



Beschrijving meetlat Energieboerderij voor energiegebruik en broeikasgasemissies

Toelichting van gehanteerde opzet en rekenregels

M.P.J. van der Voort
E.S.C. Stilma



Beschrijving meetlat Energieboerderij voor energiegebruik en broeikasgasemissies

Toelichting van gehanteerde opzet en rekenregels

M.P.J. van der Voort
E.S.C. Stilma



© 2012 Wageningen, Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO) onderzoeksinstituut Praktijkonderzoek Plant & Omgeving. 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 DLO.

Voor nadere informatie gelieve contact op te nemen met: DLO in het bijzonder onderzoeksinstituut Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, Business Unit Akkerbouw, Groene ruimte en Vollegrondsgroenten

DLO is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

PPO-publicatienr. 510

OPDRACHTGEVER:



Projectnummer: 3250034801

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, onderdeel van Wageningen UR
Business Unit Akkerbouw, Groene ruimte en Vollegrondsgroenten

Adres : Edelhertweg 1, 8219 PH Lelystad
: Postbus 430, 8200 AK Lelystad
Tel. : 0320 – 29 11 11
Fax : 0320 – 23 04 79
E-mail : info.ppo@wur.nl
Internet : www.ppo.wur.nl

Inhoudsopgave

pagina

1	INLEIDING	5
1.1	Aanleiding	5
1.2	Doel rapport.....	5
1.3	Opbouw rapport	6
2	ALGEMENE BESCHRIJVING MODELLEN	7
2.1	Keten covergisting van maïs	7
2.2	Keten covergisting van suikerbieten	8
2.3	Keten persen en veresteren van koolzaad.....	9
2.4	Opbouw van het model.....	9
2.5	Keuze kengetallen.....	10
3	TEELT VAN GEWASSEN.....	11
3.1	Opbrengst van het gewas.....	11
3.2	Uitgangsmateriaal.....	11
3.3	Organische meststoffen	11
3.4	Kunstmeststoffen.....	12
3.5	Gewasbeschermingsmiddelen.....	12
3.6	Directe en indirecte energie/BKG van machines	12
3.7	Directe en indirecte lachgasemissies.....	13
4	VERGISTEN VAN COVERGISTINGSGEWASSEN.....	17
4.1	Opbrengsten uit coproduct.....	17
4.2	Transport.....	17
4.3	Energieverbruik vergister	18
4.4	Elektriciteit- en warmteverbruik vergister	18
4.5	Indirect energieverbruik en broeikasgasemissies vergistingsinstallatie en opslag	19
4.6	Emissie lekverlies methaan.....	19
5	PERSEN VAN KOOLZAAD.....	21
5.1	Opbrengst uit persen koolzaad	21
5.2	Transport.....	21
5.3	Energieverbruik drogen/schonen	22
5.4	Energieverbruik opslag.....	22
5.5	Energieverbruik pers.....	22
5.6	Indirect energieverbruik en broeikasgasemissies pers en opslag	22
6	RESULTATENOVERZICHT.....	23
6.1	Energiebalans.....	23
6.2	Broeikasgasbalans.....	23
	LITERATUUR.....	25
	BELANGRIJKSTE ENERGIE- EN BROEIKASGASWAARDEN / EMISSIEFACTOREN	27

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Deze rapportage is onderdeel van het project Energieboerderij. Het project Energieboerderij heeft als doel om de duurzaamheid van in Nederland geproduceerde biomassa inzichtelijk te maken en te verbeteren. In plaats van het rekenen met gegevens uit de literatuur worden op praktijkbedrijven gegevens verzameld en geanalyseerd. Deze informatie vormt de basis voor het berekenen van duurzaamheidskengetallen en het optimaliseren van energieteelten.

Achtergrond van het project is de discussie over de oplossingsrichtingen voor het energievraagstuk en de bijdrage die hernieuwbare grondstoffen (in het bijzonder energieteelten) daaraan kunnen leveren. De initiatiefnemers van Energieboerderij hanteren als uitgangspunt dat de energieteelt dient te voldoen aan de duurzaamheidscriteria zoals vastgelegd in de EU richtlijn voor energie uit hernieuwbare grondstoffen (RED). Ook de regionale impact van meer energieteelten dient inzichtelijk te zijn. Uitgangspunt daarbij is dat alle berekeningen en resultaten eenduidig en transparant zijn voor alle betrokkenen en geïnteresseerden.

Er is in Energieboerderij gewerkt met een drietal in de praktijk functionerende ketens. De ketens dienen als basis voor de verzameling van bruikbare praktijkcijfers. Het betreft de volgende ketens:

1. Maïsteelt – vergisting - elektriciteit
2. Suikerbietenteelt – vergisting – elektriciteit
3. Koolzaad - PPO/biodiesel

Per keten is een groep ondernemers betrokken waar een van de bovengenoemde gewassen is geteeld. In de keten zijn teelt en verwerking gevolgd (registratie) en de benodigde metingen uitgevoerd. Met deze gegevens is over een periode van 4 jaar de duurzaamheid van het energiegewas voor de totale keten bepaald.

Daarnaast zijn van elk gewas jaarlijks proefvelden en zogenaamde 'best practice' demo's aangelegd waarin teeltvarianten zijn vergeleken en de invloed op de duurzaamheid is bepaald. De verzamelde praktijkcijfers en de cijfers van de proefvelden en de demo's zijn met de verschillende telersgroepen besproken, met als doel vast te stellen waar de verbeterpunten liggen.

De duurzaamheid is bepaald met een, in het project ontwikkelde, meetlat voor energie-efficiency en broeikasgasemissiereductie.

Energieboerderij is een initiatief van Vereniging Innovatief Platteland. De uitvoering is in handen van Praktijkonderzoek Plant & Omgeving (Wageningen UR), IRS en Cultus Agro advies.

Het project wordt mogelijk gemaakt door de volgende organisaties: Ministerie van EL&I, Wageningen UR, provincie Limburg, LLTB, Productschap Akkerbouw, Cosun en IRS, Argos Oil, Attero, Carnola, Vitelia, HAS Kennistransfer en OCI-Nitrogen.

1.2 Doel rapport

Om de doelstelling van Energieboerderij te realiseren is een meetlat ontwikkeld. Dit rapport is de onderbouwing van de meetlat. De onderbouwing is bedoeld om helder en duidelijk te communiceren over de meetlat. Dit moet bijdragen aan transparantie van het meetsysteem. De claims die worden gemaakt op basis van berekeningen met de meetlat van Energieboerderij kunnen op deze wijze door iedereen worden getoetst en nagerekend.

1.3 Opbouw rapport

Het rapport is opgebouwd uit twee delen. De ketens die centraal staan in het project Energieboerderij worden in een algemene toelichting op de meetlat beschreven. In de algemene toelichting worden de verschillende ketenschakels benoemd. Naast de ketens wordt ook de algemene insteek van de meetlat beschreven.

Het tweede deel van het rapport is de toelichting op gehanteerde uitgangspunten en kengetallen in de meetlat. De toelichting vindt plaats per ketenschakel/processtap. De gebruikte kengetallen zijn tevens opgenomen in de bijlage.

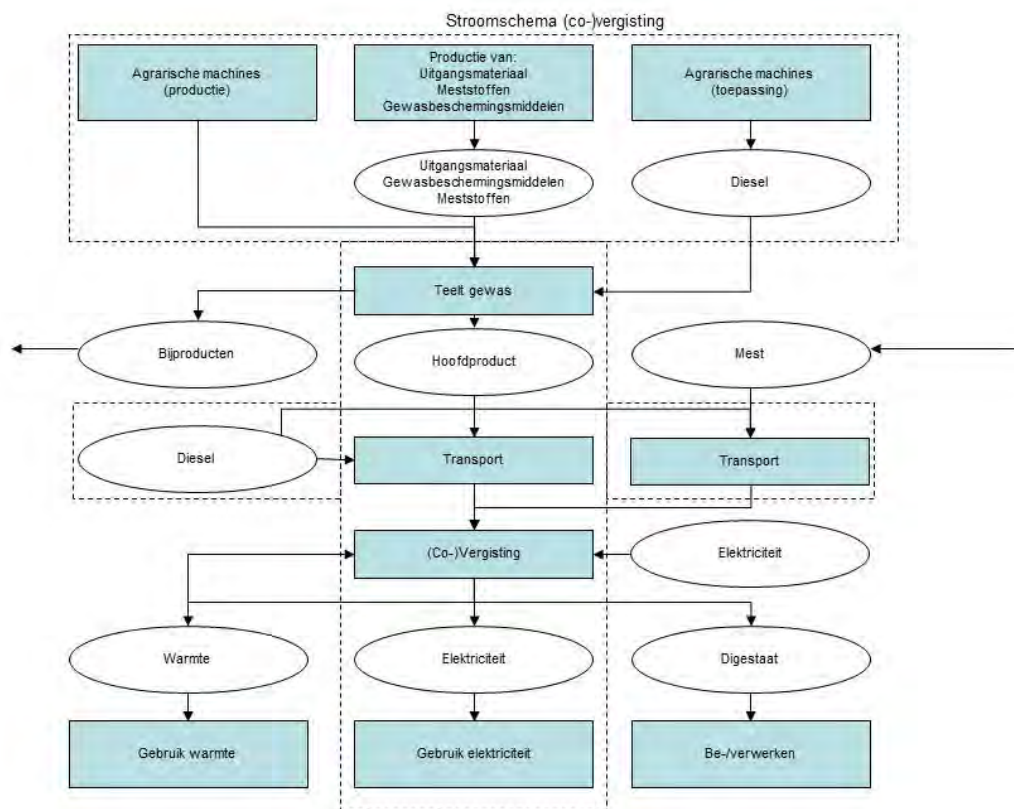
2 Algemene beschrijving modellen

Voor het project Energieboerderij zijn voor een drietal ketens vergelijkbare modellen ontwikkeld. De drie geselecteerde gewassen/ketens zijn covergisting van maïs, covergisting van suikerbieten (wortel en loof) en verwerking van koolzaad. De eerste twee ketens zijn gericht op energieproductie (elektriciteit via covergisting). De verwerking van koolzaad is gericht op biobrandstofproductie (PPO via koude persing). De geselecteerde ketens worden hieronder in de gelijknamige paragrafen toegelicht.

De drie ketens kennen een gelijke methodiek en systeemgrenzen voor het beoordelen van de teelt van het gewas op energiegebruik en broeikasgasemissies. De agrarische machines en de hulpstoffen, welke worden gebruikt in de teelt, worden beoordeeld. De agrarische machines (trekkers en werktuigen) bestaan uit twee delen. In het model wordt de productie van machines en het energieverbruik (voornamelijk diesel) tijdens de teelt meegerekend. De hulpstoffen zijn zaad, (kunst)meststoffen en gewasbeschermingsmiddelen. In het model wordt de productie van de hulpstoffen meegerekend in de teelt. Voor dierlijke mest wordt alleen de broeikasgasemissie voor toepassing van de dierlijke mest meegenomen. De lachgasemissie voor de teelt van de gewassen wordt bepaald op basis van de IPCC-methodiek. In de IPCC-methodiek voor de lachgasemissie wordt gerekend met stikstof uit kunstmest, dierlijke mest en gewasresten.

2.1 Keten covergisting van maïs

Een van de ketens binnen Energieboerderij is die van covergisting van maïs. De maïs wordt geteeld om te worden covergist in een mestvergistingsinstallatie. Het onderstaande schema geeft de verschillende schakels in deze keten weer. Hiermee wordt tevens inzicht gegeven in de systeemgrenzen.

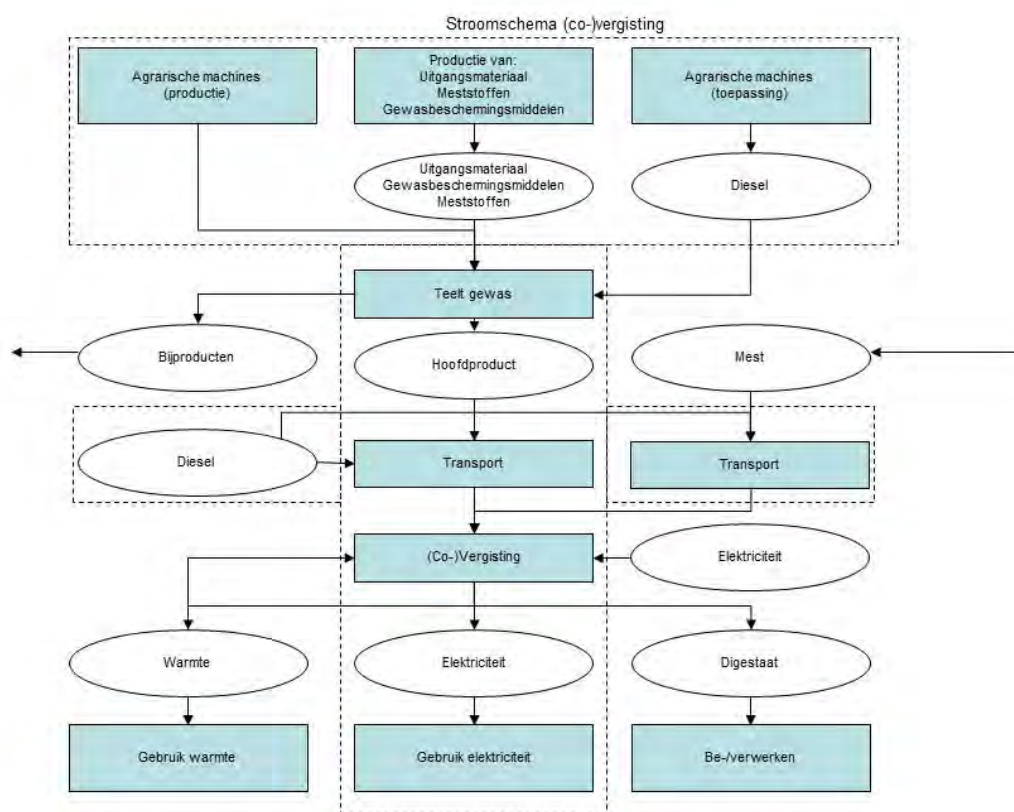


Figuur 1.: **Stroomschema covergisting van maïs**

In het stroomschema geeft de stippellijn aan welke activiteiten/schakels wel en niet worden meegenomen. In de berekening, welke voor Energieboerderij zijn uitgevoerd, wordt de elektriciteitsproductie als uitgangspunt genomen. Productie van warmte en eventuele positieve effecten van het gebruik digestaat zijn in de berekeningen buiten beschouwing gelaten. Deze keuze is gebaseerd op het feit dat de bestaande vergisters in Nederland maar beperkt gebruik maken van de warmte. De productie van warmte kan wel worden meegenomen als optie in de berekening.

2.2 Keten covergisting van suikerbieten

De tweede keten binnen Energieboerderij is die van covergisting van suikerbieten. De suikerbieten worden geteeld om te worden covergist in een mestvergistingsinstallatie. De biet en het loof worden in het kader van energieboerderij covergist. Het onderstaande schema geeft de verschillende schakels in deze keten weer.

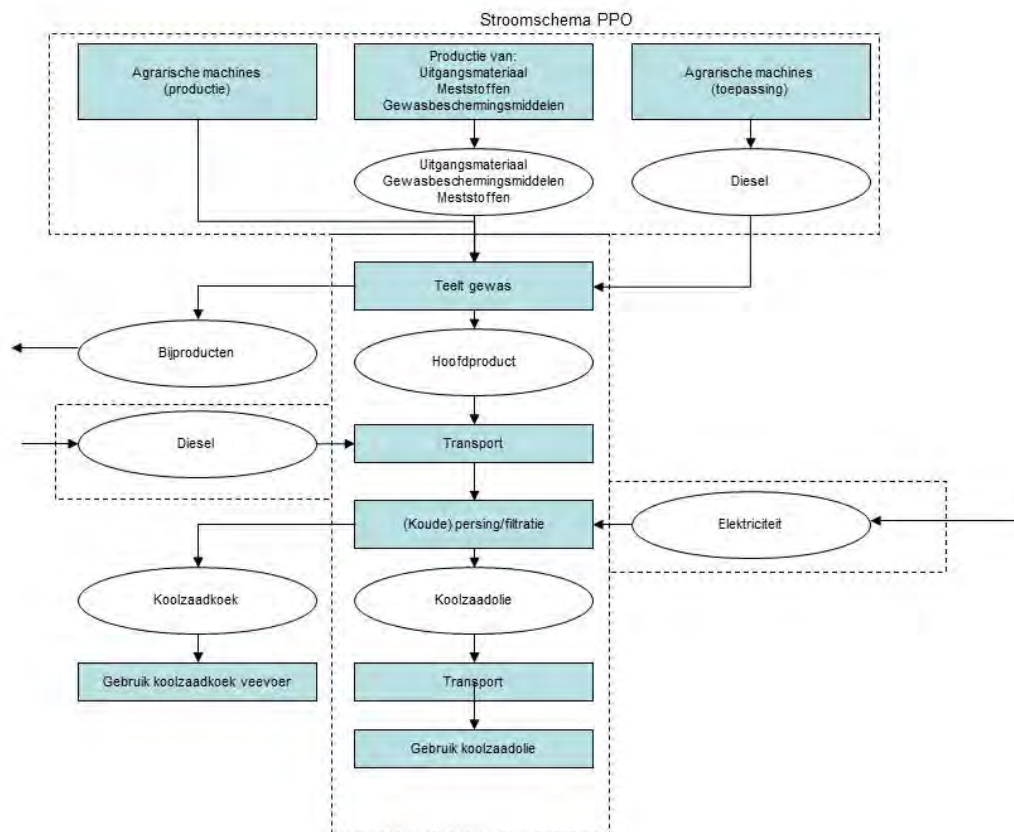


Figuur 2.: **Stroomschema covergisting van suikerbieten**

Het stroomschema voor covergisting van suikerbieten is dezelfde als voor maïs. Het gewas is alleen anders. In het stroomschema geeft de stippellijn aan welke activiteiten/schakels wel en niet worden meegenomen. In de berekening, welke voor Energieboerderij zijn uitgevoerd, wordt de elektriciteitsproductie als uitgangspunt genomen. Productie van warmte en eventuele positieve effecten van het gebruik digestaat zijn in de berekeningen buitenbeschouwing gelaten. Deze keuze is gebaseerd op het feit dat de bestaande vergisters in Nederland maar beperkt gebruik maken van de warmte. De productie van warmte kan wel worden meegenomen als optie in de berekening.

2.3 Keten persen en veresteren van koolzaad

Een derde keten binnen Energieboerderij is die voor persen en veresteren van koolzaad.



Figuur 3: **Stroomschema verwerking koolzaad tot PPO (Pure Plantaardige Olie)**

Het schema geeft aan dat voor de berekende gewassen het gebruikte uitgangsmateriaal, meststoffen, gewasbeschermingsmiddelen en dieselverbruik van landbouwmachines meegenomen zijn voor de teelt. Daarnaast is tevens de lachgasemissie door gebruik van meststoffen berekend op basis van gewasresten en uitspoeling. Verder in de keten is het dieselverbruik van het transport van het energiegewas naar de persinstallatie en het elektriciteitsverbruik van de installatie meegenomen. Voor koolzaad zijn er twee eindproducten mogelijk, namelijk koolzaadolie en biodiesel. De koolzaadolie komt direct vrij na persing, ook wel PPO (=pure plantaardige olie genaamd), de biodiesel na de verestering van koolzaadolie tot biodiesel. Voor de verestering zijn het transport, de methanol en elektriciteit voor verestering van koolzaadolie meegenomen.

2.4 Opbouw van het model

De hiervoor beschreven ketens zijn op een vergelijkbare wijze verwerkt tot een model. Het model kent drie onderdelen, namelijk teeltgegevens (per teler), processtappen en een resultatenoverzicht. De teeltgegevens zijn gebaseerd op de registraties per teler. Het model heeft ruimte om voor 10 verschillende telers de resultaten te berekenen. De teeltgegevens worden op basis van metingen, kengetallen en berekeningen verwerkt per processtap. Het model voor vergisting van maïs en suikerbieten kent twee processtappen, namelijk teelt en vergisting. Binnen de processtappen wordt het energiegebruik en de broeikasgasemissie berekend. Voor de keten vergisting van maïs en suikerbieten kan binnen de processtappen voor 10 telers specifiek worden weergegeven welke resultaten er worden geboekt. Op basis van de meetgegevens,

kengetallen en de berekeningen wordt een resultaat berekend. De berekening van het resultaat vindt plaats in het resultatenoverzicht. Het resultatenoverzicht geeft het overall resultaat van de 10 telers.

2.5 Keuze kengetallen

De kengetallen zijn van aanzienlijk invloed op de berekening van resultaten. De keuze van de kengetallen is derhalve een proces van zorgvuldige afweging. Binnen het project zijn de volgende afwegingen gemaakt met betrekking tot de keuze van bronnen voor kengetallen. In het model is gekozen om het directe en indirecte energiegebruik en broeikasgasemissies mee te nemen. In de keuze van de bronnen is zoveel mogelijk geprobeerd studies te gebruiken die eenzelfde aanpak kennen. Verder is gekeken naar bronnen die aansluiten bij de Nederlandse situatie. Daarnaast is gekozen een de meest recente bronnen te gebruiken. Dit laatste is vooral om de laatste stand van de techniek weer te geven.

3 Teelt van gewassen

In dit hoofdstuk worden de verschillende onderdelen van de teelt, die zijn meegenomen in de berekeningen, beschreven. Het energiegebruik en broeikasgasemissies van de teelt zijn op energetische waarde te verdelen over hoofd- en bijproduct. Voor maïs is er geen sprake van bijproduct. Dit geldt ook voor suikerbieten als zowel loof als wortel worden vergist. Het energiegebruik en de broeikasgasemissies worden daarbij volledig meegenomen naar de vergister. Als de biet alleen wordt vergist, wordt het loof niet meegenomen omdat dit op het land achterblijft. Als alleen het loof wordt vergist wordt hoofd- en bijproduct (=wortel en loof) op basis van energetische waarde verdeeld. Bij koolzaad is er ook sprake van een bijproduct, namelijk koolzaadstro. Het koolzaadstro is in de berekeningen niet meegenomen, omdat het stro in het landbouwsysteem aanwezig blijft. Het energiegebruik en de broeikasgasemissies voor de teelt van koolzaad worden volledig meegenomen naar de koolzaadpers. Wanneer koolzaadstro zou worden gebruikt voor 2^e generatie brandstofproductie kan het alsnog op energetische waarde worden verdeeld.

3.1 Opbrengst van het gewas

In het teelt-onderdeel van het rekenmodel worden de hoeveelheid hoofdproduct en bijproduct in kilogram vers gebruikt. De hoeveelheden hoofd- en bijproduct komen uit de registraties. Afhankelijk van gewas en keten worden er oogst-, inkuil-, bewaar- en schoningsverliezen meegerekend.

3.2 Uitgangsmateriaal

Voor uitgangsmateriaal is sprake van drie gewassen, die alle drie worden gezaaid. Voor zaaizaad wordt gebruik gemaakt van een emissiefactor per kilogram zaad, hier is gekozen voor Gaillard (1997). Gaillard (1997) geeft een energiewaarde van 14,8 MJ per kilogram zaad. Deze energiewaarde bevat de energie voor productie en bewerking. De 14,8 MJ per kilogram is gehanteerd als algemeen kengetal. Voor koolzaad en suikerbieten zijn specifieke energiewaarden opgenomen. Voor koolzaad 7,87 MJ per kilogram zaad en voor suikerbieten 36,24 MJ per kilogram zaad. De beide waarden zijn overgenomen uit BioGrace (versie 4).

De omrekeningsfactor voor de hoeveelheid CO₂-equivalenten die vrijkomen om zaadgoed te produceren is 0,074 kg CO₂ per MJ (Gaillard (1997)).

3.3 Organische meststoffen

Voor organische meststoffen wordt er geen energiegebruik en broeikasgasemissies berekend voor de productie. Stelregel is dat mest een afvalproduct is van bijvoorbeeld vlees- of melkproductie. Daarom dient het energiegebruik en broeikasgasemissie van vlees- of melkproductie aan de betreffende producten te worden toegerekend. Dit is in overeenstemming met onder andere de NTA 8080-richtlijn en BioGrace.

Voor organische meststoffen wordt alleen de broeikasgasemissie bepaald, die samenhangt met de toepassing van organische mest. De indirecte broeikasgasemissies worden behandeld in paragraaf 3.7 over de lachgasemissies.

Het transport van organische mest wordt meegenomen in de berekening. De hoeveelheid toegepaste organische mest en de transportafstand zijn door telers opgegeven. Op basis van het kengetal voor transport 2,73 MJ/ton kilometer (Ecoinvent, 1997) wordt het energieverbruik berekend.

De CO₂-equivalenten voor transport is op basis van kengetal 0,164 kg CO₂-eq/ ton km (Ecoinvent, 1997).

3.4 Kunstmeststoffen

Voor kunstmeststoffen wordt het energiegebruik en de broeikasgasemissies meegenomen in de berekeningen. In de registraties wordt de hoeveelheid kunstmest en de samenstelling opgevraagd. Op basis hiervan wordt de hoeveelheid N-, P- en K-kunstmeststof bepaald.

Voor kunstmeststoffen worden de volgende energiewaarden gehanteerd:

N-kunstmest	40 MJ per kilogram N	(Brentrup et al., 2008)
P-kunstmest	13,31 MJ per kilogram P ₂ O ₅	(Brentrup et al., 2008)
K-kunstmest	8,35 MJ per kilogram K ₂ O	(Brentrup et al., 2008)

Voor omrekening naar CO₂-equivalenten worden de volgende waarden gehanteerd:

N-kunstmest	6,338 kg CO ₂ -eq. per kilogram N	(Brentrup et al., 2008)
P-kunstmest	0,713 kg CO ₂ -eq. per kilogram P ₂ O ₅	(Brentrup et al., 2008)
K-kunstmest	0,456 kg CO ₂ -eq. per kilogram K ₂ O	(Brentrup et al., 2008)

3.5 Gewasbeschermingsmiddelen

De gewasbeschermingsmiddelen zijn opgedeeld in drie groepen, namelijk herbiciden, fungiciden en insecticiden. Per groep gewasbeschermingsmiddelen zijn de energiegebruiks- en broeikasgasemissiecijfers uit de literatuur verzameld. De cijfers zijn per kilogram actieve stof (a.s.). Uit de registraties blijkt de hoeveelheid gebruikte gewasbeschermingsmiddelen en de bijbehorende concentraties aan actieve stoffen.

Op basis hiervan wordt per gewasbeschermingsmiddel de gebruikte hoeveelheid actieve stof bepaald.

Gaillard (1997) geeft voor verschillende herbiciden, fungiciden en insecticiden de energiewaarden, als som van de energie voor productie (= energie-inhoud + procesenergie) en energie voor de opwerking. De gehanteerde waarden per groep pesticiden zijn voor:

Herbiciden	258,96 MJ per kilogram actieve stof	(Gaillard 1997)
Fungiciden	177,13 MJ per kilogram actieve stof	(Gaillard, 1997)
Insecticiden	583 MJ per kilogram actieve stof	(Gaillard, 1997)

De omrekeningsfactor voor de hoeveelheid CO₂-equivalenten die vrijkomt om pesticiden te produceren is

Herbiciden	8,396 kg CO ₂ -eq. per kilogram a.s.	(Gaillard 1997)
Fungiciden	5,602 kg CO ₂ -eq. per kilogram a.s.	(Gaillard 1997)
Insecticiden	23,883 kg CO ₂ -eq. per kilogram a.s.	(Gaillard 1997)

3.6 Directe en indirecte energie/BKG van machines

De directe en indirecte energie- en broeikasgaswaarden voor machines worden grotendeels middels elkaar overlappende methodes berekend. Uit twee registratie-onderdelen van de meetlat worden de directe en indirecte energie en broeikasgasemissies bepaald. Het eerste onderdeel is een lijst van machines, bestaande uit trekker, zelfrijders en werktuigen, welke worden ingezet voor de teelt van het betreffende gewas. Per machine wordt het gewicht en de draaiuren per jaar opgevraagd. Het tweede onderdeel is de bewerkingen per teelt. Per bewerking wordt opgegeven welke trekker en/of werktuig wordt gebruikt, de bewerkingstijd en het brandstofverbruik. De mechanisatie wordt ingedeeld in 4 categorieën, deze worden in paragraaf 3.6.2 verder toegelicht.

3.6.1 Energieverbruik

Het energieverbruik bestaat voor het grootste deel uit diesilverbruik van de verschillende bewerkingen in de teelt van het gewas. Voor berekening wordt ook gebruik gemaakt van elektrische pompen.

Het diesilverbruik wordt bepaald door de bewerkingen. Per bewerking wordt het energieverbruik berekend op basis van de bewerkingstijd (ha/uur) en het brandstofverbruik (ltr/uur). Het totaal van alle bewerkingen is het totale energieverbruik (diesilverbruik).

Voor energie worden de volgende energiewaarden gehanteerd:

Diesel	50 MJ per kilogram	(BioGrace, version 4)
Elektriciteit	9,7 MJ per kWh	(BioGrace, version 4)

Voor broeikasgasemissies worden de volgende waarden gehanteerd:

Diesel	0,088 kg CO ₂ -eq. per MJ	(BioGrace, version 4)
Elektriciteit	0,128 kg CO ₂ -eq. per MJ	(BioGrace, version 4)

3.6.2 Agrarische machines

Het indirecte energiegebruik en broeikasgasemissies van agrarische machines wordt bepaald door het aantal draaiuren per hectare. Per bewerking is gegeven welke machines worden gebruikt en welke bewerkingstijd er voor nodig is. Op basis van gewicht van de machine en technische levensduur is het energiegebruik en de broeikasgasemissie per draaiuur te bepalen. De draaiuren per hectare gecombineerd met het energiegebruik en de broeikasgasemissie per draaiuur geeft de indirecte energiegebruik en broeikasgasemissie per machine per hectare.

Voor de machines zijn de volgende waarden gebruikt:

Trekkers	176,8 MJ per kilogram	(Gaillard, 1997)
Zelfrijders	163,4 MJ per kilogram	(Gaillard 1997)
Werktuigen, grondbewerking	150,8 MJ per kilogram	(Gaillard 1997)
Werktuigen, overig	139,1 MJ per kilogram	(Gaillard, 1997)

Voor broeikasgasemissies wordt de volgende waarde gehanteerd:

Trekkers	8,919 kg CO ₂ -eq. per MJ	(Gaillard, 1997)
Zelfrijders	7,729 kg CO ₂ -eq. per MJ	(Gaillard, 1997)
Werktuigen, grondbewerking	7,2 kg CO ₂ -eq. per MJ	(Gaillard, 1997)
Werktuigen, overig	6,79 kg CO ₂ -eq. per MJ	(Gaillard, 1997)

Als levensduur zijn de waarden van Ecoinvent overgenomen:

Trekkers	12 jaar per machine	(Ecoinvent, report no. 15)
Zelfrijders	12 jaar per machine	(Ecoinvent, report no. 15)
Werktuigen, grondbewerking	14,375 jaar per machine	(Ecoinvent, report no. 15)
Werktuigen, overig	12,727 jaar per machine	(Ecoinvent, report no. 15)

3.6.3 Loonwerk

In de registraties wordt loonwerk op een vergelijkbare wijze geregistreerd als de bewerkingen die door de teler zelf worden uitgevoerd. Op deze wijze worden diesilverbruik en het indirecte energiegebruik en broeikasgasemissies via een vergelijkbare wijze bepaald, zoals hierboven reeds is beschreven.

3.7 Directe en indirecte lachgasemissies

De lachgasemissie berekening en de onderstaande toelichting is overgenomen van Visser et al. (2008). De lachgasemissies die samenhangen met bemesting zijn op basis van de IPCC-methodiek bepaald. De betreffende literatuurverwijzingen zijn daarom niet separaat opgenomen in de literatuurlijst.

Mogelijke stikstofemissies bij de teelt van gewassen zijn afkomstig van kunstmest, dierlijke mest, gewasresten en (mineralisatie van) organische stof in de bodem. Deze emissies kunnen bovendien optreden in verschillende chemische vormen: de belangrijkste zijn nitraat (uitspoeling), ammoniak (vervluchtiging gevolgd door neerslag) en lachgas (gasvormige emissies). In het onderstaande wordt de emissie van de laatste categorie (lachgas) besproken, omdat nitraat en ammoniak niet rechtstreeks bijdragen aan de broeikasgasemissie.

N₂O (lachgas) komt vrij bij denitrificatie: de omzetting van nitraat (NO₃⁻) naar stikstof (N₂). Denitrificatie treedt

op onder zuurstofloze omstandigheden in aanwezigheid van afbreekbare organische stof. Bij afbraak van organische stof wordt zuurstof verbruikt. Situaties met veel organische stof kunnen leiden tot zuurstofloze omstandigheden en zo tot N-verliezen door denitrificatie (De Ruijter & Smit 2007). Gerekend over een tijdshorizon van 100 jaar is het broeikaseffect van N₂O 296 keer sterker dan dat van CO₂ (Houghton 2001).

Een deel van de minerale stikstof in de bodem zal direct worden omgezet in N₂O en 'verdwijnen' naar de atmosfeer; een ander deel zal eerst vervluchtigen (als ammoniak), vervolgens weer neerslaan en dan pas worden omgezet. Weer een ander deel zal eerst uit- of afspoelen en vervolgens worden omgezet. IPCC (2006) geeft rekenregels om de grootte van deze drie termen te benaderen: hierbij wordt onderscheid gemaakt in stikstof afkomstig uit kunstmest, dierlijke mest, gewasresten en organische stof in de bodem. De directe N₂O emissies kunnen worden berekend als volgt:

$$N_2O_{N_{inputs}} = (F_{SN} + F_{ON} + F_{CR} + F_{SOM}) \cdot EF_1 \cdot 44/28$$

waarbij:

$N_2O_{N_{inputs}}$ =	de directe N ₂ O emissies ten gevolge van stikstoftoevoer aan cultuurgronden, kg N ₂ O/jaar
F_{SN} =	de hoeveelheid toegediende N kunstmest, kg N/jaar
F_{ON} =	de hoeveelheid dierlijke mest, compost, rioolslib en andere organische stikstoftoedieningen aan bodems, kg N/jaar
F_{CR} =	de hoeveelheid stikstof uit gewasresten (boven- ondergronds), inclusief stikstofbindende gewassen en het scheuren van grasland, kg N/jaar
F_{SOM} =	de hoeveelheid gemineraliseerde stikstof, in samenhang met de afbraak van bodem organische stof (en dus koolstofemissie) ten gevolge van veranderend landgebruik of management, kg N/jaar
EF_1 =	de emissie factor van N ₂ O emissies ten gevolge van stikstoftoevoer, kg N ₂ O/(kg N input). De standaard waarde die genoemd wordt door IPCC is 0.01
44/28 =	massa conversie factor 2N => N ₂ O

F_{CR} bij suikerbieten teelt bestaat uit de stikstof in het bietenblad met een deel van de kop dat op het veld wordt achtergelaten. De datasets bevat gegevens over deze hoeveelheden en de bijbehorende N-gehalten.

De F_{som} varieert onder praktijkomstandigheden erg sterk. De uiteindelijke mineralisatie kan liggen tussen de 50 en 200 of meer kg per ha per jaar. Dit is sterk afhankelijk van de aanvoer van organische stof uit gewasresten, dierlijke mest, groenbemesters en compost in voorafgaande jaren en van het organisch stofgehalte van de bodem alsmede de kwaliteit (samenstelling) van die organische stof. Op basis van de beschikbare gegevens is gemineraliseerde stikstof berekend.

IPCC (2006) geeft voor het schatten van N₂O emissies van uit- en afspoeling, in gebieden waar deze processen voorkomen, de volgende vergelijking:

$$N_2O_{(L)} = (F_{SN} + F_{ON} + F_{CR} + F_{SOM}) \cdot \text{Frac}_{LEACH-(H)} \cdot EF_5 \cdot 44/28$$

waarbij:

$N_2O_{(L)}$ =	de hoeveelheid N ₂ O die geproduceerd wordt na uit- en afspoeling van stikstof toevoer aan cultuurgronden, kg N ₂ O/jaar
$\text{Frac}_{LEACH-(H)}$ =	de fractie van alle toegevoegde/gemineraliseerde stikstof die af- en uitspoelt, kg N/(kg aangevoerde N). De standaard waarde die genoemd wordt door IPCC is 0.30: dat wil zeggen, als de netto neerslag tijdens enig moment in het groeiseizoen groter is dan het waterhoudend vermogen van de bodem.
EF_5 =	emissie factor voor N ₂ O emissies na uit- en afspoeling van stikstof, kg

N₂O/(kg uit-/afgespoelde N). De standaard waarde die genoemd wordt door IPCC is 0.0075

De N₂O emissie ten gevolge van vervluchtiging, neerslag en vervolgens denitrificatie wordt in IPCC (2006) beschreven door:

$$N_2O_{(ATD)} = \{(F_{SN} \cdot \text{Frac}_{GASF}) + (F_{ON} \cdot \text{Frac}_{GASM})\} \cdot EF_4 \cdot 44/28$$

N₂O_(ATD) = hoeveelheid N₂O geproduceerd door atmosferische depositie van N die eerder is vervluchtigd van cultuurgronden, kg N₂O/jaar

F_{SN} = hoeveelheid toegediende stikstof kunstmest, kg N/jaar

Frac_{GASF} = fractie kunstmest stikstof die vervluchtigt als NH₃ en NO_x, kg N vervluchtigd/(kg N toegediend). De standaard waarde die genoemd wordt door IPCC is 0.1

F_{ON} = de hoeveelheid dierlijke mest, compost, rioolslib en andere organische stikstoftoedieningen aan bodems, kg N/jaar

Frac_{GASM} = fractie van de toegediende organische stikstof (F_{ON}) die vervluchtigt als NH₃ en NO_x, kg vervluchtigd N/(kg neergeslagen N). De standaard waarde die genoemd wordt door IPCC is 0.20

EF₄ = emissie factor voor N₂O emissies uit atmosferische depositie van stikstof op bodems en wateroppervlakken, kg N₂O/(kg vervluchtigde NH₃-N + NO_x-N). De standaard waarde die genoemd wordt door IPCC is 0.010

De totale directe en indirecte aan N bemesting en mineralisatie gerelateerde N₂O emissies kunnen nu worden beschreven door

$$N_2O_{Nbemst} = N_2O_{Ninputs} + N_2O_{(L)} + N_2O_{(ATD)}$$

4 Vergisten van covergistingsgewassen

In dit hoofdstuk worden de berekeningen welke gerelateerd worden aan de vergister toegelicht. In het model wordt geen rekening gehouden met mest. Alle activiteiten worden gerelateerd aan het coproduct. De positieve effecten, de reductie van broeikasgasemissies door verwerking van mest, worden buiten beschouwing gelaten.

In het model wordt het energiegebruik en de broeikasgasemissies, welke samenhangen met de vergister en de teelt, toegerekend aan een drietal producten. De producten zijn biogas, elektriciteit en warmte. Gesteld is dat warmte en elektriciteit altijd in combinatie met een WKK-installatie voorkomen. Dit in tegenstelling tot biogas. In de berekeningen wordt het energiegebruik en de broeikasgasemissies volledig aan de elektriciteit toegerekend. De keuze is gebaseerd op het feit dat slechts een beperkt (maar toenemend) aantal vergisters de warmte nuttig gebruikt.

4.1 Opbrengsten uit coproduct

In het project Energieboerderij worden per gewas monsters genomen om biogaswaarden te bepalen. Op basis van de methaangaswaarden wordt elektriciteits- en warmteproductie bepaald. Hiervoor worden de volgende waarden gehanteerd:

Methaangas	10 kWh per m ³ methaangas	(verbrandingswaarde)	(Vreuls et al., 2009)
Elektriciteit	3,5 kWh per m ³ methaangas	(35% werkingsgraad)	(FNR, 2006)
Warmte	4 kWh per m ³ methaangas	(40% werkingsgraad)	(FNR, 2006)

De productie wordt gecorrigeerd met lekverliezen. Verliezen treden op twee plekken op. Verlies in de installatie, zoals dekzeil van de vergister en verlies in de WKK. Voor het lekverlies wordt 1% gehanteerd (Zwart et al., 2006).

4.2 Transport

4.2.1 Transport van coproduct naar de vergister

Een vergister vereist altijd transport van mest en/of coproduct naar de installatie. Het transport wordt in het model bepaald op basis van afstand van het landbouwbedrijf (teeltlocatie) tot de vergister.

De opbrengst (vers) en de transportafstand zijn als uitgangspunt genomen. Op basis van het kengetal voor transport 2,73 MJ/ton kilometer (Ecoinvent, 1997) wordt het energieverbruik berekend.

De CO₂-equivalenten voor transport is op basis van kengetal 0,164 kg CO₂-eq/ ton km (Ecoinvent, 1997).

4.2.2 Transport van digestaat vanaf de vergister

Het afvoeren van digestaat is onderdeel van de vergister. De hoeveelheid digestaat wordt bepaald door de volgende stelregel. Hoeveelheid versproduct in kilogram wat als coproduct de vergister in gaat, minus de hoeveelheid biogas in kilogram dat uit het product gewonnen wordt. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen hoofd- en bijproduct. Op basis van laboratorium analyses zijn per gewas voor hoofd- en/of bijproduct methaan- en biogaswaarden bepaald. Voor methaan wordt een dichtheid van 0.668 kg per m³ gehanteerd en voor CO₂ een dichtheid van 1,842 kg per m³.

De transportafstand voor afvoer van digestaat is niet opgenomen in de registraties. Zwart et al. (2006) geeft hiervoor 20 kilometer. De 20 kilometer wordt als uitgangspunt voor de vergister gehanteerd.

De hoeveelheid digestaat en de transportafstand zijn als uitgangspunt genomen. Op basis van het kengetal voor transport 2,73 MJ/ton kilometer (Ecoinvent, 1997) wordt het energieverbruik berekend.

De CO₂-equivalenten voor transport is op basis van kengetal 0,164 kg CO₂-eq/ ton km (Ecoinvent, 1997).

4.3 Energieverbruik vergister

Het directe en indirecte energieverbruik en broeikasgasemissies van mechanisatie ten behoeve van de vergister is op een vergelijkbare wijze berekend als bij de teelt. Dit betreft bijvoorbeeld activiteiten als het inkuielen van maïs, voeren van de vergister en eventueel versnijden/verhakselen van het product.

4.3.1 Energieverbruik

Het energieverbruik bestaat voor het grootste deel uit diesilverbruik van de verschillende bewerkingen in de teelt van het gewas. Voor een aantal bewerkingen wordt ook gebruik gemaakt van elektrische aandrijvingen. Het diesilverbruik wordt bepaald door de bewerkingen. Per bewerking wordt het energieverbruik berekend op basis van de bewerkingstijd (uur/ton) en het brandstofverbruik (ltr/uur). Het totaal van alle bewerkingen is het totale energieverbruik (diesilverbruik).

Voor energie worden de volgende energiewaarden gehanteerd:

Diesel	50 MJ per kilogram	(BioGrace, version 4)
Elektriciteit	9,7 MJ per kWh	(BioGrace, version 4)

Voor broeikasgasemissies worden de volgende waarden gehanteerd:

Diesel	0,128 kg CO ₂ -eq. per MJ	(BioGrace, version 4)
Elektriciteit	0,128 kg CO ₂ -eq. per MJ	(BioGrace, version 4)

Het indirecte energiegebruik en broeikasgasemissies van de mechanisatie wordt bepaald door het aantal draaiuren per ton. Per bewerking is gegeven welke machines worden gebruikt en welke bewerkingstijd er voor nodig is. Op basis van gewicht van de machine en technische levensduur is het energiegebruik en de broeikasgasemissie per draaiuur te bepalen. De draaiuren per ton gecombineerd met het energiegebruik en de broeikasgasemissie per draaiuur geeft de indirecte energiegebruik en broeikasgasemissie per machine per hectare.

Voor de machines zijn de volgende waarden gebruikt:

Trekkers	176,8 MJ per kilogram	(Gaillard, 1997)
Zelfrijders	163,4 MJ per kilogram	(Gaillard, 1997)
Werktuigen, overig	139,1 MJ per kilogram	(Gaillard, 1997)

Voor broeikasgasemissies wordt de volgende waarde gehanteerd:

Trekkers	8,919 kg CO ₂ -eq. per MJ	(Gaillard, 1997)
Zelfrijders	7,729 kg CO ₂ -eq. per MJ	(Gaillard, 1997)
Werktuigen, overig	6,79 kg CO ₂ -eq. per MJ	(Gaillard, 1997)

Als levensduur zijn de waarden van Ecoinvent overgenomen:

Trekkers	12 jaar/machine	(Ecoinvent, report no. 15)
Zelfrijders	12 jaar/machine	(Ecoinvent, report no. 15)
Werktuigen, overig	12,727 jaar/machine	(Ecoinvent, report no. 15)

4.4 Elektriciteit- en warmteverbruik vergister

Op basis van registraties is een energieverbruik voor de vergister bepaald. Voor de vergister wordt geen externe energie betrokken. Het energieverbruik is op basis van registratie 6% van de methaan opbrengst. Op de berekende methaanopbrengst is derhalve de 6% in mindering gebracht.

4.5 Indirect energieverbruik en broeikasgasemissies vergistingsinstallatie en opslag

Het indirecte energieverbruik en broeikasgasemissies voor de vergister wordt als volgt bepaald. Uit registraties is een hoeveelheid beton en staal voor de bouw van de vergister opgenomen in het model. Op basis van registraties wordt de hoeveelheid beton (8.360 ton) en de hoeveelheid staal (365 ton) als uitgangspunt genomen. De hoeveelheden beton en staal worden teruggerekend naar energiegebruik en broeikasgasemissie per kilogram versproduct middels levensduur en hoeveelheid verwerkt product per jaar.

Hiervoor zijn de onderstaande waarden gebruikt.

Levensduur	20 jaar
Verwerkte hoeveelheid product (mest en coproduct)	40.000.000 kg

Voor opslagsilo's zijn de volgende uitgangpunten gehanteerd:

Afmetingen	40 x 12 meter
Inhoud	1.200 ton (maïs)
Levensduur	50 jaar

Hoeveelheden beton, staal en asfalt opslagsilo's:

Beton	966 kg per strekkende meter	(MS keerwand)
Staal	30 kg per strekkende meter	(MS keerwand)
Asfalt	0,1 m ³ per m ² silo	(MS keerwand)

Voor energieverbruik worden de volgende waarden gehanteerd:

Beton	1466,99 MJ/m ³ (SimaPro) en een dichtheid van 2.400 kg/m ³ (Dorf, 1996)
Staal	28,57 MJ/kg (SimaPro)
Asfalt	7,04 MJ/kg (SimaPro)

Voor broeikasgasemissies worden de volgende waarden gehanteerd:

Beton	267 kg CO ₂ -eq./m ³ (SimaPro) en een dichtheid van 2.400 kg/m ³ (Dorf, 1996)
Staal	28,57 kg CO ₂ -eq./kg (SimaPro)
Asfalt	7,04 kg CO ₂ -eq./kg (SimaPro)

4.6 Emissie lekverlies methaan

Op basis van de in paragraaf 4.1 benoemde lekverliezen wordt de methaanemissie berekend. De IPCC 2007 emissiefactor voor methaan is 25. De hoeveelheid methaan als lekverlies in kilogram en de emissiefactor geven een kilogram CO₂-eq. als broeikasgasemissie.

5 Persen van koolzaad

Voor de persing van koolzaad is uitgegaan van koude persing. Hierdoor ligt de gewonnen hoeveelheid koolzaadolie lager in verhouding tot warme (chemische) persing, maar is de koolzaadkoek van hogere kwaliteit. De koolzaadkoek wordt hierdoor interessanter voor verwerking in veevoeders. Afhankelijk van de verdeling hoofd- en bijproduct van de teelt wordt het energiegebruik en de broeikasgasemissies meegenomen in persing van koolzaad. Het koolzaadstro wordt geacht in het landbouwsysteem te blijven. Daarom wordt het energiegebruik en de broeikasgasemissie van de teelt volledig meegenomen naar de persing van koolzaad.

5.1 Opbrengst uit persen koolzaad

De koolzaadopbrengst van de teelt wordt als uitgangspunt genomen. Op basis van het bepaalde vochtgehalte, oliepercentage van de teler wordt verder gerekend. Daarnaast wordt de opbrengst aan koolzaadolie mede bepaald door het rendement van de pers (85%) en impurificaties (0,85%). De koolzaadkoek is berekend door de hoeveelheid koolzaad minus de koolzaadolie. De waarden voor de berekening en de berekening voor persing zelf zijn getoetst aan waarden van de Oliemolen te Harlingen.

5.2 Transport

5.2.1 Transport naar opslag

Het transport wordt bepaald op basis van afstand van het landbouwbedrijf (teeltlocatie) tot de opslaglocatie in de registratie. De opbrengst (koolzaad) en de transportafstand zijn als uitgangspunt genomen. Op basis van het kengetal voor transport 2,73 MJ/ton kilometer (Ecoinvent, 1997) wordt het energieverbruik berekend.

De CO₂-equivalenten voor transport is op basis van kengetal 0,164 kg CO₂-eq/ ton km (Ecoinvent, 1997).

5.2.2 Transport van opslag naar pers

De transportbehoefte van de opslag naar de pers is vastgesteld op 50 kilometer. Dit komt overeen met de CO₂ tool voor biobrandstoffen van SenterNovem. De opbrengst (koolzaad) en de transportafstand zijn als uitgangspunt genomen. Op basis van het kengetal voor transport 2,73 MJ/ton kilometer (Ecoinvent, 1997) wordt het energieverbruik berekend.

De CO₂-equivalenten voor transport is op basis van kengetal 0,164 kg CO₂-eq/ ton km (Ecoinvent, 1997).

5.2.3 Transport van koolzaadolie naar eindgebruiker

De transportbehoefte van de pers naar de eindgebruiker is vastgesteld op 150 kilometer. Dit komt overeen met de CO₂ tool voor biobrandstoffen van SenterNovem. De opbrengst (koolzaadolie) en de transportafstand zijn als uitgangspunt genomen. Op basis van het kengetal voor transport 2,73 MJ/ton kilometer (Ecoinvent, 1997) wordt het energieverbruik berekend.

De CO₂-equivalenten voor transport is op basis van kengetal 0,164 kg CO₂-eq/ ton km (Ecoinvent, 1997).

5.3 Energieverbruik drogen/schonen

Afhankelijk van het vochtgehalte tijdens de oogst dient het koolzaad te worden teruggedroogd. Als maximale vochtgehalte voor opslag is 8,5% gehanteerd. Bij alle telers met een hoger vochtgehalte tijdens de oogst wordt energieverbruik voor het terugdrogen naar het maximum toegerekend.

Voor droging wordt gerekend met de volgende waarden:

Elektriciteit 19,5 kWh per ton koolzaad per 1% vocht

Diesel 15 liter per ton koolzaad per 1% vocht

Naast energieverbruik voor drogen, is energieverbruik voor schonen van het koolzaad opgenomen. Hiervoor is de volgende waarde opgenomen:

Elektriciteit 1 kWh per ton koolzaad

5.4 Energieverbruik opslag

Het elektriciteitsgebruik van de opslag is overgenomen uit de registraties. Deze is vastgesteld op 0,5 kWh per ton koolzaad.

5.5 Energieverbruik pers

Het elektriciteitsgebruik van de pers is overgenomen uit de registraties. Deze is vastgesteld op 30 kWh per ton koolzaad.

5.6 Indirect energieverbruik en broeikasgasemissies pers en opslag

Het indirecte energieverbruik en broeikasgasemissies voor de koolzaadpers wordt als volgt bepaald. Uit registraties is het gewicht van de koolzaadpers overgenomen in het model. Op basis van de hoeveelheid staal (9 ton), de levensduur (20 jaar) en de hoeveelheid die per jaar wordt verwerkt is een kengetal bepaald. Het kengetal wordt teruggerekend naar energiegebruik en broeikasgasemissie per kilogram koolzaad.

Voor de opslag is een module opslag van staal uit de registraties als uitgangspunt genomen. Op basis van de hoeveelheid staal (2,7 ton), de opgeslagen hoeveelheid en de levensduur (25 jaar) is een kengetal per kilogram koolzaad bepaald.

Voor energieverbruik worden de volgende waarden gehanteerd:

Staal 28,57 MJ/kg (SimaPro)

Voor broeikasgasemissies worden de volgende waarden gehanteerd:

Staal 28,57 kg CO₂-eq./kg (SimaPro)

6 Resultatenoverzicht

Het resultatenoverzicht is een verzameling van gegevens uit eerdere onderdelen van de meetlat. Het resultatenoverzicht geeft aan hoeveel energie er wordt geproduceerd of hoeveel broeikasgasemissie wordt vermeden per gewas per hectare. Vervolgens wordt op basis van de verrekeringen, energetische toerekening naar de verschillende producten, een totaal aan energiegebruik en broeikasgasemissies bepaald. De productie aan energie of de vermeden broeikasgasemissies vergeleken met conventioneel energiegebruik worden gerelateerd aan het totaal aan energiegebruik en broeikasgasemissies van de hele productieketen van de opwekking van bio-energie. Het resultaat wordt in alle gevallen per hectare bepaald.

6.1 Energiebalans

De energiebalans is bepaald als percentage van de energie die is geproduceerd en de energie die in de keten is gebruikt. De energiebalans geeft als percentage de hoeveelheid geproduceerde energie die kan worden gebruikt. Als het energiegebruik in de keten bijvoorbeeld 5% is ten opzichte van de geproduceerde energie, resteert hierdoor 95% energie die kan worden gebruikt. Het percentage moet groter zijn dan nul, om meer energie te leveren dan het kost om de energie te produceren.

6.2 Broeikasgasbalans

De broeikasgasbalans is bepaald als percentage van de vermeden broeikasgasemissies en de emissie aan broeikasgassen in de keten. De broeikasgasbalans geeft als percentage de vermeden emissies aan broeikasgassen. De vermeden broeikasgasemissies door gebruik van de bio-energie of biobrandstof is gesteld op 100%. De emissies aan broeikasgassen in de keten worden hierop in mindering gebracht. Een percentage moet groter zijn dan nul, om meer broeikasgasemissies te vermijden dan in de keten aan broeikasgasemissie zijn uitgestoten.

Deze berekeningswijze sluit aan op de wijze waarin deze wordt voorgeschreven in de "Greenhouse Gas Calculator for Electricity and Heat from Biomass" (Van der Voet et al., 2008).

Literatuur

- BioGrace_standard_values_-_version_4_-_Public.xls, www.BioGrace.net; Neeft, J., Gagnepain, B., Bacovsky, D., Lauranson, R., Georgakopoulos, K., Fehrenback, H., et al., Harmonised calculations of biofuel greenhouse gas emissions in Europe, Netherlands, 2011
- Brentrup, Frank, Palliere, Christian, GHG emissions and energy efficiency in European nitrogen fertiliser production and use, Proceedings 639, The International Fertiliser Society, ISBN 978-0-85310-276-2, December 2008
- Bugge, J., Note: Rapeseed oil for transport 1: Energy balance and CO2 balance. Base on embio, the Danish energy agency's model for economic and environmental assessment of biofuels. Folkecenter for renewable energy (Danish center for plant oil technology), Hurup Thy, 2001
- Dorf, R., Engineering Handbook, CRC Press, New York, 1996
- Ecoinvent Centre, Swiss centre for life cycle inventories, Zurich, www.ecoinvent.org, 1997
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.), Handreichung biogasgewinnung und –nutzung, Institut für Energetik und Umwelt GmbH, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., 3 überarbeitete Auflage, Gülzow, 2006
- Gaillard, G., 1997. Umweltinventar der landwirtschaftlichen Inputs im Pflanzenbau : Daten fuer die Erstellung von Energie- und Oekobilanzen in der Landwirtschaft, CH-8356 Tänikon TG,.
- IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4. Agriculture, Forestry and Other Land Use. Institute for Global Environmental Strategies, on behalf of the IPCC, Hayama, Japan, 2006
- Nederlandse Technische Afspraak, NTA8080, Duurzaamheidscriteria voor biomassa ten behoeve van energiedoeleinden, Nederlands Normalisatie-instituut, Delft, 2009
- SimaPro, LCA software and Eco-indicator methodology for optimal Life Cycle Management solutions
- Visser, Chris de, Ven, Gerrie van de, Langeveld, Hans, Vries, Sander de, Brink, Lubbert van den, Duurzaamheid van ethanolbieten, Het toetsingskader toegepast, ACRRES – Wageningen UR, rapport AC 2008/01, juli 2008
- Voet, E. van der, Oers, L. van, Davis, C., Nelis, R., Cok, B., Heijungs, R., Chappin, E., Guinée, J.B., Greenhouse Gas Calculator for Electricity and Heat from Biomass, CML Institute of Environmental Sciences, Leiden University, July 2008
- Vreuls, drs. H.H.J, Zijleman, drs. P.J., Nederlandse lijst van energiedragers en standaard CO₂-emissiefactoren, versie december 2009, SenterNovem, december 2009
- Zwart, K.B., Oudendag, D.A., Ehlert, P.A.I., Kuikman, P.J., Duurzaamheid co-vergisting van dierlijke mest, Alterra, rapport 1437, ISSN 1566-7197, Wageningen, 2006

Belangrijkste energie- en broeikasgaswaarden / emissiefactoren

	Waarde	Eenheid	Bron	Waarde	Eenheid	Bron
Uitgangsmateriaal						
Zaaizaad – algemeen	14,8	MJ/kg	Gaillard, 1997	0,059	kg CO ₂ -eq./MJ	Gaillard, 1997
Zaaizaad – koolzaad	7,87	MJ/kg	BioGrace, version 4	0,734	kg CO ₂ -eq./kg	BioGrace, version 4
Zaaizaad – suikerbieten	36,29	MJ/kg	BioGrace, version 4	3,558	kg CO ₂ -eq./kg	BioGrace, version 4
Meststoffen						
N-kunstmest	40	MJ/kg N	Brentrup et al., 2008	6,17	kg CO ₂ -eq./kg	Brentrup et al., 2008
P-kunstmest	13,31	MJ/kg P ₂ O ₅	Brentrup et al., 2008	0,73	kg CO ₂ -eq./kg	Brentrup et al., 2008
K-kunstmest	8,35	MJ/kg K ₂ O	Brentrup et al., 2008	0,50	kg CO ₂ -eq./kg	Brentrup et al., 2008
Gewasbeschermingsmiddelen						
Herbiciden	258,96	MJ/kg as	Gaillard, 1997	8,396	kg CO ₂ -eq./kg as	Gaillard, 1997
Fungiciden	177,13	MJ/kg as	Gaillard, 1997	5,602	kg CO ₂ -eq./kg as	Gaillard, 1997
Insecticiden	583,00	MJ/kg as	Gaillard, 1997	23,883	kg CO ₂ -eq./kg as	Gaillard, 1997
Energiedragers						
Diesel	41,6	MJ/ltr	BioGrace, version 4	0,088	kg CO ₂ -eq./MJ	BioGrace, version 4
Elektriciteit (opwekking)	9,7	MJ/kWh	BioGrace, version 4	0,128	kg CO ₂ -eq./MJ	BioGrace, version 4
Emissiefactoren						
CO ₂	1		IPCC, 2007			
Methaan	25		IPCC, 2007			
Lachgas	298		IPCC, 2007			

