



Duurzaamheidsaspecten van de teelt en verwerking van energiegewassen in Zuidoost Nederland

J.G. Conijn & W.J. Corré





Duurzaamheidsaspecten van de teelt en verwerking van energiegewassen in Zuidoost Nederland

J.G. Conijn & W.J. Corré

© 2009 Wageningen, Plant Research International B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Plant Research International B.V.

Exemplaren van dit rapport kunnen bij de (eerste) auteur worden besteld. Bij toezending wordt een factuur toegevoegd; de kosten (incl. verzend- en administratiekosten) bedragen € 50 per exemplaar.

Plant Research International B.V.

Adres : Droevendaalsesteeg 1, Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 48 60 01
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : info.pri@wur.nl
Internet : www.pri.wur.nl

Inhoudsopgave

	pagina
Voorwoord	1
Samenvatting	3
1. Inleiding	9
2. Onderzoekmethode	11
2.1 Systeemvergelijking	11
2.2 Gewas-energieketens	11
2.3 Duurzaamheidthema's	12
2.4 Verbeteringen	13
3. Standaard situaties	15
3.1 Groene braak	15
3.2 Winterkoolzaad	16
3.3 Energiemaïs	17
3.4 Suikerbiet voor ethanol	18
3.5 Suikerbiet voor vergisting	19
4. Effecten van verbeteringen	21
4.1 Winterkoolzaad	21
4.2 Energiemaïs	22
4.3 Suikerbiet voor ethanol	23
4.4 Suikerbiet voor vergisting	24
5. Discussie	25
5.1 Algemeen	25
5.2 Resultaten vergeleken	25
5.3 Referentie landgebruik	25
5.4 Bodemorganische stof	26
5.5 Innovaties	28
5.6 N ₂ O emissie uit de bodem	28
5.7 Verdroging	28
5.8 Rendement BKG emissie reductie	29
5.9 Attributie of systeemuitbreiding?	29
Referenties	31
Bijlage I. Omschrijving en kengetallen van teelten/ketens en overige berekeningen	7 pp.
Bijlage II. Balansen van energie en broeikasgassen	8 pp.

Voorwoord

Het project 'Duurzaamheidsvragen gewassen' is uitgevoerd binnen het kader van het LNV programma Beleids-ondersteunend Onderzoek, cluster 'Economisch perspectiefvolle agroketens' (projectnummer B0-03-007-009). De begeleidingcommissie bestond uit Peter Besseling (LNV-DK Den Haag), Jan van Esch (LNV-DK Den Haag) en Hariëtte Bos (Wageningen UR-AFSG). In het project wordt gebruik gemaakt van rekeninstrumenten die ontwikkeld zijn in het KB-10 cluster 'Biobased Economy' (KB-10-002-301; 'LCA Instrumentarium voor Energiegewassen').

Samenvatting

Inleiding

In dit rapport worden resultaten gepresenteerd van berekeningen van de effecten van teelt en verwerking van energiegewassen van vier verschillende ketens (Tabel 1). De duurzaamheidsaspecten die aan bod komen zijn: vermindering fossiel energiegebruik en broeikasgas (BKG) emissie, behoud organische stof in de bodem, nitraatuitspoeling uit de bodem en gebruik niet-hernieuwbare fosfaatmeststof. Er is aangenomen dat de gewassen worden geteeld op akkerbouwbedrijven in Zuidoost Nederland, waarbij het energiewas in de plaats komt van groene braak (= referentie landgebruik) op 10% van het totale bedrijfsareaal.

Tabel 1. De gewas-bio-energieketens van dit rapport.

Gewas	Hoofdproduct	Bijproduct (optioneel)
Winterkoolzaad	biodiesel	elektriciteit door verbranding van stro, koolzaadmeel en glycerine
Energiemaïs	elektriciteit na vergisting	nvt
Suikerbiet_eth	ethanol	elektriciteit na vergisting van pulp en blad
Suikerbiet_elekt	elektriciteit na vergisting biet met blad	nvt

Methodologie

Met behulp van de geoogste biomassa van de gewassen en de verwerking ervan wordt hernieuwbare energie geproduceerd waarmee fossiele energievormen vervangen worden. Over de hele keten van zaad tot aflevering van de energie aan de gebruiker ('well-to-tank') zijn energie en BKG balansen opgesteld en zijn de effecten van de teelten op de bodem gekwantificeerd. Berekeningen zijn uitgevoerd met E-CROP, een rekenmodel voor energiegewassen (Corré & Conijn, 2008). In de berekeningen zijn hierbij indirecte effecten van gewasresten apart meegenomen als gevolg van verschillen in beschikbaarheid van nutriënten (nawerking en bemestende waarde van gewasresten) en in bodemorganische stofbalans (organische stofinput van gewasresten).

Er zijn twee rekenmethodes gehanteerd waarvan de resultaten in dit rapport worden vergeleken. De eerste methode betreft de '*Attributie*' methode waarbij rest- of bijproducten in de keten een deel van het energieverbruik en BKG emissie tijdens teelt en verwerking toegekend krijgt via een verdeelsleutel op basis van de energie-inhouden van hoofd-, bij- en restproducten. Het overblijvende deel komt dan op conto van het hoofdproduct (bijvoorbeeld ethanol of biodiesel). In de tweede methode, '*Energie*', wordt een systeemuitbreiding toegepast waarin de bij- en restproducten worden verwerkt tot bruikbare energievormen (bijvoorbeeld elektriciteit). Deze hernieuwbare energie vervangt dan fossiele energie en dit wordt bij de totale energie en BKG balans verrekend.

Innovaties

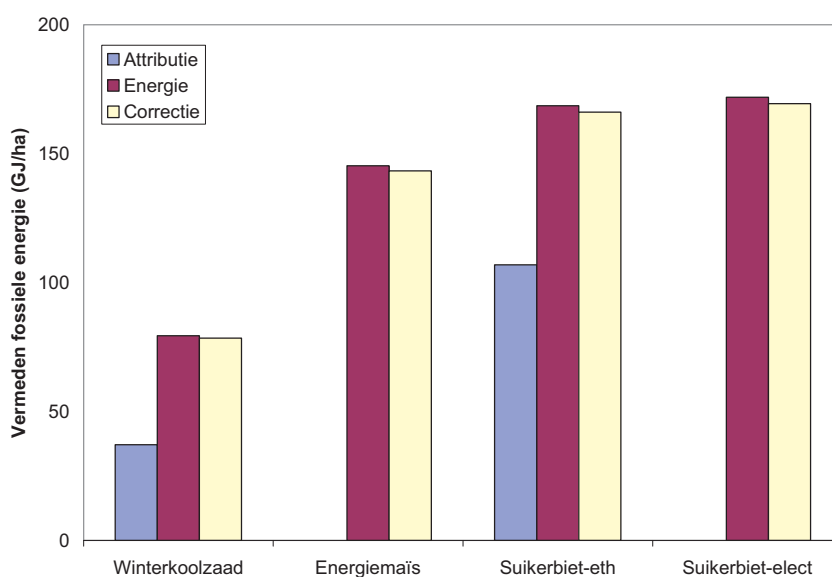
In dit rapport worden ook uitkomsten getoond van een aantal mogelijke innovaties in de keten die tot een verbetering van het resultaat over de hele keten kunnen leiden. Deze extra berekeningen zijn in de eerste plaats bedoeld als gevoeligheidsanalyse, waarmee kan worden onderzocht welke aanpassingen in de keten een duidelijke verbetering kunnen opleveren. Het kan hierdoor richting geven aan onderzoek naar en realisatie van verbeteringen van de keten in de toekomst. Er zijn vier categorieën aan verbeteringen doorgerekend die gezamenlijk de hele keten omvatten:

(1) verlaging van energieverbruik, (2) verlaging van N₂O emissie, (3) verhoging van gehalten aan inhoudstoffen en van verwerkingsefficiëntie en (4) verbetering van input-output relaties bij de teelt.

Resultaten en conclusies

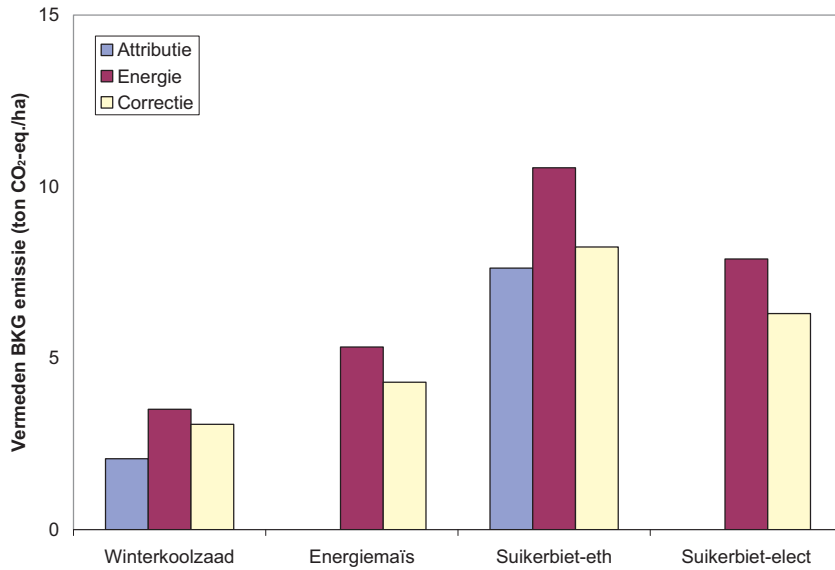
Onderstaande conclusies zijn uiteraard gebaseerd op de resultaten van het onderzoek dat in dit rapport beschreven is. Aangezien bij het onderzoek keuzes gemaakt zijn (zoals groene braak als referentie, Zuidoost Nederland als gebied, gebruik van bijproducten alleen voor energie, enz.), is de reikwijdte van de conclusies in principe beperkt. Voor andere keuzes zijn aanvullende berekeningen nodig. Daarnaast zijn er ook onzekerheden bijvoorbeeld in de landbouw ten aanzien van de aangenomen opbrengsten en bemestingsniveaus in de toekomst waardoor conclusies anders uit kunnen vallen. Toch is getracht om zoveel mogelijk algemeen geldende conclusies te trekken uit dit onderzoek. Dat houdt in dat de situatie en mogelijkheden voor innovatie van specifieke gewas-energieketens bij deze conclusies onderbelicht blijven. Daarvoor wordt verwezen naar de onderliggende hoofdstukken en wellicht zouden ook nieuwe berekeningen behulpzaam zijn voor specifieke oplossingen per keten. De volgende 'algemene' conclusies zijn getrokken:

Voor alle energiegewassen en scenario's uit deze studie zijn het netto vermeden gebruik van fossiele energie en de netto vermeden broeikasgasemissie ruim positief. De effecten van de nawerking van gewasresten (via de bemestende waarde) op de balansen van energie en broeikasgassen waren relatief klein, maar de correctie voor de verschillen in organische stof in de bodem op de BKG balans bleek wel significant (zie Figuren 1 en 2).



Figuur 1. De netto vermeden fossiele energie van de rekenscenario's 'Attributie' en 'Energie' en voor het rekenscenario 'Energie' ook de waarden gecorrigeerd voor het totale effect van verschillen in nawerking en organische stofaanvoer van gewasresten (zie Correctie).

De berekende verschillen in koolstofopslag in de bodem als gevolg van de vervanging van het referentie landgebruik (in deze studie: groene braak) door een energiegewas bleken kwantitatief belangrijk voor de BKG balans en zorgden ervoor dat in deze studie de netto BKG emissiereductie met gemiddeld 22% verlaagd werd. Dit effect is nog niet aanwezig in huidige CO₂-tools. Het is de verwachting dat op gronden met minder zand (meer klei/leem) dit effect groter zal zijn (bijvoorbeeld bij gronden met ca. 50% zand kan de verlaging oplopen tot 50%).



Figuur 2. De netto vermeden BKG emissie van de rekenscenario's 'Attributie' en 'Energie' en voor het rekenscenario 'Energie' ook de waarden gecorrigeerd voor het totale effect van verschillen in nawerking en organische stofaanvoer van gewasresten (zie Correctie).

In deze studie is gekozen voor groene braak als referentielandgebruik en de resultaten worden hierdoor beïnvloed. Echter, er is geen intrinsieke rechtvaardiging dat deze referentie beter is dan alternatieven, omdat het land in principe voor meerdere functies gebruikt kan worden, bijvoorbeeld voor natuurontwikkeling of voedselproductie. Andere keuzes zullen zeker andere resultaten opleveren, die op basis van het onderzoek in dit rapport niet aangegeven kunnen worden.

De verschillen in de resultaten van de scenario's 'Attributie' en 'Energie' bleken aanzienlijk (zie bij winterkoolzaad en suikerbiet-eth in Figuren 1 en 2). Dit wijst erop dat de rekenmethode met attributie niet geschikt is om de werkelijke effecten van een verandering in een systeem met meerdere (bij)producten goed in te schatten in tegenstelling tot de methode van systeemuitbreiding zoals gehanteerd is bij 'Energie'. Nader onderzoek is echter nodig om uit te zoeken hoe groot de verschillen zijn indien andere keuzes gemaakt zouden worden ten aanzien van het gebruik van bijproducten dan in deze studie gedaan is (scenario 'Energie': 100% naar energie). Daarbij moet tevens onderzocht worden in hoeverre een realistisch systeem van substitutie van bijproducten in een systeemuitbreiding nog hanteerbaar is.

Van de onderzochte aanpassingen die tot verbeteringen in de keten leiden, vormden de landbouwgerelateerde innovaties (in gewasproductie, stikstofbemesting en bodememissies) een belangrijke groep. Verbeteringen hierin leiden tot relatief grote effecten op de resultaten van de energie of de BKG balans van de hele keten. Aan de andere kant laat het ook zien dat betrouwbare gegevens over de landbouw (inputs en outputs) van groot belang zijn voor een goede berekening van energie- en broeikasgasbalansen in de keten.

Verbeteringen van onderdelen van de keten hebben verschillende effecten op de fossiele energie en BKG balans (zie Tabel 2). Een aantal aanpassingen had een vergelijkbaar effect op alle ketens (bijvoorbeeld nauwelijks effect van verlaging transportenergie en een groot effect van verhoging gewasproductie), terwijl bij de overige maatregelen de effecten varieerden afhankelijk van de teelt en verwerking van de biomassa in de verschillende gewas-energieketens.

Tabel 2. *Samenvatting van de effecten van verbeteringen in teelt en verwerking op de netto vermeden fossiele energie en BKG emissie (0 = klein, + = matig, ++ = hoog).*

	Vermeden fossiele energie	Vermeden BKG emissie
Landbouwdiesel, transportenergie	0	0
Energieverbruik bij verwerking ¹	0/+	0/+
N ₂ O emissie (bij productie kunstmest en uit de bodem) ²	nvt	0/+
N-kunstmestgift ³	0	0/+
Gewasproductie	++	++

¹ *Bij vergisten van biomassa is het effect klein in tegenstelling tot de situatie bij verwerking tot biodiesel of ethanol.*

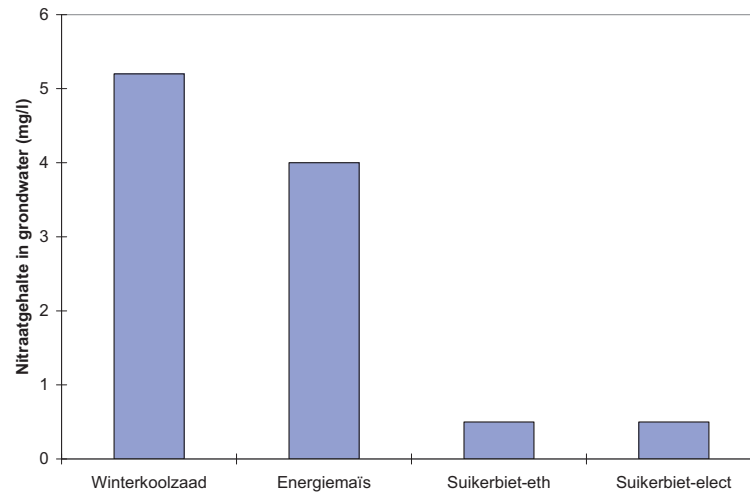
² *Score is afhankelijk van mate van N inputgebruik in de standaard situatie en de verhouding tussen gebruik digestaat en N-kunstmest.*

³ *N-kunstmestgift heeft nauwelijks effect op de energiebalans, en het effect op de BKG balans hangt af van de verhouding tussen N gift en gewasopbrengst.*

Het gebruik van het broeikasgasrendement (percentage vermeden broeikasgasemissie ten opzichte van de fossiele keten bij transportbrandstoffen) zoals voorgesteld in de meeste CO₂ tools (zie bijvoorbeeld Cramer *et al.*, 2007) kan leiden tot contraproductieve situaties. De berekeningen gaven namelijk aan dat de relatie tussen dit rendement en de hoeveelheid vermeden broeikasgasemissie per ha niet consistent is. Een hoger rendement gaat soms samen met een lagere reductie per ha en omgekeerd. Zo wordt bijvoorbeeld het rendement verhoogd bij het gebruik van suikerbieten met een lager suikergehalte en dat zou tot gevolg hebben dat er minder ethanol geproduceerd wordt en de reductie van broeikasgassen per ha lager wordt. Om de mate van duurzaamheid met betrekking tot de BKG balans aan te geven, zijn andere indicatoren nodig.

Het bedrijfsgemiddelde bodemorganische stofgehalte verandert slechts in geringe mate door de vervanging van groene braak met de energiegewassen uit deze studie, omdat het verschil in organische stofaanvoer tussen groene braak en een energiegewas relatief klein is ten opzichte van de andere organische stofbronnen op het bedrijf en bovendien in de berekeningen op slechts 10% van het areaal van toepassing is.

De vervanging van groene braak door een energiegewas leidt tot een verhoging van het nitraatgehalte in het grondwater onder (droge) zandgronden bij winterkoolzaad en energiemais (bij suikerbiet was de verhoging door afvoer van het blad zeer gering; zie Figuur 3). Dit lijkt een onvermijdelijke uitruil (trade-off), indien het energiegewas ten behoeve van een optimale gewasproductie met voldoende stikstof bemest wordt. Indien deze verhoging niet toelaatbaar is, zal de efficiëntie waarmee gewassen stikstof opnemen verbeterd moeten worden om de uitspoeling te verminderen. Dit kan dan nadelige consequenties hebben op de gewasopbrengst.

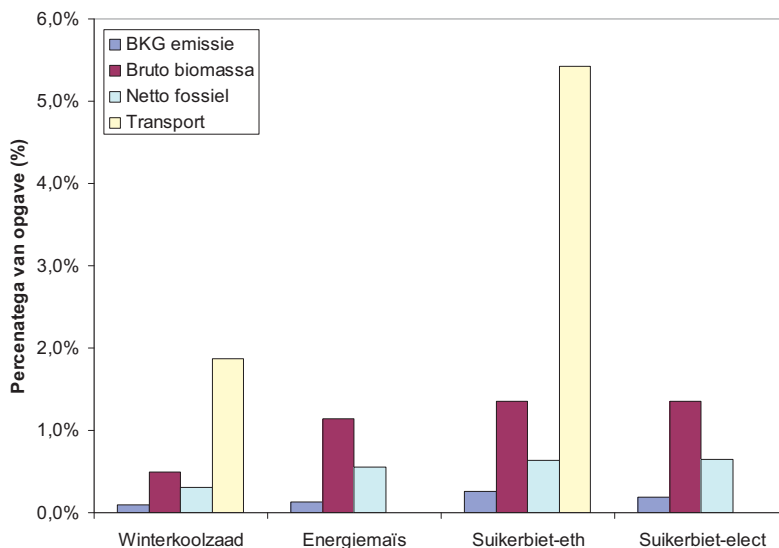


Figuur 3. De geschatte verhoging van het bedrijfsgemiddelde nitraatgehalte in het grondwater bij de vervanging van groene braak door een energiegewas (toegestane EU-norm = 50 mg nitraat/l).

Zolang de nutriënten in de verbrandingsas niet worden hergebruikt in de landbouw, leidt elektriciteitsproductie uit biomassa door verbranding tot een verlies van fosfaat voor de landbouw. Dit is ongewenst in het kader van de beschikbaarheid van fosfaatmeststoffen op basis van eindige niet-hernieuwbare bronnen. Gebruik van bijproducten voor vergisting of als veevoer kent dit bezwaar niet, als digestaat of dierlijke mest weer hergebruikt worden in de landbouw.

Bij vergisting moet het risico op weglekken van methaan zorgvuldig beteugeld worden omdat methaan een veel sterker broeikasgas is in vergelijking met CO₂. Bij de biogas/elektriciteitsproductie van energiemaïs op de boerderij gaat 25% van de netto vermeden BKG emissie verloren door CH₄ emissie.

Door het relatief hoge energiegebruik per ha in Nederland en de geringe vastlegging van zonne-energie in oogstbare biomassa van gewassen (ca. 0,5 – 1,0%), blijven de bijdragen van Nederlandse energiegewassen aan klimaatgerelateerde doelstellingen zeer beperkt (zie Figuur 4), ook na het realiseren van innovaties, zoals voor deze studie zijn doorgerekend.



Figuur 4. De bijdragen van de gewas-bio-energieketens aan een aantal opgaven die in Nederland zijn gesteld voor 2020 op het gebied van klimaat en energie (zie Tabel 3; Brouwer, 2009). Berekeningen zijn gebaseerd op 20.000 ha energiegewas en de resultaten van rekenscenario 'Energie', gecorrigeerd voor verschillen in nawerking en organische stofaanvoer.

Tabel 3. De waarden die gebruikt zijn om de bijdragen van gewas-bio-energieketens aan klimaat en energie gerelateerde doelen in Nederland in 2020 te bepalen (zie Figuur 4).

Opgave	Totale NL opgave
Vermindering BKG emissie	65 Mton CO ₂ -eq.
Gebruik hernieuwbare energie (zie bruto biomassa) ¹	520 PJ ²
Bijmenging met biobrandstoffen in transport	56 PJ ³

¹ **bruto biomassa** is gebaseerd op de bruto verbrandingsenergie van de geoogste biomassa. Met **netto fossiel** in Figuur 4 wordt de netto vermeden fossiele energie bedoeld en het verschil tussen **bruto biomassa** en **netto fossiel** hangt voor een groot deel af van het energiegebruik en de omzettingefficiëntie bij de teelt en verwerking van energiegewassen.

² Opgave geldt voor totaal hernieuwbare energie (wind, water, zon, biomassa, enz.).

³ Opgave is 10% van het energieverbruik in wegtransport (totaal geschat op 560 PJ).

1. Inleiding

Vanuit het beleid van het Ministerie van LNV is er behoefte aan kennis om de biobased economy in Nederland te stimuleren. Minder afhankelijk worden van fossiele energiebronnen, aardolie, aardgas en steenkool, en het stimuleren/ontwikkelen van economische bedrijvigheid in het gebruik van alternatieven voor deze bronnen staan centraal in de biobased economy. Onderdeel van de biobased economy zijn energiegewassen waarmee energiedragers geproduceerd worden waardoor het gebruik van fossiele bronnen vermeden wordt (zoals ethanol uit biomassa in plaats van benzine, groen gas voor aardgas en groene elektriciteit voor elektriciteit geproduceerd met steenkool of aardgas). Er zijn vragen over de effectiviteit van energiegewassen die in Nederland worden geteeld ten aanzien van specifiek omschreven doelen (terugdringen broeikasgasemissie en vervanging fossiele energie, c.q. bijmenging met biobrandstof) en vragen met betrekking tot overige duurzaamheidsaspecten die samenhangen met de teelt. Ook internationaal is er veel discussie over de productie van energiegewassen (o.a. Bindraban *et al.*, 2009) en door middel van het opstellen van duurzaamheidscriteria wordt getracht de ontwikkelingen in goede banen te leiden (o.a. EC, 2008 en Cramer *et al.*, 2007). In dit rapport wordt verslag gedaan van een studie, die een bijdrage levert aan de kennisbehoefte op het gebied van mate van duurzaamheid van Nederlandse biomassateelt voor energieproductie.

Doelstelling van het project is om aan te geven welke bijdrage het telen van energiegewassen in Nederland heeft op Nederlandse doelstellingen ten aanzien van energiebeleid, broeikasgas emissiereductie en andere (duurzaamheids)aspecten, zoals behoud van bodemorganische stof en vermindering nutriëntenverliezen (bijvoorbeeld Kader Richtlijn Water). Vragen met betrekking tot de teelt van energiegewassen en de verwerking ervan leven niet alleen bij het beleid maar ook bij de landbouw- en energiesector. Ook deze partijen hebben behoefte aan objectieve informatie over de prestaties van verschillende ketens en de resultaten van dit project voorziet daar deels in.

Op verzoek van de begeleidingsgroep (zie voorwoord) is besloten om de keuze van gewassen en ketens aan te laten sluiten bij de '*Energieboerderij*' dat een initiatief is van de Vereniging Innovatief Platteland Venray e.o. In dit initiatief worden de volgende energiegewassen in de praktijk van Zuid-Nederland getest: koolzaad, energiemaïs en suikerbieten in combinatie met de productie van plantaardige olie/biodiesel (uit koolzaad) en biogas/elektriciteit (uit energiemaïs en suikerbiet). Daarnaast is ook de 'ethanolroute' met suikerbieten meegenomen in de analyse. In het project waarvan dit rapport de resultaten weergeeft, zijn model- en scenariostudies uitgevoerd waarmee:

- 1) duurzaamheidscores zijn berekend van deze ketens in hun omgeving en
- 2) opties worden aangegeven die kunnen worden doorgevoerd om de prestaties te verbeteren ('optimalisatie van het ontwerp').

Door inzicht in de effecten van aanpassingen, wordt informatie gegeven over de mogelijkheden tot verbeteringen in de ketens en deze kennis kan gebruikt worden bij eventuele verdere ontwikkelingen van de productie en verwerking van energiegewassen.

2. Onderzoekmethode

2.1 Systeemvergelijking

In deze studie is voor een aantal bio-energieproductieketens (zie 2.2) onderzocht welke effecten zij hebben op een aantal duurzaamheidsthema's (zie 2.3). Hiervoor is een LevensCyclusAnalyse (LCA: ECS, 1997) uitgevoerd, waarin vergelijkingen gemaakt worden tussen referentiesystemen en alternatieve systemen. Het aantal in deze studie behandelde thema's is niet uitputtend, het gaat dan ook om een *beperkte* LCA. Het referentiesysteem voor landgebruik bestaat uit een akkerbouwbedrijf op zandgrond in Zuidoost Nederland waar een aantal gewassen worden geteeld en tevens 10% groene braak aanwezig is die volledig is opgenomen in de rotatie met die gewassen (zie Bijlage I voor beschrijving van de groene braak). Het referentiesysteem voor energiegebruik is gebaseerd op de productie van o.a. kunstmest, motorbrandstoffen en elektriciteit op basis van fossiele bronnen. In het alternatieve systeem voor landgebruik wordt op het bedrijf de groene braak vervangen door de teelt van een energiegewas. In het alternatieve systeem voor energie worden deze gewassen na verwerking gebruikt voor de productie van bijvoorbeeld kunstmestvervangers, motorbrandstoffen en/of elektriciteit. Door de teelt van een energiegewas in plaats van groene braak en de verwerking van het energiegewas tot bruikbare energiedragers waarbij fossiele energie vervangen wordt, veranderen de effecten op de gekozen duurzaamheidsthema's en deze veranderingen worden toegeschreven aan het energiegewas. De verschillen in de effecten bij de vervanging van groene braak door de teelt van een energiegewas zijn voor deze studie uitgerekend en worden in dit rapport gepresenteerd.

Onderdeel van de berekeningen door middel van een LCA is een verdeling van de effecten over de verschillende producten die een systeem op kan leveren (bijvoorbeeld zaad en stro), de zogenoemde allocatie (Thomassen *et al.*, 2008). Dit gebeurt in een LCA in principe door systeemuitbreiding waarbij het effect dat aan een bijproduct toegerekend wordt, gelijk wordt gesteld aan het effect dat een vervangend product heeft, afkomstig van een andere keten. Hierdoor wordt het te beschrijven systeem uitgebreid met die andere keten. Omdat die keten in de regel ook meerdere producten oplevert, is voor het vervangend product ook weer een allocatie nodig en kan het totale systeem dat beschreven dient te worden erg uitgebreid worden. Om dit te voorkomen wordt meestal een allocatie op basis van attributie uitgevoerd, waarin allocatie van een effect plaatsvindt op basis van een kenmerk van de verschillende producten in de keten, bijvoorbeeld de financiële of de energetische waarde. In deze studie worden beide allocatie benaderingen gehanteerd. In het rekenscenario '*Energie*' wordt een systeemuitbreiding toegepast waarbij alle restproducten worden omgezet in energie die fossiele energie vervangt en in kunstmestvervangers en in het rekenscenario '*Attributie*' wordt aan restproducten een deel van de effecten toegerekend op basis van hun energetische inhoud. Door de keuze bij rekenscenario '*Energie*' om alle restproducten te gebruiken voor energieproductie of vervanging van kunstmest, blijft het te beschrijven systeem overzichtelijk. Bij attributie daarentegen wordt de werkelijke bestemming/verwerking van de restproducten niet nader gedefinieerd en buiten het beschreven systeem gehouden. Omdat de levenscyclus van de restproducten in de attributiemethode niet volledig beschreven is, kan het werkelijke effect op duurzaamheidsthema's niet worden gekwantificeerd in tegenstelling tot de situatie bij systeemuitbreiding. Toch wordt deze methode veel toegepast, o.a. in de CO₂-tools (bijvoorbeeld o.a. EC, 2008), vanwege het gemak van de berekeningwijze. In deze studie zijn beide rekenmethoden gebruikt om de resultaten van attributie en systeemuitbreiding met elkaar te vergelijken.

2.2 Gewas-energieketens

In deze studie zijn drie verschillende gewassen geselecteerd waarvan de teelt in het project Energieboerderij in de praktijk onderzocht wordt: winterkoolzaad voor biodiesel, energiemaïs voor biogas/elektriciteit, suikerbiet voor ethanol en voor biogas/elektriciteit. In Bijlagen I.1 t/m I.4 worden korte omschrijvingen gegeven van de aannamen met betrekking tot de teelt van ieder gewas en de bijbehorende verwerkingketens waarmee in deze studie gerekend is en staan de relevante kengetallen voor de teelt van de gewassen die in de berekeningen gebruikt zijn.

De teelt van een gewas beïnvloedt ook de gewassen die in de jaren erna geteeld worden, o.a. door de niet-geogoste delen van het gewas die op het land achterblijven. Deze bron vult de voorraad in de bodem van organisch gebonden nutriënten aan, terwijl door mineralisatie (omzetting van organisch in mineraal) deze voorraad afneemt. De gemineraliseerde nutriënten uit de gewasrest kunnen door volggewassen worden opgenomen en daardoor heeft de gewasrest in de bodem dus een 'bemestende' werking (zie Bijlage I.5). Door verschillen tussen gewassen in gewasresten en dus aanvulling van organisch gebonden nutriënten, ontstaan ook verschillen in de bemestingbehoefte van volggewassen. De verschillen tussen groene braak en de energiegewassen, worden als veranderingen toegekend aan de balansen van de geselecteerde energiegewassen (alleen bij rekenscenario 'Energie', omdat daar het lot van de bijproducten beschreven is). Er is alleen gerekend aan nawerking van stikstof en kalium omdat deze nutriënten kwantitatief belangrijk zijn en omdat ze gemakkelijk uit de bodem verloren kunnen gaan, bijvoorbeeld door uitspoeling. Kalium is in de bodem geen organisch gebonden nutriënt, maar kan via de gewasrest wel de behoefte aan kaliummeststof van een volggewas beïnvloeden. Bij de bemestende waarde van een gewasrest is fosfor niet meegenomen omdat aangenomen is dat door evenwichtbemesting en dezelfde mate van uitspoeling bij alle gewassen, inclusief groene braak de beschikbaarheid van fosfaat voor volggewassen nauwelijks beïnvloed zal worden door de teeltkeuze (zie uitleg in 2.3 bij fosfaat).

2.3 Duurzaamheidsthema's

Een beperkt aantal duurzaamheidsthema's wordt in dit rapport behandeld: (1) gebruik fossiele energie, (2) broeikasgasemissie, (3) bodemorganische stofvoorraad, (4) nitraatuitspoeling en (5) fosfaatgebruik.

(1) Gebruik fossiele energie

De hoeveelheid fossiele energie die netto vervangen kan worden door de teelt van energiegewassen is bepaald door middel van het opstellen van een energiebalans. Berekening van de energiebalans van de verschillende ketens, scenario's en opties is uitgevoerd met behulp van het model 'E-CROP' (Corré & Conijn, 2008). Resultaat van de balansberekening is de netto energie opbrengst per hectare per jaar, ofwel het verschil tussen bruto energieopbrengst en energiegebruik over de volledige keten. De bruto energieopbrengst is de totale energiewaarde van de vervangen fossiele energie, die bestaat uit de directe energie (de verbrandingswaarde) plus de indirecte energie (de energie nodig voor winning, transport, raffinage, enz.). Onder het energiegebruik wordt verstaan alle energie, inclusief de hierboven beschreven indirecte energie, die gebruikt wordt binnen de keten en voor productie van stoffen, materialen, apparatuur, installaties en gebouwen die in de keten worden gebruikt. Binnen de keten worden vier fasen onderscheiden: landbouw, transport van 'boerderij' naar 'fabriek', productie van energie uit biomassa en distributie van 'fabriek' naar 'eindverbruiker', inclusief eventuele bijmenging met fossiele motorbrandstoffen. Op basis van de netto hoeveelheid vervangen fossiele energie per ha per jaar kan bepaald worden in hoeverre de teelt van energiegewassen bij kan dragen aan het verminderen van het gebruik van (niet-hernieuwbare) fossiele energie.

(2) Broeikasgasemissie

De netto reductie van de broeikasgasemissie die kan worden gerealiseerd door de teelt van energiegewassen is bepaald door middel van het opstellen van een broeikasgasbalans. De berekening van de broeikasgasbalans volgt deels de energiebalans: aan iedere hoeveelheid vervangen of gebruikte energie is een hoeveelheid CO₂ emissie verbonden. De emissie van CO₂ per eenheid energie is afhankelijk van het type brandstof (kolen > olie > gas) en van de exacte bron (moeilijk winbaar > makkelijk winbaar). De broeikasgasbalans bevat ook de emissie van N₂O als gevolg van de productie van kunstmeststikstof en de totale stikstofaanvoer naar de bodem (volgens IPCC, 2006) en de emissie van CH₄ door het weglekken ervan bij vergisting. Daarnaast kan er nog sprake zijn van emissie of vastlegging van CO₂ uit de bodem door verandering van de voorraad bodemkoolstof als gevolg van de vervanging van groene braak door de teelt van het energiegewas (zie hieronder bij bodemorganische stof). De totale netto BKG emissiereductie wordt eerst berekend als de bruto reductie door het vervangen van fossiele brandstof minus de emissies van CO₂ door het gebruik van energie in de keten en de emissies van N₂O en CH₄. Alleen in het rekenscenario 'Energie' wordt deze balans gecorrigeerd voor de CO₂ emissie/vastlegging als gevolg van de verandering in bodemkoolstof, omdat in dit rekenscenario voor alle energiegewassen expliciet beschreven is wat er met de bij- of restproducten gebeurt. In het rekenscenario 'Attributie' is dit niet het geval en voor dit scenario kan dan ook geen verandering in bodemkoolstof worden uitgerekend. In dit rapport wordt het effect van de verandering in bodemkoolstof apart gepresenteerd om het effect van dit aspect op de broeikasgasbalans te belichten en om de vergelijking

tussen beide rekenscenario's zuiver te houden. Op basis van de netto reductie van de broeikasgasemissie per ha per jaar kan bepaald worden in hoeverre de teelt van energiegewassen bij kan dragen aan het verminderen van broeikasgasemissie.

(3) Bodemorganische stof

De teelt van gewassen beïnvloedt de dynamiek van organische stof in de bodem, hoofdzakelijk door input van organische meststoffen (indien toegediend) en van de niet-geoogste delen van het gewas die op het land achterblijven. De vervanging van groene braak door een energiegewas kan dus een effect hebben op het gemiddelde bodemorganische stofgehalte van het bedrijf en daarmee dus het behoud van bodemorganische stof beïnvloeden (een criterium in bijvoorbeeld Cramer *et al.*, 2007). In de berekeningen is gebruik gemaakt van een studie waarbij een aantal simulatiemodellen voor afbraak en accumulatie van organische stof in de bodem met elkaar zijn vergeleken (De Willigen *et al.*, 2008; zie Bijlage I.6 voor aannamen en kengetallen). De berekening van het evenwichtniveau in bodemkoolstof is ook gebruikt om het verschil in emissie of vastlegging van CO₂ uit de bodem te berekenen bij de vervanging van groene braak waardoor de netto broeikasgasemissie in de analyse mede bepaald wordt. Hierbij is gebruik gemaakt van een 'carbon pay back time' van 20 jaar zoals ook door de EC wordt voorgesteld (EC, 2008).

(4) Nitraatgehalte

De streefwaarde voor het nitraatgehalte in het grondwater is volgens de Kaderrichtlijn Water (KRW) gelijk aan 50 mg nitraat per liter. Landbouwactiviteiten in Nederland hebben een grote invloed op het nitraatgehalte, o.a. door gewaskeuze en bemesting, en in Zuidoost Nederland met relatief veel droge zandgebieden wordt de streefwaarde over het algemeen (nog) niet gerealiseerd door de landbouw. Voor dit rapport is onderzocht welk effect de vervanging van groene braak door een energiegewas heeft op het bedrijfsgemiddelde nitraatgehalte (zie Bijlage I.7 voor bijzonderheden ten aanzien van de berekening).

(5) Fosfaat

Duurzaam gebruik van fosfaat kent twee aspecten: milieubelasting door uitspoeling en gebruik van een niet-hernieuwbare hulpbron. In deze studie wordt de aanvoer van fosfaat ten behoeve van een teelt gelijkgesteld aan de afvoer ervan (zie ook Bijlagen I.1 t/m I.4). Dit wijkt af van de werkelijke bemesting in de praktijk op gewasniveau die soms hoger en soms lager is dan de afvoer. Toch is in deze studie gekozen voor aanvoer = afvoer omdat hiermee een 'eerlijk' beeld gegeven wordt van het gebruik van fosfaat voor een bepaalde teelt en omdat het beleid in Nederland streeft naar evenwichtbemesting in de toekomst. Hierbij zal nog steeds een (klein) deel van de fosfaat uit de bodem weglekken (op niet-verzadigde gronden), maar dit is relatief gering ten opzichte van de bemesting, de afvoer en de bodemvoorraad in Nederland. Omdat evenwichtbemesting ook geldt voor groene braak, waar de posten aan- en afvoer beide gelijk aan nul zijn, wordt verwacht dat de verschillen in fosfaatuitspoeling tussen groene braak en energiegewassen op hetzelfde bedrijf nihil zullen zijn.

Het gebruik van fosfaaterts voor productie van fosfaatmeststoffen die nodig zijn voor de teelt van energiegewassen heeft een heel ander effect op duurzaamheid, omdat de mondiale voorraad van fosfaaterts eindig is. Bij handhaving van het huidige gebruik zal het fosfaaterts binnen ten hoogste enkele honderden jaren uitgeput zijn, bij verhoging van het gebruik natuurlijk eerder (volgens Jasinsky (2006) mogelijk zelfs binnen 50 - 100 jaar). Een deel van de fosfaatmeststoffen komt uiteindelijk terecht in de oceaan waar het met de huidige technieken niet eenvoudig/economisch uit teruggewonnen kan worden. Afhankelijk van het gebruik van (een deel van) de biomassa dat het fosfaat bevat, kan er bij de teelt en verwerking van energiegewassen sprake zijn van een niet-duurzaam verbruik van een eindige bron. Dit zal in deze studie voor de energiegewasketens worden aangegeven.

2.4 Verbeteringen

In deze paragraaf wordt een aantal mogelijke innovaties besproken die tot een verbetering van het resultaat over de hele keten kunnen leiden. De berekeningen hiermee zijn in de eerste plaats bedoeld als gevoeligheidsanalyse, waarmee kan worden onderzocht welke aanpassingen in de keten een duidelijke verbetering kunnen opleveren. De technische en economische haalbaarheid van de onderzochte innovaties zijn voor deze studie niet onderzocht, zodat geen uitspraak gedaan kan worden of de onderzochte innovaties (even) gemakkelijk te realiseren zijn. Het geeft wel richting aan onderzoek naar en realisatie van verbeteringen van de keten in de toekomst omdat de mogelijke voor-

delen (of nadelen) ex-ante zijn gekwantificeerd. Daarmee kunnen inspanningen en financiën ter verbetering van de prestaties van de keten efficiënter benut worden.

Er zijn vier categorieën aan verbeteringen doorgerekend die gezamenlijk de hele keten omvatten. Met betrekking tot het verlagen van het energieverbruik zijn drie opties onderzocht:

- in de landbouw door zuiniger motoren, verbeterde apparatuur of extensievere teeltsystemen, bijvoorbeeld minder grondbewerking (D-20%; zie Tabel 2.1),
- bij de verwerking van biomassa door energieverliezen te verminderen en/of restwarmte beter te benutten (F-20%) en
- in het transport van de biomassa door zuiniger motoren en/of verbeterde logistiek (T-20%).

De tweede categorie betreft de verlaging van de N₂O emissie en kent twee opties:

- bij de productie van stikstofkunstmest door procesinnovatie waarbij de uitstoot op nul komt (pN₂O=0) en
- in de landbouw bij de emissie uit de bodem door andere samenstelling van meststoffen, andere toedieningstechnieken, andere doseringen e.d. (bN₂O = 0.5).

Optie pN₂O=0 leidt waarschijnlijk tot een hoger energiegebruik voor de productie van kunstmest, maar dit is niet meegenomen in de analyse.

In de derde categorie worden verbeteringen doorgerekend met betrekking tot inhoudstoffen van de gewassen en vergistingefficiëntie:

- in de landbouw door verhoging van het olie- en suikergehalte bijvoorbeeld als gevolg van gewasveredeling (Oil+10% resp. Sui+10%) en
- in de vergistinginstallatie door optimalisatie van omstandigheden/voorbewerking en het verlengen van de verblijftijd (Gis+10%).

Het verlengen van de verblijftijd verhoogt echter ook het energiegebruik doordat voor dezelfde productie een grotere installatie nodig is, maar dit is niet meegenomen in de analyse.

Tenslotte betreft de vierde categorie de efficiëntie van input-output relaties in de landbouw met twee opties:

- door betere benutting van de gegeven stikstofbemesting, bijvoorbeeld door precisiebemesting (Ng-20%) en
- door verhoging van de gewasproductie via gewasveredeling en verbetering van het teeltmanagement (Gw+20%).

Gezien de grote verschillen in opbrengsten tussen bedrijven onderling en tussen de gemiddelde praktijk en proefvelden lijkt er zeker ruimte te zijn voor een verhoging van de input-output efficiëntie. De verschillende opties waarmee gerekend is, zijn samengevat in Tabel 2.1.

Tabel 2.1. De onderzochte innovaties in de keten waarvan de effecten zijn berekend op de energie- en broeikasgasbalans.

Optie	Omschrijving
D-20%	Verlaging van het dieselgebruik ten behoeve van de teelt van het energiegewas met 20%
F-20%	Verlaging van het energieverbruik bij de verwerking (biobrandstof, vergisting, elektriciteit, enz.) met 20%
T-20%	Verlaging van het energieverbruik door transport van biomassa met 20%
pN ₂ O=0	Verlaging van de N ₂ O emissie bij de productie van stikstofkunstmest tot 0 kg N ₂ O per kg kunstmest N
bN ₂ O=0,5	Halvering van de directe en indirecte N ₂ O emissie uit de bodem van de toegediende stikstofhoudende meststoffen
Oil+10%	Verhoging van het oliegehalte in het zaad van winterkoolzaad met 10% ten opzichte van de droge stof
Sui+10%	Verhoging van het suikergehalte in de suikerbiet met 10% ten opzichte van de droge stof
Gis+10%	Verhoging van het vergistingpercentage in de vergistinginstallatie met 10%
Ng-20%	Verlaging van de stikstofgift aan het energiegewas met 20%, waarbij opname en de productie van het gewas gelijk blijven
Gw+20%	Verhoging van de opname en productie van het gewas met 20%, waarbij de bemesting gelijk blijft

3. Standaard situaties

3.1 Groene braak

Fossiele energie en BKG emissie

De teelt van groene braak vergt landbouwkundige handelingen en gaat dus gepaard met energieverbruik, broeikasgas emissie e.d. Volgens Kaltschmitt & Reinhardt (1997) is er voor een éénjarige groene braak 780 MJ/ha nodig voor o.a. zaaïen en ploegen en wordt er 68 kg CO₂-eq./ha geëmitteerd (inclusief de N₂O emissie bij de productie van het zaaizaad). Het onderploegen van de vegetatie voor het inzaaien van een nieuw gewas wordt in dit rapport beschouwd als het toevoegen van een gewasrest aan de bodem. Volgens IPCC regels (IPCC, 2006) moet dan aan de groene braak een emissie van 460 kg CO₂-eq. per ha worden toegekend door N₂O emissie uit de gewasrest (zie Bijlage I.1) waardoor het totaal uitkomt op een emissie van 528 kg CO₂-eq. per ha.

Het gebruik van fossiele energie en de uitstoot van BKG door de teelt van groene braak zijn gecorrigeerd voor de nawerking van groene braak. De nawerking levert een besparing op kunstmestgebruik op (zie Bijlage I.5), waardoor ook bespaard wordt op energiegebruik en emissie van BKG. Het netto effect voor groene braak komt dan uit op vermeden gebruik van fossiele energie van 2840 MJ/ha en een emissie van broeikasgassen, ter grootte van 96 kg CO₂-eq./ha.

Organische stof in de bodem

Groene braak heeft een effect op de organische stofdynamiek in de bodem. Voor de kwantificering van dit effect is gebruik gemaakt van de totale organische stof die de vegetatie heeft geproduceerd, die tijdens de groei en na het onderploegen uiteindelijk geheel aan de bodem wordt toegediend (zie Bijlage I.6). Bij een gemiddeld organische stofgehalte op het bedrijf van 2% in de bovenste 20 cm van de grond met een dichtheid van 1300 kg m⁻³ (aangenomen waarden in de berekeningen), is de bijdrage van groene braak aan het gemiddelde organisch stofgehalte van het bedrijf op lange termijn gelijk aan ca. 6,0% (zie Bijlage I.6). Er was aangenomen dat de groene braak op 10% van het bedrijfsareaal geteeld werd. Een deel van het gemiddelde organisch stofgehalte op het bedrijf (i.e. de aangenomen 2% in dit voorbeeld) zou afkomstig kunnen zijn van veel ouder organisch materiaal (dus niet van recente agrarische gewasresten en toedieningen; zie de discussie in De Willigen *et al.*, 2008). In dat geval is de bijdrage van groene braak ten opzichte van de andere bronnen van organische stofinvoer op het bedrijf groter dan de berekende 6%.

Nitraatgehalte

Op de bodemstikstofbalans van de (onbemeste) groene braak staat een aanvoerpost van 30 kg N/ha door atmosferische depositie. Aangezien groene braak niet geoogst wordt, is de afvoerpost gelijk aan 0 kg N/ha en komt de totale balans uit op +30 kg N/ha. Echter, deze balans moet nog gecorrigeerd worden voor de nawerking van groene braak via besparing op kunstmestgebruik (zie Bijlage I.5) en daarmee komt de netto balans van groene braak uit op -43 kg N/ha. Door de aanname dat er 10% groene braak op het bedrijf aanwezig is, is het effect van groene braak op de bedrijfsgemiddelde bodemstikstofbalans gelijk aan -4,3 kg N/ha. De bijdrage van groene braak aan het bedrijfsgemiddelde nitraatgehalte in het grondwater bedraagt hierdoor -4,2 mg nitraat per liter volgens een schatting die gebaseerd is op het mest-ABC (Schröder *et al.*, 2009a). Ten opzichte van de streefwaarde (50 mg nitraat per liter) komt dit effect overeen met -8,3%.

Fosfaat

Voor groene braak wordt geen fosfaat gebruikt en geen fosfaat afgevoerd. Daarom is de teelt van groene braak neutraal ten opzichte van duurzaam gebruik van een eindige bron.

3.2 Winterkoolzaad

Fossiele energie en BKG emissie

In Tabel 3.1 staan de resultaten van de berekening met E-CROP waarbij winterkoolzaad gebruikt is voor biodieselproductie en stro, koolzaadmeel en glycerine verbrand zijn voor elektriciteitsproductie bij het reken scenario 'Energie' (zie Bijlage I voor kengetallen van de teelt en Bijlage II voor meer resultaten). In beide reken scenario's zijn zowel de balans voor energie als die voor broeikasgassen positief. Het gebruik van de bij- en restproducten voor elektriciteitsproductie in reken scenario 'Energie' blijkt aanzienlijk bij te dragen aan de netto energieopbrengst en de reductie van broeikasgasemissie.

De netto vermeden fossiele energie en BKG emissie worden nog beïnvloed door indirecte effecten van de verandering in nawerking van gewasresten en opslag van C in de bodem als gevolg van de vervanging van groene braak door winterkoolzaad. Deze effecten zijn alleen berekend voor de standaard situatie van reken scenario 'Energie' (Tabel 3.1). Hieruit blijkt dat volgens de gehanteerde rekenmethodologie (zie Bijlage I.6) de verandering in bodemkoolstof een aanzienlijke verlaging van de netto vermeden broeikasgasemissie geeft. Groene braak legt meer koolstof vast (0,21 ton C/ha, jaar) en dit is toegerekend als extra CO₂ emissie aan de broeikasgasbalans van de keten van winterkoolzaad dat de teelt van groene braak vervangt (effect van koolstofopslag = -22%). De verschillen in nawerking levert enerzijds een positieve bijdrage aan de reductie van de BKG emissie, en leidt tevens tot een geringe afname in de netto vermeden fossiele energie (-1%). Door de verschillen ten aanzien van nawerking en bodemorganische koolstof tussen groene braak en winterkoolzaad in de berekening te betrekken, dalen de netto broeikasgasrendementen van 45% naar 39% (BKG_totaal) respectievelijk van 78% naar 68% (BKG_biobrandstof).

Tabel 3.1. Berekende resultaten met betrekking tot energie en broeikasgassen (BKG) van winterkoolzaad (standaardsituaties, Std, van reken scenario 'Attributie' en 'Energie') en de effecten op de ketenresultaten bij vervanging van groene braak door winterkoolzaad in reken scenario 'Energie'.

Reken scenario	'Attributie'		'Energie'			
	Std	Std	Nawerking ¹	Bodem C ²	Totaal ³	Correctie (%) ⁴
Situatie						
Biobrandstof (kg/ha)	1405	1405	1405	1405	1405	0
Elektriciteit (MWh/ha)	0	5,87	5,87	5,87	5,87	0
Netto vermeden fossiel (GJ/ha)	37,1	79,4	78,5	79,4	78,5	-1,2
Netto vermeden BKG emissie (ton CO ₂ -eq./ha)	2,07	3,51	3,84	2,73	3,07	-12,5
Rendement BKG_totaal (%) ⁵	46	45	49	35	39	-12,5
Rendement BKG_biobrandstof (%) ⁵	46	78	85	61	68	-12,5

¹ Nawerking bevat de resultaten na correctie met de verschillen in nawerking/bemestende waarde (zie o.a. Bijlage I.5).

² Bodem C bevat de resultaten na correctie met de verschillen in vastlegging van CO₂ in de bodemorganische stof (zie Bijlage I.6).

³ Totaal bevat de gesommeerde resultaten van de voorgaande twee kolommen.

⁴ Correctie (%) geeft de relatieve verandering van kolom Totaal ten opzichte van kolom Std van reken scenario 'Energie'.

⁵ Bij rendement BKG_totaal is het percentage berekend ten opzichte van de totale bruto vermeden BKG emissie van alle energiedragers; bij rendement BKG biobrandstof is het percentage bepaald ten opzichte van de bruto vermeden BKG emissie van alleen de biobrandstofopbrengst.

Organische stof in de bodem

Indien groene braak wordt vervangen door winterkoolzaad, zoals in de berekeningen van dit rapport, dan daalt het gemiddelde organische stofgehalte op het bedrijf van de aangenomen standaard waarde van 2% in de berekeningen naar een evenwichtwaarde van 1,97% (relatieve daling van 1,4%, zie Bijlage I.6). Deze verandering is in de praktijk niet of nauwelijks meetbaar en heeft waarschijnlijk ook geen betekenis voor de functies van de bodemorganische stof op het bedrijf.

Als het stro niet verbrand wordt, maar direct of indirect aan de bodem wordt toegediend, dan geeft de teelt van winterkoolzaad extra koolstofopslag ten opzichte van groene braak. Dit kan echter niet aan het rekenscenario '*Attributie*' worden toegerekend, omdat in dat scenario de bestemming van het stro niet expliciet is beschreven. In het rekenscenario '*Energie*' is deze optie niet van toepassing omdat in dit scenario gekozen is voor verbranding van het stro ten behoeve van extra energieopbrengst.

Nitraatgehalte

Voor winterkoolzaad is de totale aanvoer van stikstof gelijk aan 185 kg N/ha (inclusief atmosferische depositie) en de totale afvoer is 133 kg N/ha, zodat het bodemstikstofoverschot gelijk wordt aan +52 kg N/ha (zie Bijlage I.1). Hierop is een correctie uitgevoerd door de verschillen in stikstofnawerking van groene braak en winterkoolzaad te betrekken bij de schatting van het effect op het gemiddelde nitraatgehalte van het bedrijf. Door de vervanging van groene braak leidt de netto bijdrage van winterkoolzaad op bedrijfsniveau tot een verhoging van gemiddeld 5,2 mg nitraat per liter grondwater (= +10,4% ten opzichte van de streefwaarde).

Fosfaat

In het rekenscenario '*Energie*' worden de bij- en restproducten verbrand en de fosfor van het zaad en het stro, dat uit de bodem is opgenomen, komt terecht in de verbrandingsas. Momenteel is het niet gebruikelijk dat deze as wordt gerecycled als meststof en daardoor wordt de fosfor van het zaad en het stro onttrokken aan de landbouw. Dit betekent, gegeven de eindige voorraden van fosforerts in de fosformijnen, dat de extra energie opbrengst door verbranding van rest- en restproducten, waar in dit scenario voor gekozen is, leidt tot een niet-duurzaam gebruik van een niet-hernieuwbare bron. Gebruik van het koolzaadmeel als veevoer waarbij ook mest geproduceerd wordt dat dienst kan doen als meststof voor gewassen, is voor de fosforcyclus een betere optie. Ook vergisting van het koolzaadmeel kan via het digestaat tot hergebruik van fosfaat leiden. Voor stro, dat overigens maar een kleine hoeveelheid fosfaat bevat, zijn deze alternatieven (veevoer, vergisting) minder geschikt.

3.3 Energiemaïs

Fossiele energie en BKG emissie

In Tabel 3.2 staan de resultaten van de berekening met E-CROP waarbij energiemaïs gebruikt is voor elektriciteitsproductie met behulp van biogas verkregen door vergisting (zie Bijlage I voor kengetallen van de teelt en Bijlage II voor meer resultaten). Bij deze optie zijn er geen bij- of restproducten zoals bij winterkoolzaad. Hierdoor is het rekenscenario '*Attributie*' niet van toepassing en blijft alleen het rekenscenario '*Energie*' in de analyse over. Zowel de balans voor energie als die voor broeikasgassen zijn positief.

De netto vermeden fossiele energie en BKG emissie worden nog beïnvloed door indirecte effecten van de verandering in nawerking van gewasresten en opslag van C in de bodem als gevolg van de vervanging van groene braak met energiemaïs. Volgens de gehanteerde rekenmethodologie (zie Bijlage I.6) geeft de verandering in bodemkoolstof een aanzienlijke verlaging van de netto vermeden broeikasgasemissie. Groene braak legt meer koolstof vast (0,33 ton C/ha, jaar) en dit is toegerekend als extra CO₂ emissie aan de broeikasgasbalans van de keten van energiemaïs dat de teelt van groene braak vervangt (effect van koolstofopslag = -23%). De verschillen in nawerking levert enerzijds een positieve bijdrage aan de reductie van de BKG emissie, en leidt tevens tot een geringe afname in de netto vermeden fossiele energie (-1%). Door de verschillen ten aanzien van nawerking en bodemorganische koolstof tussen groene braak en energiemaïs in de berekening te betrekken, daalt het netto broeikasgasrendement van 53% naar 42%.

Tabel 3.2 *Berekende resultaten met betrekking tot energie en broeikasgassen (BKG) van energiemais (standaardsituatie, Std, van rekenscenario 'Energie') en de effecten op de ketenresultaten bij vervanging van groene braak door energiemais.*

Situatie	Std	Nawerking	Bodem C	Totaal	Correctie (%)
Biobrandstof (kg/ha)	0	0	0	0	0
Elektriciteit (MWh/ha)	18,1	18,1	18,1	18,1	0
Netto vermeden fossiele energie (GJ/ha)	145,3	143,3	145,3	143,3	-1,4
Netto vermeden BKG emissie (ton CO ₂ -eq./ha)	5,32	5,52	4,10	4,30	-19,1
Rendement BKG_totaal (%)	53	54	40	42	-19,1
Rendement BKG_biobrandstof (%)					

NB. Zie onderschrift van Tabel 3.1.

Organische stof in de bodem

Indien groene braak wordt vervangen door energiemais, zoals in de berekeningen van dit rapport, dan daalt het gemiddelde organische stofgehalte op het bedrijf van de aangenomen standaard waarde van 2% in de berekeningen naar een evenwichtwaarde van 1,96% (relatieve daling van 2,2%, zie Bijlage I.6). Deze verandering is in de praktijk niet of nauwelijks meetbaar en heeft waarschijnlijk ook geen betekenis voor de functies van de bodemorganische stof op het bedrijf.

Nitraatgehalte

Voor energiemais is de totale aanvoer van stikstof gelijk aan 245 kg N/ha (inclusief atmosferische depositie) en de totale afvoer is 223 kg N/ha (inclusief ammoniakvervluchtiging), zodat het bodemstikstofoverschot gelijk wordt aan +22 kg N/ha (zie Bijlage I.2). Hierop is een correctie uitgevoerd door de verschillen in stikstofnawerking van groene braak en energiemais te betrekken bij de schatting van het nitraatgehalte. Door de vervanging van groene braak leidt de netto bijdrage van energiemais op bedrijfsniveau tot een verhoging van gemiddeld 4,0 mg nitraat per liter grondwater (= +8,0% ten opzichte van de streefwaarde).

Fosfaat

Indien de uitspoeling van fosfor uit de bodem verwaarloosbaar klein is en niet afhangt van de teelt, zoals in deze studie is aangenomen, dan is de kringloop voor fosfor met energiemais gedeels gesloten. Er wordt een hoeveelheid fosfor aan de teelt van energiemais gegeven ter grootte van de totale afvoer die via het terugvoeren van digestaat wederom aan de bodem kan wordt toegediend.

3.4 Suikerbiet voor ethanol

Fossiele energie en BKG emissie

In Tabel 3.3 staan de resultaten van de berekening met E-CROP waarbij suikerbiet gebruikt is voor ethanolproductie, bij het rekenscenario 'Energie' zijn bovendien bietenblad en pulp gebruikt voor vergisting (zie Bijlage I voor kentallen van de teelt en Bijlage II voor meer resultaten). In alle gevallen is zowel de balans voor energie als die voor broeikasgassen positief. Het gebruik van de bij- en restproducten voor vergisting (Tabel 3.3) draagt aanzienlijk bij aan de netto energieopbrengst en de reductie van broeikasgasemissie.

De netto vermeden fossiele energie en BKG emissie worden nog beïnvloed door indirecte effecten van de verandering in nawerking van gewasresten en opslag van C in de bodem als gevolg van de vervanging van groene braak met suikerbiet. Deze effecten zijn alleen berekend voor de standaard situatie van rekenscenario 'Energie' (Tabel 3.2). Hieruit blijkt dat volgens de gehanteerde rekenmethodologie (zie Bijlage I.6) de verandering in bodemkoolstof een aanzienlijke verlaging van de netto vermeden broeikasgasemissie geeft. Groene braak legt meer koolstof vast (0,67 ton C/ha, jaar) en dit is toegerekend als extra CO₂ emissie aan de broeikasgasbalans van de keten van

suikerbiet dat de teelt van groene braak vervangt (effect van koolstofopslag = -23%). De verschillen in nawerking levert enerzijds een positieve bijdrage aan de reductie van de BKG emissie, en leidt tevens tot een geringe afname in de netto vermeden fossiele energie (-1%). Door de verschillen ten aanzien van nawerking en bodemorganische koolstof tussen groene braak en winterkoolzaad in de berekening te betrekken, daalt het netto broeikasgasrendement van 58% naar 46% (BKG_totaal) respectievelijk van 79% naar 62% (BKG_biobrandstof).

Tabel 3.3. Berekende resultaten met betrekking tot energie en broeikasgassen (BKG) van suikerbiet - ethanol (standaardsituaties, Std, van rekenscenario 'Attributie' en 'Energie') en de effecten op de ketenresultaten bij vervanging van groene braak door suikerbiet in rekenscenario 'Energie'.

Rekenscenario	'Attributie'		'Energie'			
	Std	Std	Nawerking ¹	Bodem C ²	Totaal ³	Correctie (%) ⁴
Biobrandstof (kg/ha)	5670	5670	0,0	0,0	0,0	0,0
Elektriciteit (MWh/ha)	0	8,43	0,0	0,0	0,0	0,0
Netto vermeden fossiel (GJ/ha)	106,9	168,6	166,1	168,6	166,1	-1,5
Netto vermeden BKG emissie (ton CO ₂ -eq./ha)	7,62	10,55	10,69	8,11	8,24	-21,9
Rendement BKG_totaal (%)	57	58	59	45	46	-21,9
Rendement BKG_biobrandstof (%)	57	79	80	61	62	-21,9

NB. Zie onderschrift van Tabel 3.1.

Organische stof in de bodem

Indien groene braak wordt vervangen door suikerbiet/ethanol, zoals in de berekeningen van dit rapport, dan daalt het gemiddelde organische stofgehalte op het bedrijf van de aangenomen standaard waarde van 2% in de berekeningen naar een evenwichtwaarde van 1,91% (relatieve daling van 4,4%, zie Bijlage I.6). Deze verandering is in de praktijk niet of nauwelijks meetbaar en heeft waarschijnlijk ook geen betekenis voor de functies van de bodemorganische stof op het bedrijf.

Nitraatgehalte

Voor suikerbiet is de totale aanvoer van stikstof gelijk aan 205 kg N/ha (inclusief atmosferische depositie) en de totale afvoer is 236 kg N/ha (inclusief ammoniakvervluchtiging), zodat het bodemstikstofoverschot gelijk wordt aan -30 kg N/ha (zie Bijlage I.3). Hierop is een correctie uitgevoerd door de verschillen in stikstofnawerking van groene braak en suikerbiet te betrekken bij de schatting van het nitraatgehalte. Door de vervanging van groene braak leidt de netto bijdrage van suikerbiet op bedrijfsniveau tot een verhoging van gemiddeld slechts 0,5 mg nitraat per grondwater (= +1,0% ten opzichte van de streefwaarde).

Fosfaat

Voor suikerbiet geldt hetzelfde als voor energiemais: gegeven de veronderstellingen in deze studie is de kringloop van fosfaat door het hergebruik van digestaat goeddeels gesloten en wordt er nauwelijks aanspraak gemaakt op externe fosfaatmeststoffen.

3.5 Suikerbiet voor vergisting

Fossiele energie en BKG emissie

In Tabel 3.4 staan de resultaten van de berekening met E-CROP waarbij de hele suikerbiet gebruikt is voor vergisting, inclusief het blad, en met het biogas elektriciteit geproduceerd is (zie Bijlage I voor kengetallen van de teelt en Bijlage II voor meer resultaten). Ook hier is het rekenscenario 'Attributie' niet van toepassing omdat er geen bij- of

restproducten zijn met een mogelijke bestemming buiten het bedrijf (vergelijkbaar met energiemais, echter wel met een transportafstand voor het vervoer naar de vergistinginstallatie). Wederom zijn zowel de balans voor energie als die voor broeikasgassen positief.

De netto vermeden fossiele energie en BKG emissie worden nog beïnvloed door indirecte effecten van de verandering in nawerking van gewasresten en opslag van C in de bodem als gevolg van de vervanging van groene braak met suikerbiet. Volgens de gehanteerde rekenmethodologie (zie 1.6) geeft de verandering in bodemkoolstof een aanzienlijke verlaging van de netto vermeden broeikasgasemissie. Groene braak legt meer koolstof vast (0,47 ton C/ha, jaar) en dit is toegerekend als extra CO₂ emissie aan de broeikasgasbalans van de keten van suikerbiet dat de teelt van groene braak vervangt (effect van koolstofopslag = -22%). De verschillen in nawerking levert enerzijds een positieve bijdrage aan de reductie van de BKG emissie, en leidt tevens tot een zeer geringe afname in de netto vermeden fossiele energie (-1%). Door de verschillen ten aanzien van nawerking en bodemorganische koolstof tussen groene braak en winterkoolzaad in de berekening te betrekken, daalt het netto broeikasgasrendement van 62% naar 50%.

Tabel 3.4. Berekende resultaten met betrekking tot energie en broeikasgassen (BKG) van suikerbiet voor vergisting (standaardsituatie, Std, van rekenscenario 'Energie') en de effecten op de ketenresultaten bij vervanging van groene braak door suikerbiet.

Situatie	Std	Nawerking	Bodem C	Totaal	Correctie (%)
Biobrandstof (kg/ha)	0				
Elektriciteit (MWh/ha)	22,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Netto vermeden fossiel (GJ/ha)	171,9	169,4	171,9	169,4	-1,5
Netto vermeden BKG emissie (ton CO ₂ -eq./ha)	7,89	8,02	6,16	6,30	-20,2
Rendement BKG_totaal (%)	62	64	49	50	-20,2
Rendement BKG_biobrandstof (%)					

NB. Zie onderschrift van Tabel 3.1

Organische stof in de bodem

Indien groene braak wordt vervangen door suikerbiet/biogas, zoals in de berekeningen van dit rapport, dan daalt het gemiddelde organische stofgehalte op het bedrijf van de aangenomen standaard waarde van 2% in de berekeningen naar een evenwichtwaarde van 1,94% (relatieve daling van 3,1%, zie Bijlage I.6). Het organische stofgehalte daalt minder dan bij suikerbietteelt voor ethanol, omdat er meer digestaat ontstaat bij de vergisting van de hele biet + blad, waardoor er meer koolstof wordt teruggevoerd naar de bodem. Maar ook hier geldt dat deze verandering in de praktijk niet of nauwelijks meetbaar is en dat het waarschijnlijk ook geen betekenis heeft voor de functies van de bodemorganische stof op het bedrijf.

Nitraatgehalte

Voor de berekening van het nitraatgehalte is er geen verschil tussen suikerbiet voor vergisting en suikerbiet voor ethanol omdat er geen verschillen zijn in de teelt en de hoeveelheid stikstof in het digestaat tussen beide ketens (zie 3.4).

Fosfaat

Effect van de teelt van suikerbiet in plaats van groene braak op het gebruik van fosfaat zijn gelijk aan die van de keten suikerbiet voor ethanol (zie 3.4).

4. Effecten van verbeteringen

De effecten van verbeteringen (zie Tabel 2.1 voor de lijst van verbeteringen in de keten) zijn alleen uitgerekend voor de standaard situaties van beide rekenscenario's (kolommen Std van Tabellen 3.1 t/m 3.4).

4.1 Winterkoolzaad

Vermindering van het dieselgebruik in de landbouw (D-20%) en in het transport (T-20%) sorteren nauwelijks effect op het ketenresultaat. Vermindering van energieverbruik in de verwerkingsfabriek (F-20%) geeft wel een duidelijke respons op beide balansen. De resultaten laten zien dat de N₂O emissie, zowel door kunstmestproductie (pN₂O=0) als uit de bodem na toediening van de meststof (bN₂O=0.5), belangrijk is voor de netto reductie in broeikasgas-emissie. De berekende effecten van een verhoging van het oliegehalte zijn variabel (Oil+10%). Bij het rekenscenario 'Attributie' worden de netto energie opbrengst en de netto emissiereductie duidelijk verhoogd en dat geeft een licht positief resultaat voor het broeikasgasrendement (= +2,3%). Bij het rekenscenario 'Energie' leidt een verhoging van het oliegehalte tot een verlaging van de elektriciteitsproductie, omdat er minder koolzaadmeel beschikbaar is. Hierdoor is het netto resultaat voor energie nog wel positief, maar minder dan in het rekenscenario 'Attributie'. Ook het effect op de broeikasgasreductie is lager en dat leidt uiteindelijk tot een lager broeikasgasrendement dan in de standaard berekening indien dit rendement berekend wordt ten opzichte van de geproduceerde biodiesel, die 10% omhoog is gegaan. Verlaging van de stikstofgift met 20% (met gelijkblijvende gewasopname, Ng-20%) beïnvloedt de netto vermeden fossiele energie slechts in geringe mate, maar scoort beter met betrekking tot de emissiereductie. Verhoging van de gewasproductie (bij gelijkblijvende stikstofgift, Gw+20%) is voor zowel energie als broeikasgassen effectief. Hierbij valt op dat het rendement van broeikasgasreductie procentueel veel minder stijgt dan de absolute hoeveelheid in ton CO₂-eq. per ha.

Tabel 4.1. Berekende resultaten met betrekking tot energie en broeikasgassen (BKG) van winterkoolzaad (rekenscenario 'Attributie'). Kolommen D-20% t/m Gw+20% geven de percentages verandering weer ten opzichte van de berekende waarden in de standaard situatie van kolom Std.

Opties	Std	D-20%	F-20%	T-20%	pN ₂ O=0	bN ₂ O=0.5	Oil+10%	Ng-20%	Gw+20%
Biobrandstof (kg/ha)	1405	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	20,0
Elektriciteit (MWh/ha)	0								
Netto vermeden fossiel (GJ/ha)	37,1	0,8	9,2	0,1	0,0	0,0	11,2	1,5	22,2
Netto vermeden BKG emissie (ton CO ₂ -eq./ha)	2,07	0,9	12,3	0,2	10,6	13,1	12,5	7,8	28,7
Rendement BKG_totaal (%)	46	0,9	12,3	0,2	10,6	13,1	2,3	7,8	7,2
Rendement BKG_biobrandstof (%)	46	0,9	12,3	0,2	10,6	13,1	2,3	7,8	7,2

4.3 Suikerbiet voor ethanol

Vermindering van het dieselgebruik in de landbouw (D-20%) en in het transport (D-20%) sorteren ook bij de suikerbiet-ethanolketen nauwelijks effect op het ketenresultaat. Vermindering van energieverbruik in de verwerking (F-20%) geeft wel een duidelijke respons op beide balansen. De resultaten laten zien dat de N₂O emissie, zowel door kunstmestproductie (pN₂O=0) als uit de bodem na toediening van de meststof (bN₂O=0.5), minder belangrijk is voor de netto reductie in broeikasgasemissie dan bij de andere twee energiegewassen. Bij het rekenscenario 'Energie' is het effect van "pN₂O=0" zelfs negatief geworden omdat het digestaat meer werkzame stikstof bevat dan bij de teelt van suikerbiet wordt toegediend. Verhoging van het suikergehalte (Sui+10%) geeft in het rekenscenario 'Attributie' ook een verhoging van 10% in zowel de energie opbrengst als de emissie reductie, waardoor het rendement er nauwelijks door beïnvloed wordt. Bij het rekenscenario 'Energie' heeft de verhoging van het suikergehalte als consequentie dat er minder pulp is waardoor de elektriciteitsproductie omlaag gaat. Uiteindelijk leidt dat tot relatief kleine effecten op de energie opbrengst en vermeden broeikasgasemissie en weer een negatief effect op het rendement indien dit rendement berekend wordt ten opzichte van de geproduceerde ethanol (vergelijkbaar met winterkoolzaad). Verlaging van de stikstofgift met 20% (met gelijkblijvende gewasopname, Ng-20%) beïnvloedt de netto vermeden fossiele energie slechts in geringe mate en heeft ook met betrekking tot de emissiereductie een relatief klein effect. Verhoging van de gewasproductie (bij gelijkblijvende stikstofgift, Gw+20%) is voor zowel energie als broeikasgassen effectief. Hierbij valt op dat het rendement van broeikasgasreductie procentueel veel minder stijgt dan de absolute hoeveelheid in ton CO₂-eq. per ha.

Tabel 4.4. *Berekende resultaten met betrekking tot energie en broeikasgassen (BKG) van suikerbiet voor ethanol (rekenscenario 'Attributie'). Kolommen D-20% t/m Gw+20% geven de percentages verandering weer ten opzichte van de berekende waarden in de standaardsituatie van kolom Std.*

Opties	Std	D-20%	F-20%	T-20%	pN ₂ O=0	bN ₂ O=0.5	Sui+10%	Ng-20%	Gw+20%
Biobrandstof (kg/ha)	5670	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	20,0
Elektriciteit (MWh/ha)	0								
Netto vermeden fossiel (GJ/ha)	106,9	1,4	10,7	1,0	0,0	0,0	10,0	0,7	21,8
Netto vermeden BKG emissie (ton CO ₂ -eq./ha)	7,62	1,5	8,7	1,0	3,9	4,3	10,4	2,9	24,0
Rendement BKG_totaal (%)	57	1,5	8,7	1,0	3,9	4,3	0,4	2,9	3,3
Rendement BKG_biobrandstof (%)	57	1,5	8,7	1,0	3,9	4,3	0,4	2,9	3,3

Tabel 4.5. *Berekende resultaten met betrekking tot energie en broeikasgassen (BKG) van suikerbiet voor ethanol (rekenscenario 'Energie'). Kolommen D-20% t/m Gw+20% geven de percentages verandering weer ten opzichte van de berekende waarden in de standaardsituatie van kolom Std.*

Opties	Std	D-20%	F-20%	T-20%	pN ₂ O=0	bN ₂ O=0.5	Sui+10%	Ng-20%	Gw+20%
Biobrandstof (kg/ha)	5670	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	20,0
Elektriciteit (MWh/ha)	8,43	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-12,4	0,0	20,0
Netto vermeden fossiel (GJ/ha)	168,6	1,5	7,9	1,8	0,0	0,0	2,0	0,7	21,8
Netto vermeden BKG emissie (ton CO ₂ -eq./ha)	10,55	1,7	7,6	2,2	-1,3	5,8	4,6	3,3	24,6
Rendement BKG_totaal (%) ¹	58	1,7	7,6	2,2	-1,3	5,8	0,4	3,3	3,8
Rendement BKG_biobrandstof (%) ¹	79	1,7	7,6	2,2	-1,3	5,8	-4,9	3,3	3,8

¹ Bij rendement BKG_totaal is het percentage berekend ten opzichte van de totale bruto vermeden BKG emissie van alle energiedragers; bij rendement BKG biobrandstof is het percentage bepaald ten opzichte van de bruto vermeden BKG emissie van alleen de biobrandstofopbrengst.

5. Discussie

5.1 Algemeen

Met deze studie kan en zal geen eendoordeel geveld worden ten aanzien van de mate van duurzaamheid van de onderzochte energiegewassen vanwege meerdere redenen.

De eerste reden is dat in de analyse voor deze studie veel keuzes zijn gemaakt met betrekking tot de inputgegevens en de verwerking van de geproduceerde biomassa. De inputgegevens, zoals gewasopbrengst, bemesting, N₂O emissies, energiegebruik, parameters voor de fossiele ketens e.d., maar ook de verwerkingkeuzes staan niet vast, want ze zijn onderhevig aan variatie zowel wat betreft huidige als ook toekomstige waarden en ontwikkelingen. Als de opbrengst juist lager is (bijvoorbeeld door klimaatveranderingen in de toekomst), als het stro of het blad wordt ondergeploegd in plaats van afgevoerd, als restwarmte beter benut kan worden, als in de toekomst fossiele olie moeilijker winbaar zal zijn, zijn zeer legitieme aspecten die echter in deze studie niet aan bod zijn gekomen, maar wel de resultaten van berekeningen zullen beïnvloeden. De gemaakte keuzes kunnen aanleiding tot discussie geven, echter het maken van keuzes is onvermijdelijk.

De tweede reden is dat in deze studie deels nieuwe wegen bewandeld zijn om een meer integraal beeld te geven van de effecten van energiegewassen op een aantal duurzaamheidsthema's. Hierbij zijn enerzijds trade-offs gekwantificeerd (bijvoorbeeld met nitraatuitspoeling) en anderzijds zijn de balansen voor energie en broeikasgassen die traditioneel beperkt worden tot de directe effecten van de keten, gecorrigeerd met indirecte effecten van naderwerking van gewassen en verandering van bodemkoolstofvoorraden als gevolg van teeltkeuzes. Over de gehanteerde methodologie kan discussie ontstaan en deze methodologie zal daardoor mogelijk aangescherpt worden.

De derde reden is dat deze studie niet uitputtend was en wellicht belangrijke duurzaamheidsaspecten niet heeft behandeld. Biodiversiteit is daar een voorbeeld van: er was geen tijd om de effecten van de vervanging van groene braak op biodiversiteit goed te bestuderen en dus blijft die vraag hier vooralsnog onbeantwoord. Ondanks al deze onzekerheden, die niet altijd vermeden kunnen worden en waar hieronder dieper op wordt ingegaan, heeft deze studie naast resultaten voor concrete gewas-energieketens in Nederland ook meer algemene inzichten opgeleverd over het belang van indirecte effecten, het nut van verbeteringen in de keten, het verschil in rekenmethoden en criteria en een aantal overblijvende methodologische vragen.

5.2 Resultaten vergeleken

De resultaten van deze studie zijn in grote lijnen in overeenstemming met die van andere studies die in de afgelopen jaren gepubliceerd zijn (zie o.a. Horne *et al.*, 2003, Reinhardt, 2007, Eickhout *et al.*, 2008, Bindraban *et al.*, 2009, Visser *et al.*, 2008). De vergelijking met anderen wordt echter wel bemoeilijkt door de vele verschillende keuzes ten aanzien van de inputwaarden en de opties van verwerking waardoor de totale ketenresultaten beïnvloed worden in iedere studie.

5.3 Referentie landgebruik

Ook al is in de huidige landbouwpraktijk in Zuidoost Nederland bijna geen groene braak aanwezig, is er in deze studie toch gekozen voor groene braak als referentie landgebruik. Deze keuze is mede ingegeven door de verwachting dat in Europa in de toekomst minder land gebruikt zal gaan worden voor voedselproductie (zie bijvoorbeeld EEA, 2006, 2007 & 2008). Door groene braak te kiezen, is impliciet verondersteld dat het 'surplus' aan landbouwgrond in gebruik blijft van de landbouw en niet bijvoorbeeld wordt gebruikt voor natuurontwikkeling. Groene braak is verkozen boven zwarte braak (braak leggen zonder inzaai van een vegetatie en bestrijding van spontaan opkomende planten) omdat groene braak een positief effect heeft op het organische stofgehalte van het bedrijf, waarvan het behoud

vaak gezien wordt als een knelpunt in het bedrijfsmanagement. In de literatuur zijn geen gegevens gevonden over de productie van biomassa door groene braak op een akkerbouwbedrijf (weinig onderzocht in Nederland) en daarom zijn hiervoor aannames gedaan die een gemiddelde verwachte opbrengst weergeven. De functie van groene braak als organisch stofleverancier kan waarschijnlijk geoptimaliseerd worden door de juiste keuze van zaaizaad en dan meer opleveren dan volgens de aanname in deze studie, maar daar is niet mee gerekend omdat er te weinig over bekend is. Ander landgebruik als referentie was ook mogelijk, bijvoorbeeld permanent afstaan van het land ten behoeve van natuurontwikkeling evt. in combinatie met recreatie. Een dergelijk gebruik van het land zou natuurlijk ook koolstof in de bodem vastleggen (volgens verwachting zelfs meer dan groene braak), maar de vergelijking met energiegewassen zou dan methodologisch ingewikkelder worden, omdat natuur en recreatie heel andere functies kennen dan akkerbouwgebied. Met de keuze voor groene braak als referentie hebben we voorkomen dat het energiegewas de plaats zou innemen van een voedselgewas, zoals wel het geval is in de analyse van De Visser *et al.* (2008), waar suikerbiet geteeld wordt voor ethanolproductie en daarbij korrelmaïs of zomergerst vervangt. De keuze van De Visser *et al.* past overigens wel bij de huidige landbouwpraktijk waar de teelt van een energiegewas feitelijk een voedselgewas zal verdringen. Echter, als een voedselgewas de referentie zou zijn, wordt ook de voedselproductie vervangen die dan hoogst waarschijnlijk elders in de wereld zal plaatsvinden. In dat geval zal in de analyse rekening gehouden moeten worden met waar en hoe de vervangen hoeveelheid voedsel wordt geproduceerd en de effecten daarvan op duurzaamheidsaspecten (lokaal en mondiaal) moeten worden toegeschreven aan het energiegewas. Dit is nodig omdat anders geen compleet beeld gegeven wordt van de veranderingen die het energiegewas veroorzaakt. Het kwantificeren van deze 'extra' effecten zal niet eenvoudig zijn omdat de vragen 'waar en hoe' zich niet gemakkelijk laten beantwoorden. Waarschijnlijk zal dit buiten Europa zijn en dan gaat het mogelijk gepaard met de ontginning van natuurlijke gebieden (zie o.a. Searchinger, 2008), al is dit in specifieke gevallen vanuit Nederland vaak niet met zekerheid vast te stellen (meer globaal gezien kan dit wel verwacht worden; zie o.a. Bindraban *et al.*, 2009). In de analyse van De Visser *et al.* (2008) is geen rekening gehouden met de verplaatsing van de voedselproductie waardoor in de resultaten in dat rapport niet alle effecten zijn gekwantificeerd die het gevolg zijn van de teelt van suikerbiet voor ethanol. Toch kan de vraag gesteld worden of het terecht is om groene braak als referentie landgebruik te kiezen, zoals dat in LCA studies gebruikelijk is (zie bijvoorbeeld Horne *et al.* (2003)). Het 'surplus' aan landbouwgrond in de EU in de toekomst is mede het gevolg van een toegenomen productie die plaatsvindt in andere regio's, bijvoorbeeld in Zuid Amerika, waar een deel van de extra productie afkomstig is van ontgonnen natuurgebieden. Die macro-economische ontwikkelingen zijn niet het directe gevolg van de teelt van een energiegewas in Nederland (eerder andersom), maar de teelt van voedselgewassen in Zuid-Amerika en de ruimte voor energiegewassen in de EU staan dan toch niet los van elkaar. Daarnaast kan de grond in Nederland natuurlijk in principe wel gebruikt worden voor voedselproductie, al is dat dan financieel niet aantrekkelijk voor een boer o.a. door de al eerder genoemde macro-economische ontwikkelingen. In deze studie is de vraag naar de juiste keuze voor het referentie landgebruik niet opgelost, maar we pleiten wel voor een bredere discussie hierover zodat de uitkomsten van verschillende analyses en/of referenties beter met elkaar vergeleken kunnen worden.

Wanneer groene braak als alternatief landgebruik gekozen wordt, is het belangrijk om niet alleen de standaardwaarden voor energiegebruik en BKG emissie volgens Kaltschmidt & Rheinhardt (1997) mee te nemen, maar dat ook rekening gehouden wordt met de effecten van groene braak op de nutriëntenhuishouding en op de bodemorganische stofhuishouding. Deze conclusie wordt getrokken op basis van de resultaten uit dit rapport. Wanneer deze effecten niet in aanmerking genomen (kunnen) worden, lijkt het zelfs beter het alternatief grondgebruik helemaal niet mee te nemen in een analyse.

5.4 Bodemorganische stof

In deze studie bleek dat de vervanging van groene braak door een energiegewas volgens de berekeningen nauwelijks meetbare effecten had op het gehalte aan bodemorganische stof van het bedrijf (relatieve verandering minder dan 5%). Dit hangt samen met de situatie dat het verschil tussen de referentie en een energiegewas relatief klein is ten opzichte van de grote hoeveelheid organische stof in de bodem en bovendien slechts van toepassing is op 10% van het totale bedrijfsareaal. Ook in De Visser *et al.* (2008) werd geconcludeerd dat het behoud van de bodemorganische stof op het bedrijf niet noemenswaardig in gevaar kwam en dat daarmee voldaan werd aan één van de

criteria uit de commissie Cramer (criterium 2.2: 'behoud ondergrondse koolstof reservoirs', Cramer *et al.* 2007). In deze studie is de verandering in bodemorganische stof ook op een andere manier gebruikt, namelijk om te kwantificeren hoeveel meer/minder koolstof wordt vastgelegd in de bodem door de vervanging van groene braak met een energiegewas. De methodologie die hierbij gevolgd is, is gelijk aan die van het voorstel van de EC voor het berekenen van de broeikasgasbalans (EC, 2008). Het verschil in evenwichtniveau van bodemkoolstof, bijvoorbeeld tussen een bos (oorspronkelijk gebruik) en een energiegewas (nieuw gebruik), wordt gedeeld door een periode en de verandering, uitgedrukt in ton CO₂/ha, jaar, wordt als een emissie toegerekend aan het energiegewas. In het voorstel van de EC en ook in de berekeningen voor dit rapport wordt een periode van 20 jaar gebruikt. Deze periode past goed bij de werkelijke dynamiek in afbraak van bodemorganische stof als natuurgebieden worden ontgonnen voor akkerbouwmatige teelten, omdat gedurende de eerste twee decennia de daling in organische stofvoorraad het grootst is. Ook is het gebruik van een relatief korte periode van belang indien op korte termijn de doelstelling van emissiereductie gerealiseerd moet worden.

Principieel is er voor de aanpak van de berekening van de broeikasgasbalans geen verschil tussen een verandering van bodemkoolstof bij ontginning van natuurgebieden (verandering van landgebruik) en de verandering als gevolg van gewaskeuze op een akkerbouwbedrijf (verandering van teeltmanagement). In het onderzoek voor dit rapport bleek dat de geschatte veranderingen als gevolg van de teelt van energiegewassen ten opzichte van groene braak op lange termijn, als het evenwicht bereikt zou zijn, een groot effect hebben op de berekende netto reductie van broeikasgassen. De extra emissie van CO₂ door een lager organisch stofgehalte in de bodem bij energiegewassen, varieerde van 0,77 – 2,45 ton CO₂/ha, jaar en was gelijk aan 22 - 23% van de netto reductie, berekend zonder dit effect. Het relatieve effect is zoveel groter dan het effect op het organische stofgehalte op bedrijfsniveau, omdat (i) het effect niet uitgemiddeld kan worden over het totale bedrijfsareaal en (ii) omdat de verandering in bodemkoolstof relatief een veel groter onderdeel is van de netto vermeden broeikasgasbalans dan van de voorraad in de bodem. Voor zover ons bekend wordt deze methodologie niet toegepast in CO₂ tools, maar deze hoort wel uitgevoerd te worden als het werkelijke effect van energiegewassen op de (mondiale) broeikasgasbalans moet worden vastgesteld.

De berekende omvang van het effect, zoals in deze studie uitgevoerd, kent echter een aantal onzekerheden, waarvan er twee hieronder worden besproken.

- Er is in deze studie gebruik gemaakt van twee bodemorganische stofmodellen, die qua resultaten nogal uiteenlopen (zie De Willigen *et al.*, 2008). Met opzet is gekozen voor het gemiddelde van deze twee modellen omdat het niet zeker is welk model de opbouw en afbraak van organische stof in de bodem als functie van de toevoer het beste beschrijft voor de Nederlandse omstandigheden. Beide modellen zijn wel getoetst op datasets, maar niet voor de specifieke situatie met groene braak en energiegewassen in Zuidoost Nederland. Omdat specifieke kennis ontbreekt, zijn in de berekeningen voor de gebruikte organische materialen uit deze studie (gewasresten en digestaat) dezelfde eigenschappen gebruikt die bepalend zijn voor de hoogte van het evenwichtsniveau, waarbij een gemiddelde genomen is van snel en langzaam afbreekbaar materiaal. Het is niet goed bekend of door deze keuze de verschillen in eigenschappen van de gebruikte materialen voldoende zijn weergegeven. De afbraak en opbouw hangen niet alleen af van het materiaal dat toegediend wordt, maar ook van de eigenschappen van de bodem. Hierbij wordt het percentage klei en/of leem vaak gebruikt omdat een hoger percentage van klei/leem een hoger bodemorganische stofgehalte oplevert bij gelijke aanvoer (Hassink, 1995). Men spreekt in dit verband van de 'beschermende' werking van klei/leem tegen afbraak van organische stof. Dit effect is slechts in één van twee modellen opgenomen en leidt volgens dat model tot een verdubbeling van het berekende evenwichtsniveau bij ca. 50% klei + leem ten opzichte van 0%. Voor deze studie is gerekend met 100% zand omdat in één van de twee modellen de correctie voor het klei/leem gehalte ontbreekt. Voor Zuidoost Nederland is 100% zand een redelijke schatting voor de gemiddelde grondsoort. Echter, op gronden met een hoger klei/leem gehalte, bijvoorbeeld buiten Zuidoost Nederland, zou de gecorrigeerde reductie in broeikasgasemissie veel lager zijn dan in deze studie is uitgerekend.
- In deze studie is gerekend met gewasresten en digestaat als aanvoer van organische stof voor de bodem. Er zijn op het bedrijf natuurlijk ook andere manieren om extra bodemorganische stof te produceren in combinatie met het energiegewas, bijvoorbeeld door het inzaaien van een vanggewas na de teelt van het energiegewas.

Hierdoor veranderen de balanssen van energie (bijvoorbeeld door het inzaaien van het vanggewas) en broeikasgassen (o.a. door extra koolstofopslag). Deze optie is nu niet uitgerekend, maar zal het verschil met groene braak ten aanzien van koolstofopslag en de CO₂ emissie die toegerekend wordt aan het energiegewas door de vervanging van groene braak verkleinen. Daar staat tegenover dat ook de groene braak waarschijnlijk nog geoptimaliseerd kan worden ten opzichte van de aannamen in deze studie om zoveel mogelijk organische stof op te leveren. Ook hier is op dit moment nog geen berekening voor uitgevoerd.

5.5 Innovaties

De verschillende innovaties waarvoor berekeningen zijn uitgevoerd, zijn zeker niet allemaal eenvoudig te realiseren. De berekeningen waren dan ook niet in de eerste plaats bedoeld om aan te geven wat het effect van concrete innovaties zou zijn, maar om aan te geven welk type innovatie waar in de keten effectief zou zijn. Op deze manier kan bepaald worden voor welke aspecten specifiek onderzoek zinvol kan zijn. Dit betreft met name innovaties die de opbrengst verhogen, die de stikstofbemesting effectiever maken en energiebesparing bij de omzettingsprocessen van ethanol en biodiesel. Dat wil niet zeggen dat andere innovaties, zoals zuiniger motoren, niet belangrijk zijn, ze zijn alleen minder belangrijk binnen de beschreven bio-energieketens. Verder is alleen gekeken naar de directe effecten van de innovaties en niet naar indirecte effecten en naar kosten. Zo lijkt het goed mogelijk dat een effectieve maatregel als voorkomen van N₂O emissie tijdens de productie van kunstmest als indirect effect meer energiegebruik heeft en dat minder effectieve innovaties door lagere kosten toch aantrekkelijk zijn.

5.6 N₂O emissie uit de bodem

Een specifiek probleem vormt de verlaging van N₂O emissie uit de bodem. Van tal van factoren (soort stikstofbemesting, bodemtype, klimaat, gewas) is bekend dat ze een effect op deze emissie hebben, de effecten zijn echter lastig te kwantificeren door de vele interacties en de grote kleinschalige variatie van de emissie, zowel in de ruimte als in de tijd (Stehfest & Bouwman, 2006). De IPCC methodiek heeft als nadeel dat met al deze factoren geen rekening gehouden wordt maar levert gesommeerd op mondiaal niveau wel een realistische totaal emissie op. Wanneer nuanceringen aangebracht worden, is steeds de vraag hoe groot de onzekerheid van deze nuanceringen is en wat de consequenties voor het mondiale budget zijn en of en hoe die gecompenseerd kunnen worden.

5.7 Verdroging

Bij suikerbiet en energiemais is aangenomen dat er irrigatie nodig is om op de zandgrond van Zuidoost Nederland de opbrengsten te halen zoals ze voor deze studie zijn aangenomen (zie Bijlage I.3 & I.4). Hierin verschillen de teelten van deze twee gewassen ten opzichte van de teelten van winterkoolzaad en groene braak waarvoor is aangenomen dat irrigatie niet nodig is. Voor de berekening van het nitraatgehalte dat mede afhangt van het neerslagoverschot, is het effect van wel/niet beregenen in de analyse (zeer) beperkt (zie Bijlage I.7). De mate van beregening kan echter wel vochthuishouding van het gebied waarin het bedrijf zich bevindt beïnvloeden en verlaging van grondwaterpeil c.q. verdroging versterken. Deze effecten zijn in het kader van deze studie niet onderzocht, maar zijn natuurlijk wel belangrijk in droogtegevoelige gebieden. Het kan betekenen dat er beregeningsverboden gelden waardoor de opbrengsten lager zijn dan nu aangenomen in de analyse of dat er gebruik gemaakt wordt van water uit bronnen die niet in diezelfde mate weer worden aangevuld. Dat laatste kan gezien worden als een onduurzame situatie omdat het negatieve consequenties heeft voor ofwel toekomstige opbrengstmogelijkheden ofwel eigenschappen van het omringende gebied. Een studie naar deze effecten zou het beste uitgevoerd kunnen worden met een simulatiemodel voor gewas en bodem vanwege de grote variatie in de waterbalans tussen jaren en grondsoorten en dat viel buiten de mogelijkheden in dit project.

5.8 Rendement BKG emissie reductie

Voor de effectiviteit van BKG emissie reductie door gebruik van biobrandstoffen wordt algemeen het 'rendement BKG biobrandstof' gebruikt als indicator (o.a. EC, 2008). Dit is gedefinieerd als de verhouding tussen de totale netto BKG emissie reductie van een gewas-bio-energieketen ($= E_1$) en de BKG emissie van de fossiele brandstofketen dat vervangen wordt door de geproduceerde biobrandstof ($= E_2$). Indien bijproducten van de gewas-bio-energieketen gebruikt worden voor andere doelen dan biobrandstof (bijvoorbeeld voor veevoer of elektriciteit), dan wordt een bruto vermeden BKG emissie aan de bijproducten toegekend via attributie of systeemuitbreiding. In de berekening wordt deze emissie reductie als een 'negatieve' emissie in mindering gebracht op de door de productie van biobrandstof veroorzaakte emissie, waardoor de teller in de verhouding (i.e. E_1) verhoogd wordt. Dit gebeurt ook in situaties waar geproduceerde energie uit bijproducten niet voor de productie van de biobrandstof gebruikt wordt (bijvoorbeeld bij een surplus aan elektriciteit die aan het net geleverd wordt).

De indicator is dus een maat voor de reductie van BKG emissie bij gebruik van biobrandstoffen. Daardoor zijn gewassen/variëteiten met een laag gehalte aan grondstof voor biobrandstof en een hoog gehalte aan overige organische stof in het voordeel ten opzichte van gewassen/variëteiten met een hoog gehalte aan grondstof voor biobrandstof. Dit is goed zichtbaar in de Tabellen 3.2 en 3.7, waar in het scenario met een verhoging van het suiker- of oliegehalte ten opzichte van de totale droge stof het 'rendement BKG biobrandstof' daalt, terwijl de netto emissie reductie per ha juist stijgt. Andersom, leidt een verlaging van het gehalte dus tot een verhoging van het 'rendement BKG biobrandstof' en een verlaging van de emissie reductie per ha. Dit effect kan voorkomen worden door het 'rendement BKG totaal' als indicator te gebruiken. Dit sluit aan bij een beschrijving van het systeem waarin de verschillende producten van een keten (bijvoorbeeld biobrandstof en biogas of elektriciteit) gewaardeerd worden met betrekking tot de vervanging van fossiele energie, in plaats van dat de voordelen van alle producten alleen aan de biobrandstofproductie wordt toegeschreven, zoals dat nu met de indicator 'rendement BKG biobrandstof' gebeurt. Dit leidt ook tot een evenwichtiger vergelijking van systemen die verschillende producten voortbrengen in verschillende verhoudingen en stimuleert beter de optimale inzet van biomassa voor BKG emissiereductie. Een andere mogelijke indicator betreft de emissiereductie in kg CO₂-eq per ha, die als voordeel heeft dat rekening gehouden wordt met de beperkte beschikbaarheid van productief land. De veel gebruikte indicator op basis van 'rendement BKG biobrandstof' is dus niet geschikt om de mate van duurzaamheid van gewas-bio-energieketens te kwantificeren en te vergelijken. Deze indicator bevoordeelt ketens waarin relatief veel biomassa niet tot biobrandstof wordt verwerkt en in deze indicator komt de efficiëntie van het gebruik van beperkende factoren in het productieproces niet tot uiting.

5.9 Attributie of systeemuitbreiding?

Bij het beoordelen van de effecten van de productie van biobrandstof behoort ook het beoordelen van de effecten van geproduceerde bijproducten. Zo wordt een deel van de BKG emissie verbonden aan de productie gealloceerd naar de biobrandstof en een deel naar de bijproducten. Volgens de principes van LCA dient dit te gebeuren door middel van systeemuitbreiding. Resultaten hiervan zijn in dit rapport gepresenteerd onder rekenscenario 'Energie', waarbij de bijproducten zijn gebruikt voor energieproductie. Dit geeft een eenvoudige en sluitende systeemuitbreiding; met alle bijproducten wordt gebruik van fossiele energie vervangen. Echter, dit scenario komt niet (altijd) overeen met de werkelijkheid omdat keuzes voor de verwerking van bijproducten door economische motieven anders kunnen zijn. Indien het werkelijke gebruik van bijproducten in de systeemuitbreiding van een LCA beschreven dient te worden, kan het totale systeem te uitgebreid en te complex worden, omdat bijproducten van gewas-bio-energieketens veelal bijproducten van andere ketens vervangen en daardoor het aantal te beschrijven ketens onhanteerbaar wordt. Daarnaast zullen er vooral bij ex-ante evaluaties (arbitraire) keuzes gemaakt moeten worden welk bestaand product uit welke keten vervangen wordt door de bijproducten van de gewas-bio-energieketen. Deze keuzes zijn in het algemeen van grote invloed op de resultaten. Om deze problemen te vermijden wordt in plaats van systeemuitbreiding meestal attributie gebruikt (zie rekenscenario 'Attributie' in dit rapport). Een nadeel van attributie is het arbitraire criterium waarmee toegedeeld wordt, bijvoorbeeld via de economische of energetische waarde van hoofd- en bijproducten van een keten. Hoewel de economische waarde de keuze voor verwerking sterk bepaalt, is dit criterium niet goed hanteerbaar door de continu fluctuerende waarde van verschillende producten, terwijl de

energetische inhoud voor bijproducten als veevoer op zich zeker niet het enige criterium is. Attributie op basis van energie-inhoud wordt in de regel toegepast (o.a. EC, 2008; zie ook Bindraban *et al.*, 2009). Resultaten in dit rapport laten echter duidelijk zien dat de waardering van bijproducten sterk onderschat kan worden bij attributie op basis van energetische inhoud. De toerekening door middel van attributie op basis van energie-inhoud is voor de meeste bijproducten veel lager dan de vermindering die optreedt door deze bijproducten voor de productie van energie te gebruiken (vergelijk de netto vermeden fossiele energie en BKG emissie bij rekenscenario's 'Attributie' en 'Energie' in Tabellen 3.1 & 3.2 en 3.6 & 3.7). Dit geeft aan dat attributie op basis van energetische waarde niet geschikt is om de werkelijke effecten aan te geven indien de bijproducten omgezet worden in energie. Hieruit kan de conclusie getrokken worden dat attributie als methode om bijproducten te waarderen niet de werkelijke effecten die optreden kan weergeven. Daarvoor is systeemuitbreiding als waarderingssysteem nodig. Discussie over een correcte waardering van overige producten in een keten en waarschijnlijk ook meer onderzoek hiernaar zal in toekomst nog nodig zijn.

Referenties

- Bindraban, P.S., E. Bulte, J.G. Conijn, B. Eickhout, M. Hoogwijk & M. Londo, 2009.
Can biofuels be sustainable by 2020? An assessment for an obligatory blending target of 10% in the Netherlands. Netherlands Research Programme on Scientific Assessment and Policy Analysis for Climate Change (WAB). Report 500102024 (2009). www.pbl.nl.
- Brouwer, W., 2009.
Presentatie op 'International Energy Farming Congress' in Papenburg. Ministerie LNV.
- Corré, W.J. & J.G. Conijn, 2008.
Sustainability aspects of biofuel production. Proceedings no: 633. The International Fertiliser Society, York.
- Corré, W.J. & J.W.A. Langeveld, 2008.
Energie en broeikasgasbalans voor een aantal opties van energieproductie uit suikerbieten en -blad. Rapport 197. Plant Research International, Wageningen.
- Cramer, J., E. Wissema, M. de Bruijne, E. Lammers, D. Dijk, H. Jager, S. van Bennekom, E. Breunese, R. Horster, C. van Leenders, S. Wonink, W. Wolters, H. Kip, H. Stam, A. Faaij & K. Kwant, 2007.
Testing framework for sustainable biomass, EnergieTransitie, The Netherlands. http://www.senternovem.nl/energietransitiegg/documentatie/downloads_rapporten_en_achtergrondinformatie.asp.
- CVB, 2007.
Tabellenboek Veevoeding 2007. Voedernormen landbouwhuisdieren en voerderwaarde veevoerders. CVB-reeks nr. 133, ISSN 1567-8679 (www.cvb.pdv.nl).
- EC, 2008.
Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources. European Commission, COM(2008) 30 final, Brussel.
- ECS, 1997.
Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework. European Standard ISO 14040. European Committee for Standardisation, Brussel.
- EEA, 2006.
How much bioenergy can Europe produce without harming the environment? Copenhagen. European Energy Agency technical report no 7/2006.
- EEA, 2007.
Estimating the environmentally compatible bioenergy potential from agriculture. Copenhagen. European Energy Agency technical report no 12/2007.
- EEA, 2008.
Maximising the environmental benefits of Europe's bioenergy potential. Copenhagen. European Energy Agency technical report No 10/2008.
- Eickhout B., G.J. van den Born, J. Notenboom, M. van Oorschot, J.P.M. Ros, D.P. van Vuuren & H.J. Westhoek, 2008.
Local and global consequences of the EU renewable directive for biofuels- Testing the sustainability criteria, MNP, report 500143001/2008.
- Fraters, B., L.J.M. Boumans, T.C. van Leeuwen & J.W. Reijs, 2007.
De uitspoeling van het stikstofoverschot naar grond- en oppervlaktewater op landbouwbedrijven (in Dutch). RIVM Rapport 680716002/2007, RIVM, Bilthoven, The Netherlands, 83 pp.
- Goudriaan, J. & H.H. van Laar, 1994.
Modelling Potential Crop Growth Processes. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Nederland.
- Habekotté, B. & H.G. Smid, 1992.
Growth analysis and pod and seed set of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). Experimental results. CABO Report 166 Wageningen, The Netherlands.
- Hassink, J., 1995.
Organic matter dynamics and N mineralization in grassland soils. Wageningen, Proefschrift.

- Horne, R.E., N.D. Mortimer & M.A. Elsayed, 2003.
Energy and carbon balances of biofuels production: biodiesel and bioethanol. Proceedings no: 510.
The International Fertiliser Society, York.
- IPCC, 2006.
2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. en Tanabe, K. (eds). IGES, Japan.
- Jasinski, S.M., 2006.
Phosphate Rock, Statistics and Information. US Geological Survey.
- Kaltschmitt, M. & G.A. Reinhardt, 1997.
Nachwachsende Energieträger. Vieweg, Wiesbaden.
- KWIN, 2006.
Akkerbouw en Vollegrondsgroenteteelt 2006. Kwantitatieve Informatie. Wageningen, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, publicatienummer PPO 354.
- Reinhardt, G.A., 2007.
In: Food, fuel or forests. Proceedings of a seminar held at Wageningen, March 2, 2007. Eds.: Anton Haverkort, Prem Bindraban & Hariëtte Bos.
- Searchinger, T., R. Heimlich, R.A. Houghton, F. Dong, A. Elobeid, J. Fabiosa, S. Tokgoz, D. Hayes & T.H. Yu, 2008.
Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land use change. Science Express 7 February 2008. www.scienceexpress.org.
- Schröder, J.J., H.F.M. Aarts, J.C. van Middelkoop, G.L. Velthof, J.W. Reijs & B. Fraters. 2009a,
Nitrates Directive requires limited inputs of manure and mineral fertilizer in dairy farming systems. Report 222. Plant Research International, Wageningen, The Netherlands, 37 pp.
- Schröder, J.J., H.F.M. Aarts & J. Verloop, 2009b.
Model-based estimates of combinations of cattle slurry and mineral fertilizer nitrogen in view of water quality requirements. Teermann (accepted)
- Stehfest, E. & L. Bouwman, 2006.
N₂O and NO emissions from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. Nutrient Cycling in Agroecosystems 74: 207-228.
- Thomassen, M.A., R. Dalgaard, R. Heijungs & I. De Boer, 2008.
Attributional and consequential LCA of milk production. International Journal of Life Cycle Assessment. Springer, Open Access.
- Visser, C.L.M. de, G.W.J. van de Ven, J.W.A. Langeveld, S.C. de Vries & L. van den Brink, 2008.
Duurzaamheid van ethanolbieten: het toetsingskader toegepast. Wageningen, ACRRES - Wageningen UR, rapport AC2008/01.
- Voort, M.P.J. van der, 2007.
Saldi van energiegewassen. Saldoberekeningen van energiegewassen voor co-vergisting en bio-ethanol-productie. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, PPO rapport 32500580.
- Willigen, P. de, B.H. Janssen, H.I.M. Heesmans, J.G. Conijn, G.L. Velthof & W.J. Chardon, 2008.
Decomposition and accumulation of organic matter in soil; comparison of some models. Wageningen, Alterra, rapport 1726.

Bijlage I.

Omschrijving en kengetallen van teelten/ketens en overige berekeningen

I.1 Groene braak

Teelt

De groene braak wordt in deze studie gedefinieerd als het telen van een vegetatie (bijvoorbeeld een grasmengsel) voor maximaal één jaar zonder bemesting, zonder afvoer van biomassa aan het eind van de teelt. Doordat het opgenomen is in de rotatie, wordt het niet op een vast perceel geteeld. Er is aangenomen dat de groene braak 10% van het totale akkerbouwareaal van het bedrijf beslaat.

Kengetallen

Metingen ten aanzien van onbemeste groene braak zijn in de literatuur niet gevonden. In deze studie is uitgegaan van een inzaai van overjarige plantensoort(en) op 15 maart en een groeiperiode van 365 dagen. Na één jaar wordt de zode dus weer omgeploegd voor de zaai van een nieuwe gewas. Tabel I.1 bevat de kengetallen die zijn aangenomen met betrekking tot de droge stofproductie en nutriëntenopname van groene braak. De stikstofopname is gebaseerd op 2% stikstof bovengronds en 0,75% ondergronds. Opname van fosfor en kalium is gebaseerd op de verhoudingen tussen stikstof enerzijds en fosfor/kalium anderzijds, berekend met de gemiddelde samenstelling in vers gras en grashooi (CVB, 2007). Ten behoeve van de IPCC definitie van gewasrest, is aangenomen dat op het moment van onderploegen 50% van de totale opname van stikstof aanwezig is in het gewas. De overige 50% is volgens deze aanname afgevallen tijdens de teelt en al in of op de bodem terechtgekomen. Voor de berekening van de nawerking van groene braak is de totale opname van nutriënten gekort met 15% omdat een deel van de totale opname uit Tabel I.1 bestaat uit vrijgekomen nutriënten van al afgestorven delen van de groene braak.

Tabel I.1. Kengetallen van onbemeste groene braak op zand (zie tekst voor uitleg).

Eenheid	Droge stofproductie	N-opname	P-opname	K-opname
	ton/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha
Bovengronds	6,0	120	17,9	150
Ondergronds	3,0	22,5	3,5	22,5
Gewasrest ¹	4,5	71,3	10,7	86,3

¹ Gewasrest geschat volgens definitie van het IPCC (aanwezig tijdens de oogst) ten behoeve van de berekening van N₂O emissie uit gewasresten.

De atmosferische stikstofdepositie (geschat op 30 kg N per ha) is de enige aanvoer van nutriënten voor deze teelt, omdat in deze studie is aangenomen dat de groene braak niet bemest wordt en er geen vlinderbloemigen in de vegetatie aanwezig zijn. Er wordt tevens geen berekening toegepast.

I.2 Winterkoolzaad

Keten

Winterkoolzaad wordt gebruikt voor de productie van biodiesel en produceert naast zaad ook stro en een gewasrest die achterblijft op het land. In het rekenscenario 'Energie' wordt het stro geoogst en afgevoerd naar een biomassacentrale voor de productie van elektriciteit. Het zaad gaat naar de biodieselfabriek, waar de olie uit het zaad wordt geëxtraheerd. Hierbij ontstaat koolzaadmeel als (eerste) restproduct. De plantenolie wordt vervolgens veresterd tot biodiesel en dit proces heeft glycerine als (tweede) restproduct. De biodiesel wordt uiteindelijk gedistribueerd naar tankstations. In het rekenscenario 'Energie' gaan beide restproducten naar een biomassacentrale om verbrand te worden ten behoeve van de productie van elektriciteit. Voor elk transport van zaad, stro en de restproducten die ontstaan bij de verwerking van het zaad is een afstand van 50 km aangenomen. In het rekenscenario 'Attributie' wordt alleen gerekend met het transport van het zaad naar de biodieselfabriek, omdat er in deze berekeningmethode geen expliciete aannames gemaakt zijn over de bestemmingen van het bijproduct stro en de restproducten van biodieselproductie.

Kengetallen

Droge stofopbrengst van het zaad is gebaseerd op KWIN (2006) met een aangenomen vochtgehalte van 10%. KWIN geeft een opbrengst als gemiddelde voor heel Nederland. Met behulp van de cijfers voor wintertarwe die in KWIN voor verschillende delen van Nederland gegeven zijn, is een reductie bepaald voor zandgebieden ten opzichte van de opbrengst geldend voor heel Nederland (-7,5%). Voor de stikstof-, fosfor- en kaliumgehalten van het zaad zijn de gehalten van raapzaad genomen (CVB, 2007).

Droge stofopbrengst van het koolzaadstro is gebaseerd op de zaadopbrengst en de verhouding tussen zaad en stro uit KWIN (2006). Er is hierbij aangenomen dat het stro 10% vocht bevat. De stikstof-, fosfor- en kaliumgehalten van tarwestro (CVB, 2007) zijn gebruikt voor de schatting van de gehalten in koolzaadstro. De droge stofproductie van de niet-geoogste delen van winterkoolzaad is geschat met behulp van een verhouding tussen zaad en totaal geproduceerde droge stof (Habekotté en Smid, 1992). Ten behoeve van de IPCC definitie van gewasrest, is aangenomen dat op het moment van oogsten 50% van de niet-geoogste delen aanwezig is in het gewas. De overige 50% is volgens deze aanname afgevallen tijdens de teelt en al in of op de bodem terechtgekomen.

Tabel I.2. Kengetallen van de teelt van winterkoolzaad op zand (zie tekst voor uitleg).

Eenheid	Droge stofopbrengst	N-opbrengst	P-opbrengst	K-opbrengst
	ton/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha
Zaad	3,33	118	25,2	29,6
Stro	2,08	14,6	2,3	36,4
Niet-geoogst	6,92	69,2	10,8	69,2
Gewasrest ¹	3,46	34,6	5,4	34,6

¹ Gewasrest geschat volgens definitie van het IPCC (aanwezig tijdens de oogst) ten behoeve van de berekening van N₂O emissie uit gewasresten

Voor de berekening van de nutriëntenbalansen zijn de volgende aannamen gedaan:

- De teelt van winterkoolzaad op zand wordt bemest met 155 kg N-kunstmest per ha.
- Atmosferische stikstofdepositie is geschat op 30 kg N per ha.
- De aanvoer van fosfaatkunstmest is gelijk aan de afvoer met zaad en stro.
- De aanvoer van kaliumkunstmest is gelijk aan de afvoer met zaad en stro.

Er is aangenomen dat er geen berekening nodig is voor de teelt en opbrengst zoals beschreven in Tabel I.2.

I.3 Energiemaïs

Keten

Energiemaïs is een maïsvariëteit die geteeld wordt om zoveel mogelijk bio-energie op te leveren. Dit kan o.a. als het gewas langer kan doorgroeien. Het gewas wordt in zijn geheel geoogst waarbij alleen wortels en stoppels als gewasrest op het land achterblijven. De biomassa, bestaande uit kolven, bladeren en stengels, wordt na inkuilen en bewaren in een vergistinginstallatie grotendeels omgezet in biogas (een mengsel van CH₄ en CO₂). In de regel zal energimaïs samen met dierlijke mest en/of andere substraten vergist worden (co-vergisting), voor dit rapport is echter alleen de bijdrage van het energiegewas berekend. De vergisting vindt plaats in een installatie op 'boerderij-schaal' op het bedrijf, waar ook de energimaïsteelt plaatsvindt en de afstanden van het transport zijn daarom in de berekeningen op 0 km gezet. Met het biogas wordt elektriciteit opgewekt, waarbij een deel van de geproduceerde warmte gebruikt wordt voor de verwarming van de vergistinginstallatie. Het overige deel wordt in deze studie als niet benutbaar beschouwd omdat de geproduceerde restwarmte veel groter is dan de warmtebehoefte van het bedrijf. De nutriënten in de geoogste biomassa komen via het niet-vergiste deel van de biomassa terecht in het digestaat dat in deze studie weer als meststof op hetzelfde bedrijf wordt hergebruikt. Bij deze recycling is aangenomen dat bij transport, opslag en vergisting op het bedrijf in totaal 5% van de stikstof die oorspronkelijk in de geoogste biomassa aanwezig is, via gasvormige verliezen verloren gaat. Bemesting met digestaat wordt uitgevoerd door middel van injectie, waardoor de ammoniakvervluchtiging beperkt wordt. Na de oogst wordt geen vanggewas geteeld omdat is aangenomen dat een vanggewas door het langere groeiseizoen van de energimaïs niet goed kan aanslaan voor de winter begint. Voor energimaïs is het rekenscenario 'Attributie' niet doorgerekend, omdat het digestaat binnen het beschreven systeem als meststof op het bedrijf gebruikt kan worden en er geen andere restproducten zijn.

Kengetallen

De gemiddelde opbrengst voor Zuidoost Nederland is geschat op 17,5 ton droge stof per ha (zie Van der Voort, 2007; persoonlijke mededeling J. Groten (PSG), 2008). De nutriëntengehalten van energimaïs zijn geschat door de gehalten in snijmaïs te nemen (zie www.handboeksnijmais.nl). De hoeveelheid niet-geoogste delen (wortel en stoppel) is berekend met behulp van de verhouding tussen niet-geoogst en geoogst bij snijmaïs (Schröder *et al.*, 2009a). Er is een stikstofgehalte van 1% aangenomen in de gewasrest en de verhouding met de andere twee nutriënten is verondersteld gelijk te zijn aan die in het geoogste materiaal. Voor toepassing in een vergistinginstallatie op het bedrijf, zal energimaïs ingekuuld worden waarvoor aangenomen is dat 5% van de geoogste biomassa/energie verloren gaat door verademing. Ten behoeve van de IPCC definitie van gewasrest, is aangenomen dat op het moment van oogsten 100% van de niet-geoogste delen aanwezig is in het gewas.

Tabel I.3. Kengetallen van de energimaïs op zand (zie tekst voor uitleg).

Eenheid	Droge stofopbrengst	N-opbrengst	P-opbrengst	K-opbrengst
	ton/ha	kg/ha	Kg/ha	kg/ha
Geoogst	17,5	219	34,2	219
Niet-geoogst	3,1	30,9	4,8	30,9
Gewasrest ¹	3,1	30,9	4,8	30,9

¹ Gewasrest geschat volgens definitie van het IPCC (aanwezig tijdens de oogst) ten behoeve van de berekening van N₂O emissie uit gewasresten

Voor de berekening van de nutriëntenbalansen zijn de volgende aannamen gedaan:

- De teelt van energiemais op zand wordt bemest met 185 kg N werkzaam per ha, bestaande uit 208 kg N totaal uit digestaat van energiemais en 7,3 kg kunstmest N.
- Atmosferische stikstofdepositie is geschat op 30 kg N per ha.
- De ammoniakemissie door toediening van digestaat via injectie bedraagt 4,2 kg N per ha.
- De aanvoer van fosfaatkunstmest is gelijk aan de afvoer.
- De aanvoer van kaliumkunstmest is gelijk aan de afvoer.

Er is aangenomen dat er gemiddeld berekend wordt met 10 mm water per jaar voor de teelt en opbrengst zoals beschreven in Tabel 1.3 (persoonlijke mededeling van G. Meuffels (PSG, 2008): 30-60 mm in zeer droge jaren).

I.4 Suikerbiet

Keten voor ethanol

In deze keten wordt suikerbiet gebruikt voor de productie van bioethanol, waarbij de biet met kop gebruikt wordt. Daarnaast wordt er bietenblad geproduceerd en een gewasrest van wortels die op het land achterblijft. In het rekenscenario '*Energie*' wordt ook het blad geoogst en afgevoerd naar een middelgrote vergistinginstallatie voor de productie van elektriciteit uit biogas. De bieten met kop gaan naar een ethanolafabriek, waar de suiker wordt geëxtraheerd in het ruwsap. Hierbij ontstaat perspulp als restproduct. De suiker wordt vervolgens vergist tot ethanol en dit proces heeft vinasse als bijproduct. Vinasse heeft geen energetische waarde maar wordt in deze studie toegevoegd aan het digestaat zodat gebruik gemaakt wordt van de nutriënten in de vinasse, voornamelijk kalium. De ethanol wordt, meestal na menging met benzine, gedistribueerd naar tankstations. In het rekenscenario '*Energie*' wordt de perspulp bij de ethanolafabriek vergist voor de productie van biogas, wat direct gebruikt wordt voor de energievoorziening van de ethanolafabriek. Voor het transport van bieten is een afstand van 90 km aangenomen, de huidige gemiddelde afstand waarover in Nederland bieten naar een suikerfabriek vervoerd worden. In het rekenscenario '*Energie*' wordt het blad afgevoerd naar een middelgrote vergistinginstallatie waarvoor een transportafstand van 25 km is aangenomen, Het schaalvoordeel van een (nog) grotere vergistinginstallatie weegt niet op tegen de nadelen van een grotere vervoersafstand. Het digestaat van de vergisting van perspulp en van bietenblad wordt hergebruikt op het bedrijf waar de bietenteelt heeft plaatsgevonden. In het rekenscenario '*Attributie*' wordt alleen energie geproduceerd in de vorm van ethanol; van de overige producten is het transport, de verwerking en de bestemming niet beschreven.

Keten voor biogas

In dit systeem met suikerbiet wordt geen ethanol geproduceerd, maar worden ook de bieten vergist. Hele bieten, inclusief blad, worden in een middelgrote installatie vergist, waarbij 25 km als gemiddelde vervoersafstand is aangenomen en de biet vers vergist wordt zonder eerst in te kuilen zoals bij de energiemais op de boerderij. Met het biogas wordt elektriciteit opgewekt. Ook hier wordt het digestaat teruggebracht naar het bedrijf van herkomst en als meststof benut. Net als bij energiemais ontstaan hierbij naast digestaat geen andere bij- of restproducten en is het rekenscenario '*Attributie*' niet van toepassing.

Kengetallen

Bij de opbrengsten (biet, kop en blad) die in deze studie gebruikt zijn voor suikerbiet, is een combinatie van gegevens van IRS (Corré en Langeveld, 2008) en KWIN (2006) gebruikt. De nutriëntengehalten zijn ontleend uit CVB (2007). De hoeveelheid gewasrest (fijne wortels) is berekend door 6% te nemen van de totaal bovengrondse biomassa (biet+kop+blad). De nutriëntengehalten van de gewasrest zijn gelijk gehouden aan die van energiemais. Ook hier is ten behoeve van de IPCC definitie van gewasrest aangenomen dat op het moment van oogsten 100% van de niet-geoogste delen aanwezig is in het gewas.

Tabel 1.4. Kengetallen van de suikerbiet op zand (zie tekst voor uitleg).

Eenheid	Droge stofopbrengst	N-opbrengst	P-opbrengst	K-opbrengst
	ton/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha
Biet met kop	16,4	107	25,4	130
Blad	4,3	125	10,0	151
Niet-geogst	1,2	12,4	1,9	12,4
Gewasrest ¹	1,2	12,4	1,9	12,4

¹ Gewasrest geschat volgens definitie van het IPCC (aanwezig tijdens de oogst) ten behoeve van de berekening van N₂O emissie uit gewasresten

Voor de berekening van de nutriëntenbalansen zijn de volgende aannamen gedaan:

- De teelt van suikerbiet op zand wordt bemest met 150 kg N werkzaam per ha, bestaande uit 175 kg N totaal uit digestaat van suikerbiet; hierbij is er nog digestaat 'over' met 45 kg N totaal voor gebruik op andere gewassen.
- Atmosferische stikstofdepositie is geschat op 30 kg N per ha.
- De totale ammoniakemissie door toediening van digestaat via injectie bedraagt 4,4 kg N per ha.
- De aanvoer van fosfaatkunstmest is gelijk aan de afvoer.
- De aanvoer van kaliumkunstmest is gelijk aan de afvoer.

Er is aangenomen dat er gemiddeld berekend wordt met 90 mm water per jaar voor de teelt en opbrengst zoals beschreven in Tabel 1.3 (persoonlijke mededeling van G. Meuffels (PSG, 2008): 60-120 mm, afhankelijk van het jaar).

1.5 Berekening nawerking gewasresten

De verwachting is dat de totale hoeveelheid nutriënten in de gewasrest op lange termijn in minerale vorm zal vrijkomen in de bodem. Deze nutriënten komen voor een deel ook beschikbaar tijdens perioden waarin geen gewasopname plaatsvindt (bijvoorbeeld in de winter) waardoor de bemestende werking lager is dan de hoeveelheid nutriënten in de gewasrest. Deze lagere werking wordt berekend met een werkingcoëfficiënt (0 - 100%). Voor stikstof is een generieke werkingcoëfficiënt van 60% gebruikt (lange termijn werking; zie Schröder *et al.*, 2009a) en voor kalium 100% (voorjaar) en 50% (najaar), afhankelijk van het tijdstip waarop de gewasrest in de bodem terecht komt.

In de analyse is het effect van een teelt van groene braak of een energiegewas op de bemestingbehoefte van volggewassen berekend (in kunstmestequivalenten) en vervolgens is bepaald hoeveel energiegebruik en CO₂ en N₂O emissie gepaard gaan met de productie en gebruik van deze kunstmest. Door de bemestende waarde kan op het kunstmestgebruik van het bedrijf bespaard worden en de verschillen tussen groene braak en een energiegewas worden toegekend aan het energiegewas. De resultaten ten aanzien van de bemestende waarde van de gewasrest voor de stikstoftoediening op bedrijfsniveau zijn ook gebruikt bij de berekening van het effect op het nitraatgehalte.

Tabel I.5. De geschatte nawerking van stikstof en kalium van de niet-geogoste gewasdelen en berekende vermeden fossiele energiegebruik en BKG emissie door besparing op kunstmestgebruik.

	Groene braak	Winterkoolzaad	Energiemaïs	Suikerbiet
N-nawerking (kg N)	73	42	19	7,4
K ₂ O-nawerking (kg K ₂ O)	133	42	19	7,5
Vermeden energie (MJ)	3620	1910	853	343
Vermeden BKG emissie (kg CO ₂ -eq.)	431	236	105	42

De gewasrest veroorzaakt ook N₂O emissie en die wordt berekend in de broeikasgasbalans volgens de rekenregels van het IPCC. Hierbij heeft het IPCC gewasrest gedefinieerd als de biomassa die tijdens de oogst aanwezig is, maar niet van het land wordt afgevoerd. Dat betekent dat biomassa die tijdens de groeiperiode al is afgestorven en op of in de bodem terecht is gekomen niet wordt meegerekend bij de regels van het IPCC. Voor de berekening van de nawerking/bemestende waarde is een andere definitie gehanteerd die beter aansluit bij de aanpak van de Werkgroep Onderbouwing Derogatie (zie o.a. Schröder *et al.*, 2009a), namelijk het totaal aan niet-geogoste biomassa/nutriënten.

I.6 Berekening bodemorganische stof

In de studie van De Willigen *et al.* (2008) zijn verschillende modellen gebruikt om het evenwichtniveau van organische koolstof in de bodem uit te rekenen indien jaarlijks een vaste hoeveelheid organische stof wordt toegediend. Het gemiddelde van de resultaten van twee uiteenlopende modellen (MINIP-b en CENTURY) is voor de huidige analyse in dit rapport toegepast. Hierbij zijn standaard condities verondersteld waaronder afbraak en accumulatie plaatsvinden (100% zand, temperatuur = 9°C, en geen vochtbeperking). De kwaliteit van de organische stofinvoer is ook van belang: bij (tarwe)stro levert een jaarlijkse input van 1 kg C/ha op termijn een evenwichtniveau van 5,6 kg C/ha in de bodem op, terwijl dat voor groene biomassa ('green manure') gelijk is aan 3,4 kg C/ha (ongepubliceerde resultaten van De Willigen *et al.*, 2008). Voor de analyse in dit rapport is verondersteld dat de organische input, de gewasresten en het digestaat, voor 50% uit materiaal bestaat met de afbraakeigenschappen van stro en voor 50% met die van groene biomassa.

Tabel I.6. *Berekende organische stofaanvoer via gewasresten en digestaat, koolstofvastlegging en het indirecte CO₂ effect van de vervanging van groene braak door energiegewassen per ha.*

	Groene braak	Winterkoolzaad	Energie-maïs	Suikerbiet/ethanol	Suikerbiet/biogas
Bruto aanvoer (ton ds)	9,0	6,9	5,7	2,4	4,3
Bodem C evenwicht (ton C) ¹	1,82	1,40	1,16	0,49	0,88
Relatief tov standaard C voorraad (%) ²	6,0	4,6	3,8	1,6	2,9
Vershil in CO ₂ vastlegging per jaar (ton CO ₂) ³	-	-0,77	-1,22	-2,45	-1,73

¹ *Bijdrage van de teelt aan de bedrijfsgemiddelde bodemkoolstofvoorraad op lange termijn (per ha energiegewas zijn de waarden 10x zo groot).*

² *Standaard C voorraad is hier geschat op 2% organische stof in de bovenste 20 cm van de bodem met een dichtheid van 1300 kg m³.*

³ *Vershil in CO₂ vastlegging door het vervangen van groene braak met een energiegewas over een periode van 20 jaar ('carbon pay back time'; zie EC, 2008).*

1.7 Berekening nitraatgehalte

Voor de berekening van het nitraatgehalte is de aanpak van de Werkgroep Onderbouwing Derogatie (WOD) gevolgd die het mest-ABC gebruikt dat door het RIVM is ontwikkeld (Fraters *et al.*, 2007). Met behulp van (i) het bodemstikstofoverschot, (ii) een gemiddeld neerslagoverschot en (iii) een netto uitspoelingfractie, wordt het nitraatgehalte in het grondwater uitgerekend. De relatie tussen deze drie variabelen is gebaseerd op metingen in de praktijk. Voor droge zandgronden wordt een gemiddeld neerslagoverschot van 332 mm per jaar en een netto uitspoelingfractie van 0,73 gehanteerd voor akkerbouwmatige teelten (Schröder *et al.*, 2009a).

Het bodemstikstofoverschot wordt berekend in de stikstofbalans als het verschil tussen aanvoerposten (depositie, bemesting en fixatie) en afvoerposten (gewasafvoer en ammoniakvervluchtiging). Naast het bodemoverschot is ook het neerslagoverschot van belang voor de nitraatuitspoeling. Het neerslagoverschot van energiegewassen kan zowel kleiner dan groene braak zijn omdat er door energiegewassen meer biomassa geproduceerd wordt (en dus meer water verdampt), als groter omdat energiegewassen korter op het veld staan door een kortere groeiperiode. Door verschillen in neerslagoverschot zal het nitraatgehalte bij eenzelfde nitraatoverschot anders zijn. Maximale verschillen in verdamping tussen een perceel groene braak en een energiegewas zijn geschat op ca. +/- 50 mm per jaar en komen dan uit op gemiddeld +/- 5 mm voor het hele bedrijf. Daardoor wordt het bedrijfsgemiddelde neerslagoverschot 327 respectievelijk 337 mm in plaats van 332 mm. Deze verschillen zijn zo klein dat in deze studie voor zowel groene braak als energiegewas met dezelfde waarde van 332 mm gerekend is.

Bijlage II.

Balansen van energie en broeikasgassen

II.1 Winterkoolzaad

Tabel II.1. *Berekende energiebalans van de keten winterkoolzaad-biodiesel in GJ/ha (vermeden) fossiel energiegebruik van reken scenario 'Attributie'.*

Opties	Std	D-20%	F-20%	T-20%	pN ₂ O =0	bN ₂ O=0,5	Oil+10%	Ng-20%	Gw+20%
Energieverbruik									
Landbouw	10,5	9,8	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	9,2	10,7
Transport	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5
Fabriek	20,2	20,2	16,2	20,2	20,2	20,2	21,6	20,2	24,3
Distributie	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,4	1,7
<i>Totaal</i>	<i>32,5</i>	<i>31,9</i>	<i>28,5</i>	<i>32,4</i>	<i>32,5</i>	<i>32,5</i>	<i>34,1</i>	<i>31,3</i>	<i>37,2</i>
Attributie									
Stro	2,7	2,6	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,4	2,8
Restproducten	6,2	6,0	5,6	6,2	6,2	6,2	5,9	5,8	6,9
Bio-energie	23,6	23,3	20,2	23,5	23,6	23,6	25,5	23,0	27,5
Bruto energieopbrengst									
Biobrandstof	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	66,8	60,7	72,9
Elektriciteit	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Totaal</i>	<i>60,7</i>	<i>60,7</i>	<i>60,7</i>	<i>60,7</i>	<i>60,7</i>	<i>60,7</i>	<i>66,8</i>	<i>60,7</i>	<i>72,9</i>
Netto energieopbrengst	37,1	37,4	40,6	37,2	37,1	37,1	41,3	37,7	45,4

Tabel II.2. *Berekende broeikasgassenbalans van de keten winterkoolzaad-biodiesel in ton CO₂-eq./ha emissie (reductie) van reken scenario 'Attributie'.*

Opties	Std	D-20%	F-20%	T-20%	pN ₂ O=0	bN ₂ O=0,5	Oil+10%	Ng-20%	Gw+20%
Emissie N ₂ O									
Landbouw N ₂ O	1,72	1,72	1,72	1,72	1,22	1,10	1,72	1,42	1,76
Attributie									
Stro	0,48	0,48	0,48	0,48	0,34	0,31	0,46	0,39	0,49
Restproducten	0,48	0,48	0,48	0,48	0,34	0,31	0,44	0,39	0,49
Bio-energie	0,76	0,76	0,76	0,76	0,54	0,49	0,82	0,63	0,78
Emissie CO ₂									
Landbouw	0,61	0,57	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,55	0,63
Transport	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04
Fabriek	1,50	1,50	1,20	1,50	1,50	1,50	1,61	1,50	1,80
Distributie	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,10	0,13
<i>Totaal</i>	<i>2,25</i>	<i>2,21</i>	<i>1,95</i>	<i>2,24</i>	<i>2,25</i>	<i>2,25</i>	<i>2,36</i>	<i>2,18</i>	<i>2,59</i>
Attributie									
Stro	0,16	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,14	0,16
Restproducten	0,41	0,40	0,37	0,41	0,41	0,41	0,40	0,40	0,47
Bio-energie	1,68	1,66	1,42	1,67	1,68	1,68	1,82	1,65	1,97
Emissie CH ₄									
Emissie CH ₄	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bruto emissie reductie									
Biobrandstof	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,96	4,51	5,41
Elektriciteit	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Totaal</i>	<i>4,51</i>	<i>4,51</i>	<i>4,51</i>	<i>4,51</i>	<i>4,51</i>	<i>4,51</i>	<i>4,96</i>	<i>4,51</i>	<i>5,41</i>
Netto emissie reductie	2,07	2,09	2,33	2,07	2,29	2,34	2,33	2,23	2,66

Tabel II.3. *Berekende energiebalans van de keten winterkoolzaad-biodiesel in GJ/ha (vermeden) fossiel energiegebruik van rekenscenario 'Energie'.*

Opties	Std	D-20%	F-20%	T-20%	pN ₂ O=0	bN ₂ O=0,5	Oil+10%	Ng-20%	Gw+20%
Energieverbruik									
Landbouw	11,0	10,3	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	9,7	11,3
Transport	0,9	0,9	0,9	0,7	0,9	0,9	0,9	0,9	1,1
Fabriek	23,7	23,7	19,0	23,7	23,7	23,7	25,1	23,7	28,5
Distributie	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,4	1,7
<i>Totaal</i>	<i>37,1</i>	<i>36,3</i>	<i>32,3</i>	<i>36,9</i>	<i>37,1</i>	<i>37,1</i>	<i>38,5</i>	<i>35,8</i>	<i>42,6</i>
Attributie									
Stro	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Restproducten	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Bio-energie	37,1	36,3	32,3	36,9	37,1	37,1	38,5	35,8	42,6
Bruto energieopbrengst									
Biobrandstof	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	66,8	60,7	72,9
Elektriciteit	55,8	55,8	55,8	55,8	55,8	55,8	54,1	55,8	66,9
<i>Totaal</i>	<i>116,5</i>	<i>116,5</i>	<i>116,5</i>	<i>116,5</i>	<i>116,5</i>	<i>116,5</i>	<i>120,9</i>	<i>116,5</i>	<i>139,8</i>
Netto energieopbrengst	79,4	80,2	84,2	79,6	79,4	79,4	82,4	80,7	97,2

Tabel II.4. *Berekende broeikasgasbalans van de keten winterkoolzaad-biodiesel in ton CO₂eq./ha emissie (reductie) van rekenscenario 'Energie'.*

Opties	Std	D-20%	F-20%	T-20%	pN ₂ O=0	bN ₂ O=0,5	Oil+10%	Ng-20%	Gw+20%
Emissie N₂O									
Landbouw N ₂ O	1,72	1,72	1,72	1,72	1,22	1,10	1,72	1,42	1,76
Attributie									
Stro	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Restproducten	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bio-energie	1,72	1,72	1,72	1,72	1,22	1,10	1,72	1,42	1,76
Emissie CO₂									
Landbouw	0,65	0,60	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,59	0,68
Transport	0,07	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08
Fabriek	1,76	1,76	1,41	1,76	1,76	1,76	1,86	1,76	2,12
Distributie	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,10	0,13
<i>Totaal</i>	<i>2,59</i>	<i>2,54</i>	<i>2,24</i>	<i>2,57</i>	<i>2,59</i>	<i>2,59</i>	<i>2,69</i>	<i>2,52</i>	<i>3,00</i>
Attributie									
Stro	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Restproducten	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bio-energie	2,59	2,54	2,24	2,57	2,59	2,59	2,69	2,52	3,00
Emissie CH₄									
Stro	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bruto emissie reductie									
Biobrandstof	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,96	4,51	5,41
Elektriciteit	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,20	3,30	3,96
<i>Totaal</i>	<i>7,81</i>	<i>7,81</i>	<i>7,81</i>	<i>7,81</i>	<i>7,81</i>	<i>7,81</i>	<i>8,16</i>	<i>7,81</i>	<i>9,37</i>
Netto emissie reductie	3,51	3,55	3,86	3,52	4,00	4,12	3,75	3,87	4,61

II.2 Energiemaïs

Tabel II.5. Berekende energiebalans van de keten energiemaïs-biogas in GJ/ha (vermeden) fossiel energiegebruik van rekenscenario 'Energie'.

Opties	Std	D-20%	F-20%	T-20%	pN ₂ O=0	bN ₂ O=0,5	Gis+10%	Ng-20%	Gw+20%
Energieverbruik									
Landbouw	9,2	7,6	9,2	9,2	9,2	9,2	9,2	7,7	8,8
Transport	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Fabriek	17,0	17,0	13,6	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	20,3
Distributie	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Totaal</i>	<i>26,2</i>	<i>24,6</i>	<i>22,8</i>	<i>26,2</i>	<i>26,2</i>	<i>26,2</i>	<i>26,2</i>	<i>24,7</i>	<i>29,1</i>
Attributie									
Bio-energie	26,2	24,6	22,8	26,2	26,2	26,2	26,2	24,7	29,1
Bruto energieopbrengst									
Biobrandstof	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Elektriciteit	171,5	171,5	171,5	171,5	171,5	171,5	188,7	171,5	205,8
<i>Totaal</i>	<i>171,5</i>	<i>171,5</i>	<i>171,5</i>	<i>171,5</i>	<i>171,5</i>	<i>171,5</i>	<i>188,7</i>	<i>171,5</i>	<i>205,8</i>
Netto energieopbrengst	145,3	146,9	148,7	145,3	145,3	145,3	162,4	146,8	176,7

Tabel II.6. Berekende broeikasgasbalans van de keten energiemaïs-biogas in ton CO₂-eq./ha emissie (reductie) van rekenscenario 'Energie'.

Opties	Std	D-20%	F-20%	T-20%	pN ₂ O=0	bN ₂ O=0,5	Gis+10%	Ng-20%	Gw+20%
Emissie N ₂ O									
Landbouw N ₂ O	1,56	1,56	1,56	1,56	1,55	0,78	1,56	1,20	1,52
Attributie									
Bio-energie	1,56	1,56	1,56	1,56	1,55	0,78	1,56	1,20	1,52
Emissie CO ₂									
Landbouw	0,66	0,55	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,58	0,66
Transport	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fabriek	1,26	1,26	1,01	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,51
Distributie	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Totaal</i>	<i>1,92</i>	<i>1,81</i>	<i>1,67</i>	<i>1,92</i>	<i>1,92</i>	<i>1,92</i>	<i>1,92</i>	<i>1,84</i>	<i>2,17</i>
Attributie									
Bio-energie	1,92	1,81	1,67	1,92	1,92	1,92	1,92	1,84	2,17
Emissie CH ₄	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,47	1,34	1,60
Bruto emissie reductie									
Biobrandstof	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Elektriciteit	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	11,15	10,14	12,17
<i>Totaal</i>	<i>10,14</i>	<i>10,14</i>	<i>10,14</i>	<i>10,14</i>	<i>10,14</i>	<i>10,14</i>	<i>11,15</i>	<i>10,14</i>	<i>12,17</i>
Netto emissie reductie	5,32	5,44	5,57	5,32	5,33	6,10	6,20	5,76	6,88

II.3 Suikerbiet-ethanol

Tabel II.7. *Berekende energiebalans van de keten suikerbiet-ethanol in GJ/ha (vermeden) fossiel energiegebruik van rekenscenario 'Attributie'.*

Opties	Std	D-20%	F-20%	T-20%	pN ₂ O=0	bN ₂ O=0,5	Oil+10%	Ng-20%	Gw+20%
Energieverbruik									
Landbouw	19,9	17,6	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	18,7	20,8
Transport	6,7	6,7	6,7	5,4	6,7	6,7	6,7	6,7	8,1
Fabriek	58,8	58,8	47,1	58,8	58,8	58,8	64,7	58,8	70,6
Distributie	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	3,1	2,8	3,4
<i>Totaal</i>	<i>88,3</i>	<i>86,0</i>	<i>76,5</i>	<i>87,0</i>	<i>88,3</i>	<i>88,3</i>	<i>94,5</i>	<i>87,1</i>	<i>102,9</i>
Attributie									
Blad	3,6	3,2	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,3	3,6
Restproducten	6,4	5,9	6,1	6,1	6,4	6,4	4,7	6,2	7,1
Bio-energie	78,4	76,8	66,9	77,3	78,4	78,4	86,2	77,6	92,1
Bruto energieopbrengst									
Biobrandstof	185,3	185,3	185,3	185,3	185,3	185,3	203,9	185,3	222,4
Elektriciteit	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Totaal</i>	<i>185,3</i>	<i>185,3</i>	<i>185,3</i>	<i>185,3</i>	<i>185,3</i>	<i>185,3</i>	<i>203,9</i>	<i>185,3</i>	<i>222,4</i>
Netto energieopbrengst	106,9	108,5	118,4	108,0	106,9	106,9	117,7	107,7	130,3

Tabel II.8. *Berekende broeikasgasbalans van de keten suikerbiet-ethanol in ton CO₂-eq./ha emissie (reductie) van rekenscenario 'Attributie'.*

Opties	Std	D-20%	F-20%	T-20%	pN ₂ O=0	bN ₂ O=0,5	Oil+10%	Ng-20%	Gw+20%
Emissie N₂O									
Landbouw N ₂ O	1,52	1,52	1,52	1,52	1,05	1,00	1,52	1,24	1,54
Attributie									
Blad	0,32	0,32	0,32	0,32	0,22	0,21	0,32	0,26	0,32
Restproducten	0,25	0,25	0,25	0,25	0,18	0,17	0,18	0,21	0,26
Bio-energie	0,95	0,95	0,95	0,95	0,65	0,63	1,02	0,77	0,96
Emissie CO₂									
Landbouw	1,31	1,14	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,24	1,37
Transport	0,50	0,50	0,50	0,40	0,50	0,50	0,50	0,50	0,60
Fabriek	3,40	3,40	2,72	3,40	3,40	3,40	3,74	3,40	4,08
Distributie	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,23	0,21	0,25
<i>Totaal</i>	<i>5,42</i>	<i>5,25</i>	<i>4,74</i>	<i>5,32</i>	<i>5,42</i>	<i>5,42</i>	<i>5,78</i>	<i>5,36</i>	<i>6,31</i>
Attributie									
Blad	0,23	0,20	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,22	0,24
Restproducten	0,42	0,39	0,40	0,40	0,42	0,42	0,31	0,41	0,47
Bio-energie	4,77	4,66	4,11	4,69	4,77	4,77	5,24	4,73	5,60
Emissie CH₄									
Emissie CH ₄	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bruto emissie reductie									
Biobrandstof	13,34	13,34	13,34	13,34	13,34	13,34	14,68	13,34	16,01
Elektriciteit	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Totaal</i>	<i>13,34</i>	<i>13,34</i>	<i>13,34</i>	<i>13,34</i>	<i>13,34</i>	<i>13,34</i>	<i>14,68</i>	<i>13,34</i>	<i>16,01</i>
Netto emissie reductie	7,62	7,73	8,28	7,70	7,92	7,95	8,41	7,84	9,45

Tabel II.9. *Berekende energiebalans van de keten suikerbiet-ethanol in GJ/ha (vermeden) fossiel energiegebruik van rekenscenario 'Energie'.*

Opties	Std	D-20%	F-20%	T-20%	pN ₂ O=0	bN ₂ O=0,5	Sui+10%	Ng-20%	Gw+20%
Energieverbruik									
Landbouw	18,6	16,1	18,6	17,2	18,6	18,6	18,6	17,4	19,3
Transport	8,6	8,6	8,6	6,9	8,6	8,6	8,6	8,6	10,4
Fabriek	66,7	66,7	53,4	66,7	66,7	66,7	71,6	66,7	80,1
Distributie	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	3,1	2,8	3,4
<i>Totaal</i>	<i>96,8</i>	<i>94,3</i>	<i>83,4</i>	<i>93,7</i>	<i>96,8</i>	<i>96,8</i>	<i>102,0</i>	<i>95,6</i>	<i>113,1</i>
Attributie									
Blad	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Restproducten	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Bio-energie	96,8	94,3	83,4	93,7	96,8	96,8	102,0	95,6	113,1
Bruto energieopbrengst									
Biobrandstof	185,3	185,3	185,3	185,3	185,3	185,3	203,9	185,3	222,4
Elektriciteit	80,1	80,1	80,1	80,1	80,1	80,1	70,2	80,1	96,1
<i>Totaal</i>	<i>265,4</i>	<i>265,4</i>	<i>265,4</i>	<i>265,4</i>	<i>265,4</i>	<i>265,4</i>	<i>274,0</i>	<i>265,4</i>	<i>318,5</i>
Netto energieopbrengst	168,6	171,1	181,9	171,7	168,6	168,6	172,0	169,8	205,3

Tabel II.10. *Berekende broeikasgassenbalans van de keten suikerbiet-ethanol in ton CO₂-eq./ha emissie (reductie) van rekenscenario 'Energie'.*

Opties	Std	D-20%	F-20%	T-20%	pN ₂ O=0	bN ₂ O=0,5	Sui+10%	Ng-20%	Gw+20%
Emissie N₂O									
Landbouw N ₂ O	1,08	1,08	1,08	1,08	1,22	0,47	1,08	0,79	1,01
Attributie									
Blad	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Restproducten	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bio-energie	1,08	1,08	1,08	1,08	1,22	0,47	1,08	0,79	1,01
Emissie CO₂									
Landbouw	1,39	1,22	1,39	1,29	1,39	1,39	1,39	1,33	1,48
Transport	0,64	0,64	0,64	0,51	0,64	0,64	0,64	0,64	0,77
Fabriek	3,99	3,99	3,19	3,99	3,99	3,99	4,26	3,99	4,79
Distributie	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,23	0,21	0,25
<i>Totaal</i>	<i>6,24</i>	<i>6,06</i>	<i>5,44</i>	<i>6,01</i>	<i>6,24</i>	<i>6,24</i>	<i>6,52</i>	<i>6,17</i>	<i>7,29</i>
Attributie									
Blad	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Restproducten	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bio-energie	6,24	6,06	5,44	6,01	6,24	6,24	6,52	6,17	7,29
Emissie CH₄									
Bio-energie	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,18	0,21	0,25
Bruto emissie reductie									
Biobrandstof	13,34	13,34	13,34	13,34	13,34	13,34	14,68	13,34	16,01
Elektriciteit	4,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Totaal</i>	<i>18,08</i>	<i>13,34</i>	<i>13,34</i>	<i>13,34</i>	<i>13,34</i>	<i>13,34</i>	<i>14,68</i>	<i>13,34</i>	<i>16,01</i>
Netto emissie reductie	10,55	6,00	6,62	6,05	5,68	6,43	6,89	6,17	7,47

II.4 Suikerbiet-vergist

Tabel II.11. *Berekende energiebalans van de keten suikerbiet-vergist in GJ/ha (vermeden) fossiel energiegebruik van rekenscenario 'Energie'.*

Opties	Std	D-20%	F-20%	T-20%	pN ₂ O=0	bN ₂ O=0,5	Gis+10%	Ng-20%	Gw+20%
Energieverbruik									
Landbouw	14,5	12,1	14,5	13,9	14,5	14,5	14,5	13,3	14,4
Transport	6,0	6,0	6,0	4,8	6,0	6,0	6,0	6,0	7,2
Fabriek	21,1	21,1	16,9	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1	25,3
Distributie	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Totaal</i>	<i>41,6</i>	<i>39,2</i>	<i>37,4</i>	<i>39,8</i>	<i>41,6</i>	<i>41,6</i>	<i>41,6</i>	<i>40,4</i>	<i>46,9</i>
Attributie									
Bio-energie	41,6	39,2	37,4	39,8	41,6	41,6	41,6	40,4	46,9
Bruto energieopbrengst									
Biobrandstof	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Elektriciteit	213,5	213,5	213,5	213,5	213,5	213,5	234,9	213,5	256,2
<i>Totaal</i>	<i>213,5</i>	<i>213,5</i>	<i>213,5</i>	<i>213,5</i>	<i>213,5</i>	<i>213,5</i>	<i>234,9</i>	<i>213,5</i>	<i>256,2</i>
Netto energieopbrengst	171,9	174,3	176,2	173,7	171,9	171,9	193,3	173,1	209,3

Tabel II.13. *Berekende broeikasgasbalans van de keten suikerbiet-vergist in ton CO₂-eq./ha emissie (reductie) van rekenscenario 'Energie'.*

Opties	Std	D-20%	F-20%	T-20%	pN ₂ O=0	bN ₂ O=0,5	Gis+10%	Ng-20%	Gw+20%
Emissie N₂O									
Landbouw N ₂ O	1,08	1,08	1,08	1,08	1,22	0,47	1,08	0,79	1,01
Attributie									
Bio-energie	1,08	1,08	1,08	1,08	1,22	0,47	1,08	0,79	1,01
Emissie CO₂									
Landbouw	1,09	0,92	1,09	1,04	1,09	1,09	1,09	1,03	1,12
Transport	0,45	0,45	0,45	0,36	0,45	0,45	0,45	0,45	0,54
Fabriek	1,57	1,57	1,26	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,88
Distributie	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Totaal</i>	<i>3,11</i>	<i>2,93</i>	<i>2,79</i>	<i>2,97</i>	<i>3,11</i>	<i>3,11</i>	<i>3,11</i>	<i>3,04</i>	<i>3,53</i>
Attributie									
Bio-energie	3,11	2,93	2,79	2,97	3,11	3,11	3,11	3,04	3,53
Emissie CH₄									
Emissie CH ₄	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,61	0,55	0,67
Bruto emissie reductie									
Biobrandstof	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Elektriciteit	12,62	12,62	12,62	12,62	12,62	12,62	13,89	12,62	15,15
<i>Totaal</i>	<i>12,62</i>	<i>12,62</i>	<i>12,62</i>	<i>12,62</i>	<i>12,62</i>	<i>12,62</i>	<i>13,89</i>	<i>12,62</i>	<i>15,15</i>
Netto emissie reductie	7,89	8,06	8,20	8,02	7,75	8,49	9,09	8,24	9,94