeuren als energieproductie uit de bladeren financieel uit kan. Voor deze studie wordt hiervan uitgegaan.

Suikerriet wordt verwerkt door schoonmaken en persen. Suikerrietsap is het belangrijkste product van dit proces, dit bevat 12 à 13 % suiker, die na filtering kan worden gefermenteerd. Het bijproduct van het suikerrietproces is bagasse (suikerrietvezel). Bagasse wordt, eventueel met de bladeren, gebruikt als de belangrijkste energiebron in de suikerfabriek. Verbranding

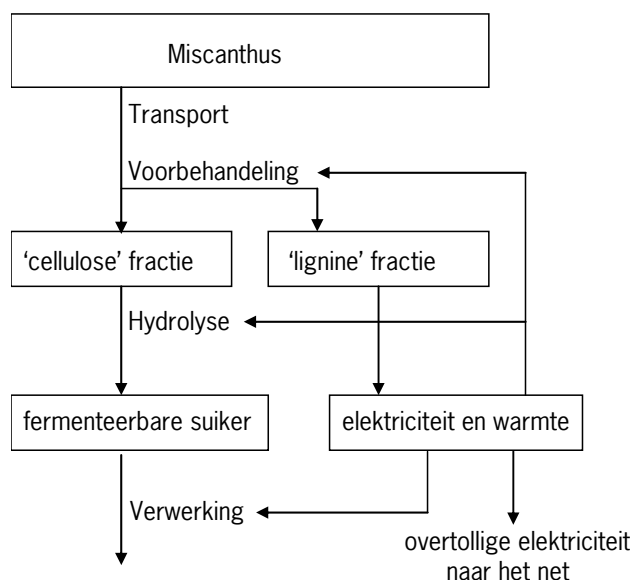


*Figuur 2.4. Stroomdiagram voor de productie van fermenteerbare suiker uit suikerriet, waarbij aangenomen is dat alle co-producten worden omgezet in energie.*

van de bagasse levert genoeg electriciteit en warmte om aan de energiebehoefte van de suikerfabriek te voldoen. Op dit moment wordt meestal niet meer warmte en elektriciteit geproduceerd dan de fabriek gebruikt omdat daar geen afzet voor is. De verwachting is echter dat in de toekomst een toenemende vraag naar elektriciteit zal ontstaan, waardoor elektriciteitsproductie uit bagasse zal toenemen.

Miscanthus (figuur 2.5) kan worden geteeld in Nederland, maar dat gebeurt momenteel slechts op kleine schaal. In deze studie is aangenomen dat de oogst in het voorjaar plaatsvindt als het meeste blad is gevallen. De opbrengst is in het voorjaar weliswaar lager dan bij oogst in het najaar, maar omdat het gewas in het voorjaar minder vocht bevat zijn de transport en droogkosten veel lager. Bovendien blijven bij voorjaarsoogst meer nutriënten achter op het veld, waardoor minder kunstmest nodig is.

Miscanthus is een meerjarig gewas met een groeicyclus van 15 tot 20 jaar. Het is een "lignocellulose gewas" en in die zin vergelijkbaar met hout en stro. In de voorbehandelingstap worden de cellulose en hemicellulose (samen de 'cellulose' fractie) gescheiden van de lignine ).



*Figuur 2.5. Stroomdiagram voor de productie van fermenteerbare suiker uit Miscanthus, waarbij aangenomen is dat alle co-producten worden omgezet in energie.*

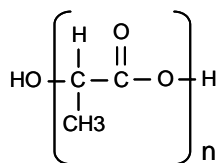
De (hemi)cellulose wordt omgezet in fermenteerbare suikers, de lignine wordt gebruikt om elektriciteit en warmte te maken.

## De producten

### *Polymelkzuur (PLA)*

Polymelkzuur of PLA is één van de eerste nieuw ontwikkelde biobased polymeren die een brede toepassing heeft gevonden in een aantal consumentenproducten. PLA wordt gebruikt voor verpakkingsmaterialen zoals voedselverpakkingen, zowel folies als schaaltes en flessen. Albert Heijn gebruikt PLA voor een aantal verpakkingen van biologische producten. Het Nederlandse bedrijf Synbra heeft een groene schuim uit PLA ontwikkeld (Biofoam) dat piepschuim kan vervangen. Van PLA worden ook vezels gesponnen waar kleding, tapijten en dekbedvullingen van worden gemaakt. PLA wordt al sinds tientallen jaren gebruikt in medische toepassingen. PLA voor niet-medische toepassingen wordt op dit moment alleen geproduceerd door NatureWorks, maar er wordt gebouwd aan nieuwe productielocaties.

PLA is een polyester dat wordt gemaakt uit melkzuur, de melkzuur wordt via fermentatie uit suikers gemaakt. NatureWorks (voorheen een samenwerking tussen Cargill en Dow) heeft in 2002 een fabriek opgestart die 140.000 ton PLA per jaar produceert.

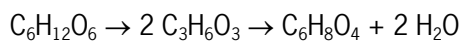


*Figuur 2.6. Het PLA molecuul en een tweetal producten uit PLA. (foto's FBR)*

De fysische- en mechanische eigenschappen van PLA maken het een goede kandidaat om PET, het polyester van de PET-flessen en fleece kleding, te vervangen. PET wordt op enorme schaal geproduceerd, alleen in Europa al meer dan 3 miljoen ton per jaar. PLA is lange tijd veel duurder geweest dan PET, waardoor het gebruik beperkt bleef tot voornamelijk medische

toepassingen, maar recente ontwikkelingen hebben geleid tot een meer concurrerende prijs, waardoor PLA nu op grotere schaal wordt toegepast.

Het proces om de grondstof voor PLA, het melkzuur, te maken uit suikers is zeer efficiënt, de omzettingsgraad is vaak hoger dan 95%, theoretisch zelfs 100% zoals blijkt uit onderstaande reactievergelijking. Het melkzuur wordt vervolgens omgezet in lactide (een ring van twee melkzuurmoleculen) en daaruit wordt PLA gemaakt. De reactievergelijking van suiker tot lactide ziet er als volgt uit:



Bij de productie van de lactide komt water vrij, de omzetting van de lactide naar polymelkzuur gaat zonder afsplitsing van andere moleculen. Van het oorspronkelijke gewicht aan suiker wordt maximaal 80% omgezet in PLA. Dat is een relatief goede omzettingsefficiëntie.



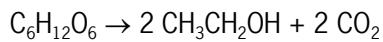
*Figuur 2.7. Bioethanol productie van Abengoa in Salamanca, Spanje (Bron: Biosynergy 2010).*

### *Bioethanol*

Bioethanol kan worden gebruikt als vervanger voor benzine, het kan worden bijgemengd bij conventionele benzine, maar aangepaste motoren kunnen ook op 100% ethanol lopen.

Naast het gebruik als brandstof kent ethanol ook toepassingen in de chemische industrie onder andere als oplosmiddel. Deze ethanol wordt vaak uit aardolie gemaakt, maar is precies dezelfde stof als bioethanol, en kan hier dus door worden vervangen.

Bioethanol wordt gemaakt uit suikers. Fermenteerbare suikers kunnen anaeroob (zonder zuurstof) worden gefermenteerd tot ethanol. Hiervoor geldt de volgende reactievergelijking:



Bij deze reactie wordt dus naast ethanol ook  $\text{CO}_2$  gevormd, bijna de helft van het suikergewicht wordt omgezet in  $\text{CO}_2$ . De reactie is daardoor minder efficiënt dan de productie van melkzuur uit fermenteerbare suikers. Ethanol wordt uit het reactiemengsel geïsoleerd



*Figuur 2.8. Brazilië kent een flink aantal automodellen met flex-fuel motoren die op ethanol-benzine mengsels in verschillende verhoudingen, van pure benzine tot pure ethanol, kunnen rijden. (Bron: Mario Roberto Duran Ortiz).*

door destillatie, hierbij wordt een mengsel van 96 % ethanol en 4 % water gevormd. Om puur ethanol te krijgen moet het laatste restje water er apart worden uitgehaald, dit kost veel energie.

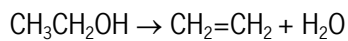
### *Biobased Polyethyleen*

Polyethyleen (PE) is de meest gebruikte kunststof ter wereld. Polyethyleen wordt ook wel polyetheen of polytheen genoemd. In Europa wordt ruim 14 miljoen ton per jaar aan PE gebruikt (circa 80 miljoen ton wereldwijd). PE wordt gebruikt voor allerlei consumententoepassingen, variërend van plastic zakken en flessen tot afvalcontainers, waterleidingen en gaspijpen. PE wordt geproduceerd uit etheen, wat weer uit aardolie wordt gemaakt. Er zijn veel verschillende types PE. De twee meest toegepaste zijn HDPE (high density polyethyleen), een wat stijver materiaal dat onder andere wordt gebruikt voor containers en pijpen en LDPE (low density polyethyleen), een wat zachter materiaal dat wordt gebruikt voor bijvoorbeeld folies en zakken.



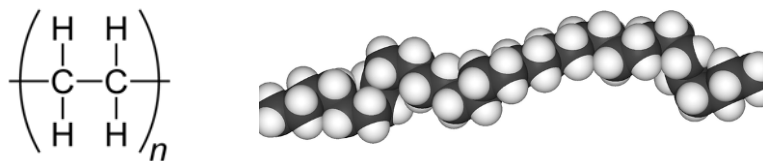
*Figuur 2.9. Polyethyleen wordt gebruikt voor zeer veel verschillende toepassingen. Plastic zakken en vloerverwarmingsleidingen zijn hiervan slechts twee voorbeelden. Foto's: Bert Annevelink (linkerfoto), Arjen Bosch (rechterfoto).*

Biobased polyethyleen (BioPE) kan worden gemaakt uit bioethanol. De bioethanol wordt daarvoor eerst omgezet in etheen. Deze etheen is moleculair gezien precies dezelfde stof als fossiel etheen. De etheen wordt gepolymeriseerd tot polyethyleen via hetzelfde proces dat in de huidige chemische industrie wordt gebruikt. Voor de productie van etheen uit ethanol geldt de volgende reactievergelijking:



Bij deze reactie komt dus naast etheen ook water vrij. Bijna 40% van de massa van de ethanol wordt omgezet in water. Uiteindelijk kan maximaal 31 % van het gewicht aan suiker worden omgezet in BioPE, de rest wordt water en  $\text{CO}_2$ . De etheen wordt vervolgens via een polymerisatiereactie omgezet in polyethyleen.

BioPE is dezelfde stof als petrochemisch PE en kan dus voor dezelfde toepassingen worden gebruikt.



*Figuur 2.10. De molecuulstructuur en de ruimtelijke structuur van polyethyleen. Bron: Wikipedia*

### 3. Methodologie

#### Afbakening van het systeem

Eén van de centrale vragen van dit onderzoek is of bij de productie van de drie biobased producten minder niet-hernieuwbare energie wordt gebruikt en minder broeikasgassen worden uitgestoten dan bij de productie van hun fossiele tegenhangers. Om deze vergelijking te kunnen maken is voor elk van de drie biobased producten een product gekozen dat uit fossiele bron wordt gemaakt. Het fossiele product heeft (ongeveer) dezelfde eigenschappen of vervult dezelfde functie als het biobased product.

Voor de vergelijking zijn de volgende producten gekozen:

- PLA wordt vergeleken met PET. PET en PLA hebben niet helemaal dezelfde eigenschappen, maar kunnen toch in veel toepassingen elkaar vervangen.
- BioPE wordt vergeleken met LDPE. LDPE kan uit bioetheen worden gemaakt, je krijgt dan eigenlijk BioLDPE). BioPE en LDPE kunnen dus precies dezelfde eigenschappen hebben.
- Bioethanol wordt vergeleken met benzine, wat relevant is voor de toepassing van bioethanol als transportbrandstof. Bioethanol heeft een lagere verbrandingswaarde dan benzine en je kunt dus minder kilometers rijden op een liter.
- Bioethanol wordt ook vergeleken met petrochemisch ethanol dat uit aardolie wordt gemaakt. Ethanol wordt in de chemische industrie wordt gebruikt bijvoorbeeld als oplosmiddel. Bioethanol en petrochemisch ethanol zijn precies dezelfde stof met dezelfde eigenschappen.

De vergelijkingen zijn gemaakt per ton product. Dat betekent dat er niet wordt gecorrigeerd voor het verschil in eigenschappen tussen bijvoorbeeld PLA en PET. Alleen voor de toepassing van bioethanol als transportbrandstof wordt wel rekening gehouden met het verschil in verbrandingswaarde: 1 ton ethanol wordt vergeleken met 0.67 ton benzine.

Omdat de biobased producten worden vergeleken met fossiele producten met ongeveer dezelfde eigenschappen is de gebruiksfase niet meegenomen in de analyse, dat betekent dat de analyse is uitgevoerd van de “wieg tot de fabriekspoort”. Verschillende opties voor afvalverwerking zijn dus ook niet bekeken.

### **Wat doen we met de co-producten?**

In de meeste biobased productieketens wordt maar een gedeelte van het gewas gebruikt om biobrandstof of bioplastics te maken, terwijl de co-producten zoals stro, bietenpulp en DDGS (Dried Distillers Grain Solubles, een bijproduct van de ethanolfermentatie) worden gebruikt voor andere doeleinden, bijvoorbeeld voor stalbedekking of diervoer. Daarom zou eigenlijk ook maar een deel van de broeikasgasemissies en het energieverbruik aan het hoofdproduct en een deel aan het bijproduct moeten worden toegekend. Dit wordt allocatie genoemd.

De keuze welk deel van de emissies en energiegebruik aan welk product wordt toegekend beïnvloedt zeer sterk het eindresultaat van de studie. Daarnaast is het toepassen van allocatie een complex probleem waarvoor verschillende methodes bestaan. De ISO-norm die de uitvoering van LCA's beschrijft stelt dat allocatie het best vermeden kan worden. Dit kan bijvoorbeeld worden gedaan door het systeem uit te breiden en ook de verschillende toepassingen van de co-producten helemaal mee te nemen in de LCA. De omvang van de analyse neemt hierdoor echter enorm toe en dit kan leiden tot een veel te dure of onwerkbaar situatie. Daarom wordt allocatie toch vaak toegepast.

In deze studie hebben we allocatie vermeden. Hiervoor hebben we aangenomen dat de co-producten ook worden geoogst en dat deze worden omgezet in energie. Gecombineerd met systeemuitbreiding betekent dit dat bijvoorbeeld stro wordt verbrand, waarbij stoom en electriciteit worden geproduceerd, die een mix van fossiele brandstoffen vervangen. De DDGS wordt vergist tot biogas, dat aardgas vervangt. De vermeden fossiele brandstoffen kunnen worden afgetrokken van het gebruik van niet-hernieuwbare energie en de CO<sub>2</sub> uitstoot die deze brandstoffen zouden veroorzaken kan worden afgetrokken van de broeikasgasuitstoot. Het voordeel van deze aanpak is dat de verschillende gewassen beter met elkaar vergelijkbaar zijn. Dit geldt met name voor de vergelijking van zogenaamde 2<sup>e</sup> generatie gewassen met 1<sup>e</sup> generatie gewassen. Bij 2<sup>e</sup> generatie gewassen wordt vrijwel het hele gewas geoogst, dit zijn over het algemeen houtachtige gewassen. De lignocellulose wordt omgezet in lignine en fermenteerbare suikers, waarna de fermenteerbare suikers worden omgezet in het eindproduct. Miscanthus is een typisch 2<sup>e</sup> generatie gewas. Bij 1<sup>e</sup> generatie gewassen worden alleen de zaden geoogst en gebruikt om het eindproduct te produceren. De opbrengst per hectare en de duurzaamheid per hectare is daarom per definitie lager. Door het benutten van alle co-producten worden de 1<sup>e</sup> en 2<sup>e</sup> generatie gewassen op een meer vergelijkbare voet tegen elkaar afgezet.

Daarnaast hebben we ter vergelijking ook de berekeningen uitgevoerd waarbij we zijn uitgegaan van de gangbare landbouwpraktijk. In dit geval hebben we dus aangenomen dat stro en suikerbietenblad op het land achterblijven.

### **Data voor de modellering**

Berekeningen voor energiegebruik en broeikasgasemissies tijdens de groei van het gewas, het transport, en de omzetting tot fermenteerbare suikers zijn gedaan met het E-Crop model.

De uit de co-producten geproduceerde elektriciteit en warmte kan voor een deel in het proces worden gebruikt (en vervangt dan dus niet-hernieuwbare elektriciteit en warmte) en een deel is beschikbaar om aan het net (elektriciteit) of aan anderen (warmte) te leveren. In de berekeningen worden twee varianten onderscheiden voor de resterende warmte: wel of geen gebruiksmogelijkheid. Elektriciteit kan altijd naar het net, warmte moet direct lokaal gebruikt kunnen worden, anders is het weg.

De emissies van overige broeikasgassen ( $N_2O$  en  $CH_4$ ) zijn omgerekend in  $CO_2$ -equivalenten volgens de IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change) methodiek, met een tijdshorizon van 100 jaar. Voor de berekeningen van het energiegebruik en de broeikasgasemissie van de productie van de biobased producten is gebruik gemaakt van werk wat in het kader van het BREW<sup>1</sup> project is uitgevoerd. Meer achtergrondinformatie over de gebruikte methodes is te vinden in het rapport van Bos et al. uit 2010, dit rapport bevat ook een overzicht van de in de berekeningen gebruikte getallen.

---

<sup>1</sup> BREW project: Medium and long-term opportunities and risks of the biotechnological production of bulk chemicals from renewable resources, gecoördineerd door Universiteit Utrecht

## 4. Resultaten

### Introductie

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de studie gepresenteerd. Zoals in figuur 1.1 is aangegeven zijn de berekeningen in feite in twee delen uitgevoerd. Eerst is gekeken naar het gebruik van niet-hernieuwbare<sup>2</sup> energie en de broeikasgasemissie bij de productie van de fermenteerbare suikers. Vervolgens zijn het gebruik van fossiele energie en de broeikasgasemissie berekend van de productiestap van de fermenteerbare suikers naar de verschillende eindproducten.

De resultaten kunnen op verschillende manieren worden gepresenteerd, en het gekke (en misschien ook wel het verontrustende) is dat de verschillende manieren van presenteren schijnbaar leiden tot verschillende conclusies. Om dat duidelijk te maken zullen we in dit hoofdstuk stap voor stap door de verschillende grafieken met resultaten heenlopen.

In de eerste stap wordt de productie van de fermenteerbare suikers bekeken. Hierbij worden de vijf verschillende gewassen waaruit de fermenteerbare suikers kunnen worden geproduceerd met elkaar vergeleken. In dit hoofdstuk worden de grafieken voor het gebruik van fossiele energie gepresenteerd. De grafieken voor de broeikasgasuitstoot leiden tot ongeveer dezelfde conclusies en worden in de appendix gepresenteerd.

In de volgende stap wordt het gebruik van fossiele energie bij de productie van de drie verschillende eindproducten, PLA, bioPE en bioethanol, gepresenteerd. Hierbij worden zowel de productie van de fermenteerbare suikers als de productie van de eindproducten uit de suikers meegenomen. De grafieken laten dus de resultaten voor de hele productieketen van gewas tot eindproduct zien. In deze grafieken staat ook het gebruik van fossiele energie bij de productie van de fossiele tegenhangers (PET, PE, ethanol en benzine). Hierdoor wordt inzichtelijk hoe het gebruik van fossiele energie bij de productie van biobased producten zich verhoudt tot het energiegebruik bij de productie van de fossiele producten.

---

<sup>2</sup> Niet-hernieuwbare energie en fossiele energie zijn niet precies hetzelfde, maar voor de leesbaarheid van de tekst worden beide termen door elkaar gebruikt. Strikt genomen wordt niet-hernieuwbare energie bedoeld.

In de derde stap wordt gekeken naar het effect van de vervanging van de fossiele producten door de biobased producten. Als bij de productie van de biobased producten minder fossiele energie wordt gebruikt dan bij de productie van de fossiele producten, kan het vervangen van een fossiel product door een biobased product dus leiden tot *vermeden* gebruik van fossiele energie. Je hebt als maatschappij dan minder fossiele energie nodig om je producten te maken. Tegelijkertijd worden er dus ook minder broeikasgassen uitgestoten, ook hier spreken we van *vermeden* uitstoot van broeikasgassen.

In de vierde stap wordt nog weer een ander effect bekeken. Normaal worden LCA resultaten altijd uitgedrukt per ton product. In de eerste drie stappen wordt dit ook gedaan. De opbrengst aan fermenteerbare suikers per hectare van de vijf verschillende gewassen die zijn onderzocht ligt echter nogal ver uit elkaar. Daardoor is voor de productie van een ton suiker voor het ene gewas meer land nodig dan bij het andere. In de vierde stap worden daarom de resultaten ook per hectare gepresenteerd. We laten dan het *vermeden* gebruik van fossiele energie zien die je per ingezette hectare landbouwgrond kan bereiken door een fossiel product te vervangen door een biobased product. In een maatschappij waarin de beschikbaarheid van landbouwgrond een beperkende factor is, is dit een relevante parameter.

In alle gevallen staan in dit hoofdstuk de grafieken voor het (vermeden) gebruik van fossiele energie; de grafieken voor de broeikasgasemissies staan in de appendix.

## **Aannames**

Zoals eerder besproken zijn we er in de berekeningen vanuit gegaan dat alle co-producten die vrijkomen bij de productie van de biobased producten worden omgezet in energie. Dit geldt voor de co-producten die vrijkomen bij de oogst, bij de verwerking van het gewas, bij de productie van de fermenteerbare suikers en bij de productie van het eindproduct. De energie die wordt geproduceerd vervangt het gebruik van niet-hernieuwbare energiebronnen en dit wordt verrekend in de LCA berekeningen. Als er een overschot aan elektriciteit is kan dit worden geleverd aan het net, wat resulteert in een credit voor energiegebruik en broeikasgasemissies. Als er een overschot aan warmte is kan hier ook een credit voor energiegebruik en broeikasgas worden gerekend. Voor warmte die vrijkomt hangt het echter van de lokale omstandigheden af of deze gebruikt kan worden. Daarom laten we in de grafieken ook de resultaten zien voor het geval de warmte niet gebruikt kan worden.

Voor de co-producten zijn de volgende aannames gemaakt:

- Tarwe: het stro wordt verbrand in een biomassa centrale om elektriciteit en warmte te genereren, de co-producten van de verwerkingsstappen worden vergist tot biogas, wat wordt gebruikt in een WKK-installatie (warmte kracht koppeling installatie) om elektriciteit en warmte te genereren.
- Mais: het stro en de co-producten worden op dezelfde manier verwerkt als bij tarwe.
- Suikerbiet: de bladeren en de pulp worden gebruikt om biogas te produceren, en het biogas wordt gebruikt in een WKK-installatie om elektriciteit en warmte te genereren.
- Suikerriet: de stengels worden geoogst inclusief de bladeren, de bladeren en de bagasse worden verbrand om elektriciteit en warmte te genereren.
- Miscanthus: na scheiding van de cellulose fractie worden de co-producten gebruikt om warmte en elektriciteit te genereren.

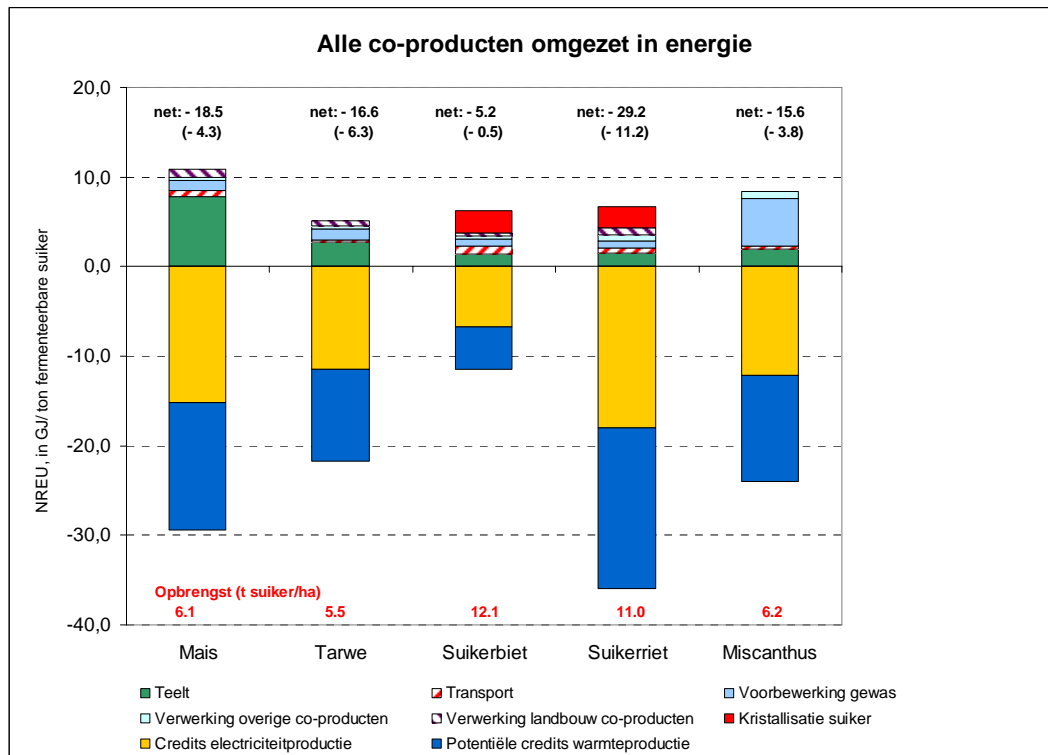
Naast de berekeningen waarbij alle co-producten worden omgezet in energie, zijn de ketens ook doorgerekend onder aanname dat de huidige landbouwpraktijk wordt toegepast. Hierbij blijft dus een deel van de co-producten op het land achter. Deze resultaten presenteren we ook om te laten zien welke winst te behalen is bij de huidige landbouwpraktijk, en hoeveel extra winst er maximaal te behalen is als alle co-producten zouden worden verzameld.

## Stap 1: De productie van fermenteerbare suikers

Figuur 4.1 geeft het gebruik van niet-hernieuwbare energie (NREU, Non-Renewable Energy Use) voor de productie van fermenteerbare suikers voor de verschillende gewassen weer. De hoogte van de balk boven de streep (de nul-lijn) geeft weer hoeveel fossiele energie er nodig is voor de teelt en productie van 1 ton suiker. Onder de streep staat de opbrengst in elektriciteit en warmte als de suiker en de bijproducten worden omgezet in energie.

Alle gewassen leveren netto meer energie op dan dat er in wordt gestopt. De gewassen verschillen echter sterk, zowel in het gebruik van niet hernieuwbare energie, als in de credits die de bijproducten leveren. Onder in de figuur staat de opbrengst aan suikers per hectare, ook dit getal verschilt sterk tussen de gewassen, meer dan een factor twee tussen bijvoorbeeld tarwe en suikerbiet.

De conclusie ligt voor de hand dat voor de Nederlandse situatie maïs en tarwe de beste gewassen zijn voor de productie van fermenteerbare suikers. Het is echter belangrijk om ook te kijken naar de suikeropbrengst per hectare van de verschillende gewassen (de rode getallen onderin de grafieken). De hoeveelheid land die benodigd is voor de productie van één



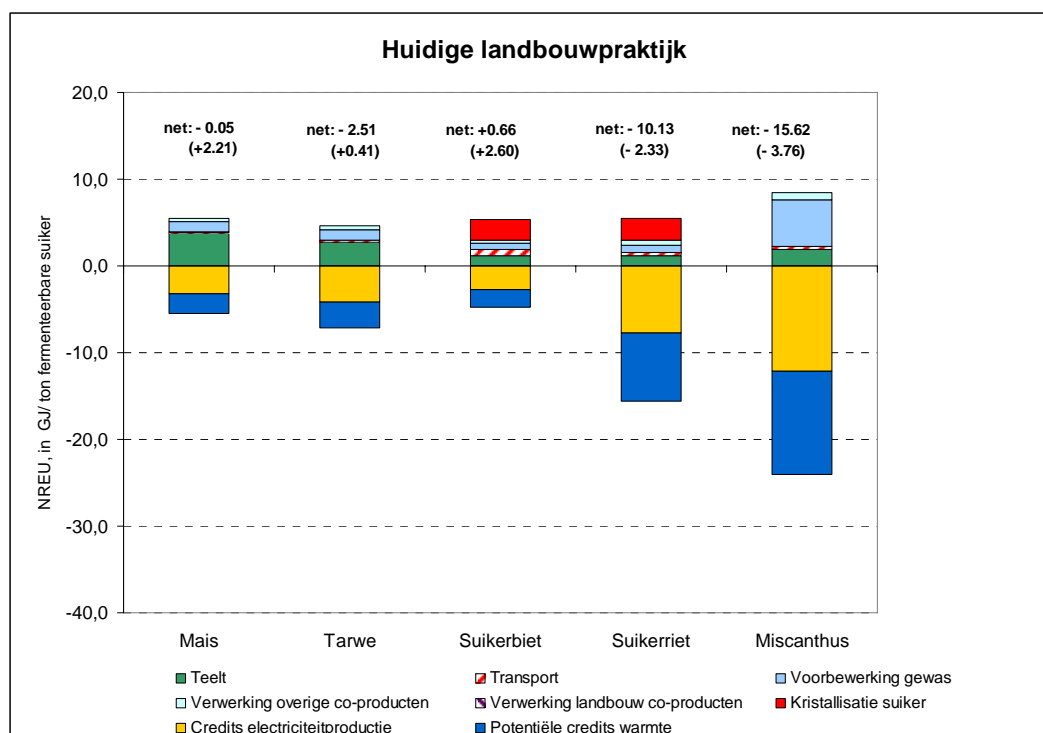
*Figuur 4.1. Het gebruik van niet-hernieuwbare energie (NREU), in gigajoule per ton fermenteerbare suiker, voor de productie van fermenteerbare suikers uit de verschillende gewassen. De net (netto) waarden boven de balken geven het netto energiegebruik, waarbij het omzetten van de co-producten in energie is meegenomen. De getallen tussen haakjes geven het netto energiegebruik in het geval de warmte niet kan worden gebruikt.*

ton fermenteerbare suiker, is ongeveer twee keer groter voor mais en tarwe dan voor suikerbiet. Het gebruik van niet-hernieuwbare energie *per hectare* is daardoor voor suikerbiet het kleinst. In de resultaten voor de eindproducten zal dit verschil uitgebreid aan bod komen.

In figuur 4.2 staat ter vergelijking dezelfde grafieken afgebeeld, alleen nu uitgaande van de huidige landbouwpraktijk, waarbij dus een deel van de co-producten op het land wordt achtergelaten en niet wordt gebruikt voor de omzetting in energie. Het is duidelijk dat met name het stuk onder de nullijn, dus de credits die worden gehaald door de benutting van co-producten, in dit geval veel kleiner is, behalve voor het 2<sup>e</sup> generatie gewas Miscanthus,

waarvoor in beide gevallen dezelfde getallen gelden, omdat bij 2<sup>e</sup> generatiegewassen vrijwel alle bovengrondse biomassa wordt geoogst en verwerkt.

In dit geval is het verschil tussen suikerbiet en tarwe en maïs veel minder groot. Dat komt omdat tarwe en maïs veel co-producten geven die kunnen worden omgezet in energie, wat een voordeel is bij de eerste berekening (figuur 4.1). Suikerbiet geeft juist meer biomassa die kan worden omgezet in suikers en levert dus relatief meer eindproduct ten opzichte van de hoeveelheid co-producten. De opbrengst aan fermenteerbare suikers per hectare is gelijk aan de situatie waarbij alle co-producten worden verzameld en worden omgezet in energie. Ook in dit geval is voor de Nederlandse situatie suikerbiet het gewas met het minste niet-hernieuwbare energiegebruik per hectare.

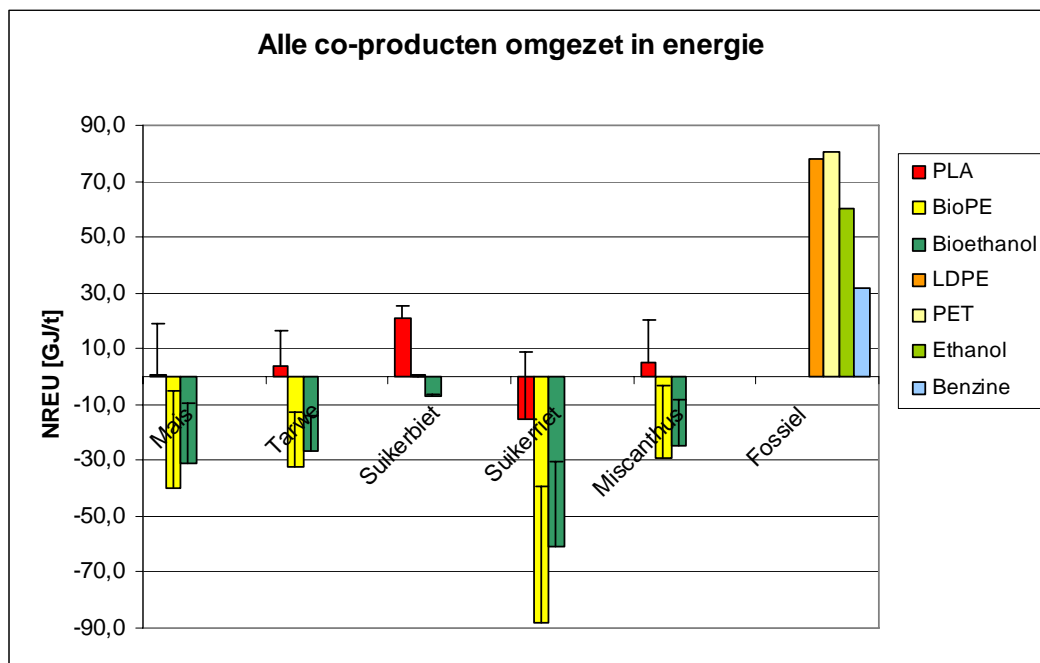


*Figuur 4.2. Het gebruik van niet-hernieuwbare energie (NREU) in gigajoule per ton fermenteerbare suiker, voor de productie van fermenteerbare suikers uit de verschillende gewassen, uitgaande van de huidige landbouwpraktijk. De net (netto) waardes boven de balken geven het netto energiegebruik, de getallen tussen haakjes geven het netto energiegebruik in het geval de warmte niet kan worden gebruikt.*

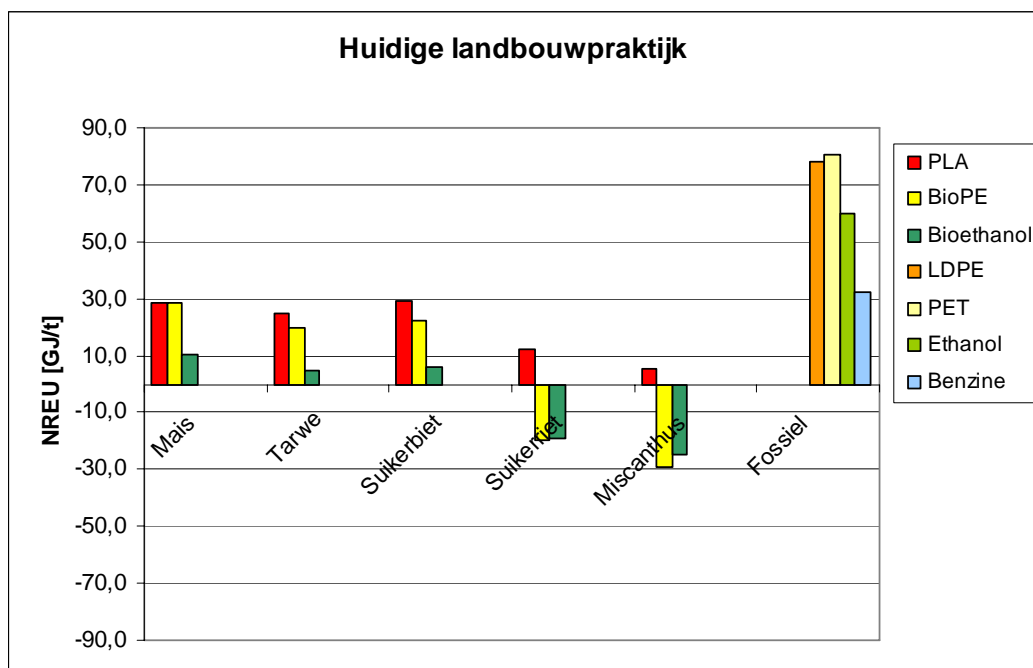
## Stap 2: De drie eindproducten

In figuur 4.3 staat het gebruik van fossiele energie per ton product van de drie eindproducten, PLA, bio-ethanol en bioPE weergegeven voor de vijf gewassen. Hierbij is de volledige productieketen meegenomen, dus inclusief de teelt en de verwerking van de gewassen tot fermenteerbare suikers, die in het vorige hoofdstuk is behandeld. In deze berekening is weer aangenomen dat alle co-producten worden omgezet in energie. In de figuur staat ook het niet-hernieuwbare energiegebruik van de fossiele producten waarmee de bioproducten worden vergeleken.

Het is duidelijk dat in alle gevallen de biobased producten beter scoren in het gebruik van fossiele energie (minder gebruiken) dan hun fossiele counterparts en daarmee dus een meer duurzaam alternatief vormen. Tevens blijkt dat, als de co-producten worden omgezet in



*Figuur 4.3. Het gebruik van fossiele energie (NREU) bij de productie van de drie biobased producten PLA, bioPE en bio-ethanol, en van de vier fossiele tegenhangers LDPE, PET, ethanol en benzine. Voor de productie van de bioproducten is aangenomen dat alle co-producten worden omgezet in energie. De streepjes in/op de balken geven het energiegebruik weer als de geproduceerde warmte niet kan worden gebruikt.*



*Figuur 4.4. Het gebruik van fossiele energie (NREU) bij de productie van de drie biobased producten PLA, bioPE en bio-ethanol, en van de vier fossiele tegenhangers LDPE, PET, ethanol en benzine. Voor de productie van de bioproducten is de huidige landbouwpraktijk aangenomen.*

energie, een aantal productieketens energieleveranciers worden (NREU is kleiner dan 0). BioPE komt in deze vergelijking naar voren als de optie die de meeste besparing in niet-hernieuwbaar energiegebruik per ton product levert en bioethanol komt als één na beste optie naar voren.

Het niet-hernieuwbare energie gebruik bij de huidige landbouwpraktijk is weergegeven in figuur 4.4. Ook in dit geval scoren alle biobased producten beter in het gebruik van niet-hernieuwbare energie dan alle fossiele counterparts. Doordat in dit geval echter geen extra energie wordt opgewekt door de co-producten, zijn alleen de suikerriet- en de Miscanthusketen energieleveranciers wanneer bioPE of bio-ethanol wordt geproduceerd. Bij de huidige landbouwpraktijk is het verschil tussen bioPE en PLA veel kleiner dan als de co-producten worden omgezet in energie. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat het proces voor bioethanol en bioPE relatief inefficiënt is, zoals ook in hoofdstuk 2 aangegeven. Voor de

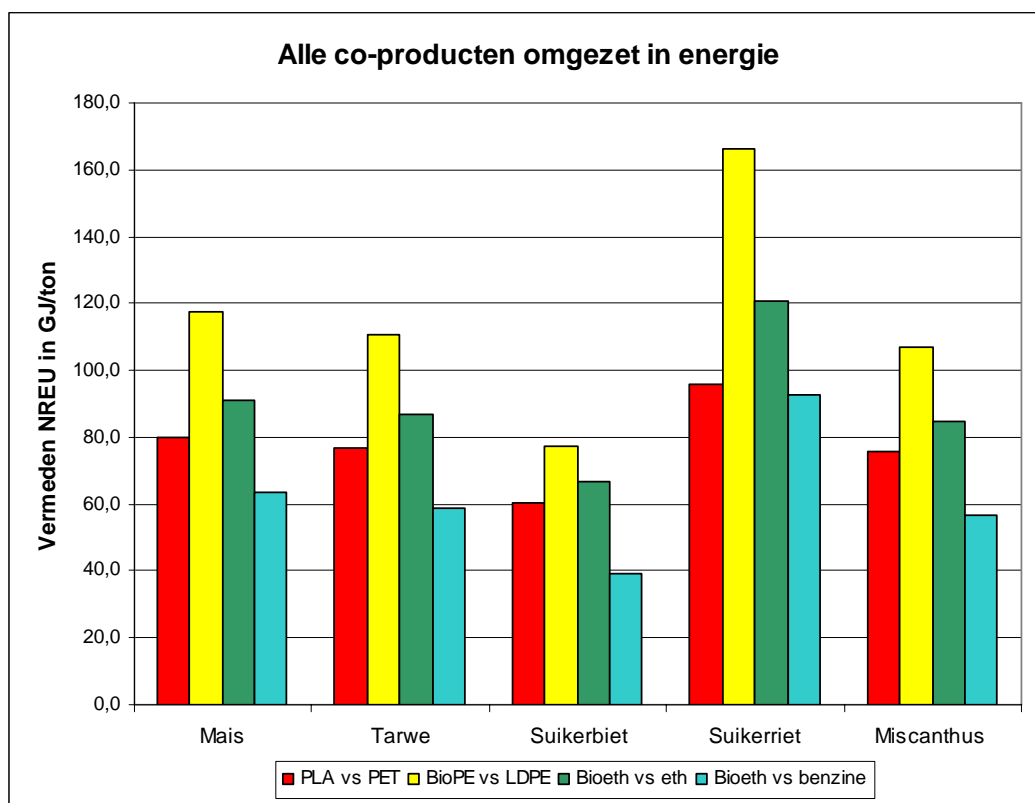
productie van 1 ton ethanol of bioPE is veel meer fermenteerbare suiker nodig, en dus meer gewas, dan voor de productie van 1 ton PLA. Daarom komen er in de productie van bioethanol en bioPE meer co-producten vrij die kunnen worden omgezet in energie, en dus komt de totale vergelijking bij het gebruik van co-producten voor energie positief uit voor bioPE en bioethanol. Voor de huidige landbouwpraktijk liggen de uitkomsten dicht bij elkaar, omdat er dus geen extra energie wordt opgewekt met de co-producten.

### **Stap 3: Vermeden energiegebruik en broeikasgasuitstoot**

Door de resultaten voor de bioproducten af te zetten tegen de resultaten voor de fossiele producten kan de hoeveelheid niet-hernieuwbare energie (en uitstoot van broeikasgas) worden uitgerekend die wordt vermeden door over te gaan naar de bioproducten. Hiervoor vergelijken we dus PLA met PET, BioPE met LDPE en bioethanol met zowel benzine als met petrochemisch ethanol. De bioproducten hebben in alle gevallen een lager fossiele energiegebruik en een lagere uitstoot in broeikasgassen dan de fossiele producten, de hoeveelheid vermeden energiegebruik en broeikasgasuitstoot is dus in alle gevallen groter dan nul.

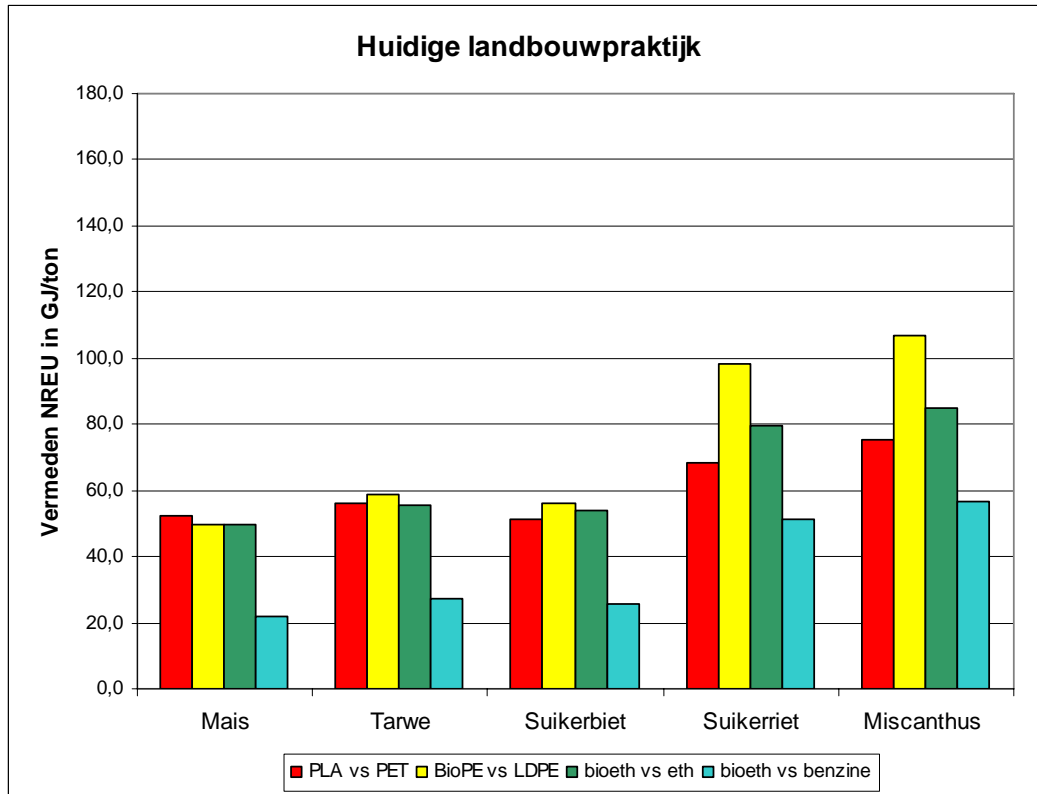
In figuur 4.5 en 4.6 staan het vermeden fossiele energiegebruik per ton geproduceerd eindproduct, respectievelijk voor het geval dat alle co-producten worden omgezet in energie en voor de huidige landbouwpraktijk. In dit geval wordt het absolute verschil tussen de resultaten voor het fossiele product en de resultaten voor het bioproduct bepalend voor de uitkomst. Doordat de productie van PET, de fossiele tegenhanger van PLA, relatief veel energie kost (zie figuur 4.3), scoort PLA in deze vergelijking veel beter dan in de vorige paragraaf. Voor maïs is het bij de huidige landbouwpraktijk zelfs het meest aantrekkelijke alternatief. Voor de andere gewassen komt echter in alle gevallen bioPE er als de meest aantrekkelijke optie uit.

Interessant is ook de vergelijking van bioethanol met benzine ten opzichte van de vergelijking van bioethanol met petrochemisch ethanol. De productie van benzine kost relatief weinig energie (figuur 4.5) en daarom leidt het vervangen van benzine door bioethanol tot relatief weinig vermeden energiegebruik. Bioethanol inzetten voor benzine is voor alle gewassen de minst aantrekkelijke optie. Wanneer bioethanol echter wordt ingezet in plaats van petrochemisch ethanol, is de hoeveelheid vermeden energiegebruik veel hoger. Dit komt omdat de productie van petrochemisch ethanol veel meer energie kost dan de productie van benzine.



*Figuur 4.5. Vermeden gebruik van fossiele energie (NREU) per ton eindproduct, wanneer fossiele producten worden vervangen door hun biobased tegenhanger. Aangenomen is dat alle co-producten worden omgezet in energie.*

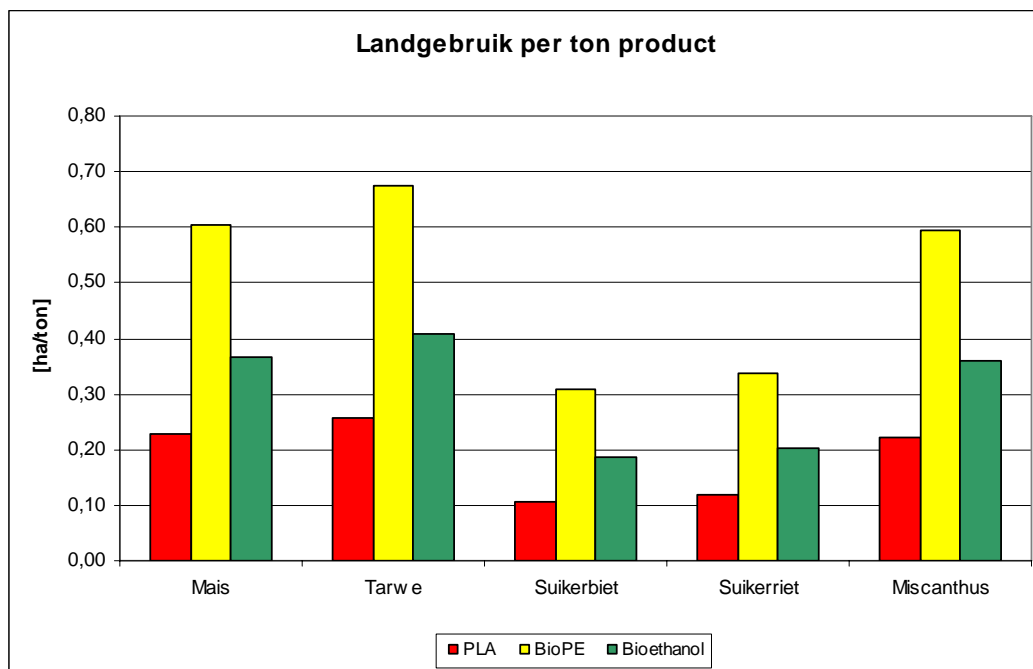
Wanneer alle co-producten worden omgezet in energie komt bioPE er als de meest aantrekkelijke optie uit. Dit wordt voor een belangrijk deel veroorzaakt door het feit dat bij de productie van bioPE een deel van de grondstof verloren gaat in de vorm van CO<sub>2</sub> en water (zie bladzijde 19). Er is dus veel gewas nodig voor een ton bioPE en daardoor komen er veel co-producten vrij. De co-producten worden in deze berekening omgezet in energie, en deze extra energie zorgt mede voor de goede score van bioPE als wordt gekeken naar het (vermeden) fossiele energiegebruik per ton product. Zoals we in de volgende stap zullen zien leidt een vergelijking per ingezette hectare landbouwgrond tot andere conclusies.



*Figuur 4.6. Vermeden gebruik van fossiele energie (NREU) per ton eindproduct, wanneer fossiele producten worden vervangen door hun biobased tegenhanger. Aangenomen is dat de huidige landbouwpraktijk wordt toegepast.*

#### Stap 4: De resultaten per hectare

Zoals al eerder opgemerkt variëren de opbrengsten fermenteerbare suiker per hectare sterk tussen de verschillende gewassen, waardoor voor de productie van 1 ton product zeer uiteenlopende arealen nodig zijn. In figuur 4.7 is het landgebruik per ton product uitgezet voor de verschillende gewassen en de drie biobased producten. Het is duidelijk dat voor de Nederlandse situatie suikerbiet het gewas is dat met het kleinste areaalbeslag een ton fermenteerbare suikers produceert. Daarnaast blijkt dat PLA het product is dat voor elk gewas het minste beslag legt op areaal. Dit komt omdat de PLA productie uit suiker een heel efficiënt



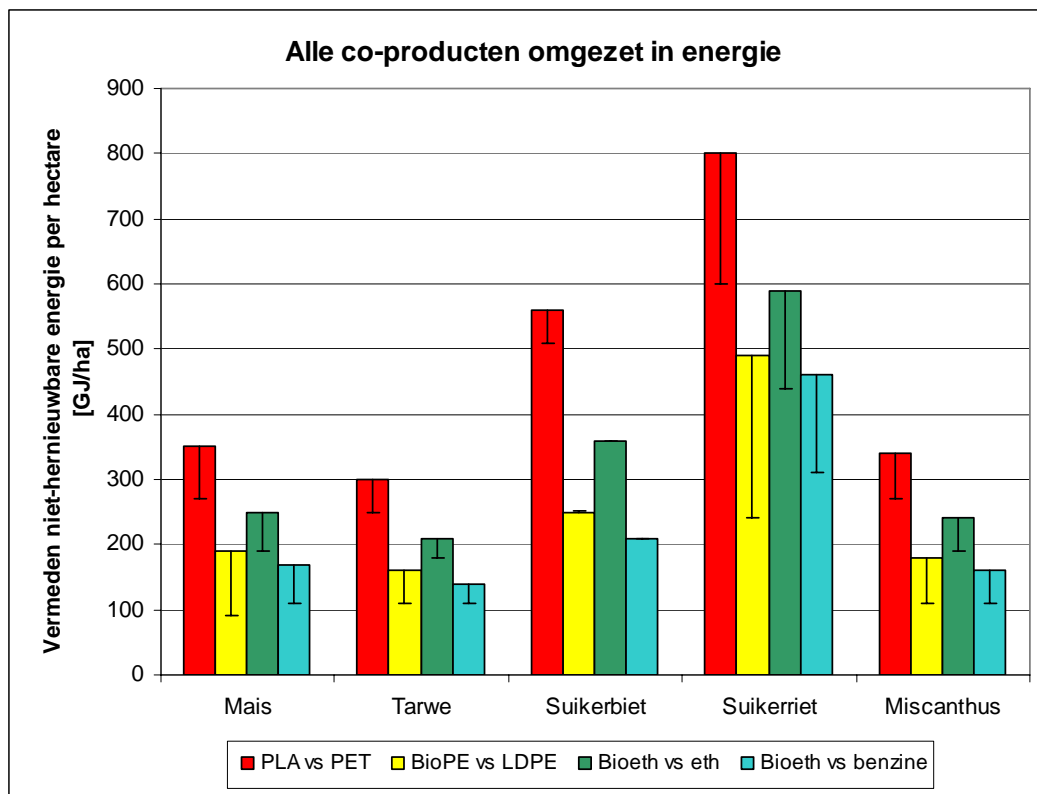
*Figuur 4.7. Landgebruik per ton eindproduct voor de verschillende gewassen en de drie eindproducten.*

proces is, er gaat weinig materiaal verloren tijdens de omzetting. In hoofdstuk 2 hebben we gezien dat bij de productie van bioethanol een significant deel van de suikers wordt omgezet in CO<sub>2</sub>, en dat bij de omzetting van ethanol naar bioetheen water vrijkomt. Maximaal 31% van de oorspronkelijke suiker komt uiteindelijk terecht in de bioPE, en dat heeft significante gevolgen voor de hoeveelheid benodigd areaal.

Over het algemeen wordt verondersteld dat de hoeveelheid beschikbare landbouwgrond een knelpunt zal gaan vormen in de toekomst. Een product dat per hectare gebruikte grond de grootste reductie in broeikasgasemissies en in het gebruik van niet-hernieuwbare energie geeft is in die situatie dus de meest duurzame optie. In figuur 4.8 staat het vermeden gebruik van niet-hernieuwbare energie in gigajoule per hectare wanneer de biobased producten hun fossiele tegenhangers zouden vervangen. Hierin zitten dus twee aspecten verwerkt: ten eerste de hoeveelheid hectares die nodig zijn om de grondstof voor het bioproduct te telen, en ten tweede het verschil in het energiegebruik bij de productie van het bioproduct ten opzichte van

de productie van het fossiele product. De bioproducten kosten minder energie om te produceren dan de fossiele producten. Het inzetten van het bioproduct in plaats van het fossiele product leidt dus tot minder energiegebruik en dus tot een positieve waarde in vermeden fossiele energie in figuur 4.8. Wanneer daarnaast het gewas waaruit het product is gemaakt een hoge opbrengst per hectare heeft leidt dit dus ook tot een hogere waarde in vermeden niet-hernieuwbare energie per hectare.

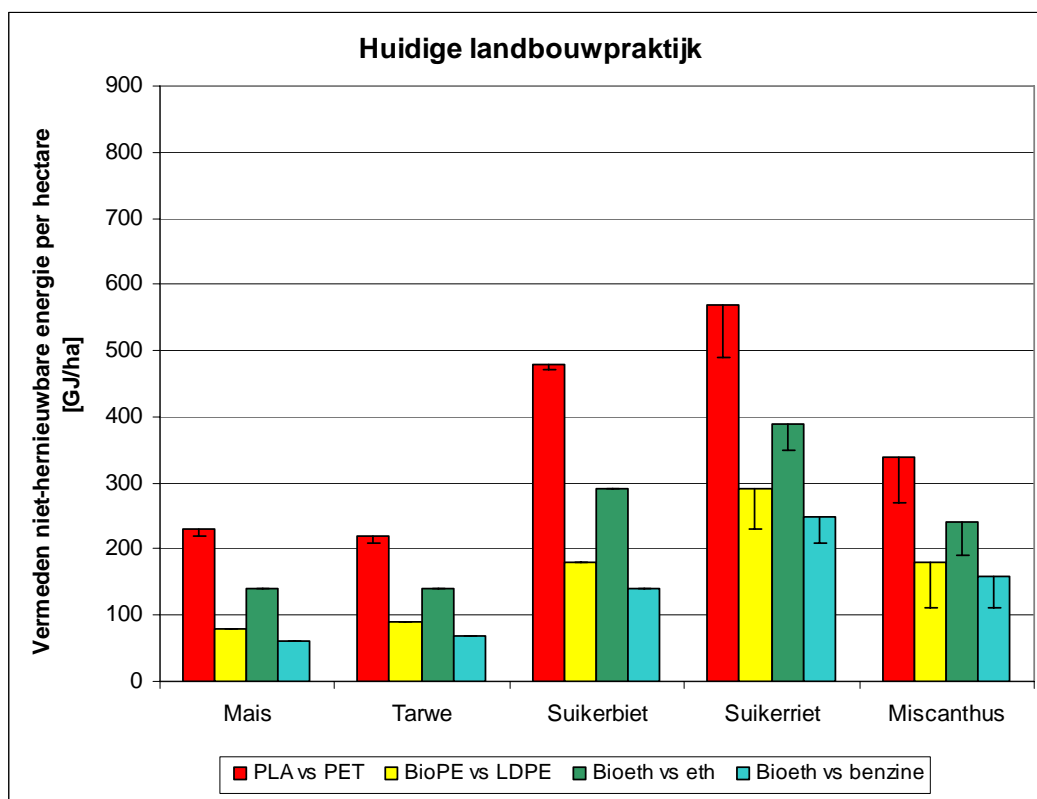
Het is duidelijk dat de hoge suikerproductie per hectare van de suikerbiet er toe leidt dat met dit gewas voor de Nederlandse situatie het meeste fossiele energiegebruik kan worden vermeden. Verder blijkt dat PLA tot de hoogste besparing per hectare leidt, analoog aan het



*Figuur 4.8. Vermeden gebruik van niet-hernieuwbare energie per hectare van de biobased producten wanneer deze hun fossiele tegenhanger vervangen. Bij de berekening is aangenomen dat alle co-producten worden omgezet in energie. De streepjes in de balken geven het energiegebruik in het geval de vrijkomende warmte niet kan worden gebruikt.*

lage areaalgebruik per ton PLA productie.

Bioethanol wordt in deze figuur vergeleken met zowel petrochemisch ethanol als met benzine. Het is duidelijk dat de toepassing van bioethanol in plaats van petrochemisch ethanol leidt tot een grotere verlaging van het gebruik van niet-hernieuwbare energie dan de toepassing als benzine. Dit komt omdat bij de vergelijking met benzine wordt meegenomen dat bioethanol een lagere verbrandingswaarde heeft dan benzine en je er dus minder kilometers op kunt rijden, je hebt er daarom meer van nodig om dezelfde afstand te rijden. Bij de vergelijking met petrochemisch ethanol zijn de beide stoffen chemisch identiek, petrochemisch ethanol kan vervangen worden door precies dezelfde hoeveelheid bioethanol.



*Figuur 4.9. Vermeden gebruik van niet-hernieuwbare energie per hectare van de biobased producten wanneer deze hun fossiele tegenhanger vervangen. Bij de berekening is de huidige landbouwpraktijk aangenomen. De streepjes in de balken geven het energiegebruik in het geval de vrijkomende warmte niet kan worden gebruikt.*

Daarnaast kost de productie van petrochemisch ethanol veel meer energie dan de productie van benzine, waardoor het ook relatief gunstiger is petrochemisch ethanol te vervangen door bio-ethanol.

In figuur 4.9 is het vermeden gebruik van niet-hernieuwbare energie weergegeven uitgaande van de huidige landbouwpraktijk. Het is duidelijk dat in dit geval de conclusies precies hetzelfde zijn. Voor Nederland is suikerbiet het gewas dat de meeste besparing kan opleveren en de productie van PLA is gunstiger dan de productie van bioPE en bioethanol. Het voordeel van PLA ten opzichte van de andere alternatieven is in deze situatie zelfs nog groter dan wanneer de co-producten worden omgezet in energie. Ook in dit geval is het gebruik van bioethanol als ethanol voordeliger dan het gebruik als transportbrandstof. Ook bioPE scoort onder beide situaties beter dan bioethanol als transportbrandstof.

## **Discussie**

Uit deze vergelijkingen komt eenduidig naar voren dat de producten uit hernieuwbare grondstoffen beter scoren wat betreft het gebruik van niet-hernieuwbare energie en de uitstoot van broeikasgassen dan hun fossiele tegenhangers. In deze studie is niet gekeken naar andere milieueffecten zoals vermisting en verzuring van het milieu, toxiciteit of fijnstof. Deze milieu-indicatoren kunnen eveneens met behulp van de LCA methodiek worden bestudeerd, maar dit is in deze studie (nog) niet gedaan. Voor biobased producten is een belangrijke reden om ze te ontwikkelen dat ze kunnen leiden tot een verlaging van de uitstoot van broeikasgassen en een vermindering van het energiegebruik, eventueel in combinatie met de productie van hernieuwbare energie. Broeikasgasemissie en het gebruik van niet-hernieuwbare energie zijn daarom belangrijke indicatoren, als deze niet goed uitkomen valt de belangrijkste reden voor de ontwikkeling van deze producten weg. Dat neemt niet weg dat ook de andere milieueffecten bestudeerd dienen te worden.

In deze studie is voor een deel van de berekeningen aangenomen dat alle co-producten van het land worden gehaald en worden omgezet in energie. Het oogsten van alle co-producten betekent echter over het algemeen dat het gehalte aan bodemorganische stof zal dalen. Dit is een ongewenste situatie. Er is nog veel discussie over hoeveel gewasresten precies achter moeten blijven om het gehalte aan bodemorganische stof op peil te houden. Ook zal moeten worden onderzocht of het digestaat uit het vergistingsproces (dat de gewasresten omzet in energie) kan dienen om een deel van de koolstof en andere mineralen terug te brengen op het land. Dit is één van de onderwerpen die op dit moment verder worden aangepakt. Het is

---

echter bemoedigend dat ook in het geval wordt uitgegaan van de huidige landbouwpraktijk, en de gewasresten dus deels achterblijven op het land, de biobased producten positief uitkomen ten opzichte van de fossiele tegenhangers, zij het dat de te behalen winst minder groot is.

De impact van landgebruik voor de productie van de fermenteerbare suikers is eveneens niet bestudeerd, dit is één van de aspecten waarop biobased grondstoffen fundamenteel verschillen van aardolie. Er is op dit moment veel discussie over hoe dit landgebruik op te nemen in duurzaamheidsanalyses en ook hoe om te gaan met de indirecte effecten van uitbreiding van de teelt van landbouwgewassen. Hierover is het laatste woord beslist nog niet gezegd.

Wat duidelijk wordt uit de figuren die zijn gepresenteerd in de voorgaande paragrafen, is dat de conclusie van de studie afhangt van de manier waarop de resultaten worden uitgedrukt, en wat als de meest limiterende parameter wordt gezien. Als de vermindering van het gebruik van niet-hernieuwbare energie belangrijk is, ongeacht de hoeveelheid areaal die hiervoor wordt ingezet, en alle co-producten worden ingezet, dan is voor alle gewassen behalve suikerbiet bioPE de beste optie (zie figuur 4.5 en 4.6). Wanneer de broeikasgasuitstoot belangrijk is, ongeacht van de hoeveelheid areaal die wordt ingezet, dan is in de situatie dat alle co-producten worden omgezet in energie bioPE de beste optie, maar uitgaande van de huidige landbouwpraktijk is voor Nederland PLA de beste optie (zie in de appendix figuur A.5 en A.6). Wanneer echter de hoeveelheid beschikbare landbouwgrond als limiterend wordt genomen is de vermeden uitstoot per hectare belangrijk. In dat geval is suikerbiet voor de Nederlandse situatie in alle onderzochte gevallen het meest aantrekkelijke gewas en PLA het meest aantrekkelijke product (figuren 4.8, 4.9, A.7 en A.8).

De les die hier uit getrokken kan worden is dat bij het interpreteren van duurzaamheidstudies het heel belangrijk is om goed na te gaan wat de uitgangspunten van de studie zijn en op welke basis de producten met elkaar vergeleken worden, omdat uitgaande van precies dezelfde data heel verschillende conclusies getrokken kunnen worden.

## 5. Conclusies

In deze studie is gekeken naar de besparing in het gebruik van fossiele energie en de verlaging in uitstoot van broeikasgassen die bereikt kunnen worden door producten te maken uit fermenteerbare suikers in plaats van uit fossiele grondstoffen (aardolie). Daarnaast zijn de biobased producten onderling vergeleken, waarbij onder andere de inzet van bioplastics (PLA en BioPE) en biobrandstof (bioethanol) tegen elkaar is afgezet. Uit de studie komen de volgende conclusies naar voren:

Voor alle onderzochte producten leidt vervanging van een fossiel product door een vergelijkbaar biobased product tot een verlaging van de uitstoot van broeikasgassen en van het gebruik van fossiele energie.

Produceren van bioplastics uit fermenteerbare suikers levert een grotere reductie in gebruik van fossiele energie en broeikasgasemissie dan het produceren van bioethanol voor brandstof uit fermenteerbare suikers. Bij de huidige landbouwpraktijk leveren zowel suikerbiet als tarwe en maïs een twee keer hogere besparing aan gebruik van fossiele energie wanneer ze worden ingezet voor bioplastics dan wanneer ze worden ingezet voor bioethanol productie. De fossiele plastics die door de bioplastics worden vervangen geven bij productie een relatief hoge uitstoot van broeikasgassen en gebruiken relatief veel fossiele energie, het vervangen van deze plastics levert dus relatief veel winst op.

De grootste reductie in het gebruik van fossiele energie en broeikasgasemissie per hectare levert het produceren van bioplastics met zoveel mogelijk behoud van functionele groepen (dat wil zeggen dat een zo groot mogelijk deel per suikermolecuul in het eindproduct terecht komt, en er dus weinig CO<sub>2</sub> en water vrijkomt tijdens de omzettingsreacties). Dit komt duidelijk naar voren bij de vergelijking tussen PLA en BioPE; de suikers die worden geproduceerd door de planten komen bij PLA voor een groter deel daadwerkelijk terecht in het eindproduct dan bij BioPE.

Biobased producten van suikers uit suikerbieten geven voor de Nederlandse situatie de grootste broeikasgasemissie reductie per hectare. Dit komt omdat suikerbiet in Nederland het gewas is dat de grootste hoeveelheid suikers per hectare produceert. Voor de productie van

een ton fermenteerbare suikers is met suikerbieten maar half zoveel areaal nodig als met Miscanthus of tarwe.

Als alle co-producten van de onderzochte gewassen worden verzameld en worden gebruikt voor energieproductie wordt het verschil tussen 1<sup>e</sup> generatie gewassen (tarwe en maïs) en 2<sup>e</sup> generatie gewassen (Miscanthus) verwaarloosbaar klein. Dit komt doordat bij 2<sup>e</sup> generatie gewassen altijd vrijwel het gehele gewas wordt geoogst en omgezet. Wanneer we maïs en tarwe op dezelfde wijze benaderen, komen we tot vergelijkbare resultaten. Vervolgonderzoek zal moeten uitwijzen wat de effecten zijn van het oogsten van meer co-producten op de bodemkoolstofvoorraad, en of er mogelijkheden zijn om eventueel verlies van bodemkoolstof te compenseren.

## Literatuur

Alle achtergronddata van de hier gepresenteerde studie, alsmede een uitgebreide literatuurlijst kunnen worden gevonden in:

Harriëtte Bos, Koen Meesters, Sjaak Conijn, Wim Corré, Martin Patel, Sustainability aspects of biobased applications; Comparison of different crops and products from the sugar platform, BO-12.05-002-008 (2010)

Deze studie is beschikbaar op [www.kennisonline.wur.nl](http://www.kennisonline.wur.nl).

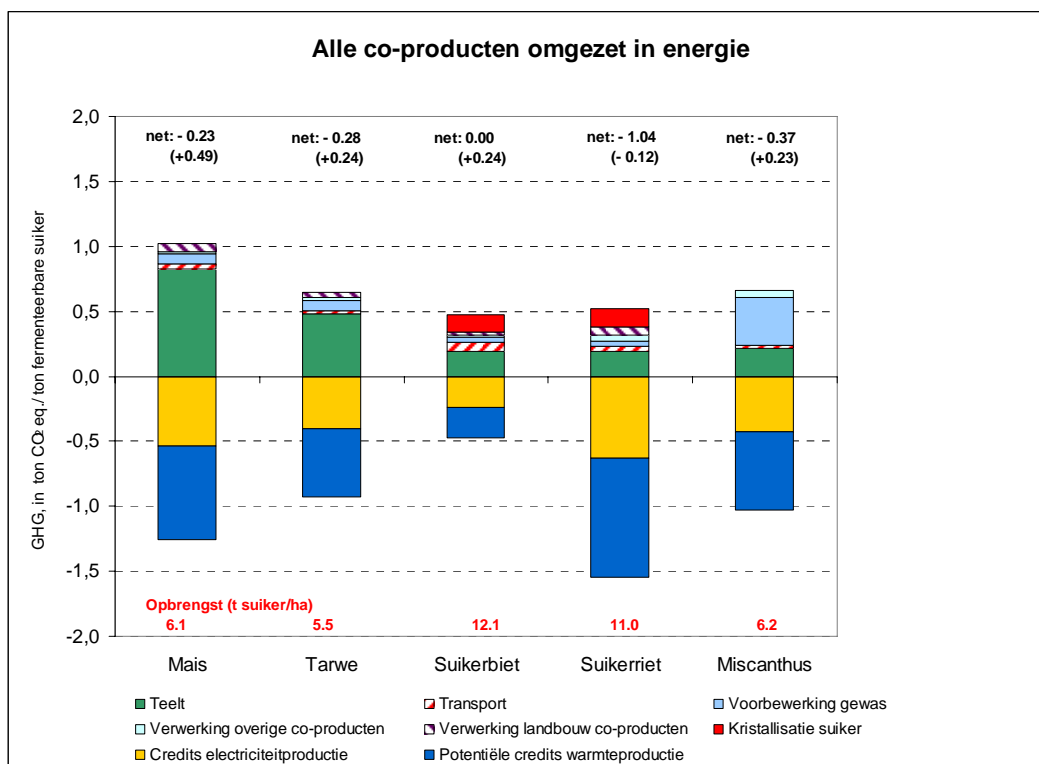
## Overzicht van gebruikte termen

Broeikasgasemissie	Uitstoot van broeikasgassen, dat kan CO <sub>2</sub> zijn, maar bijvoorbeeld ook methaan. Voor de berekeningen worden de andere broeikasgassen teruggerekend naar de hoeveelheid CO <sub>2</sub> die hetzelfde effect zou hebben.
Fermentatie	Het omzetten van een stof in een andere stof door gisten, bacteriën of schimmels.
Fermenteerbare suikers	Suiker of een mengsel van suikers die kunnen worden omgezet in bijvoorbeeld ethanol of zuur door fermentatie.
GHG	Green house gas, broeikasgas
Gigajoule	Een maat voor energie: een gigajoule is een miljard joule, 6 gigajoule is ongeveer de energie-inhoud van een barrel (ongeveer 160 liter) olie.
HDPE	High density polyEthylene, oftewel hoge dichtheid polyethyleen, dit is het type polyethyleen dat onder andere gebruikt wordt voor pijpen en afvalbakken.
LDPE	Low Density PolyEthylene, oftewel lage dichtheid polyethyleen, dit is het type polyethyleen dat wordt gebruikt voor zakken en folies.
Niet-hernieuwbare energie	Energie uit een fossiele bron, zoals aardolie, aardgas of kolen en/of kernenergie.
NREU	Non renewable energy use, het gebruik van niet hernieuwbare energie.
PET	PolyEthyleenTereftalaat, het kunststof waarvan PET flessen en fleecetruien worden gemaakt
PLA	PolyLactic Acid oftewel polymelkzuur
Polyethyleen	De meest gebruikte kunststof, wordt gemaakt uit aardolie en wordt gebruikt voor plastic zakken en folies, landbouwplastic, buizen, afvalbakken, enzovoort.
Polymelkzuur	Biokunststof die wordt gemaakt uit een hernieuwbare bron. Wordt al vele jaren gebruikt voor medisch hecht draad en botplaten, maar wordt tegenwoordig ook toegepast in zakken, bakjes, flessen en andere voorwerpen. Is composteerbaar.

## Appendix, de (vermeden) broeikasgasuitstoot

### Stap 1: De productie van fermenteerbare suikers

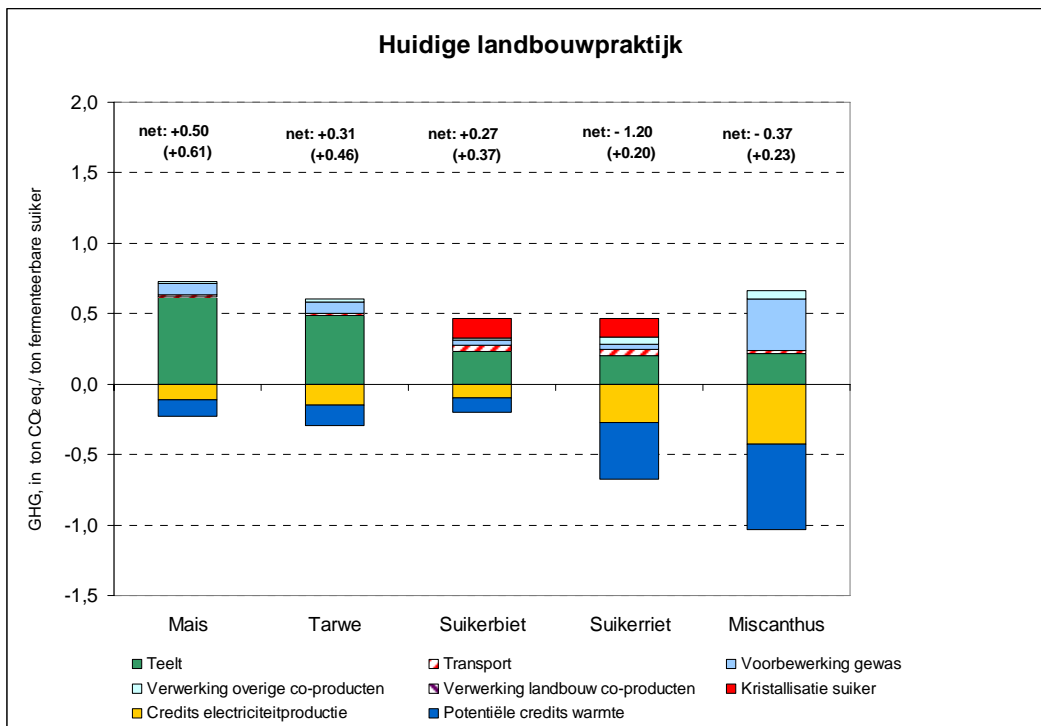
De broeikasgasbalans van de productie van de fermenteerbare suikers is weergegeven in figuur A.1. Boven de nullijn staat de uitstoot die wordt veroorzaakt door de teelt en verwerking, onder de nullijn staat de uitstoot die wordt vermeden doordat de energie uit de co-



*Figuur A.1. De uitstoot van broeikasgassen (GHG) in CO<sub>2</sub> equivalenten per ton fermenteerbare suiker, voor de productie van fermenteerbare suikers uit de verschillende gewassen. De net (netto) waarden boven de balken geven de netto waarde van broeikasgasemissie. Een negatieve waarde duidt op vermeden broeikasgasemissie. De getallen tussen haakjes geven de waarde in het geval de warmte niet kan worden gebruikt.*

producten fossiele energie vervangt. Analoog aan het niet-hernieuwbare energiegebruik zijn ook hier de verschillen tussen de gewassen vrij groot. De grootste bijdrage aan de uitstoot wordt geleverd door de teelt en de voorbereiding van het gewas. Bij suikerriet en suikerbiet vormt ook de energie nodig voor kristallisatie van de suiker een grote bijdrage. Als alle warmte kan worden gebruikt leidt de productie van fermenteerbare suikers tot een reductie in broeikasgasuitstoot, behalve bij suikerbiet, waarvoor de balans op 0 uitkomt. Als de warmte niet kan worden gebruik levert alleen suikerriet een netto reductie in broeikasgasuitstoot op.

In figuur A.2 staat de broeikasgasuitstoot in het geval de huidige landbouwpraktijk wordt toegepast. In dit geval is het verschil tussen suikerbiet en tarwe en maïs veel minder groot.

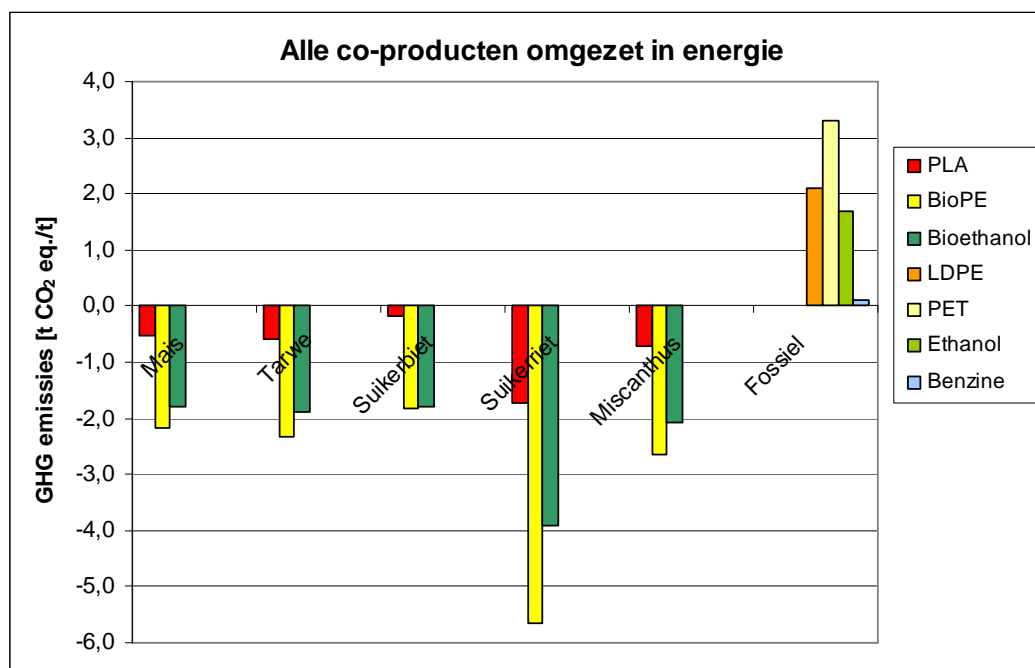


*Figuur A.2. De uitstoot van broeikasgassen (GHG) in CO<sub>2</sub> equivalenten per ton fermenteerbare suiker, voor de productie van fermenteerbare suikers uit de verschillende gewassen, in het geval van de huidige landbouwpraktijk. De net (netto) waarden boven de balken geven de netto waarde van broeikasgasemissie. Een negatieve waarde duidt op vermeden broeikasgasemissie. De getallen tussen haakjes geven de waarde in het geval de warmte niet kan worden gebruikt.*

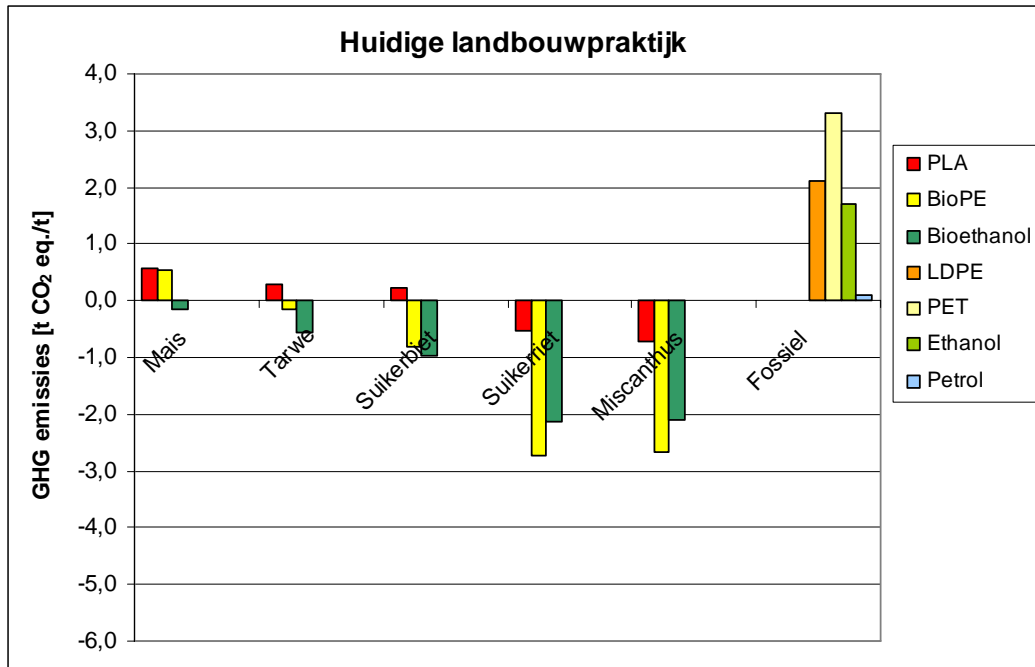
Dat komt omdat tarwe en maïs veel co-producten geven die kunnen worden omgezet in energie, wat een voordeel is bij de eerste berekening (figuur A.1). Suikerbiet geeft juist meer biomassa die kan worden omgezet in suikers en levert dus relatief meer eindproduct ten opzichte van de hoeveelheid co-producten. De opbrengst aan fermenteerbare suikers per hectare staat onderin figuur A1. Deze is voor beide landbouwpraktijken gelijk. Suikerbiet is voor de Nederlandse situatie het gewas dat de meeste opbrengst aan suikers per hectare geeft.

## Stap 2: De drie eindproducten

In figuur A.3 is de broeikasgasemissie per ton geproduceerd product weergegeven, uitgaande van het omzetten van alle co-producten in energie. Ook in het geval van de broeikasgasemissie scoren alle biobased producten beter dan de fossiele alternatieven. Net



*Figuur A.3. Broeikasgasemissies in ton CO<sub>2</sub> equivalenten per ton product bij de productie van de drie biobased producten PLA, bioPE en bio-ethanol, en van de vier fossiele tegenhangers LDPE, PET, ethanol en benzine. Voor de productie van de bioproducten is aangenomen dat alle co-producten worden omgezet in energie.*



*Figuur A.4. Broeikasgasemissies bij de productie van de drie biobased producten PLA, bioPE en bio-ethanol, en van de vier fossiele tegenhangers LDPE, PET, ethanol en benzine, uitgedrukt in equivalenten CO<sub>2</sub> per ton product. Voor de productie van de bioproducten is de huidige landbouwpraktijk aangenomen.*

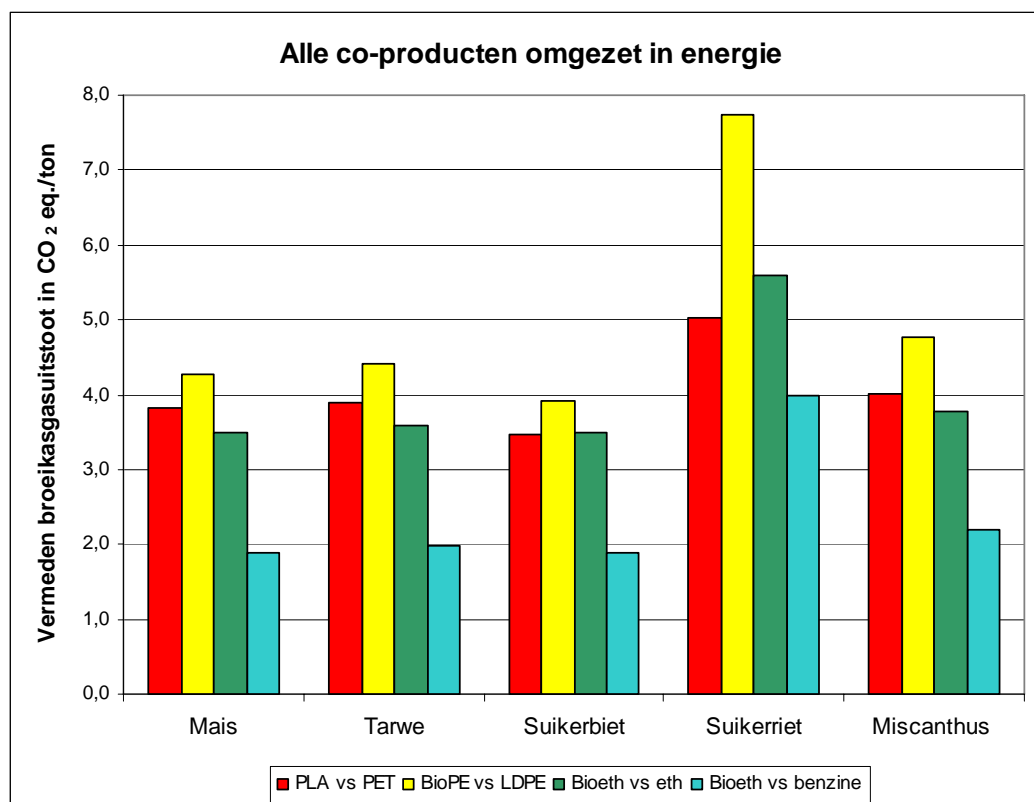
als voor het gebruik van niet-hernieuwbare energie komt ook uit deze berekening bioPE naar voren als optie die de hoogste vermeden broeikasgasemissie levert (het laagste getal in de figuur), gevolgd door bioethanol. Doordat de bijproducten worden omgezet in energie die in het geval van elektriciteit wordt geleverd aan het net, worden fossiele brandstoffen vervangen en leidt dit dus tot vermijding van de broeikasgasuitstoot die deze fossiele brandstoffen zouden veroorzaken (GHG emissie kleiner dan 0). Voor de Nederlandse situatie komt uit deze berekening Miscanthus naar voren als het gewas wat de meeste besparing oplevert, maar maïs en tarwe presenteren bijna even goed. Door het gebruik van de co-producten is het verschil tussen het 2<sup>e</sup> generatie gewas (Miscanthus) en de 1<sup>e</sup> generatie gewassen (maïs en tarwe) vrijwel nihil geworden.

Figuur A.4 geeft de broeikasgasemissie per ton geproduceerd product wanneer de huidige landbouwpraktijk wordt aangenomen. Ook in dit geval scoren de biobased producten beter dan de fossiele counterpart waarmee ze worden vergeleken. Omdat nu niet meer alle co-

producten worden omgezet in energie is de (vermeden) broeikasgasemissie lager. Voor de Nederlandse situatie komt Miscanthus als beste gewas naar voren.

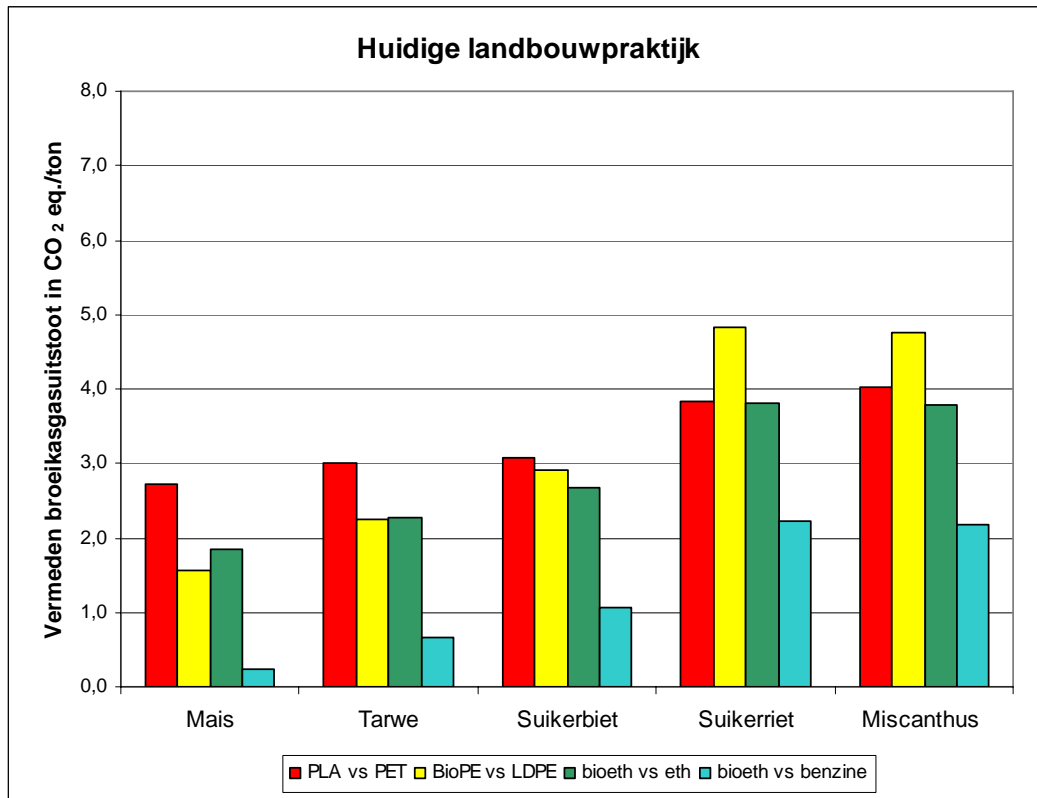
### Stap 3: Vermeden energiegebruik en broeikasgasuitstoot

In figuur A.5 en A.6 staat de vermeden uitstoot van broeikasgassen per ton geproduceerd eindproduct, respectievelijk voor het geval dat alle co-producten worden omgezet in energie en voor de huidige landbouwpraktijk. In dit geval wordt het absolute verschil tussen de resultaten voor het fossiele product en de resultaten voor het bioproduct bepalend voor de



*Figuur A.5. Vermeden uitstoot van broeikasgas in CO<sub>2</sub> equivalenten per ton eindproduct, wanneer fossiele producten worden vervangen door hun biobased tegenhanger. Aangenomen is dat alle co-producten worden omgezet in energie.*

uitkomst. Doordat bij de productie van PET, de fossiele tegenhanger van PLA, relatief veel



*Figuur 4.6. Vermeden uitstoot van broeikasgas in CO<sub>2</sub> equivalenten per ton eindproduct, wanneer fossiele producten worden vervangen door hun biobased tegenhanger. Aangenomen is dat de huidige landbouwpraktijk wordt toegepast.*

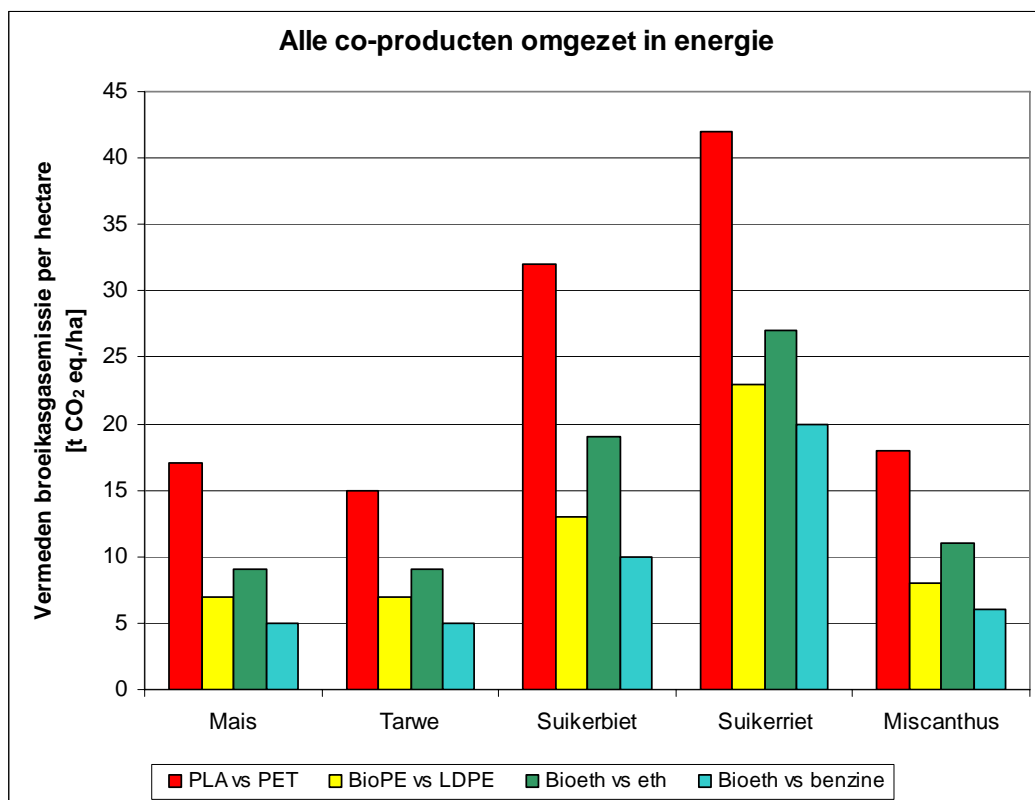
broeikasgas wordt uitgestoten (zie figuur A.3) scoort PLA in deze vergelijking veel beter dan in de vorige paragraaf. Bij de huidige landbouwpraktijk en met maïs als grondstof is het zelfs het meest aantrekkelijke alternatief. Wanneer alleen naar de absolute uitstoot van broeikasgas wordt gekeken, scoort PLA in vrijwel alle gevallen veel slechter dan bioPE en bioethanol (figuur A.3 en A.4).

Interessant is ook de vergelijking van bioethanol met benzine ten opzichte van de vergelijking van bioethanol met petrochemisch ethanol. Bij de productie van benzine wordt relatief weinig broeikasgas uitgestoten (figuur A.3) en daarom leidt het vervangen van benzine door bioethanol tot relatief weinig vermeden broeikasgasuitstoot. Bioethanol inzetten voor benzine is voor alle gewassen de minst aantrekkelijke optie. Wanneer bioethanol echter wordt

ingezet in plaats van petrochemisch ethanol, is de hoeveelheid vermeden broeikasgasuitstoot veel hoger. Dit komt omdat de productie van petrochemisch ethanol veel meer energie kost dan de productie van benzine.

#### Stap 4: De resultaten per hectare

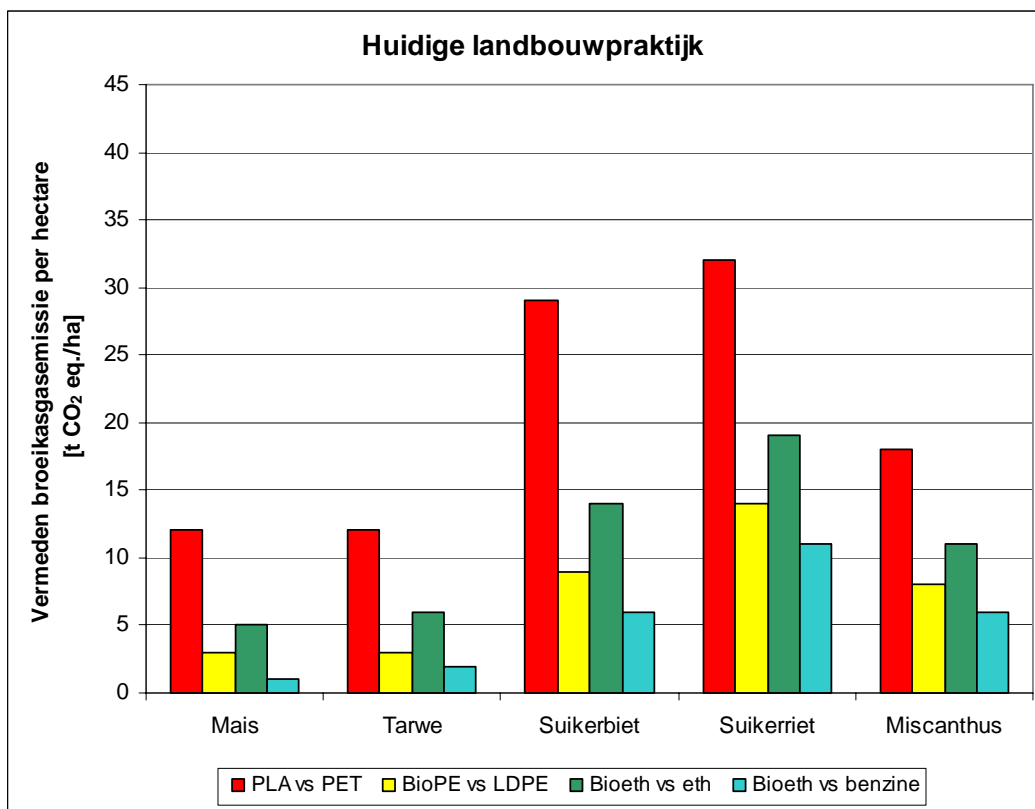
In figuur A.7 wordt de vermeden broeikasgasemissie per hectare voor de verschillende producten weergegeven in het geval alle co-producten worden omgezet in energie. De conclusies zijn hetzelfde als voor het vermeden gebruik van niet-hernieuwbare energie, suikerbiet is voor Nederland het meest aantrekkelijke gewas en PLA is het product dat



*Figuur A.7. Vermeden uitstoot van broeikasgas per hectare van de biobased producten wanneer deze hun fossiele tegenhanger vervangen. Bij de berekening is aangenomen dat alle co-producten worden omgezet in energie.*

resulteert in de hoogste vermeden broeikasgasemissie. Ook in dit geval komt ethanol als transportbrandstof het minst positief uit de vergelijking en scoort bioethanol als vervanger voor petrochemisch ethanol net iets beter dan bioPE.

Ten slotte staat in figuur A.8 de vermeden broeikasgasemissie per hectare voor de verschillende producten bij de huidige landbouwpraktijk. Ook uit deze figuur volgen dezelfde conclusies, suikerbiet is het meest aantrekkelijke gewas en PLA is het meest aantrekkelijke product.



*Figuur A.8. Vermeden uitstoot van broeikasgas per hectare van de biobased producten wanneer deze hun fossiele tegenhanger vervangen. Bij de berekening is de huidige landbouwpraktijk aangenomen.*

## Colofon

Duurzaamheid van biobased producten, energiegebruik en broeikasgasemissie van producten met suikers als grondstof.

Harriëtte Bos, Sjaak Conijn, Wim Corré, Koen Meesters, Martin Patel

Februari 2011

© Wageningen UR Food & Biobased Research

ISBN 978-90-8585-902-4

Druk: Propress, Wageningen

Biobased Products

Wageningen UR Food & Biobased Research

Bornse Weilanden 9

Postbus 17

6700 AA Wageningen

Internet: [www.fbr.wur.nl](http://www.fbr.wur.nl)

E-mail: [info.fbr@wur.nl](mailto:info.fbr@wur.nl)

**Zijn er relaties die u met deze publicatie een plezier kunt doen dan zouden we dat graag van u vernemen.**

De publicatie is mogelijk gemaakt door het beleidsondersteunend onderzoeksthema Biobased Economy (BO-12.05-002), gefinancierd door het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw & Innovatie. Het is de elfde in een reeks publicaties over het gebruik van agrogrondstoffen en nevenstromen in veilige en gezonde producten voor consumenten- en industriële markten.