



Handleiding CO₂-waarden voor biobased grondstoffen volgens MJA3/MEE-methodiek



CE Delft

Committed to the Environment

Bibliotheekgegevens rapport:

Handleiding CO₂-waarden voor biobased grondstoffen volgens MJA3/MEE-methodiek

Dit rapport is geschreven door:

H.J. (Harry) Croezen

M. (Marit) van Lieshout

Delft, CE Delft, November 2015, geactualiseerd Juli 2016

Publicatienummer: 15.3H16.81

Productie / Grondstoffen / Plantaardig / Biomassa / Kooldioxide / Emissies / Reductie/
Meetmethode

Opdrachtgever: Rijksdienst voor Ondernemend Nederland

Alle openbare CE-publicaties zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Harry Croezen.

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al 35 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Inhoud

1	Waarom deze handleiding?	5
2	De CO₂-waardeberekening	7
2.1	Definitie van de CO ₂ -waarde	7
2.2	Vier stappen van de CO ₂ -waardemethodiek	7
2.3	Baken het proces af met een procesboom	8
2.4	Inventariseer de broeikasgasemissies	10
2.5	Reken de broeikasgas emissies om tot CO ₂ -equivalenten	19
2.6	Bepalen van de afname in de CO ₂ -waarde	20
3	Uitgewerkte voorbeelden	21
4	Methanolproductie uit biobased syngas (vergassing van hout)	22
4.1	Afbakening en procesboom	23
4.2	Inventarisatie van broeikasgasemissies	24
4.3	Omrekenen van broeikasgas emissies naar CO ₂ -equivalenten	28
4.4	Bepalen afname CO ₂ -waarde	29
5	Etheen uit bio-ethanol	30
5.1	Afbakening en procesboom	30
5.2	Inventarisatie van broeikasgasemissies	31
5.3	Karakterisatie en aggregatie	39
6	PLA uit suikers	41
6.1	Afbakening en procesboom	41
6.2	Inventarisatie van broeikasgasemissies	41
6.3	Allocatie van emissies	49
6.4	Bepalen afname van de CO ₂ -waarde	50
7	Literatuur	51
Bijlage A	Ketens op basis van biomassa	53
A.1	Biomassa uit akkerbouw	53
A.2	Biomassa uit bosbouw	55
Bijlage B	Emissiefactoren voor hulpstoffen en energiedragers	59
Bijlage C	Karakterisatiefactoren	62
Bijlage D	Nutriëntenbalansen en broeikasgasemissies	63



Bijlage E	Biomassa en bodemorganische stof	66
E.1	Koolstofbalans	66
E.2	Vuistregels	67
E.3	C-cycle-model (in concept)	69



1 Waarom deze handleiding?

In het Energieakkoord is afgesproken dat bedrijven kunnen verkennen in welke mate overschakeling op biobased grondstoffen de CO₂-footprint van een product verkleint. Het gaat daarbij om CO₂-emissiereductie door substitutie van grondstoffen die geproduceerd zijn uit fossiele bronnen door biobased grondstoffen zonder dat dat energiebesparing bij het bedrijf in kwestie oplevert.

Toepasbaarheid van deze eerste versie van de methodiek is voornamelijk beperkt tot situaties:

1. waarin zogenoemde drop-in-chemicals gebruikt worden; of
2. waarin materialen ingezet worden die zonder aanpassingen qua gewichtsverhoudingen één op één de bestaande materialen kunnen vervangen (materiaalsubstitutie).

Om de berekende CO₂-emissiereductie aan te laten sluiten bij de energiebesparingscijfers, zoals die gerapporteerd worden binnen de MJA3/MEE-methodiek, is de CO₂-waardeberekening ontwikkeld.

Deze CO₂-waardeberekening sluit aan bij de huidige berekeningen voor energie-efficiency in de keten op basis van GER-waarden.

De methodiek wijkt daardoor op sommige punten af van de broeikasgasbalans-berekeningsmethodiek die in de Renewable Energy Directive (RED) voor biobrandstoffen verplicht is gesteld - zie tekstkader.

Verschillen tussen MJA3/MEE CO₂-waardemethodiek en RED-broeikasgasbalansberekeningsmethodiek

De belangrijkste punten waarop de CO₂-waardeberekening afwijkt zijn:

- Afbakening
Om aan te sluiten bij de GER-waarden is gekozen voor een cradle-to-gate benadering wordt geen cradle-to-grave- of well-to-tank-afbakening gehanteerd zoals bijvoorbeeld in de RED.
- Allocatie
Er wordt evenals in de GER-waardemethodiek economische allocatie toegepast, geen allocatie op basis van energie-inhoud.

De uitkomst van de CO₂-waardeberekening heeft anders dan een broeikasgasbalans voor een biobrandstof geen directe wettelijke relevantie: er is geen regelgeving die zegt dat aan een bepaalde grenswaarde moet worden voldaan en een dergelijke regelgeving is ook (nog) niet in de maak.

Aan de andere kant past de CO₂-waardemethodiek binnen het convenant tussen overheid en bedrijven op gebied van energiebesparing en CO₂-reductie en de achterliggende wettelijke reductiedoelen, die Nederland voor 2020/2023 dient te realiseren.

Deze handleiding legt uit hoe de CO₂-waardeberekening werkt en hoe bedrijven deze berekening op hun productieketen kunnen toepassen om de CO₂-emissiereductie in hun productieketen inzichtelijk te maken.

De handleiding bestaat uit een algemene uitleg, gevolgd door de uitwerking van drie voorbeelden:

- productie van etheer uit bio-ethanol (drop-in-chemical);
- productie van methanol uit hout (drop-in-chemical);
- productie van PLA uit suiker (één op één materiaalsubstitutie).



De handleiding en de methodiek betreffen een eerste versie - net als bij de GER-waardenmethodiek zullen methodiek en handleiding van tijd tot tijd worden aangepast en geactualiseerd op basis van ervaringen uit praktijk en op basis van nieuwe beleidsontwikkelingen.

Deze handleiding is opgesteld in samenwerking met de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO).



2 De CO₂-waardeberekening

In dit hoofdstuk leggen we de CO₂-waardeberekening stap voor stap uit.

De berekening sluit vrijwel volledig aan bij de GER-waardenmethodiek zoals toegepast onder het MJA/MEE-convenant en bij achterliggende ISO 14040/14046-normen voor Life Cycle Analyses (LCA's).

In deze handleiding wordt aangegeven wat de overeenkomsten en verschillen zijn met de GER-waardenmethodiek. Verschillen betreffen vooral broeikasgasbalansaspecten, die niet relevant zijn voor een GER-waardebepaling.

Verder wordt beknopt aangegeven welke overeenkomsten en verschillen er zijn met andere methodieken voor het opstellen van broeikasgasbalansen, bijvoorbeeld die voor biobrandstoffen, zoals vastgesteld in de Renewable Energy Directive (RED).

2.1 Definitie van de CO₂-waarde

De CO₂-waarde van een product of halffabricaat is het totaal van alle directe en indirecte emissies van broeikasgassen in de productieketen van het product of halffabricaat. Net als in de GER-waardenmethodiek wordt de CO₂-waarde uitgedrukt in kg CO₂-equivalenten per kg product of halffabricaat.

De reductie van de CO₂-emissie volgt uit het verschil tussen de CO₂-waarde van de productie in de oude situatie en de CO₂-waarde van de productie in de nieuwe situatie.

2.2 Vier stappen van de CO₂-waardemethodiek

De CO₂-waarde wordt conform de ISO-normen voor LCA's in vier stappen berekend.

Stap 1: Baken het proces af met een procesboom (Paragraaf 2.3)

Stel de procesboom op van de productieketen, van grondstofextractie tot toelevering van het halffabricaat.

Stap 2: Inventariseer de broeikasgasemissies (Paragraaf 2.4)

Deze inventarisatie bestaat uit de volgende onderdelen:

- Stel een *massabalans* op. Bepaal per schakel in de productieketen en per eenheid halffabricaat het gebruik van grondstoffen, energiedragers, hulpstoffen en additieven en combineer deze waarden in een logische en consistente massabalans (Paragraaf 2.4.1).
- Bepaal de *directe en indirecte emissies* van broeikasgassen per kilo halffabricaat (Paragraaf 2.4.2).
- Bepaal de *allocatie van emissies* bij gebruik van bijproducten en reststromen (Paragraaf 2.4.3).



Stap 3: Reken de verschillende soorten broeikasgasemissies om naar CO₂-equivalenten (Paragraaf 2.5)

Reken emissies van CH₄, N₂O en eventuele andere broeikasgassen om naar CO₂-equivalenten. Bepaal één CO₂-waarde door alle CO₂-equivalenten bij elkaar op te tellen.

Stap 4: Bepaal het verschil tussen CO₂-waarde van de fossilbased en de biobased situatie (Paragraaf 2.6)

Neem uit de aangepaste GER-waardentabel de CO₂-waarde van de op basis van fossiele energiedragers geproduceerde referentie grondstof. Trek daarvan de CO₂-waarde af die in Stap 3 is berekend. Het verschil is de CO₂-emissiereductie per kilo halffabricaat.

In Figuur 1 is ter illustratie een globale visuele weergave van de uit te voeren berekening gegeven.

Figuur 1 Structuur van een CO₂-waarde bepaling



Bron: CE Delft.

2.3 Baken het proces af met een procesboom

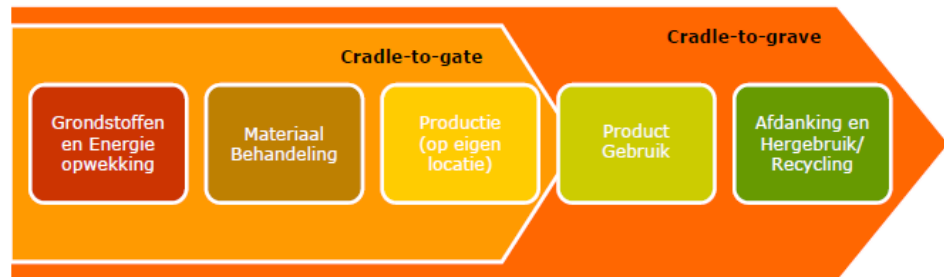
Om de procesboom op te kunnen stellen moet eerst bepaald worden welke benadering er wordt gekozen: cradle-to-gate of cradle-to-grave, zie Figuur 2. De cradle-to-gate-benadering is beperkt tot grondstoffonttrekking en navolgende processen voor omzetting van de grondstof tot een halffabricaat. In de cradle-to-grave-benadering wordt ook de gebruiksfase en de afdanking en hergebruik/recycling in de analyse meegenomen dienen te worden.

Bij de bepaling van drop-in-chemicals en materialen met drop-in-toepassingen, volstaat de cradle-to-gate-benadering, omdat aangenomen mag worden dat er in de verdere levenscyclus van het materiaal geen wijzigingen optreden.



Als aantoonbaar is dat niet alleen de emissies tijdens de grondstoffonttrekking en navolgende processen voor omzetting van de grondstof tot een half-fabricaat afwijken van de bestaande praktijk maar ook de emissies tijdens de gebruiksfase en de afdanking en hergebruik/recycling kan de procesboom uitgebreid worden tot een cradle-to-grave-benadering.

Figuur 2 Cradle-to-gate- en cradle-to-grave-benadering

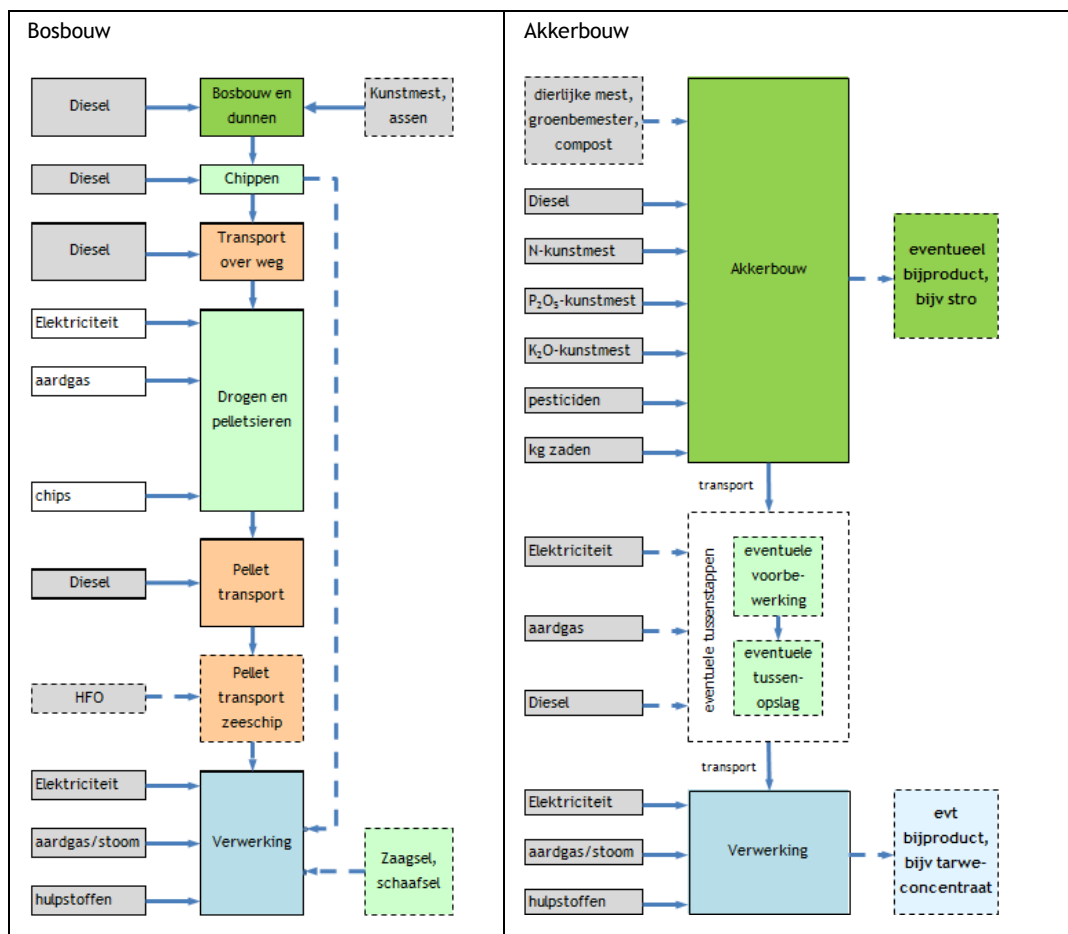


Bron: RVO, 2011.

In deze handleiding gaan we - net als in de GER-waardenmethodiek - uit van de cradle-to-gate-benadering.

Voorbeelden van een procesboom op basis van de cradle-to-gate-benadering voor grondstoffen uit bosbouw en akkerbouw staan in Figuur 3.

Figuur 3 Voorbeelden van een procesboom in de cradle-to-gate-benadering voor grondstoffen uit respectievelijk bos- en akkerbouw



Bron: CE Delft.



Een procesboom beslaat de volgende processen:

- Productie van de te verwerken biomassa, in Figuur 3 gaat het om biomassa uit bosbouw en akkerbouw, maar aquacultuur en veeteelt zijn ook mogelijk.
- Conversie van de biomassa in één of meerdere stappen. In Figuur 3 worden de producten uit de bosbouw gedroogd, gepelletiseerd en verwerkt.
- Opslag, voorbehandeling of andere tussenstappen tussen biomassa-productie en verwerking. Voorbehandeling van geproduceerde biomassa kan bijvoorbeeld zijn:
 - drogen van de geproduceerde biomassa zodat deze langdurig opgeslagen kan worden zonder ongewenste degradatie door schimmelen, broeien, etc.;
 - shredderen, pelletiseren of andere voorbereidingen waarmee de bulkdichtheid van de biomassa toeneemt en transportkosten kunnen worden beperkt.
- Transporten van de biomassa naar de eerste verwerking en tussen eventuele navolgende verwerkingen.
- De energiedragers en hulpstoffen die in de bovengenoemde processen gebruikte zijn en de manier waarop ze geproduceerd zijn.

2.4 Inventariseer de broeikasgasemissies

De totale hoeveelheid broeikasgasemissie wordt in drie stappen bepaald:

- opstellen van een massabalans;
- bepalen van directe en indirecte emissies per soort broeikasgas;
- alloceren van emissies bij gebruik van bijproducten en reststromen.

2.4.1 Stel een massabalans op

Na bepaling van de keten (Stap 1) wordt een massabalans opgesteld voor één kilo halffabricaat.

Ook wordt per schakel de omvang bepaald van:

- het gebruik van hulpstoffen;
- het gebruik van additieven;
- het gebruik van energiedragers.

Voorbeelden van hulpstoffen en energiedragers zijn:

- gebruikt/gekochte gebruikte brandstoffen en stoom of warm water;
- elektriciteit;
- agronomische hulpstoffen als kunstmest, bestrijdingsmiddelen en de smeermiddelen en brandstoffen voor mobiele werktuigen als trekkers;
- hulpstoffen of additieven in conversieprocessen, bijvoorbeeld NaOH, HCl.

Het opstellen van een massabalans is bekend van de GER-waardenmethodiek.

De opgestelde massabalans en het gebruik van hulpstoffen/additieven en van energiedragers dient inherent consistent en sluitend te zijn. Dit geldt ook voor de energiebalans van de verschillende processen.



Enkele voorbeelden:

- een geteeld gewas kan niet meer nutriënten afvoeren dan tijdens teelt wordt toegevoerd¹;
- de energie-inhoud van conversieproducten kan niet hoger zijn dan die van de ingaande stoffen wanneer er geen energie in welke vorm dan ook wordt toegevoegd. Energie komt niet uit het niets.

2.4.2 Bepaal de emissies

Alle emissies van broeikasgassen worden meegerekend. De broeikasgassen die meegerekend worden, zijn conform de IPCC-methodiek voor broeikasgasbalansen:

- alle emissies van CO₂ gevormd uit langcyclische koolstof; dat wil zeggen koolstof uit fossiele brandstoffen of afgeleide producten;
- sommige emissies van CO₂ uit kortcyclische koolstof; dat wil zeggen koolstof uit biomassa;
- alle emissies van CH₄ en N₂O;
- alle emissies van andere broeikasgassen, zoals gefluoriceerde koolwaterstoffen (HFC's) en gechlloreerde en gefluoriseerde koolwaterstoffen (HCFC's)².

CO₂-emissies uit kortcyclische koolstof worden conform IPCC-methodiek alleen meegenomen wanneer het emissies betreft gerelateerd aan:

- ontbossing of andere vormen van afname van de koolstof opgeslagen in vegetatie;
- afname van strooisel op bosbodems, hierdoor gaat er minder koolstof naar de bodem;
- afname van de koolstofvoorraad in de bodem, met name in de vorm van organische stof in de bodem (B.O.S.).

In de CO₂-waarde worden zowel directe- als indirecte emissies meegerekend. De directe emissies zijn de emissies die het directe resultaat zijn van een stap in de procesboom. De indirecte emissies zijn de emissies die vrijkomen bij processen die nodig zijn om het proces in de procesboom goed te laten verlopen, zoals bijvoorbeeld bij de productie van hulpstoffen.

Directe emissies

Directe emissies volgen uit de massabalans en het verbruik van energiedragers en hulpstoffen. De meeste zaken zijn redelijk vanzelfsprekend voor mensen die gewend zijn met GER-waarden te werken.

Voor sommige processen is enige proceskennis noodzakelijk, hiervoor zijn vaak gespecialiseerde bronnen beschikbaar. Bijvoorbeeld emissies van methaan door lekverliezen en onvolledige verbranding. Deze kunnen worden geschat aan de hand van emissiefactoren, uitgedrukt als percentage van de ingezette methaan (methaanslip bij motoren) of uitgedrukt als kg CH₄/kg mest. Bronnen voor dit soort emissiefactoren zijn onder andere te vinden op de website van de National Inventory Entity³.

¹ Dit kan in principe wel door opname van nutriënten uit de bodem, maar dit leidt dan tot uitputting van die bodem - hetgeen weer alsnog gecompenseerd moet worden door latere bemesting van die bodem.

² Betreft meestal emissies van drijfgassen of lekverliezen van koelmachines of hoogspanning schakelaars.

³ Zie webadres: www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/energie-besparen/national-inventory-entity



Directe emissies in het primaire proces

Daarnaast zijn er de directe emissies die vrijkomen in het primaire proces. Hierbij spelen heel andere aspecten dan bij de GER-waardenmethodiek. Daarom gaan we daar in Paragraaf 2.4.3 dieper op in.

Emissies door verbruik van energiedragers

Emissies door het verbruik van energiedragers kunnen zowel direct als indirect zijn. In beide gevallen worden ze op dezelfde manier bepaald.

CO₂-emissies gerelateerd aan brandstofgebruik worden als volgt berekend:

- bepaal in de massabalans het brandstofgebruik per kilo halffabricaat, uitgedrukt bijvoorbeeld in MJ/kg;
- combineer het brandstof gebruik met de CO₂-emissie per eenheid brandstof, uitgedrukt bijvoorbeeld in kg CO₂/GJ.

De CO₂-emissie per kilo halffabricaat volgt uit de combinatie van beide waarden.

Bij brandstoffen worden de directe emissies - de emissies gerelateerd aan het verbranden van de brandstoffen - en de indirecte emissies - de emissies gerelateerd aan het produceren van de brandstoffen - vaak tot één emissiefactor geaggregeerd.

CO₂-emissiefactoren voor brandstoffen zijn te vinden in de 'Nederlandse lijst van energiedragers en standaard CO₂-emissiefactoren, versie april 2015'.

Voorbeeldberekening emissies door gebruik van brandstoffen

In de productieketen van producten uit granen wordt het gebruikte graan vaak gedroogd met oog op langdurige opslag zonder kwaliteitsverlies. Hierbij wordt aardgas en/of stookolie gebruikt om de benodigde warmte te produceren.

Het brandstofgebruik wordt in de regel uitgedrukt in MJ/kg, maar bijvoorbeeld ook liter/kg (vloeibare brandstof), m³/kg (gasvormige brandstof) of kg/kg (vaste brandstoffen). De CO₂-emissie per eenheid brandstof, uitgedrukt in kg geëmitteerde stof/GJ - bijvoorbeeld kg CO₂/GJ - ook in kg geëmitteerde stof per liter vloeibare brandstof, m³ brandbaar gas of kg vaste brandstof.

Drogen van tarwe kost volgens een rapport van E-Kwadraat advies zo'n 35 MJ/ton tarwe, ongeveer 50/50% verdeeld over aardgas en stookolie (E-Kwadraat, 2010).

De emissiefactor voor aardgas is 56,5 kg CO₂/GJ en voor stookolie (hier geïnterpreteerd als gasolie) 74,3 kg CO₂/GJ. De aan het drogen gerelateerde directe broeikasgasemissie bedraagt $50\% \times 0,035 \times 56,5 + 50\% \times 0,035 \times 74,3 = 2,29$ kg CO₂/ton tarwe.

Uit een ton tarwe met vochtgehalte van 15% kan ongeveer 300 kg ethanol worden geproduceerd. Bij productie van ethanol uit tarwe zou het drogen - zonder allocatie naar eventuele andere producten in de keten - een CO₂-emissie per ton ethanol geven van $2,29 \div 0,3 = 7,63$ kg CO₂.

Indirecte emissies

De indirecte emissies volgen uit het verbruik van energiedragers en hulpstoffen.

De emissies door het verbruik van energiedragers is hierboven al besproken. De emissies die veroorzaakt worden door de productie van hulpstoffen vraag wat extra aandacht en wordt daarom besproken in Paragraaf 2.4.4.



Negatieve emissies

Het is overigens ook mogelijk CO₂-emissies uit te sparen of op te slaan. De berekende emissie is dan negatief, er wordt meer CO₂ opgeslagen dan dat er geëmitteerd wordt. Twee voorbeelden:

- Door vergisting van dierlijke mest wordt vaak de emissie van methaan uit mestopslag gereduceerd. Dit effect wordt bijvoorbeeld meegenomen in de JRC-analyses (JRC, 2014) en in de Biograce II rekenmodel⁴ voor broeikasgasemissies gerelateerd aan elektriciteit, koeling en warmte uit biomassa.
- Door bepaalde teeltmethodes kan een toename aan organische stof in de bodem worden bereikt, waarbij netto koolstof in de bodem wordt vastgelegd. Dit aspect dient volgens de in de RED vastgelegde methodiek te worden meegenomen in de broeikasgasbalans.

Dergelijke uitgespaarde emissies mogen in de CO₂-waarde worden verrekent.

2.4.3 Directe emissies in het primaire proces

Emissies kunnen ook optreden in het primaire proces bijvoorbeeld door veranderingen in vegetatie en het gehalte organische stof in de bodem. De relatie tussen deze veranderingen en de emissies is complex.

In deze handleiding maken we gebruik van eerste orde benaderingen van deze emissies door het opstellen van massabalansen over het primaire proces, waardoor rekening gehouden moet worden met:

- eventuele veranderingen in de mate waarin koolstof vastgelegd wordt in de bodem;
- opname en afgifte van voedingsstoffen door gewassen en gewasresten, ook wel nutriëntenbalans genoemd.

Massabalans en koolstofvastlegging in de bodem

Een bodem is vruchtbaar doordat het zand is verrijkt met organisch materiaal uit plantenresten, ook wel bodemorganische stof genoemd.

In een natuurlijk bos of grasland blijven alle dode plantenresten op de bodem achter (strooisel). Ze worden in een natuurlijk afbraakproces deels omgezet in CO₂, deels omgezet in bodemorganische stof. Het afbraak- en omvormingsproces is vergelijkbaar met composteren.

Bodemorganische stof (B.O.S.) zelf wordt ook weer afgebroken. De uit strooisel gevormde B.O.S. wordt tenslotte omgezet in stabiele humus en CO₂.

In een natuurlijk bos of grasland zijn groei en afsterven van planten, opbouw en afbraak van strooisellaag, bodemorganische stof en humus met elkaar in evenwicht:

- de plantengroei en CO₂-vastlegging door plantengroei is stabiel en constant;
- er groeien evenveel planten terug als er afsterven;
- de mate waarin afgestorven planten strooisel vormen is in evenwicht met de mate waarin strooisel wordt afgebroken in CO₂ en B.O.S.;
- de afbraak van B.O.S. tot humus en CO₂ is in evenwicht met de vorming uit strooisel;
- de afbraak van humus is in evenwicht met de vorming uit B.O.S.

De in dit stabiele systeem in planten, strooisel, B.O.S. en humus vastgelegde koolstof kan worden beschouwd als langdurig opgeslagen: de vastgelegde hoeveelheden zijn constant in de tijd.

⁴ Zie: www.biograce.net/biograce2/



Door verwijdering van planten of gewasresten uit bos, grasland of akkerland voor productie van biograndstoffen (of biobrandstoffen) zal het evenwicht echter veranderen en zal de hoeveelheid in B.O.S. en humus vastgelegde afnemen. Er blijven immers minder planten over om strooisel, B.O.S. en humus te vormen.

Bovengeschetste processen spelen ook in akkerbouwland, ook al wordt daar natuurlijk het gewas sowieso verwijderd. Hier vindt opbouw van B.O.S. plaats uit gewasresten als wortels en bladeren en uit eventueel door de akkerbouwer toegevoegde organische stoffen als dierlijke mest, compost of groenbemester.

De afname in de hoeveelheid in strooisel, B.O.S. en humus wordt onder het VN-Klimaatverdrag (of UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change) beschouwd als een CO₂-emissie.

Landen, die het Klimaatverdrag ondertekend hebben, zijn daarom verplicht jaarlijks te rapporteren hoeveel koolstof is vastgelegd in bos, andere vegetatie en in bodems en in welke mate deze hoeveelheden zijn veranderd.

Afnames worden geregistreerd als CO₂-emissie, toenames als CO₂-vastlegging (negatieve emissie).

Ook onder de Renewable Energy Directive dient verandering in de koolstofvoorraden in vegetatie, strooisel en bodem te worden meegenomen.

In de CO₂-waardemethodiek wordt deze CO₂-emissie meegenomen en geschat met het zogenaamde C-cycle-model, zoals bijvoorbeeld gebruikt in het IMAGE 2.0-model van PBL. Dit is een relatief eenvoudig model voor het simuleren van de koolstofdynamiek in een bos of andere landschappen, waarvoor relatief weinig gegevens nodig zijn om het te kunnen toepassen⁵. Meer informatie over het model en de toepassing daarvan in de CO₂-waardemethodiek is te vinden in Bijlage E.3.

Het C-cycle-model is anders van opzet dan de IPCC 2006-methodiek voor schatten van veranderingen in de hoeveelheid koolstof in bodems.

De IPCC 2006-methodiek is bijvoorbeeld terug te vinden in de Biograce-spreadsheets.

⁵ Ingewikkelder en mogelijk ook preciezere modellen zijn bijvoorbeeld NDICEA voor akkerland bodems van het Louis Bolk Instituut in Driebergen of de nieuwe benadering voor koolstofdynamiek in landschappen en bodems in het geactualiseerde IMAGE 3.0-model. Deze modellen vragen echter wel meer data over het betreffende landschap en het klimaat waarin dat ligt.



In IPCC, 2006 wordt verandering in bodemorganische stof (B.O.S.) in akkerbouwbodems benaderd met management factoren:

$$B.O.S._t = B.O.S._{t=0} \cdot f_{\text{landgebruik}} \cdot f_{\text{bodemanagement}} \cdot f_{\text{input}}$$

Waarbij:

$B.O.S._{t=0}$ oorspronkelijke natuurlijke hoeveelheid B.O.S. per hectare.

$f_{\text{landgebruik}}$ een 'correctiewaarde' waarmee de hoeveelheid koolstof na een periode van 20 jaar van een bepaalde vorm van landgebruik (akkerbouw, meerjarige gewassen, beheerd grasland, natuurlijk bos) kan worden geschat.

$f_{\text{bodemanagement}}$ een factor die effecten van de intensiteit van bodembewerking representeert.

f_{input} een factor in relatie tot de mate waarin organisch materiaal aan de bodem wordt gegeven in de vorm van gewasresten, compost of dierlijke mest.

De drie factoren zijn indicatief en gebaseerd op praktische ervaringen, maar bieden geen expliciete wiskundige relaties.

De factor f_{input} is bijvoorbeeld voor een droog, gematigd klimaat en voor 'hoge aanvoer' van organisch materiaal (vergeleken met 'gemiddeld') 1,04 - wat aangeeft dat een 'hoge aanvoer' een bescheiden positieve impuls aan opbouw van B.O.S. geeft. Maar er is geen wiskundige relatie of andere kwantitatieve informatie die uitlegt wat 'hoge aanvoer' precies is in bijvoorbeeld ton koolstof/hectare.

De IPCC-benadering is echter een generieke benadering, die geen directe kwantitatieve relatie legt tussen een ton koolstof in planten en de hoeveelheid van die koolstof die uiteindelijk in een bodem terechtkomt als B.O.S. en humus. Bovendien is de IPCC-methodiek alleen bruikbaar voor bodems van akkerbouwland en niet voor bijvoorbeeld bodems van beheerde of natuurlijke graslanden of bos.

De C-cycle-benadering is in principe wel algemeen toepasbaar.

De IPCC-methodiek is daarom niet goed toepasbaar in een CO₂-waardebepaling of een andere LCA-analyse.

Massabalans en nutriëntenbalans

Om planten te laten groeien hebben ze voedingsstoffen (nutriënten) nodig. De voedingsstoffen die ze in de grootste hoeveelheden nodig hebben zijn stikstof (N), fosfor (P) en kalium (K), deze staan daarom ook genoemd als hulpstoffen voor de akkerbouw in Figuur 3. Daarnaast zijn er nog zogenaamde micro-elementen, voedingsmiddelen die in heel kleine hoeveelheden nodig zijn, deze zijn voor de CO₂-waarde minder van belang.

Deze voedingsstoffen kunnen planten ook weer afstaan aan de bodem als ze gecomposteerd worden.

De mate waarin planten voedingsstoffen opnemen uit en afgeven naar de bodem heet de werkingscoëfficiënt. De werkingscoëfficiënt verschilt per element en met de manier waarop het element wordt aangeboden. Zo is de werkingscoëfficiënt van fosfaat in de vorm P₂O₅ 100% terwijl de werkingscoëfficiënt van stikstof in de vorm van kalkammonsalpeter (KAS) 59% is en de afgifte van stikstof naar de bodem vanuit gewasresten 49% is (Timmer, et al., 2004).

Naast voedingsstoffen uit gewasresten komen er ook nutriënten, met name stikstof, vrij uit de organische stof in de bodem. In Nederland bestaat een akker voor twee massa % uit organische stof in de bodem - 70.000 kg/ha - waarvan 2%/jaar wordt afgebroken (Schils, 2012).



Voor zowel de gevormde als de afgebroken organische stof in de bodem kan uitgegaan worden van een koolstofgehalte van 57% en een koolstof : stikstof verhouding van 15:1 (IPCC, 2006).

Daarom is het voor de stikstofbalans van belang om rekening te houden met de opname van stikstof uit gewasresten en de bodem wanneer de nutriëntenbalans opgesteld wordt. Meer informatie in Bijlage A.1.2. Uitgewerkte voorbeelden voor respectievelijk tarweteelt en suikerbieten teelt staan in Hoofdstuk 5 en Hoofdstuk 6.

LET OP: de bovenstaande nauwkeurigheid van bemesting wordt in de praktijk alleen in de precisielandbouw en de tuinbouw gerealiseerd, voor de rest moet het vooral gezien worden als een benadering van de minimale hoeveelheden nutriënten die toegediend worden, bij minder nutriënten kan de opbrengst niet gehaald worden. In de praktijk zal er met name voor stikstof sprake kunnen zijn van overbemesting en dus ook hogere emissies. De overheid probeert dit te beperken met de nitraatrichtlijn.

Als in de massabalans vast gesteld wordt dat er sprake is van afname van de hoeveelheid koolstof die in de bodem vastgelegd wordt kan op basis daarvan de extra CO₂-emissie berekend worden. Hierbij moet rekening gehouden worden dat de massa van CO₂ : koolstof in de bodem = 44:12.

Voor het berekenen van emissies op basis van de nutriëntenbalans wordt in de Biograce spreadsheet een tweetal werkbladen aangeboden (*N₂O emissions IPCC* en *N₂O emissions GNOC*) waarmee via twee verschillende methoden de emissies van N₂O bij gebruik van kunstmest, dierlijke mest en overige organische meststoffen (bijvoorbeeld compost) bij gewasteelt kunnen worden geschat. De Biograce-spreadsheettools zijn geaccrediteerd onder het Europese Renewable Energy Directive.

2.4.4 Indirecte emissies door de productie van hulpstoffen

De bepaling van indirecte emissies door de productie van hulpstoffen verloopt analoog aan de bepaling van de emissies door het gebruik van energiedragers:

- bepaal de emissies per eenheid gebruikte hulpstoffen;
- combineer de emissies per eenheid hulpstof met de eerder in de massabalans vastgestelde consumptie aan hulpstoffen.

Voor het bepalen van emissies door de productie van hulpstoffen is vaak enige proceskennis vereist, zie de volgende voorbeeldberekening.

Voorbeeldberekening van indirecte emissies

Productie van een stikstofhoudende kunstmest als ammoniak uit aardgas geeft bijvoorbeeld een emissie van 1,5-2,5 kg CO₂/kg NH₃.

Bij verdere verwerking van ammoniak tot salpeterzuur treden N₂O-emissies op, van 0,1-0,25 kg N₂O/ton HNO₃ voor moderne fabrieken met afgasreiniging, tot 9,0 kg N₂O/HNO₃ voor oudere fabrieken. Gebruik van 100 kg ammoniak/ha als kunstmest bij gewasteelt vertegenwoordigt bijvoorbeeld een broeikasgasemissie van 100 x 1,5 = 150 tot 100 x 2,5 = 250 kg CO₂.

Wanneer die hectare bijvoorbeeld 3 ton snijmaïs oplevert waaruit - volledig hypothetisch - 2 ton butanol wordt geproduceerd, dan is de bijdrage van ammoniakgebruik aan de CO₂-waarde van butanol:
(150 ÷ 2) tot (250 ÷ 2) = 75 - 125 kg CO₂ per ton butanol.



Daarnaast zijn er bronnen waaruit geput kan worden zoals Biograce, Protocol Monitoring Hernieuwbare Energie, lijst standaard emissiefactoren. In Bijlage C is een uittreksel van deze bronnen gegeven.

2.4.5 Standaardwaarden voor teelt

Met name de landbouw ketenschakel vergt een analyse, die complex zal zijn voor wie nog weinig thuis is in LCA's. Als service voor deze gebruikers is in onderstaande tabel een overzicht van standaardwaarden ingevoegd voor een aantal gewassen.

Tabel 1 Standaardwaarden voor broeikasgasemissies in de landbouw ketenschakel van verschillende landbouwgewassen, gebaseerd op de Renewable Energy Directive

	kg CO2-eq/ton product (als geproduceerd)	geogst product kg/ha	vochtgehalte
Suikerbiet	36	68.700	75%
Tarwe, graan	304	5.200	14%
Suikerriet, stengel op veld	24	68.700	73%
Populier, houtsnippers	18	20.000	50%
Koolzaad, zaden op veld	668	3.113	10%
Zonnebloemzaad, zaden op veld	405	2.440	10%
Sojaboon, bonen op veld	337	2.798	15%
Fresh Fruit Bunches	124	19.000	34%

De gepresenteerde cijfers zijn gebaseerd op de 'typical values' die in de Renewable Energy Directive in Bijlage C zijn opgenomen.

Het is overigens niet duidelijk of de in de Renewable Energy Directive ook rekening wordt gehouden met veranderingen in bodemorganische stof en of de nutriëntenbalans sluitend is en in hoeverre de in de Renewable Energy Directive opgenomen ketenanalyses betrekking hebben op ketens die ook voldoen aan de duurzaamheidscriteria uit de NTA8080 voor behoud van bodemkwaliteit.

2.4.6 Alloceer emissies bij gebruik van bijproducten en reststromen

In de productieketens van biobased grondstoffen worden vaak bijproducten geproduceerd. Bekende voorbeelden zijn:

- perskoek van oliehoudende zaden;
- pulp van suikerbieten;
- gistingsconcentraten of 'distillers grain with solubles', het bijproduct van ethanolproductie uit granen;
- terpentijn bij chemisch pulpen van hout.

Aan de andere kant is het ook mogelijk biobased grondstoffen te produceren uit bijproducten (en restproducten), bijvoorbeeld bietenblad van suikerbieten.

Alloctie bij gebruik van reststromen

Indien gebruik gemaakt wordt van reststromen, wordt de keten beschouwd vanaf het punt van het ontstaan van de reststroom. In dit geval hoeven bij de inventarisatie geen broeikasgasemissies aan de reststroom te worden toegerekend.

In de Renewable Energy Directive (RED) is hierover de volgende passage opgenomen:



‘Afval, residuen van landbouwproducten, zoals stro, bagasse, vliezen, kolven en notendoppen, en residuen van verwerking, met inbegrip van ruwe glycerine (niet-geraffineerde glycerine), worden geacht tijdens hun levenscyclus geen broeikasgasemissies te veroorzaken totdat ze worden verzameld.’

Wat een reststof is, is vaak locatie- en marktspecifiek en is daarom vaak onderwerp van discussie. In deze handleiding wordt geen uitsluitel gegeven over welke biomassa wel of niet als reststroom kan worden beschouwd. Dit wordt beschouwd als een apart beleidsonderwerp waarover de discussie nog niet volledig is gevoerd.

Ter informatie het volgende, in de RED zelf is de volgende lijst met reststromen opgenomen:

- de biomassafractie van gemengd stedelijk afval, maar niet gescheiden ingezameld huishoudelijk afval waarvoor de recyclingstreefcijfers gelden overeenkomstig artikel 11, lid 2, onder a), van Richtlijn 2008/98/EG;
- bioafval als gedefinieerd in artikel 3, punt 4, van Richtlijn 2008/98/EG van particuliere huishoudens, waarop gescheiden inzameling van toepassing is als gedefinieerd in artikel 3, punt 11, van die richtlijn;
- de biomassafractie van industrieel afval ongeschikt voor gebruik in de voeder- of voedselketen, met inbegrip van materiaal van de groot- en detailhandel, de agrovoedingsmiddelenindustrie en de visserij- en aquacultuursector;
- stro;
- dierlijke mest en zuiveringslib;
- effluenten van palmoliefabrieken en palmtrossen;
- tall-olie-pek;
- ruwe glycerine;
- bagasse;
- draf van druiven en droesem;
- notendoppen;
- vliezen;
- kolfspillen waaruit de maïskiemen zijn verwijderd;
- biomassafractie van afvalstoffen en residuen uit de bosbouw en de houtsector, zoals schors, takken, pre-commercieel dunningshout, bladeren, naalden, boomkruinen, zaagsel, houtkrullen/spaanders, zwart residuloog, bruin residuloog, vezelslib, lignine en tall-olie;
- gebruikte bak- en braadolie;
- dierlijke vetten, ingedeeld als categorieën 1 en 2 overeenkomstig Verordening (EG) nr. 1069/2009 van het Europees Parlement en de Raad.

Ook in de NTA 8080 is een lijst met reststromen opgenomen waaraan geen broeikasgasemissies hoeven te worden toegekend tot moment van inzameling.

Het feit dat onder de RED (en NTA 8080) stro als restproduct worden beschouwd terwijl stro in Nederland een waarde heeft van € 100/ton - en dus een bijproduct is op de Nederlandse markt - illustreert mogelijke verschillen tussen lokale omstandigheden en meer generieke wetgeving.

Allocatie bij gebruik van bijproducten

Omdat de bijproducten nuttig toepasbaar zijn is het gebruikelijk een deel van de emissies in de productieketen waarin ze vrijkomen aan deze bijproducten toe te rekenen ook wel alloceren genoemd. De achterliggende gedachte is dat de opbrengsten uit bijproducten ertoe bijdragen dat de productieketen überhaupt bestaat dus dat de emissies ook toe te rekenen zijn aan de bijproducten.



Conform de ISO 14040-normen voor LCA's zou eigenlijk systeemuitbreiding moeten worden toegepast⁶. Hierdoor zou de berekening van de productieketen echter onwerkbaar groot kunnen worden.

Daarom wordt de uitstoot van broeikasgassen in de productieketen vaak middels een bepaalde sleutel verdeeld tussen hoofdproduct en bijproduct. De verdeelsleutel wordt over het algemeen gebaseerd op de fysieke of economische kenmerken van het product, zoals energie-inhoud, massa of marktwaarde. Allocatie op basis van marktwaarde wordt economische allocatie genoemd. Economische allocatie wordt beschouwd als de meest representatieve verdeelsleutel (ISO 14040-normen) en wordt ook toegepast in de GER-waardenmethodiek.

Als voorbeeld voor de manier waarop deze allocatie werkt: als de financiële waarde van het bijproduct 30% van de totale inkomsten bedraagt, dan wordt 30% van de uitstoot van broeikasgassen toegerekend aan het bijproduct.

Voor broeikasgasbalansen van biobrandstoffen is wettelijk (onder de RED⁷) een andere allocatiemethode vereist: allocatie op basis van energie-inhoud. De energie-inhoud van een stof wordt weergegeven door de zogenoemde stookwaarden. In Bijlage B is een aantal stookwaarden opgenomen.

2.5 Reken de broeikasgas emissies om tot CO₂-equivalenten

In de voorgaande paragrafen zijn de emissies van verschillende soorten broeikasgassen bepaald. Deze verschillende soorten emissies kunnen worden omgerekend naar één type emissie: de CO₂-equivalent. Dit gebeurt met door het IPCC vastgestelde karakterisatiefactoren. De karakterisatiefactoren drukken uit hoe sterk de bijdrage van een kilo broeikasgas aan klimaatverandering is in vergelijking met de bijdrage van één kilo CO₂. De eenheid van de karakterisatiefactor van bijvoorbeeld broeikasgas N₂O is dan ook kg CO₂-equivalent/kg N₂O.

De karakterisatiefactoren van bijvoorbeeld CH₄ en N₂O zijn respectievelijk 25 en 298 kg CO₂-equivalenten/kg. Dit betekent dat één kilo CH₄ evenveel bijdraagt aan klimaatverandering als 25 kilo CO₂ en één kilo N₂O evenveel als 298 kilo CO₂.

Een lijst met karakterisatiefactoren is te vinden in Bijlage C.

Als alle broeikasgasemissies zijn omgerekend naar CO₂-equivalenten kunnen de resultaten bij elkaar opgeteld worden tot één CO₂-waarde.

⁶ Bij systeemuitbreiding wordt uitgewerkt welke productieketens van primaire grondstoffen en producten en bijbehorende broeikasgasemissies door de bijproducten worden uitgespaard. Eiwitrijke gistingsconcentraten kunnen bijvoorbeeld sojaschroot vervangen als eiwitbron in diervoeders. In systeemuitbreiding zou in dat geval de sojaketen moeten worden meegenomen. Voor een verdere (beknopte) discussie over de nadelen van systeemuitbreiding, zie bijvoorbeeld: www.ce.nl/publicatie/calculating_greenhouse_gas_emissions_of_eu_biofuels/848

⁷ RED = Renewable Energy Directive, zie <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32009L0028>, bijlage C: Methodiek opstellen van broeikasgasemissies voor biobrandstoffen.



2.6 Bepalen van de afname in de CO₂-waarde

Vergelijking van de CO₂-waarde voor de biograndstof met de CO₂-waarde van de op fossiele energie gebaseerde referentie grondstof geeft de reductie in broeikasgasemissies die door gebruik van de biograndstof kan worden bereikt. Dit is in navolgende voorbeelden verder uitgewerkt.

Als de CO₂-waarde voor de biobased productie route lager is, dan is er sprake van CO₂-emissiereductie. Het verschil tussen de CO₂-waarde van de fossilbased en de biobased situatie is de CO₂-emissiereductie per eenheid geproduceerd product.

Als het verschil negatief is, dan is de CO₂-waarde van de biobased route hoger is dan de CO₂-waarde van de fossilbased route en wordt er dus geen CO₂ bespaard door over te stappen op biobased grondstoffen.

In een volgende versie van de GER-waardenlijst zal een overzicht met CO₂-waarden voor referentie grondstoffen zijn opgenomen. Voor de in onderstaande hoofdstukken uitgewerkte voorbeelden relevante referentie CO₂-waarden zijn hieronder ingevoegd.

Tabel 2 Referentie CO₂-waarden voor enkele op basis van fossiele energiedragers geproduceerde grondstoffen (cijfers in kg CO₂-eq./kg grondstof)

	Ketenemissies	Koolstofinhoud	Som
Methanol	0,77	1,38	2,15
Etheen	1,46	3,14	4,6
Styreen	3,1	3,17	6,27

Bron van cijfers: Ecoinvent database.

De ketenemissies betreffen alle emissies die optreden bij de productie van de grondstof uit aardgas (methanol) of aardolie (etheen, styreen). De aan de koolstofinhoud gerelateerde emissie betreft de emissie die optreedt wanneer het product waarin de grondstof is verwerkt wordt afgedankt en bijvoorbeeld wordt verbrand in een AVI. De koolstof in de grondstof wordt dan omgezet in CO₂.



3 Uitgewerkte voorbeelden

In het Hoofdstuk 2 is de methodiek van de CO₂-waardebepaling besproken aan de hand van voorbeelden. In de volgende drie hoofdstukken wordt per hoofdstuk een voorbeeldberekening uitgevoerd voor respectievelijk:

- methanolproductie uit biobased syngas (vergassing van hout);
- etheenproductie uit bio-ethanol (vergisting van suiker tot ethanol);
- PLA-productie uit melkzuur (vergisting van suiker tot melkzuur).

3.1.1 Methanolproductie uit biobased syngas (vergassing van hout)

Deze route is uitgewerkt als voorbeeld van een route gebaseerd op hout. Het voorbeeld laat zien hoe keuzes in de bosbouw zoals het aantal dunningen en de mate waarin biomassa afgevoerd wordt, doorwerken op directe en indirecte emissies.

Daarnaast is methanol een basis chemicalie ook wel platform chemical of chemical building block genoemd met een breed scala aan toepassingen zoals formaldehyde, azijnzuur, DME en MDTE.

3.1.2 Etheenproductie uit biobased ethanol (vergisting van graan)

Etheen uit bio-ethanol is uitgewerkt als een voorbeeld van een biobased productieketen op basis van akkerbouw. Het voorbeeld laat zien hoe keuzes in de akkerbouw als toepassing van meststoffen en aandeel organische stof in de bodem doorwerken op directe en indirecte emissies.

Daarnaast is etheen een basis chemicalie met een breed scala aan toepassingen. Meest bekende en qua marktomvang de absoluut belangrijkste toepassing is die van grondstof voor LDE en HDPE. Maar etheen is ook geschikt als grondstof voor oppervlakteactieve stoffen en oplosmiddelen en brandstof additief (EDTE).

3.1.3 PLA-productie uit melkzuur (vergisting van suiker)

PLA uit melkzuur op basis van suiker is een voorbeeld van een biobased productieketen op basis van akkerbouw.

PLA-productie uit melkzuur is uitgewerkt als een voorbeeld van een drop-in-toepassing. De toepassing van foam geproduceerd op basis van PLA kan één op één polystyreenfoam vervangen.

Het product heeft wel heel andere chemische eigenschappen en is dus geen drop-in-chemical.

PLA een sterk opkomende bioplastic met een breed scala aan toepassingen. Meest bekend zijn verpakkingsmaterialen en isolatiemateriaal (biopearls) van PLA.



4 Methanolproductie uit biobased syngas (vergassing van hout)

Deze route is uitgewerkt als voorbeeld van een route gebaseerd op hout. Het voorbeeld laat zien hoe keuzes in de bosbouw zoals het aantal dunningen en de mate waarin biomassa afgevoerd wordt, doorwerken op directe en indirecte emissies. Daarnaast is methanol een basis chemicalie ook wel platform chemical of chemical building block genoemd met een breed scala aan toepassingen zoals formaldehyde, azijnzuur, DME en MBTE.

De benodigde technologie is commercieel beschikbaar. Recente ontwerpen voor fabrieken voor productie van methanol uit aardgas hebben een productiecapaciteit van één miljoen ton (één megaton of Mton) per jaar. Ook fabrieken voor productie van methanol uit steenkool hebben een productiecapaciteit van enkele honderdduizenden tonnen per jaar⁸. Voor grootschalige vergassing van hout kan bijvoorbeeld worden gedacht aan het HT Winkler vergassingsproces, zoals in de jaren tachtig gedemonstreerd in Duitsland.

Figuur 4 De HT Winklervergasser met 300 ton/dag methanolfabriek in Berrenrath



Bron: www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/winkler

⁸ Zie bijvoorbeeld: www.topsoe.com/sites/default/files/topsoe_methanol_coal_gasification_paper.ashx_.pdf

Een concreet initiatief voor methanolproductie op basis van houtachtige biomassa in Nederland is het Wood Spirit project bij Bio MCN in Delfzijl (on hold). Om een idee te geven van de schaalgrootte, in het WoodSpirit-project moet jaarlijks één miljoen ton gepelletiseerd hout (< 10% vocht) verwerkt gaan worden.

Een verwant proces is een recent initiatief van AkzoNobel met onder andere Bio MCN, waarin de haalbaarheid onderzocht wordt van een fabriek waarin geen hout maar huishoudelijk afval als grondstof voor de vergassing gebruikt wordt. Omdat circa 56% van het huishoudelijk afval biogeen is, is ook circa 56% van het resulterende gas biobased (Staatscourant, 2015).

4.1 Afbakening en procesboom

Methanol wordt geproduceerd uit synthesegas, dat weer is geproduceerd door vergassing van de grondstof.

In dit voorbeeld is vanwege de beoogde schaalgrootte van methanolproductie aangenomen dat de als grondstof gebruikte houtachtige biomassa bestaat uit gepelletiseerd precommercieel dunningshout uit duurzaam beheerd bos.

Dit soort houtproducten wordt ook gebruikt bij grootschalig meestoken van hout in kolencentrales.

Pellets worden in Nederland voornamelijk uit Canada en de VS geïmporteerd. In dit voorbeeld is uitgegaan van pellets uit naaldbos uit Oost-Canada en het Oosten van de VS.

Verder is uitgegaan van een situatie waarin de methanolproductie en vergassing met elkaar zijn geïntegreerd.

Figuur 5 Voorbeeld van een Canadese pelletfabriek



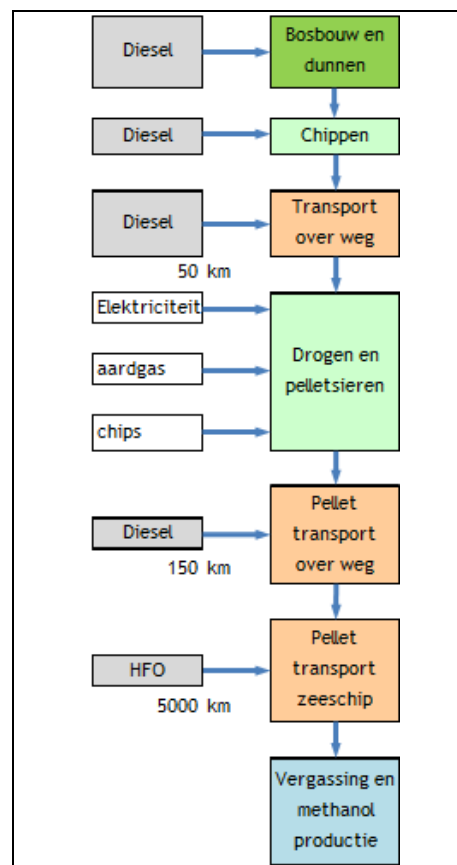
Bron: Bradley, 2006.

De procesboom omvat dan ook de volgende stappen (zie Figuur 6):

- bosbouw en dunning;
- chippen en tussentijds transport;
- drogen en pelletiseren;
- pellettransport;
- vergassing en methanolproductie.

Het methanol is een tussenproduct dus de aanpak is van cradle-to-gate. De procesboom begint bij het dunnen van het hout en niet het aanplanten van het bos, omdat we uitgaan van het gebruik van pre-commercieel dunningshout, dat wil zeggen een reststroom van het bosbouw proces (zie ook Paragraaf 2.4.5).

Figuur 6 Procesboom methanol uit hout



Bron: CE Delft.

4.2 Inventarisatie van broeikasgasemissies

De inventarisatie is conform de handleiding in Hoofdstuk 2 uitgevoerd in drie deelstappen.

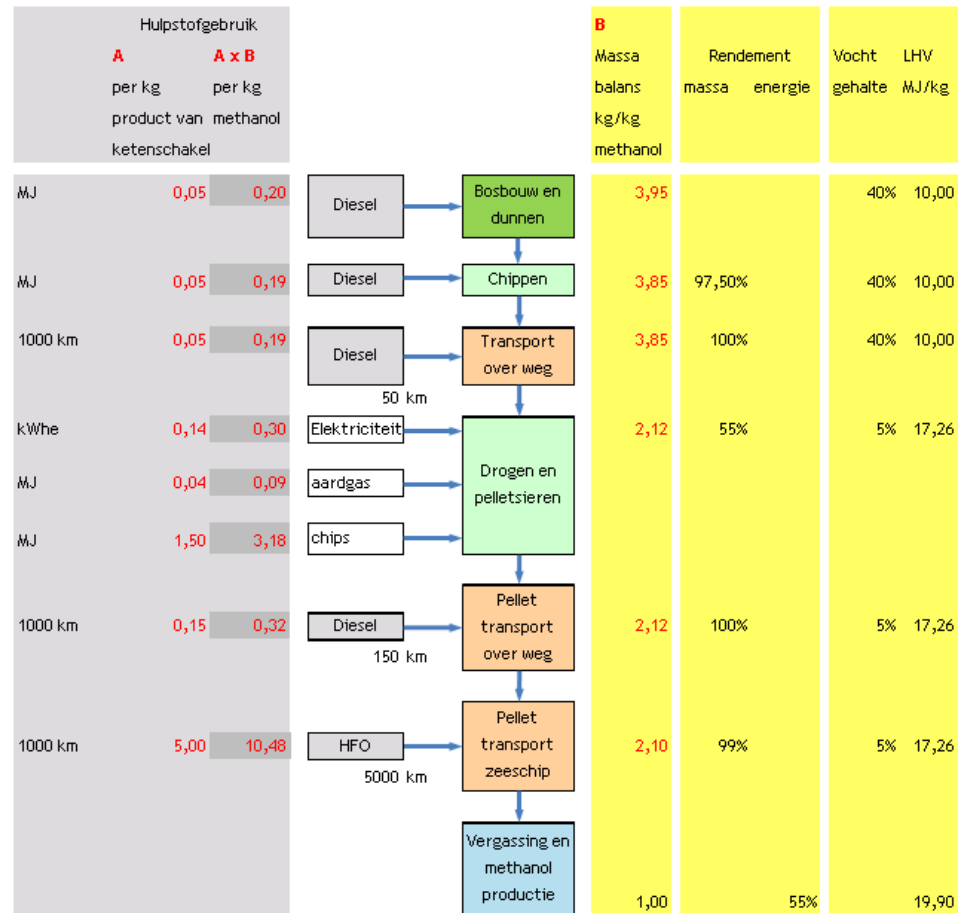
4.2.1 Massabalans en gebruik van hulpstoffen en energiedragers

In deze stap wordt per schakel in de productieketen en per eenheid halffabricaat het gebruik van grondstoffen, energiedragers, hulpstoffen en additieven bepaald en gecombineerd tot een logische en consistente massabalans (Paragraaf 2.4.1).

Op basis van een aantal bronnen is eerst het gebruik aan hulpstoffen ingeschat (kolom **A**), zodat in een latere stap de indirecte emissies kunnen worden bepaald.

Bijvoorbeeld voor het zagen van een kg 'nat' hout is aangenomen dat daarvoor 0,05 MJ nodig is (Agentschap_NL, 2011).

Figuur 7 Inschatting gebruik van hulpstoffen en energiedragers



Er is op één punt afgeweken van de gehanteerde bronnen. In de praktijk wordt het hout gedroogd voordat het wordt gepelletiseerd. De hiervoor benodigde warmte wordt geleverd door een deel van de chips te verbranden. Aardgas wordt gebruikt als 'steunbrandstof' om de vlam voldoende stabiel te houden.

Deze stap is niet terug te vinden in beide gebruikte bronnen en is hier toegevoegd op basis van achtergrondinformatie over droogapparatuur⁹.

⁹ Volgens een studie aan de Universiteit van Utrecht (Hamelinck, et al., 2003) is voor verdampen van één ton vocht in een trommeldroger 4,5 GJ aan warmte nodig. De chips worden bij het drogen gedroogd van een vochtgehalte van 40% naar een vochtgehalte van 10% - per ton te drogen chips. Dus de aangevoerde chips bevatten 400 kg water en 600 kg droog hout. De hoeveelheid verwijderd water = $(400 - 10\% \times 600) / (100\% - 10\%) = 400 - 60 = 340$ kg. Per ton te drogen chips is 150 kg chips als brandstof nodig: warmtebehoefte = $0,333 \text{ ton} \times 4,5 \text{ GJ/ton} = 1,5 \text{ GJ/ton}$ te drogen chips, Stookwaarde van chips is 1,5 GJ/ton te drogen chips / 0,15 ton chips/ton te drogen chips = 10 GJ/ton.

Uit de voor het opstellen van de massabalans gebruikte bronnen (zie voetnoot 10) zijn ook de specifieke gebruiken aan hulpstoffen en energiedragers overgenomen.

De massabalans (kolom **B**) is bepaald door terug te rekenen vanuit het product (van beneden naar boven). Uitgangspunt is 1 kg product (methanol) dat geproduceerd is uit 99% droge houtpellets met een rendement van 55%. Dit betekent dat er dus 2,10 kg houtpellets (99% ds nodig waren) en zo verder terugrekenend (naar boven) op basis van de rendementen per stap¹⁰. Voor omrekenen van massa naar energie en omgekeerd zijn ook de vochtgehalten en stookwaarden overgenomen. Tenslotte is op basis van de gegevens over het hulpstoffengebruik (kolom **A**) en de massabalans (kolom **B**), het hulpstoffengebruik per kg methanol uitgerekend (kolom **AxB**).

Massabalans en koolstofvastlegging in de bodem

Daarnaast is de afname van koolstof in de bodem door het reduceren van de beschikbare hoeveelheid biomassa voor opname in de bodem. Dit is gedaan aan de hand van het C-cycle, zie Bijlage E.3.

Door iteratieve berekening van deze vergelijkingen op basis van deze kentallen blijkt dat in koele klimaatzones gemiddeld 30% van de koolstof die in een bos na de kap achterblijft over een periode van 100 jaar vastgelegd wordt in de bodem als humus. In tropische bossen is dit minder. Dit betekent dat als je biomassa uit een bos in een koele klimaatzone haalt, je verhindert dat 30% van de koolstof in die biomassa vastgelegd wordt in de bodem.

4.2.2 Inventarisatie emissies

In deze stap worden de directe en indirecte emissies bepaald.

In dit voorbeeld onderscheiden we twee soorten emissies:

- emissies door het gebruik van energiedragers;
- emissies die voortkomen uit keuzes in de bosbouwfase.

Hieronder geven we aan hoe deze emissies berekend kunnen worden.

Emissies door het gebruik van energiedragers

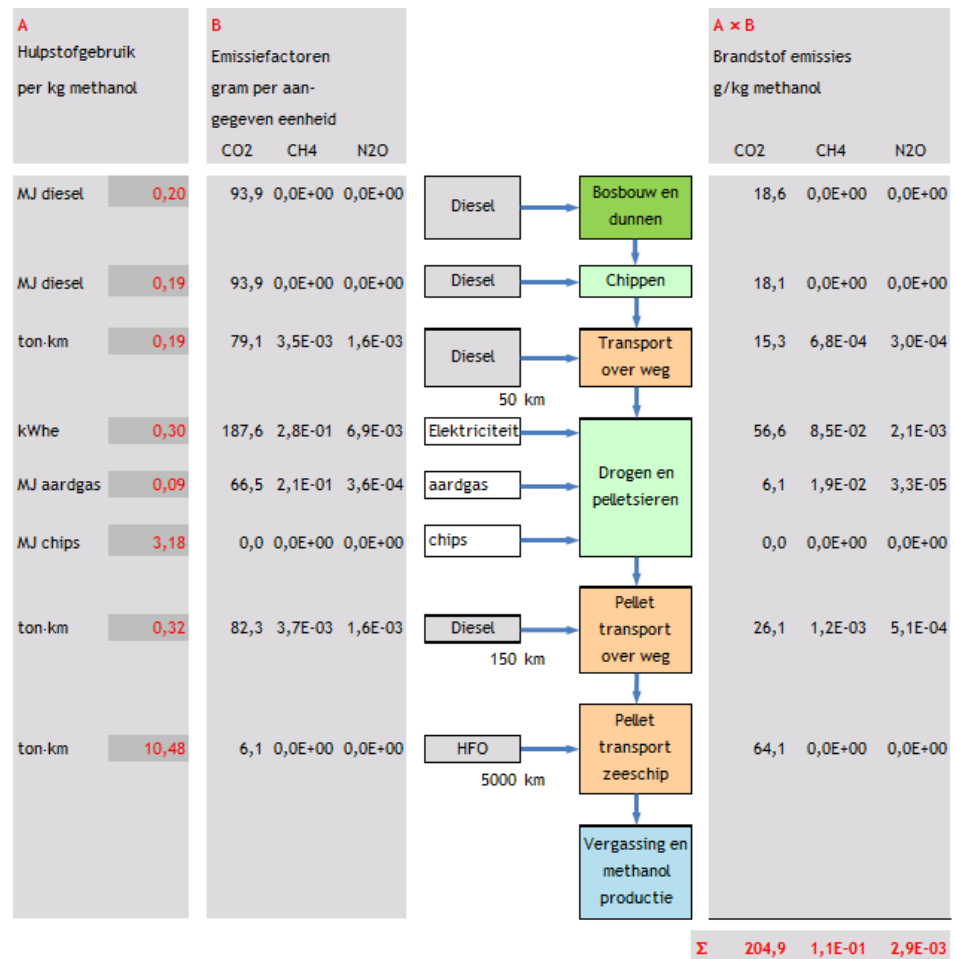
De emissies die samenhangen met het gebruik van energiedragers zijn voor deze gelegenheid overgenomen uit Biograce¹¹. Voor elektriciteitsgebruik bij drogen en chippen zijn de emissiefactoren voor elektriciteitsproductie in Canada gebruikt. De uitkomsten van deze exercitie zijn weergegeven in Figuur 8.

¹⁰ Bron: de 'Excel based biomass GHG calculations' van Agentschap NL uit 2011 en het bijbehorende methodiekrapport (Agentschap_NL, 2011) voor de processen 'transport over de weg' tot en met 'Pellet transport zeeschip'. Voor de processen 'bosbouw en dunnen', 'chippen' en 'vergassing en methanolproductie' is gebruik gemaakt van JRC, EUCAR and CONCAWE, 2014.

¹¹ Zie: http://biograce.net/app/webroot/biograce2/content/ghgcalculationtool_electricityheatingcooling/overview en Bijlage B.



Figuur 8 Berekening van de emissies door gebruik energiedragers bij de productie van methanol



Emissies door verminderde koolstofopslag in de bodem

Bij het opstellen van de massabalans op basis van het C-cycle-model is vastgesteld dat bij achterlaten van het dunningshout in het bos, 30% van de koolstof vastgelegd zou worden in de bodem. Nu dat niet gebeurt zal er geen koolstof vastlegging plaatsvinden en wordt die koolstof uiteindelijk omgezet naar CO₂-emissies.

Uit de massabalans is bekend dat per kilo methanol 3,95 kilo nat hout (40% vocht) of 2,37 kilo droog hout nodig is. Het koolstofgehalte van droog dunningshout in naaldbos in koele klimaatzones bedraagt circa 47% (IPCC, 2006).

De netto CO₂-emissie door precommercieel dunningshout te oogsten voor methanolproductie en niet in het bos achter te laten om bij te dragen aan vorming van humus en andere organische stof in de bodem bedraagt:

$$\text{CO}_2\text{-emissies} = 2,37 \times 47\% \times 30\% \times 44/12 = 1,2 \text{ kilo CO}_2/\text{kilo methanol}^{12}$$

¹² 44/12 = de massaverhouding tussen CO₂ (44) en koolstof (12).



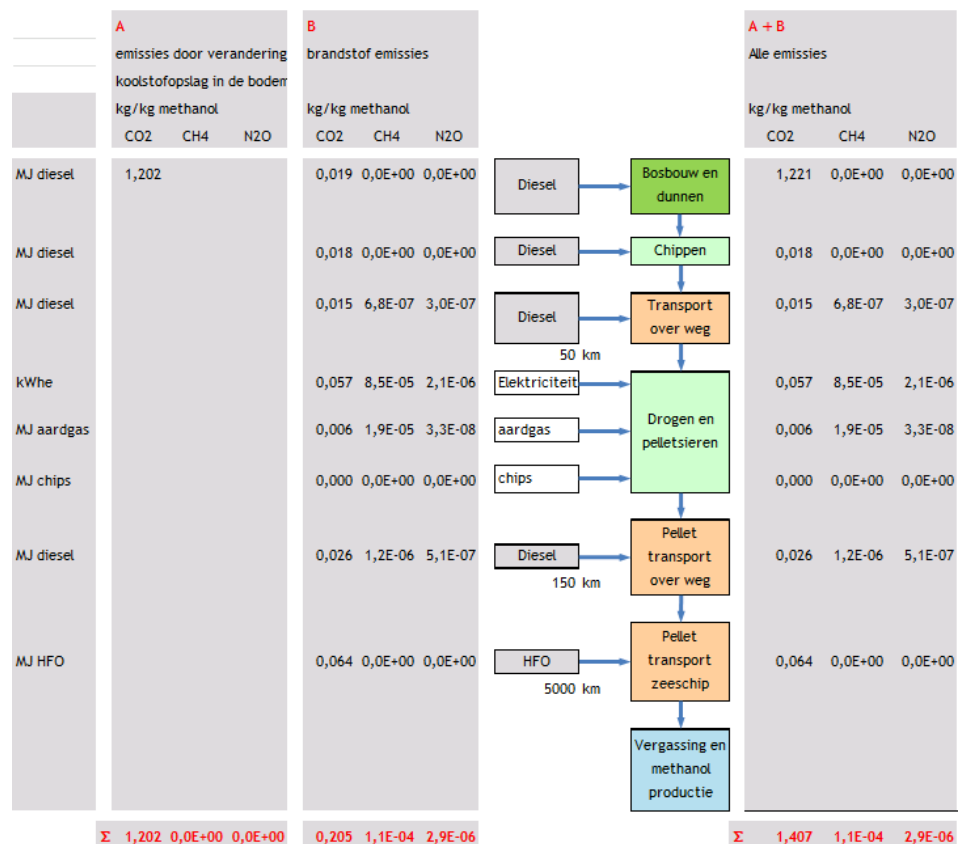
4.2.3 Allocatie van emissies

Voordat alle emissies bij elkaar opgeteld kunnen worden moet eerst bepaald worden welk gedeelte van emissies volledig toegerekend kan worden aan het proces. Daartoe bepalen we eerst of emissies gedeeltelijk geproduceerd worden door reststromen of bijproducten van andere processen, zie ook Paragraaf 2.4.5.

Omdat er in dit voorbeeld geen bijproducten gevormd worden en er geen emissies van reststromen meegenomen worden hoeft er niet te worden gealloceerd.

De totale emissies per broeikasgas kunnen bepaald worden door alle emissies bij elkaar op te tellen.

Figuur 9 Aggregatie van emissies per soort emissie



4.3 Omrekenen van broeikasgas emissies naar CO₂-equivalenten

In de vorige paragraaf is berekend hoeveel CO₂-, CH₄- en N₂O-emissie plaatsvindt per kilogram methanolproductie. Om het mogelijk te maken om deze emissies te combineren tot één CO₂-waarde, moeten deze emissies omgerekend worden naar CO₂-equivalenten. Hiervoor worden zogenoemde karakterisatiefactoren gebruikt, zie Paragraaf 2.5.

De karakterisatiefactor van CO₂ is 1, van CH₄ is 25 en van N₂O is 298. Combineren van deze karakterisatiefactor met de uitkomsten van de vorige paragraaf levert een CO₂-waarde van 1,41 kg CO₂-eq. per kg methanol productie, zie Figuur 10.



Figuur 10 Omrekenen emissies naar CO₂-waarde in CO₂-equivalenten

		A			A X B
		Emissies			kilo CO ₂ -eq
		kilo/kilo methanol			per kilo
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	methanol
Diesel	Bosbouw en dunnen	1,488	0,0E+00	0,0E+00	1,488
Diesel	Chippen	0,018	0,0E+00	0,0E+00	0,018
Diesel	Transport over weg	0,015	6,8E-07	3,0E-07	0,015
50 km					
Elektriciteit	Drogen en pelletsieren	0,057	8,5E-05	2,1E-06	0,059
aardgas		0,006	1,9E-05	3,3E-08	0,007
chips		0,000	0,0E+00	0,0E+00	0,000
Diesel	Pellet transport over weg	0,026	1,2E-06	5,1E-07	0,026
150 km					
HFO	Pellet transport zeeschip	0,064	0,0E+00	0,0E+00	0,064
5000 km					
	Vergassing en methanol productie				
		1	25	298	1,68 Σ
		B Karakterisatiefactoren			

Zoals geïllustreerd zijn de emissies van CO₂ en met name de emissie gerelateerd aan veranderingen in koolstof vastgelegd in organische stof in de bodem overheersend.

4.4 Bepalen afname CO₂-waarde

Ter vergelijking, de broeikasgasbalans gerelateerd aan de fossiele productieroute voor methanol bedraagt ongeveer 2.150 g CO₂-eq./kg methanol rekeninghoudend met de koolstofinhoud (zie Tabel 2).

De vervanging van fossiel etheen door biomethanol zou daarmee een reductie van $(2,15 - 1,41)/2,15 = 34\%$ opleveren.



5 Etheen uit bio-ethanol

Etheen uit bio-ethanol is uitgewerkt als een voorbeeld van een biobased productieketen op basis van akkerbouw. Het voorbeeld dient om te illustreren hoe om te gaan met zaken als toepassing van meststoffen en met organische stof in de bodem in akkerbouwsystemen.

Daarnaast is etheen een chemisch tussenproduct of platform chemical met een breed scala aan toepassingen. Meest bekende en qua marktomvang de absoluut belangrijkste toepassing is die van grondstof voor LDE en HDPE. Maar etheen is ook geschikt als grondstof voor oppervlakteactieve stoffen, oplosmiddelen en brandstof additief (EDTE).

5.1 Afbakening en procesboom

Etheen kan worden geproduceerd door chemische conversie (dehydrogenatie) van ethanol.

Conform de Europese praktijk (USDA, 2014) is uitgegaan van ethanolproductie op basis van granen, voor deze voorbeeld uitwerking concreet ingevuld als tarwe.

Ethanol wordt tot nu toe in de EU voornamelijk geproduceerd op basis van granen (USDA, 2014) en niet uit suikergewassen (zoals in Brazilië) vanwege de langdurige bewaarbaarheid van granen.

De procesboom, zie Figuur 11, start logischerwijs bij tarweteelt en eindigt na omzetting van ethanol in etheen. De aangehouden procesboom is gebaseerd op:

- informatie over teelt van wintertarwe in Nederland;
- verwerking van in Nederland geteelde tarwe in Nederland zelf (E-Kwadraat, 2010);
- informatie over ethanolproductie uit graan, zoals bekend bij CE Delft (o.a. (Biograce, 2012) (JRC, EUCAR and CONCAWE, 2014));
- een eerdere studie van CE Delft uitgevoerd voor Lyondell (CE Delft, 2011).

In de procesketen worden meerdere bijproducten gevormd:

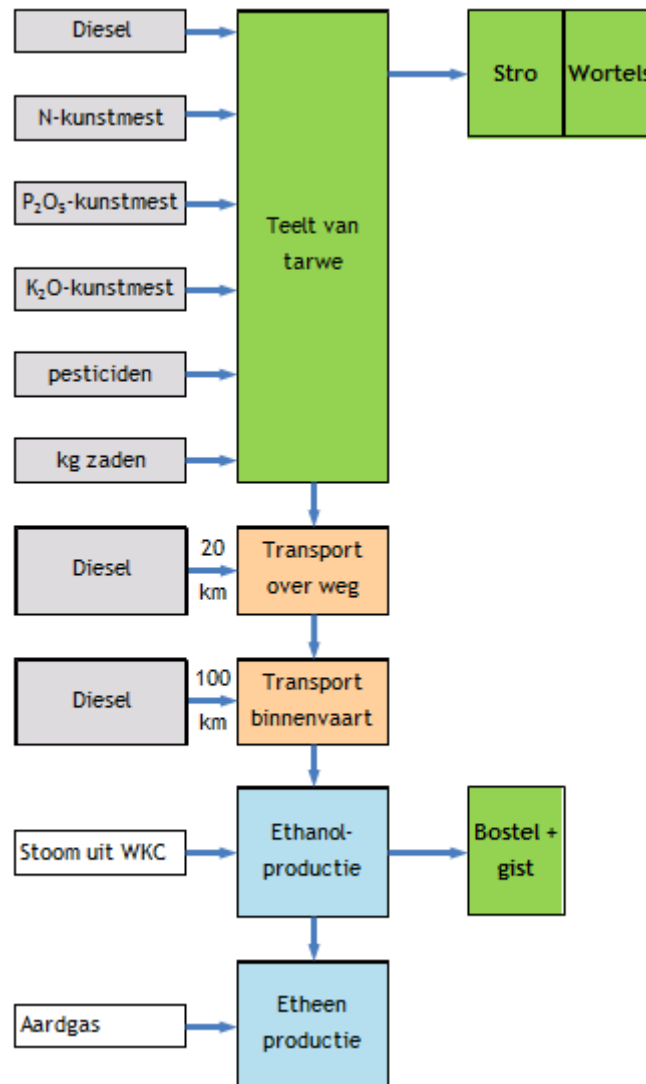
- Stro wordt in Nederland apart geoogst en gebaald en afgezet bij onder meer bloembollen kwekers (voor grondafdekking) en manegehouders. De inkomsten voor de akkerbouwer bedragen volgens (Universiteit van Wageningen, 2010) € 50/ton. Vanwege deze prijs is stro eigenlijk een bijproduct. Stro wordt echter onder RED als reststroom en niet als bijproduct beschouwd. Om die reden is er in deze voorbeeldanalyse niet naar gealloceerd.
- Bij het uitkoken van tarwe om de in het tarwe aanwezige zetmeel blijft een eiwitrijk product over dat in Engels 'distiller grains with solubles' wordt genoemd, in Nederlands tarweconcentraat. Dit product wordt in Nederland door Nedalco als vochtrijk diervoeder afgezet, terwijl het



bijproduct bij Abengoa wordt gedroogd en gepelletiseerd¹³. Deze vergelijking is anders dan in de meeste broeikasgasbalansen voor bio-ethanol voor gebruik als transportbrandstof geen rekening gehouden met eventueel drogen van tarweconcentraat en overtollig gist. De keuze om dit bijproduct wel of niet te drogen heeft geen directe relatie met het ethanol productieproces.

Verder is aangenomen dat de warmtebehoefte in het ethanol productieproces wordt gedekt met stoom, zoals ook bij Abengoa en Nedalco het geval is.

Figuur 11 Voorbeeld procesboom voor etheen uit graan



5.2 Inventarisatie van broeikasgasemissies

De inventarisatie is conform de handleiding in Hoofdstuk 2 uitgevoerd in drie deelstappen.

¹³ [Zie: www.chemicals-technology.com/projects/abengoa-bioethanol-plant/](http://www.chemicals-technology.com/projects/abengoa-bioethanol-plant/)

5.2.1 Massabalans en gebruik van hulpstoffen en energiedragers

De massabalans is gebaseerd op dezelfde bronnen als aangehouden bij het opstellen van de procesboom.

Voor de hoofdketen is de volgende informatie van belang:

- Uit 8,5 ton tarwe met een droge stof gehalte van 85% wordt 2,64 ton ethanol geproduceerd (Darwinkel, 1997).
- De selectiviteit van de reactie van ethanol naar etheen is 97% (Avais, 2010). De molaire verhouding ethanol : etheen = 1,64. Dus de ethanolbehoefte is 169% van de etheen behoefte.

De massabalans (kolom **B**) is bepaald door terug te rekenen vanuit het product (van beneden naar boven). Uitgangspunt is 1 kg product (etheen) dat geproduceerd wordt op basis van ethanol met een selectiviteit van 97%. Dit betekent dat er dus 1,69 kg ethanol nodig is. Om 1,69 kg ethanol te produceren is $1,69 \cdot 8,50 / 2,64 = 5,46$ kg tarwe met een droge stof gehalte van 85% nodig.

Voor het opstellen van de massabalans over de bijproducten is de volgende informatie van belang:

- De hoeveelheid stro is geschat op 55% van de bovengronds gevormde hoeveelheid droge stof van de graan productie (Darwinkel, 1997). Dus $55\% = \text{massa droog stro} / (5,46 \cdot 85\% + \text{massa droog stro})$. Dus massa droog stro = $55\% / (100\% - 55\%) \cdot 5,46 \cdot 85\% = 4,86$ kg per kg etheen.
- De hoeveelheid wortels is geschat op 24% van de bovengrondse biomassa¹⁴ (IPCC, 2006). Dus massa wortels = $24\% \cdot (4,86 + 85\% \cdot 5,46) = 2,28$ kg per kg etheen.
- De geproduceerde bostel en gist heeft een droge stof gehalte van 35%. Het waterige bostel en gist mengsel wordt geproduceerd in een verhouding 1:2,17 met de ethanol (CE Delft, 2008a). Dus 4,68 kg per kg etheen.

Nutriëntenbalans

De nutriëntenbalans (Figuur 13) is opgesteld op basis van de volgende aannames:

- de opbrengst aan graan is gesteld op gemiddeld 8,7 ton/ha, 85% (Universiteit van Wageningen, 2010);
- behoefte aan N, P en K voor respectievelijk graan, stro en wortels is weergegeven als productfractie in Tabel 1 (Darwinkel, 1997);
- de werkingscoëfficiënt van fosfaat en kalium uit kunstmest is 100%, voor de werkingscoëfficiënt van de opname van stikstof uit kunstmest is conform (IPCC, 2006) een waarde van 59% aangehouden, de werkingscoëfficiënt van de afgifte van stikstof door gewasresten en organische stof in de bodem aan de bodem is volgens (IPCC, 2006) 49%;
- in Nederland bestaat een akker voor 2 massa% uit organische stof in de bodem - 70.000 kg/ha - waarvan 2%/jaar wordt afgebroken (Schils, 2012);
- voor zowel de gevormde als de afgebroken organische stof in de bodem kan uitgegaan worden van een koolstofgehalte van 57% en een koolstof : stikstof verhouding van 15:1 (IPCC, 2006);
- al het stro wordt afgevoerd als bijproduct.

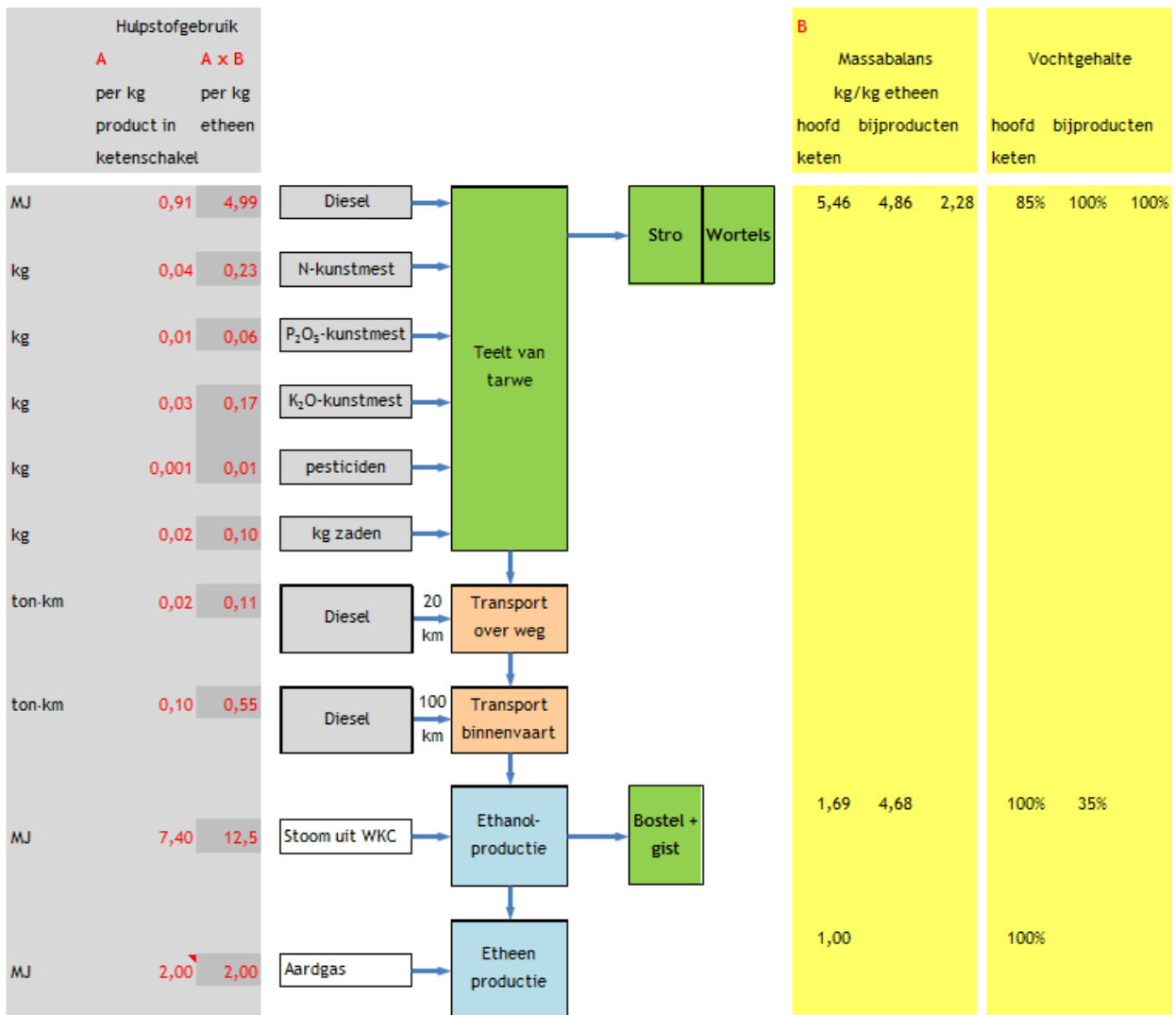
Er is bij het opstellen van de aangenomen dat alle nutriënten in de vorm van kunstmest wordt toegediend. In de praktijk zal behalve kunstmest ook dierlijke mest of groen mest worden gebruikt¹⁵.

¹⁴ Bovengrondse droge biomassa is in dit geval hoeveelheid tarwe en stro teruggerekend naar droge stof gehalte.



De aangehouden N-opname efficiëntie voor kunstmest is erg conservatief in vergelijking met praktijkcijfers. Er is echter met oog op een zekere mate van wetenschappelijke verantwoordelijkheid voor gekozen de IPCC, 2006-methodiek in deze handleiding consequent te gebruiken en niet gegevens uit allerlei bronnen voor niet aan elkaar gerelateerde situaties met elkaar te combineren.

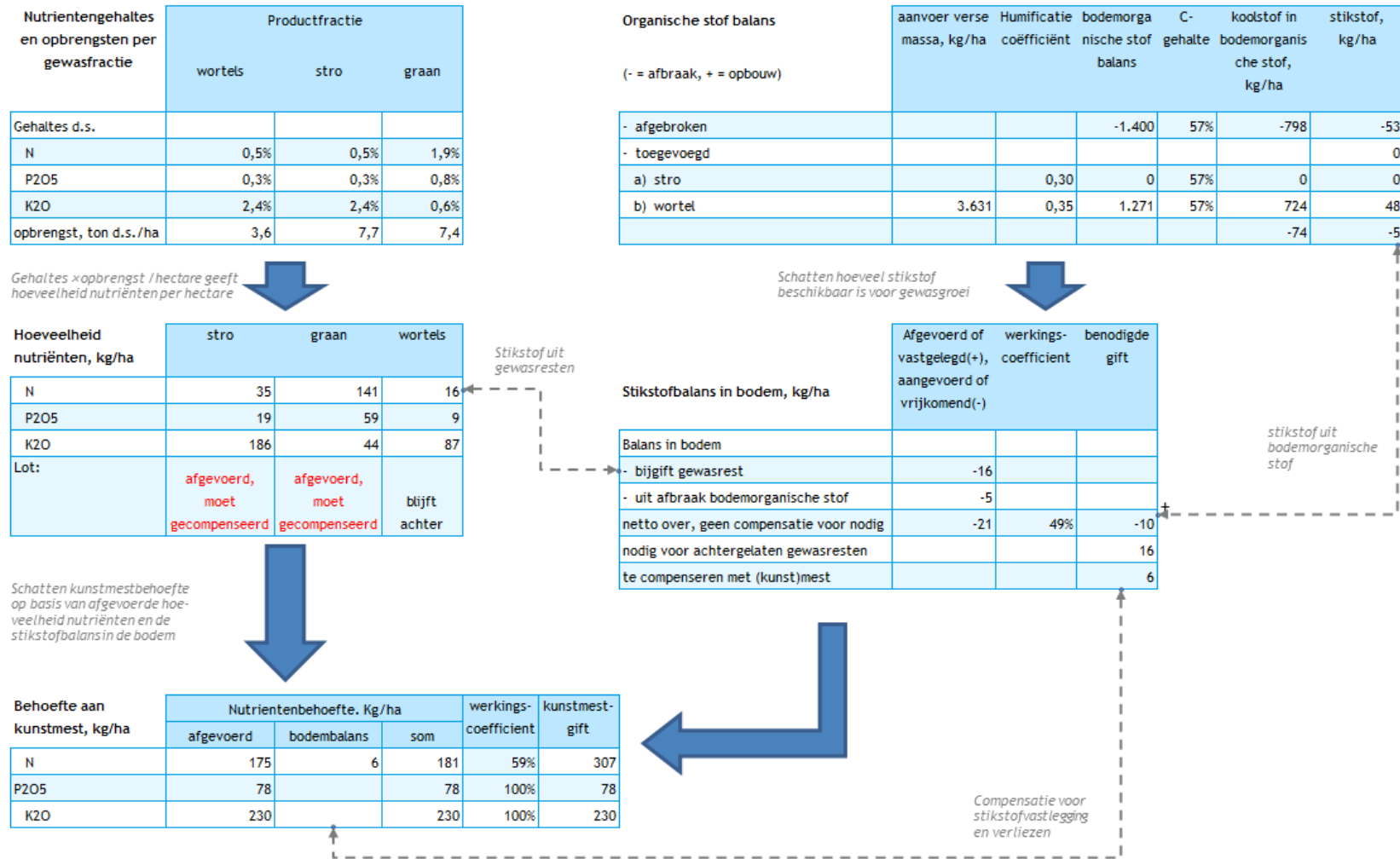
Figuur 12 Massabalans en gebruik van hulpstoffen en energiedragers in productieketen voor etheen uit graan



¹⁵ Zie bijvoorbeeld: www.kennisakker.nl/kenniscentrum/document/30-vragen-en-antwoorden-over-bodemvruchtbaarheid

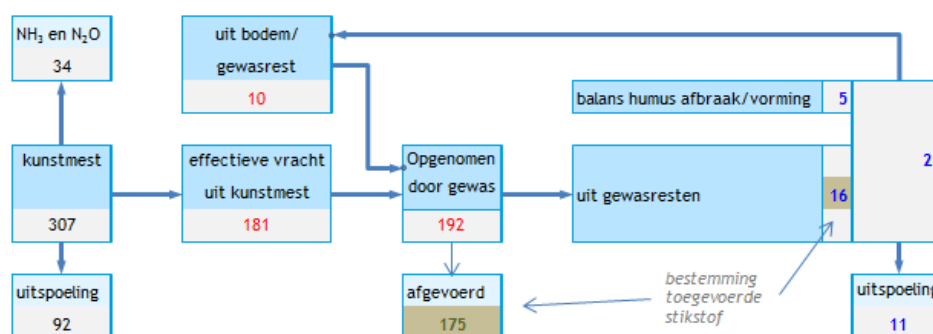


Figuur 13 Nutriëntenbalans voor winterarweteelt, hoeveelheden in kg/ha



De aangehouden stikstofbalans is nog eens apart weergegeven in Figuur 14.

Figuur 14 Stikstofbalans voor wintertarweteelt, alle waarden in kg/ha



Zoals aangegeven wordt van de 192 kg N/ha door het gewas opgenomen stikstof 175 kg/ha afgevoerd. De in gewasresten achterblijvende 16 kg/ha en 5 kg/ha die vrijkomt door de netto-afbraak van humus worden voor 11 kg/ha uitgespoeld en voor 10 kg/ha voor gewasgroei gebruikt.

Om de balans sluitend te krijgen is een effectieve vracht 181 kg/ha aan stikstof nodig. Als eerder in deze paragraaf aangegeven is aangenomen dat deze hoeveelheid wordt toegediend in de vorm van kunstmest. In de praktijk zal een deel in de vorm van dierlijke mest en groenbemester worden gegeven.

Er is als eerder aangegeven dat om consistent te zijn met IPCC aangenomen dat de effectiviteit van de kunstmestgift 59% bedraagt zodat voor een effectieve gift van 181 kg/ha een inbreng van 307 kg/ha aan kunstmest nodig is. In de Nederlandse landbouwpraktijk wordt bij gebruik van N-kunstmest een efficiëntie van 90-95% gehaald door de kunstmest in meerdere doseringen tijdens het groeiseizoen toe te dienen.

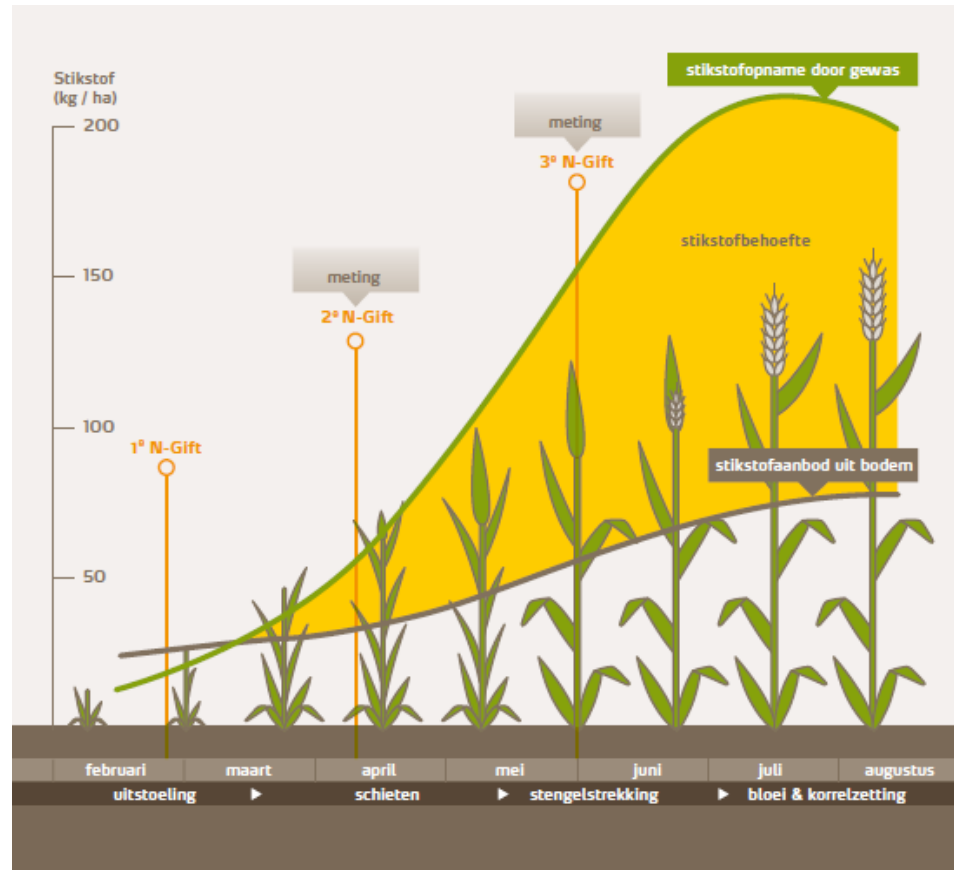
Overige gehanteerde waarden

Gebruik van bestrijdingsmiddelen en zaaigoed zijn rechtstreeks overgenomen van de gegevens van de universiteit van Wageningen (KWIN, 2009).

De transportafstand is gebaseerd op de eerder genoemde studie door E-Kwadrat (E-Kwadrat, 2010). Gebruik van stoom voor ethanolproductie is overgenomen uit informatie van Vogelbusch, een gerenommeerde leverancier van ethanolfabrieken¹⁶. Kwantitatieve informatie over gasgebruik bij omzetting van ethanol is overgenomen uit een eerdere studie voor Lyondell (CE Delft, 2011).

¹⁶ Zie: www.vogelbusch-biocommodities.com/en/technologies/alcohol.php, download 'Alcohol Technology'.

Figuur 15 Voorbeeld van stikstofgift en stikstofopname bij teelt van wintertarwe in Noordwest Europa



Bron: Yara Internationaal, 2011

5.2.2 Emissies in het primaire proces

Bij de teelt van wintertarwe vinden er broeikasgasemissies plaats die niet veroorzaakt worden door het gebruik van energiedragers als diesel of aardgas. Het gaat hierbij alleen om N₂O-emissies en CO₂-emissies.

Zoals aangegeven in Paragraaf 2.4.3 en beschreven in Bijlage D wordt een deel van de toegevoerde stikstof omgezet in N₂O-emissies. Het belangrijkste deel komt van de 307 kilo N kunstmest die per hectare wordt toegevoegd (zie Tabel 3).

Tabel 3 Bepaling directe emissies van N₂O en CO₂

	Hoeveelheid toegevoerd			Emissie-factor	Emissie	
	kg/ha	kg/kg tarwe	kg/kg etheen		kg N ₂ O/kg etheen	kg CO ₂ -eq./kg etheen
N uit kunstmest	307,2	3,53E-02	0,19	1,3%	4,02E-03	1,20
N uit bodembalans	21,2	2,44E-03	0,01	1,4%	2,99E-04	0,09
					4,32E-03	1,29
CO ₂ -effect B.O.S.	270	3,10E-02	0,17			0,17
balans						1,46

Daarnaast gaat het om het gedeelte van de stikstof die vrijkomt in de bodem uit gewasresten en bodemorganische stof. Zoals aangegeven in de nutriëntenbalans (Figuur 13) gaat dat het om ongeveer 21 kg N/ha aan niet vastgelegde stikstof.

De opbrengst aan graan is gesteld op gemiddeld 8,7 ton/ha, 85% (Universiteit van Wageningen, 2010). Daarmee kan de hoeveelheid toegevoerde stikstof omgerekend worden naar kg N/kg tarwe. Via de massa balans kan dat verder omgerekend worden naar kg N/kg etheen.

Bij het bemesten van gewassen in een nat klimaat is bekend dat er op drie manieren N₂O-emissies ontstaan (IPCC, 2006) zie Bijlage D). Voor kunstmest zijn de emissiefactoren volgens (IPCC, 2006) als volgt:

- Direct door emissie van N₂O dat is circa 1% van de stikstof die gegeven wordt.
 - Indirect door omzetting in de lucht van geëmitteerd ammoniak. Dit gaat om circa 0,1%.
 - Indirect door omzetting van nitraten die uitspoelen en later alsnog als N₂O geëmitteerd worden dit gaat om circa 0,23%.
 - De emissiefactor is bepaald als een som van de bovenstaande emissies.
- De emissies zijn berekend rekening houdend met de molmassa verhouding van 44/28 tussen N₂O en N₂, zie Bijlage D.

Figuur 16 Berekening van emissies door inzet van hulpstoffen en brandstoffen

A Hulpstofgebruik per kg etheen	B Emissiefactoren gram per aan- gegeven eenheid	A × B Indirecte emissies g/kg etheen						
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O				
MJ diesel	4,99	93,95	0,00	0,00				
kg N-kunstmest	0,19	2862,89	7,34	2,09		469	0,00	0,0E+00
kg P ₂ O ₅ -kunstmest	0,05	516,56	0,87	0,02		552	1,42	4,0E-01
kg K ₂ O-kunstmest	0,14	588,71	1,72	0,01		25	0,04	9,0E-04
kg pesticiden	0,01	12480,15	36,13	1,72		85	0,25	1,9E-03
kg zaden	0,10	163,33	0,29	0,40		77	0,22	1,1E-02
ton-km	0,11	76,199	0,003	0,002		17	0,03	4,1E-02
ton-km	0,55	30,439	0,093	0,000		8	3,7E-04	1,6E-04
MJ stoom	12,53	29,90	0,09	0,00		17	0,05	2,2E-04
MJ aardgas	2,00	66,45	0,21	0,00		375	1,17	2,0E-03
						133	0,41	7,2E-04
						Σ 1.757	3,59	4,6E-01



De IPCC, 2006 vuistregels voor schatten van N₂O-emissies moeten worden beschouwd als een eerste orde benadering.

Er is behalve met N₂O-emissies ook rekening gehouden met de bodem-organische stof (B.O.S.) balans en daaraan gerelateerde CO₂-emissies of vastleggingen. Zoals aangegeven in de nutriëntenbalans in Figuur 13 vindt er netto B.O.S.-afbraak plaats waarbij ongeveer 74 kg/ha aan koolstof vrijkomt. Dit geeft omgerekend 270 kg/ha aan CO₂-emissie.

5.2.3 Emissies gerelateerd aan gebruik van hulpstoffen en energiedragers

De berekening van de emissies gerelateerd van productie van hulpstoffen en energiedragers en het gebruik van energiedragers is weergegeven in Figuur 16.

De emissiefactoren zijn overgenomen uit Bijlage B. Voor stikstofkunstmest is uitgegaan van gebruik van KAN. Voor stoom is een bijstookfactor van 0,45 GJ_{aardgas}/GJ_{stoom} aangehouden.

5.2.4 Allocatiefactorbepaling

Bij de verwerking van tarwe tot ethanol komt ook tarweconcentraat als bijproduct vrij. De berekening van de allocatiefactoren op basis van marktwaarde en energie-inhoud is voor deze twee producten weergegeven in Tabel 4.

Tabel 4 Allocatie op basis van energie-inhoud en op basis van economische waarde voor tarwe concentraat en ethanol

	kg/kg etheen	Energie-inhoud			Waarde		
		Stookwaarde MJ/kg	Product	Allocatie factor	Markt prijs €/ton	Product	Allocatie factor
- Etheen	1,0	47,2					
- Ethanol	1,7	26,8	45	66%	€ 510	€ 864	90%
- Bostel en gist	4,7	5,0	23		€ 20	€ 94	
- <i>Stro d.s</i>	4,9	17,2			€ 50		
- <i>Tarwe n.s.</i>	5,5	14,1			€ 150		

In Tabel 5 is de berekening van allocatie van de verschillende emissies op basis van economische waarde gegeven.

Tabel 5 Allocatiefactoren (op basis van economische waarde) voor alle emissies

	Allocatiefactor
N ₂ O uit kunstmest, gewasresten	90%
Diesel in landbouw werktuig	90%
N-kunstmest	90%
P ₂ O ₅ -kunstmest	90%
K ₂ O-kunstmest	90%
Pesticiden	90%
Zaden	90%
Wegtransport	90%
Transport per binnenvaartschip	90%
Stoomgebruik	90%
Aardgasgebruik	100%



5.3 Karakterisatie en aggregatie

In Tabel 6 is de omrekening van de directe en indirecte emissies naar CO₂-equivalenten gegeven. De allocatie is gegeven in Tabel 7.

Uit de gealloceerde emissies volgt een CO₂-waarde van 3.255 g CO₂-eq./kg etheen.

Tabel 6 Karakterisatiestap (cijfers in g/kg etheen)

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ -eq.
Directe emissies:				
– N ₂ O uit kunstmest, gewasresten			4,32	1.286
– CO ₂ uit B.O.S. balans	170			170
Indirecte emissies en brandstof gerelateerde emissies:				
– Diesel in landbouw werktuig	469	0,00	0,00	469
– N-kunstmest	552	1,42	0,40	708
– P ₂ O ₅ -kunstmest	25	0,04	0,001	27
– K ₂ O-kunstmest	85	0,25	0,002	92
– Pesticiden	77	0,22	0,01	85
– Zaden	17	0,03	0,04	30
– Wegtransport	8	0,00	0,000	8
– Transport per binnenvaartschip	17	0,05	0,000	18
– Stoomgebruik	375	1,17	0,002	405
– Aardgasgebruik	133	0,41	0,001	143
				3.441
Karakterisatiefactor	1	25	298	

Tabel 7 Allocatie van de gekarakteriseerde emissies (cijfers in g/kg etheen)

	Ongealloceerde emissies kg CO ₂ -eq./ton etheen	Allocatie factor	Gealloceerde emissies kg CO ₂ -eq./ton etheen
Directe emissies:			
– N ₂ O uit kunstmest, gewasresten	1.286	90%	1.160
– CO ₂ uit B.O.S. balans	170	90%	153
Indirecte emissies en brandstof gerelateerde emissies:			
– Diesel in landbouw werktuig	469	90%	423
– N-kunstmest	708	90%	639
– P ₂ O ₅ -kunstmest	27	90%	24
– K ₂ O-kunstmest	92	90%	83
– Pesticiden	85	90%	77
– Zaden	30	90%	27
– Wegtransport	8	90%	8
– Transport per binnenvaartschip	18	90%	16
– Stoomgebruik	405	90%	365
– Aardgasgebruik	143	100%	143
	3.441		3.118

Ter vergelijking, de broeikasgasbalans gerelateerd aan de fossiele productieroute voor etheen bedraagt ongeveer 4.600 g CO₂-eq./kg etheen rekeninghoudend met de koolstofinhoud (zie Tabel 2).



De vervanging van fossiel etheen door bio-etheen zou daarmee een reductie van $(4,6 - 3,1)/4,6 = 32\%$ opleveren.



6 PLA uit suikers

Poly Lactic Acid (PLA) wordt gevormd door polymerisatie van lactaat een door fermentatie van C₆-suikers (glucose, fructose) gevormde verbinding.

De mondiale productie wordt gedomineerd door twee bedrijven, Natureworks uit de VS en Corbion uit Nederland. Huidige grootschalige productie vindt plaats in de VS, op basis van maïszetmeel en in Thailand, op basis van tapiocazetmeel.

Er zijn echter ook plannen voor productie van PLA in Nederland op basis van suikers uit suikerbieten¹⁷.

PLA wordt veel gebruikt voor doorzichtige verpakkingen, daarnaast wordt het in de vorm van piepschuim aangeboden, als alternatief voor polystyreen.

6.1 Afbakening en procesboom

In dit voorbeeld is een keten uitgewerkt waarin PLA uit suikerbiet als alternatief voor polystyreen (PS) piepschuim wordt toegepast. Doel van het voorbeeld is vooral om te illustreren hoe bij materiaalsubstitutie - vervanging van conventionele materialen door een op basis van biomassa geproduceerd materiaal - het mogelijk is om de CO₂-waarde en de uitgespaarde CO₂-emissie te berekenen.

De functionele eenheid van de analyse is 1 m² isolatieplaat met een Rc-waarde van 2,5. Uit de specificaties van isolatieplaat op basis van polystyreen en plaat op basis van PLA blijkt dat in beide typen plaatmateriaal een vrijwel vergelijkbare hoeveelheid plastics is verwerkt.

6.2 Inventarisatie van broeikasgasemissies

De inventarisatie is conform de handleiding in Hoofdstuk 2 uitgevoerd in drie deelstappen.

6.2.1 Massabalans en gebruik van hulpstoffen en energiedragers

De procesboom, zie Figuur 17, start bij teelt van suikerbieten en eindigt bij het aanleveren van de hoeveelheid PLA nodig voor de productie van 1 m² isolatieplaat.

De aangehouden procesboom is gebaseerd op informatie over:

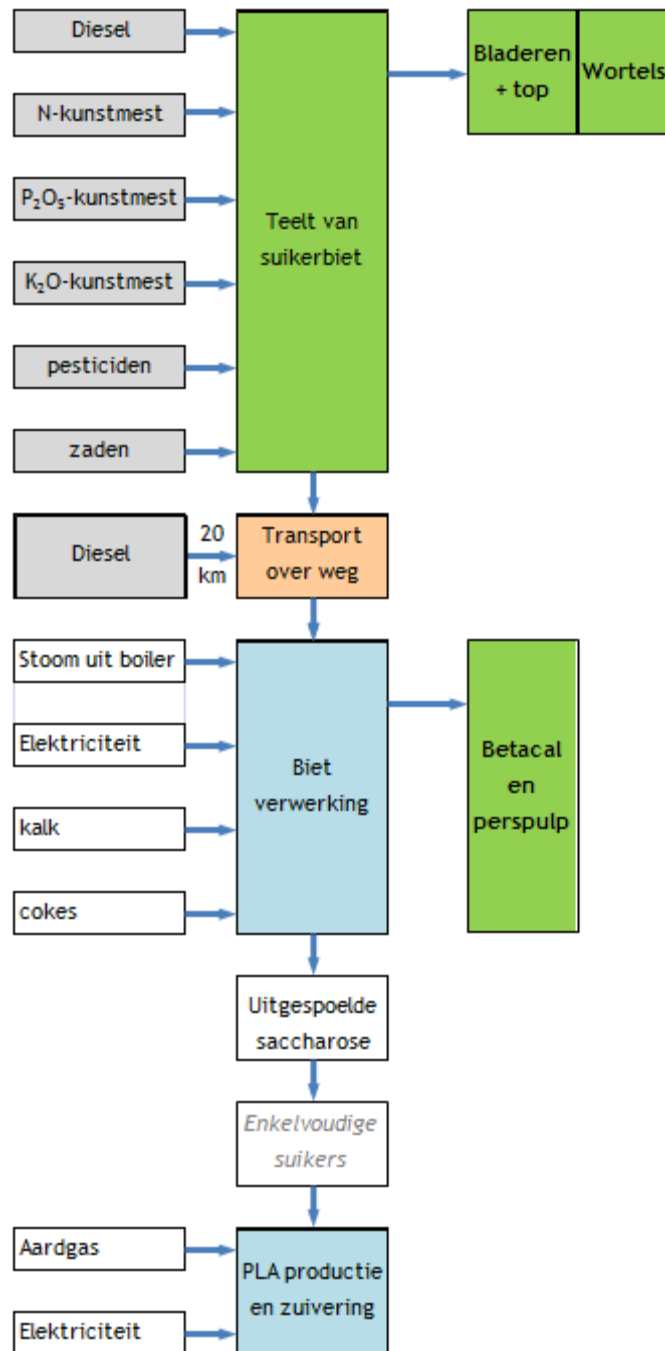
- teelt van suikerbieten in Nederland (CE Delft ; Biomass Research, 2013);
- verwerking van in Nederland geteelde suikerbieten (CE Delft ; Biomass Research, 2013);
- PLA-productie zoals beschreven in (Dornburg, 2004).

Bij bietenverwerking worden Betacal - een kalkhoudend product - en perspulp als bijproduct geproduceerd. Een indruk van de processtappen in isolatie van suikers uit suikerbieten is gegeven in Figuur 18.

¹⁷ Zie bijvoorbeeld: www.wageningenur.nl/nl/nieuws/Wegvallen-suikerquotum-biedt-Nederlandse-chemie-kansen.htm



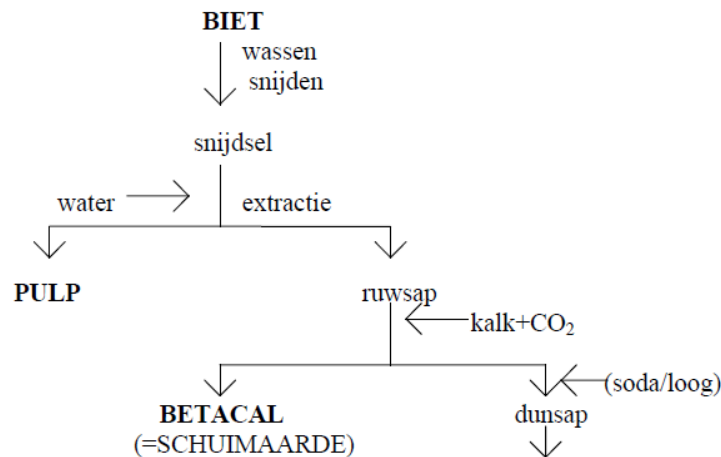
Figuur 17 Processchema voor PLA-productie uit suikerbiet



De productie van PLA omvat in principe een aantal verschillende deelstappen. Omdat er echter geen gedetailleerde informatie te vinden is over gebruik van hulpstoffen en energiedragers in de afzonderlijke processen en omdat er in de afzonderlijke deelstappen geen - met oog op allocatie - bijproducten met relevante energie-inhoud of economische waarde worden geproduceerd zijn deze deelstappen in deze globale uitwerking benaderd als één ‘black box’.



Figuur 18 Verwerking van suikerbieten



Bron: Zie voetnoot¹⁸.

In het processchema opgenomen blokje ‘enkelvoudige suikers’ is toegevoegd met oog op de massabalans.

Er is voor bietenteelt conform (CE Delft ; Biomass Research, 2013) uitgegaan van:

- een opbrengst aan suikerbiet van 68 ton/ha (25% droge stof);
- een sacharosegehalte van de droge stof van 71%;
- een hoeveelheid wortels en blad van respectievelijk 4,0 en 2,8 ton/ha aan droge stof - deze gewasresten worden op de akker achtergelaten.

De bieten worden bij de suikerfabriek met warm water gewassen en geperst, waarbij de sacharose suikers worden uitgewassen. De rest van de gewassen bietenpulp (perspulp) wordt als vochtrijk veevoer afgezet in de veehouderij. Vervuilingen in de sacharosenoplossing worden verwijderd met kalk. Het zuiveringsproduct wordt tegen waarde 0 afgezet als kalkmeststof bij bietentelers.

De in deze studie gehanteerde gewichtsverhoudingen zijn overgenomen uit de onder voetnoot 18 genoemde bron.

De uitgewassen sacharosen worden na omzetting naar enkelvoudige suikers De verhouding tussen PLA en de verschillende suikers volgt uit de verhouding in moleculaire massa's:

- sacharose hydrolyse: $C_{12}H_{22}O_{11} \rightarrow 2C_6H_{12}O_6$;
- glucose/fructose naar polylactaat $C_6H_{12}O_6 + 2C_3H_6O_3 \rightarrow C_6H_8O_4 + 2H_2O$.

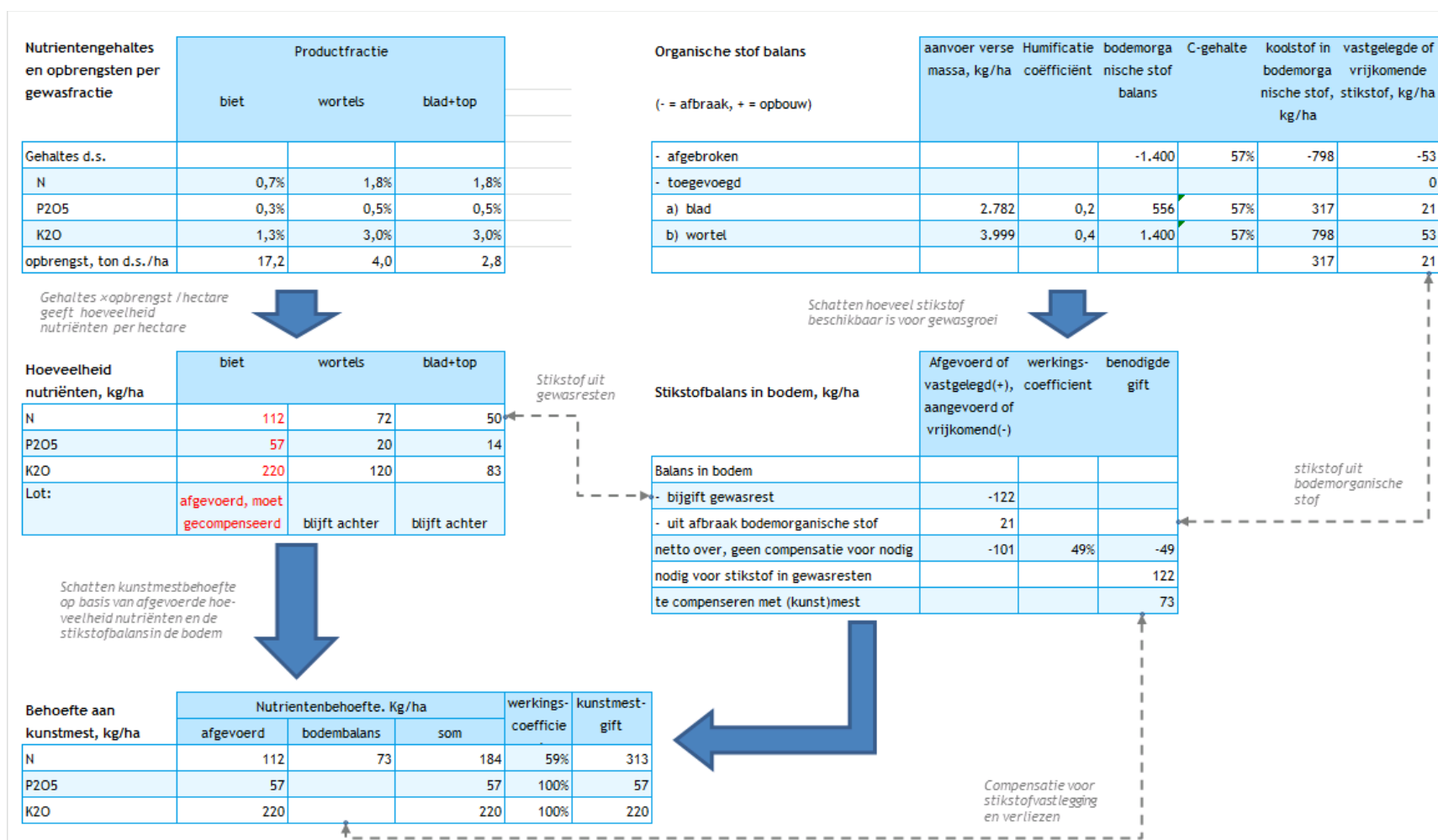
Aangenomen is dat de warmtebehoefte in het productieproces (ongeveer 13 MJ/kg PLA) wordt gedekt met stoom uit een aardgasgestookte ketel en dat elektriciteit (ongeveer 9 MJ/kg) wordt ingekocht vanaf het net.

De behoefte aan N-kunstmest en aan P₂O₅- en K₂O-kunstmest is weer bepaald met een nutriëntenbalans, waarin ook rekening is gehouden met vastlegging in of vrijkomen van stikstof in bodemorganische stof.

¹⁸ Zie: www.irs.nl/userfiles/ccmsupload/ccmsdoc/H06suikerproces.pdf



Figuur 19 Bodemorganische stofbalans en nutriëntenbalans

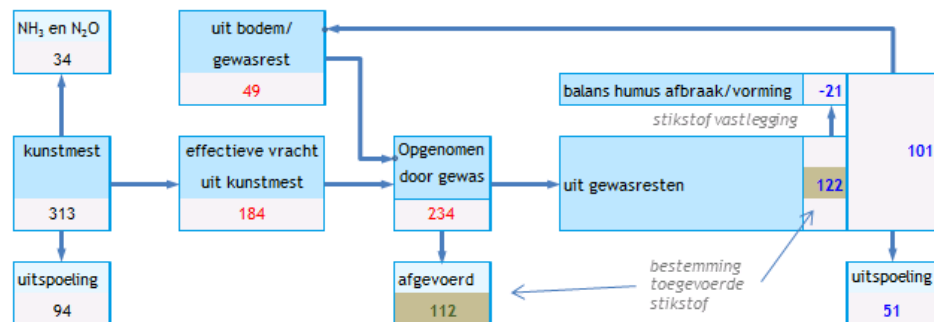


Aangehouden uitgangspunten zijn:

- De werkingscoëfficiënt van fosfaat en kalium uit kunstmest is 100%, voor de werkingscoëfficiënt van de opname van stikstof uit kunstmest is conform (IPCC, 2006) een waarde van 59% aangehouden, de werkingscoëfficiënt van de afgifte van stikstof door gewasresten en organische stof in de bodem aan de bodem is volgens (IPCC, 2006) 49%.
- In Nederland bestaat een akker voor 2 massa% uit organische stof in de bodem - 70.000 kg/ha - waarvan 2%/jaar wordt afgebroken (Schils, 2012).
- Voor zowel de gevormde als de afgebroken organische stof in de bodem kan uitgegaan worden van een koolstofgehalte van 57% en een koolstof : stikstof verhouding van 15÷1 (IPCC, 2006).

De aangehouden stikstofbalans is nog eens apart weergegeven in Figuur 20.

Figuur 20 Stikstofbalans voor wintertarweteelt, alle waarden in kg/ha

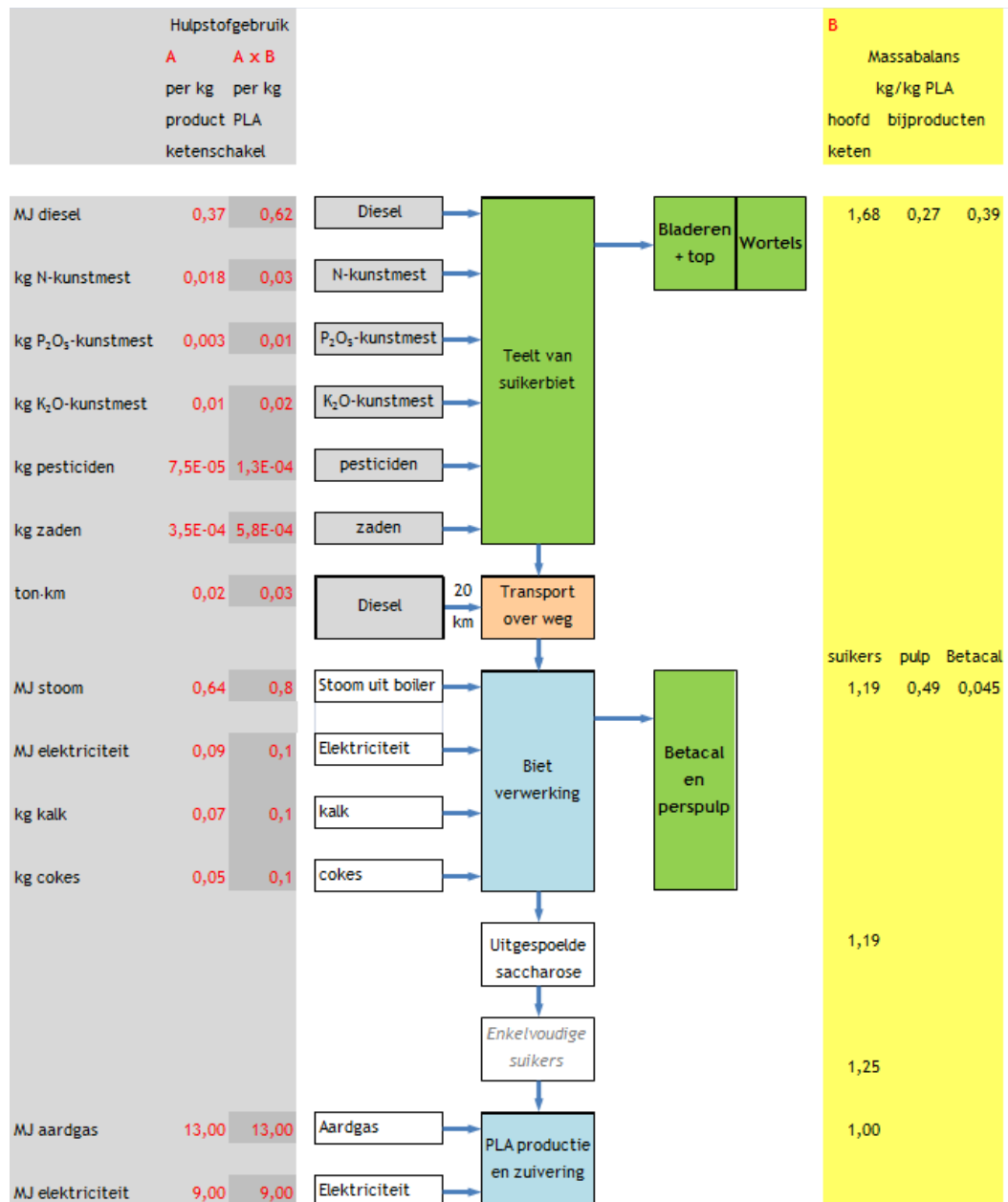


Zoals aangegeven wordt van de 234 kg N/ha door het gewas opgenomen stikstof 112 kg/ha afgevoerd. De in gewasresten achterblijvende 122 kg/ha wordt voor 21 kg/ha gebonden in netto gevormde humus en voor 49 kg/ha gebruikt voor gewasgroei, terwijl de resterende 51 kg/ha uitspoelt. Om de balans sluitend te krijgen is een effectieve vrucht 184 kg/ha aan stikstof nodig. Als eerder in deze paragraaf aangegeven is aangenomen dat deze hoeveelheid wordt toegediend in de vorm van kunstmest. In de praktijk zal een deel in de vorm van dierlijke mest en groenbemester worden gegeven.

Er is als eerder aangegeven dat om consistent te zijn met IPCC aangenomen dat de effectiviteit van de kunstmestgift 59% bedraagt zodat voor een effectieve gift van 184 kg/ha een inbreng van 313 kg/ha aan kunstmest nodig is. In de Nederlandse landbouwpraktijk wordt bij gebruik van N-kunstmest een efficiëntie van 90-95% gehaald door de kunstmest in meerdere doseringen tijdens het groeiseizoen toe te dienen.

De resulterende procesboom met gerelateerde massabalans en gebruik van hulpstoffen en energiedragers is gegeven in Figuur 21.

Figuur 21 Massabalans voor PLA uit bietsuiker



6.2.2 Emissies in het primaire proces

Zoals aangegeven in Paragraaf 2.4.3 en beschreven in Bijlage D wordt een deel van de toegevoerde stikstof omgezet in N₂O-emissies. Het belangrijkste deel komt van de 311 kilo N-kunstmest die per hectare wordt toegevoegd (zie Tabel 8). Daarnaast gaat het om het gedeelte van de stikstof die vrijkomt in de bodem uit gewasresten en bodemorganische stof. Zoals aangegeven in de nutriëntenbalans (Figuur 19) gaat dat het om ongeveer 101 kg N/ha aan niet vastgelegde stikstof.

De opbrengst aan suikerbiet is gesteld op gemiddeld 17,2 ton d.s./ha. Daarmee kan de hoeveelheid toegevoerde stikstof omgerekend worden naar kg N/kg tarwe. Via de massa balans kan dat verder omgerekend worden naar kg N/kg etheen.



Tabel 8 Bepaling directe emissies van N₂O en CO₂

	Hoeveelheid toegevoerd			Emissie factor	Emissie	
	kg/ha	kg/kg tarwe	kg/kg etheen		kg N ₂ O/kg etheen	kg CO ₂ -eq./kg etheen
N uit kunstmest	313	1,82E-02	3,05E-02	1,33%	6,34E-04	0,19
N uit bodembalans	101	5,86E-03	9,83E-03	1,43%	2,20E-04	0,07
	414	2,40E-02	4,03E-02		8,54E-04	0,25
CO ₂ -emissie	-1.162	-6,75E-02	-0,11			-0,11
						0,14

Bij het bemesten van gewassen in een nat klimaat is bekend dat er op drie manieren N₂O-emissies ontstaan (IPCC, 2006) zie Bijlage D. Voor kunstmest zijn de emissiefactoren volgens (IPCC, 2006) als volgt:

- Direct door emissie van N₂O dat is circa 1% van de stikstof die gegeven wordt.
- Indirect door omzetting in de lucht van geëmitteerd ammoniak. Dit gaat om circa 0,1%.
- Indirect door omzetting van nitraten die uitspoelen en later alsnog als N₂O geëmitteerd worden dit gaat om circa 0,23%.
- De emissiefactor is bepaald als een som van de bovenstaande emissies. De emissies zijn berekend rekening houdend met de molmassaverhouding van 44:28 tussen N₂O en N₂.

De IPCC, 2006 vuistregels voor schatten van N₂O-emissies moeten worden beschouwd als een eerste orde benadering.

Er is behalve met N₂O-emissies ook rekening gehouden met de bodem-organische stof (B.O.S.) balans en daaraan gerelateerde CO₂-emissies of vastleggingen. Zoals aangegeven in de nutriëntenbalans in Figuur 19 vindt er netto B.O.S. opbouw plaats waarbij ongeveer 317 kg/ha aan koolstof wordt vastgelegde. Dit geeft omgerekend 1.162 kg/ha aan vastgelegde CO₂.

6.2.3 Emissies gerelateerd aan gebruik van hulpstoffen en energiedragers

Op basis van massabalans, gebruik aan energiedragers en hulpstoffen en de emissiefactoren per eenheid energiedragers en hulpstoffen zijn de aan gebruik van energiedragers en hulpstoffen gerelateerde emissies bepaald, zie Figuur 22.



Figuur 22 Berekening van emissies door inzet van hulpstoffen en brandstoffen

A		B			A × B			
Hulpstofgebruik per kg PLA		Emissiefactoren gram per aangegeven eenheid			Indirecte emissies g/kg PLA			
		CO2	CH4	N2O	CO2	CH4	N2O	
MJ diesel	0,62	94	0,00	0,00	58	0,0E+00	0,0E+00	
kg N-kunstmest	0,03	2.863	7,34	2,09	87	2,2E-01	6,4E-02	
kg P ₂ O ₅ -kunstmest	0,01	517	0,87	0,02	3	4,8E-03	1,0E-04	
kg K ₂ O-kunstmest	0,02	589	1,72	0,01	13	3,7E-02	2,9E-04	
kg pesticiden	0,000	12.480	36,13	1,72	2	4,6E-03	2,2E-04	
kg zaden	0,00	163	0,29	0,40	0	1,7E-04	2,3E-04	
ton-km	0,03	82	0,004	0,002	3	1,2E-04	5,4E-05	
MJ stoom	0,75	74	0,230	0,000	56	1,7E-01	3,0E-04	
MJ elektriciteit	0,11	141	0,16	0,01				
kg kalk	0,08	1.074	0,96	0,01	85	7,6E-02	5,8E-04	
kg cokes	0,06	103	0,39	0,00	6	2,4E-02	1,6E-05	
MJ aardgas	13,00	66	0,207	0,000	864	2,7E+00	4,7E-03	
MJ elektriciteit	9,00	141	0,159	0,006	1.269	1,4E+00	5,2E-02	
					Σ	2.284	4,4E+00	5,8E-02



6.2.4 Omrekenen emissies naar CO₂-equivalenten

Aggregatie over de verschillende deelprocessen c.q. ketenschakels en combinatie met de karakterisatiefactoren voor de verschillende broeikasgassen geeft onderstaande totale emissie uitgedrukt in CO₂-equivalenten.

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ -eq.
Directe emissies:				
- N ₂ O uit kunstmest, gewasresten			0,85	255
- B.O.S.-opbouw	-1.162			-1.162
Indirecte emissies en brandstof gerelateerde emissies:				
- Teelt van suikerbieten	162	0,3	0,1	188
- Transport suikerbieten	3	0,0	0,0	3
- Bietverwerking	147	0,3	0,0	154
- PLA-productie	2.133	4,1	0,1	2.253
				1.690
Karakterisatiefactor	1	25	298	

6.3 Allocatie van emissies

In de keten komen twee waardevolle producten vrij:

- suikers en de daaruit geproduceerde PLA;
- perspulp.

Voor de economische allocatie - conform GER-waardemethodiek - is de knip tussen gezamenlijke productieketen en de verdere keten voor PLA gelegd na de verwerking van de bieten. Vanaf dat moment doorlopen de uitgespoelde suikers een andere keten, apart van de perspulp.

Voor de allocatie is een prijs aangehouden van €50/ton natte perspulp (24% d.s.)¹⁹. De suikerprijs voor de gezuiverde dunne oplossing is op basis van (Deloitte, 2014) geschat op € 320/ton:

- de prijs van ruwe suiker ligt de afgelopen jaren rond het niveau van \$ 400/ton of omgerekend met huidige wisselkoers ongeveer € 360/ton.

Volgens Figuur 25 in (Deloitte, 2014) bedraagt de prijs van dunsap ongeveer 90% van de prijs voor ruwe suiker.

Op basis van deze prijzen en de massaverhoudingen tussen de beide producten volgt een allocatiefactor naar suiker van 74%.

De resulterende allocatie van de emissies in de verschillende deelprocessen is weergegeven Tabel 9.

¹⁹ Zie: www.wageningenur.nl/nl/Expertises-Dienstverlening/Onderzoeksinstituten/livestock-research/Faciliteiten-producten/Voederwaardeprijzen-Rundvee.htm



Tabel 9 Allocatie van emissies

	Broeikasgasemissies (g CO ₂ -eq./kg PLA)	Allocatie factor	Product (g CO ₂ -eq./kg PLA)
Directe emissies:			
– N ₂ O uit kunstmest, gewasresten	255	79%	200
– CO ₂ -effect B.O.S.-balans	-1.162	79%	-915
Indirecte emissies en brandstof gerelateerde emissies:			
– Teelt van suikerbieten	188	79%	148
– Transport suikerbieten	3	79%	2
– Bietverwerking	154	79%	121
– PLA-productie	2.253	100%	2.253
			1.810

6.4 Bepalen afname van de CO₂-waarde

De berekende CO₂-waarde voor bio-PLA uit suikerbiet bedraagt circa 1,8 kg CO₂-eq./kg PLA.

De PLA vervangt styreen in een massaverhouding van 1:1, terwijl styreen een CO₂-waarde heeft van ongeveer 6,3 kg CO₂-eq./kg, rekening houdend met de koolstofinhoud van de styreen.

De vervanging van styreen door PLA zou daarmee een reductie van $(6,3 - 1,8)/6,3 = 71\%$ opleveren.



7 Literatuur

Agentschap NL, 2012. Nederlandse lijst van energiedragers en standaard CO₂-emissiefactoren, versie januari 2012, Utrecht: Agentschap NL.

Agentschap_NL 2011. Methodology CO₂-tool for electricity, gas and heat from biomass, Utrecht: Agentschap NL.

Avais, F., 2010. Green Technologies : From Ethanol to Ethylene. The Beacon, December, Issue Winter, pp. 21-34.

Biograce, 2012. Biograce calculation tool. [Online]
Available at: www.biograce.net/content/aboutthebiograceproject/aim
[Geopend 2014].

Bradley, D., 2006. GHG Impacts of Pellet Production from Woody Biomass Sources In BC Canada, Ottawa: Climate Change Solutions.

CE Delft; Biomass Research, 2013. De bodem in de bio-economie, Hoofd- en bijlagenrapport , Delft: CE Delft.

CE Delft, 2008a. Calculating greenhouse gas emissions of EU biofuels, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2008b. Energetische meerwaarde voor Sastapro afzet? Energiewinst bij verschillende vormen van gebruik van stills van ethanolproductie, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2009. GHG Emissions due to deforestation, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2011. Reducing Lyondell's footprint, Delft: CE Delft.

Darwinkel, A., 1997. Teelthandleiding wintertarwe, Lelystad: Alterra PPO.
Deloitte, 2014. Opportunities for the fermentation-based chemical industry : An analysis of the market potential and competitiveness of North-West Europe, sl: Deloitte The Netherlands.

Dornburg, V., 2004. Multifunctional biomass systems, Utrecht: Universiteit Utrecht.

E-Kwadraat, 2010. Ketenkaart Koopmans Meel BV, Leeuwarden: E-Kwadraat Advies BV.

Hamelinck, C., Suurs, R. A. & Faaij, A. P., 2003. International bioenergy transport costs and energy balance, Utrecht: Universiteit Utrecht, Copernicus Institute.

IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, sl: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).



JRC, EUCAR and CONCAWE , 2014. Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context. WELL-TO-TANK Version 4.a. JEC WELL-TO-WHEELS ANALYSIS, Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Klein Goldewijk, K. et al., 1994. Simulating the carbon flux between the terrestrial environment and the atmosphere. *Water, Air, & Soil Pollution*, 78(1), pp. 1999-230.

Minnen, J. v., 2008. The terrestrial carbon cycle on the regional and global scale : modeling uncertainties and policy relevance, Wageningen: Wageningen Universiteit.

RSB, 2011. RSB GHG calculation methodology, version 2.0, Geneva: Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB).

Schils, R., 2012. 30 vragen en antwoorden over bodemvruchtbaarheid, Wageningen: Wageningen UR, Alterra.

Staatscourant, 2015. Technische informatie over de publicatie Regeling van de Minister van Economische Zaken van 24 maart 2015, nr. WJZ/15018116, houdende vaststelling van de definitieve correcties voor de stimulering van duurzame energieproductie in het jaar 2014 (Regeling v. [Online] Available at: <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2015-8446> [Geopend 2015].

Timmer, R., Korthals, G. & Molendijk, L., 2004. Teelthandleiding groenbemesters. [Online] Available at: www.kennisakker.nl/kenniscentrum/handleidingen/teelthandleiding-groenbemesters [Geopend 2015].

Universiteit van Wageningen, 2010. Kwantitatieve Informatie vollegrondsgroenten en akkerbouwproducten : praktijkgegevens 2007-2009 en projecties voor 2011-2013, Wageningen: Universiteit van Wageningen.

USDA, 2014. United States Department of Agriculture Economic Research Service : U.S. Bioenergy Statistics, Overview. [Online] Available at: www.ers.usda.gov/data-products/us-bioenergy-statistics.aspx [Geopend 12 March 2015].



Bijlage A Ketens op basis van biomassa

A.1 Biomassa uit akkerbouw

Akkerbouw kan direct verwerkbaar grondstoffen leveren in de vorm van zetmeel, suikers en oliën zoals aanwezig in granen, wortels, knollen en oliehoudende zaden.

A.1.1 De keten voor biomassa uit akkerbouw

De gewassen ontwikkelen zich uit zaaigoed of uit stekjes. De productie daarvan kost energie en geeft broeikasgasemissies.

De teelt van gewassen in akkerbouwsystemen en op peil houden van de bodemvruchtbaarheid in die akkerbouwsystemen vergt aanvoer van nutriënten en organisch materiaal in de vorm van:

- dierlijke mest en kunstmest;
- gewasresten als wortels, bladeren en stengels;
- compost, groenbemester of ander organisch materiaal.

Daarnaast worden diesel en smeerolie gebruikt voor mobiele werktuigen en worden bestrijdingsmiddelen gebruikt voor bestrijden van plagen in gewassen en bodem. In droge gebieden of drogere periodes kan irrigatie plaatsvinden. Irrigatie vergt diesel of elektriciteit voor het verpompen van het irrigatiewater.

De teelt begint in de regel met het geschikt maken van de bodem door bijvoorbeeld ploegen en een eerste bemesting en het inzaaien van het zaaigoed of het planten van de stekjes. Tijdens het groeiseizoen wordt bemest en worden bestrijdingsmiddelen toegepast. Na te zijn volgroeid wordt het gewas geoogst waarbij de gewasresten als wortels en bladeren in de regel achterblijven op het veld en nutriënten en organische stof leveren voor een 'volggewas', het in het volgende groeiseizoen geteelde gewas. Omgekeerd profiteert teelt van het beschouwde gewas van gewasresten uit voorgaande teelt.

Geoogste landbouwproducten worden soms voorbewerkt, bijvoorbeeld in de vorm van:

- drogen van granen en oliehoudende zaden om de producten te kunnen opslaan;
- inkuilen van snijmaïs voor opslag.

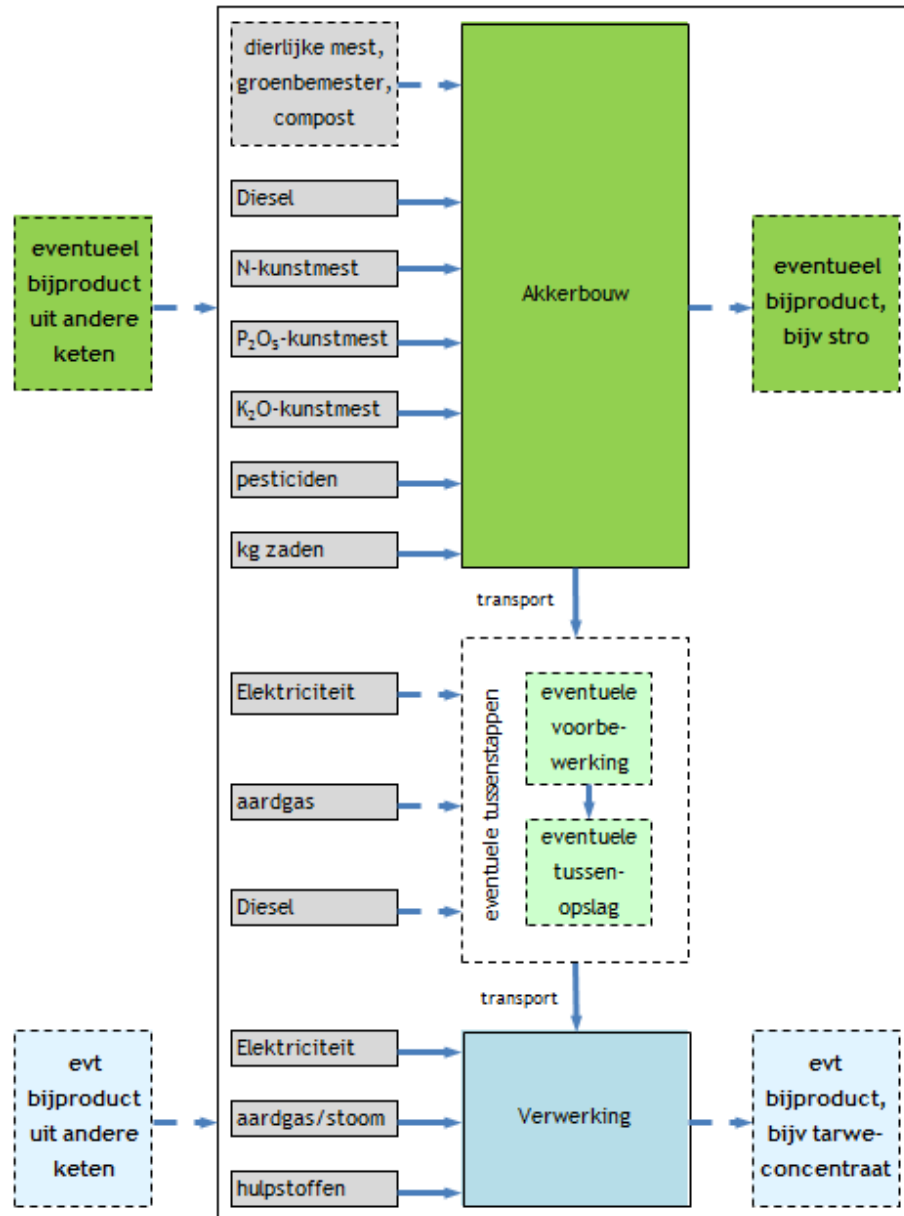
Hierbij wordt in de regel diesel gebruikt als transportbrandstof of aardgas voor warmteproductie bij drogen. Sommige landbouwproducten als suikerbieten moeten zo snel mogelijk worden verwerkt vanwege natuurlijke afbraakprocessen waardoor het gehalte aan nuttige componenten - bijvoorbeeld suiker in de suikerbiet - snel achteruit gaat.

Na de oogst kunnen op het veld groenbemesters worden geteeld, gewassen die geen directe economische waarde hebben, maar vooral zijn bedoeld om extra organische stof aan de bodem te kunnen leveren en om de bodem te dekken tegen erosie en groei van onkruid.

Ook kan na de oogst compost of een ander organisch materiaal worden opgebracht voor levering van organische stof aan de bodem. In bloembollenteelt wordt bijvoorbeeld stro gebruikt om het veld af te dekken en organische stof te leveren.



Figuur 23 Globale opbouw van ketens gebaseerd op akkerbouw



A.1.2 Directe emissies bij akkerbouw

Door gebruik van kunstmest, dierlijke mest en organisch materiaal als gewasresten, compost, groenbemester en ander organisch materiaal ontstaan N₂O-emissies.

Er kunnen daarnaast emissies van CO₂ optreden gerelateerd aan veranderingen in de hoeveelheden koolstof in bodem, strooisel of vegetatie.

Bij gebruik van dierlijke mest moet rekening worden gehouden met emissies van CH₄ uit mestopslag.

Andere directe emissies zijn gerelateerd aan gebruik van brandstoffen voor grondbewerking of voor voorbereiding van geogste producten als granen en oliehoudende zaden.

A.2 Biomassa uit bosbouw

Bos en ander boomrijk landschap kan grondstoffen voor chemische producten leveren in de vorm van hout. Het hout kan op verschillende manieren worden omgezet in chemische producten:

- via chemische conversieroutes als vergassing, pyrolyse en hydro-pyrolyse;
- het hout wordt hierbij afgebroken tot kleine chemische verbindingen als synthesesgas (een mengsel van CO en H₂) die weer geschikt zijn als grondstof voor chemische producten;
- door chemisch pulpen van hout;
- het hout wordt omgezet in vaste cellulose en opgeloste hemicellulose en lignine, die allemaal afzonderlijk verder kunnen worden verwerkt tot chemische producten of eindproducten.

In de volgende subparagrafen wordt kort ingegaan op houtproductie uit bos en de relatie met levering van hout voor productie van chemische grondstoffen.

A.2.1 Bosbeheer in gematigde klimaatzones

Een beheerd bos levert hout voor pulp en papier, fineer, plaatmaterialen als spaanplaat en multiplex en gezaagd hout.

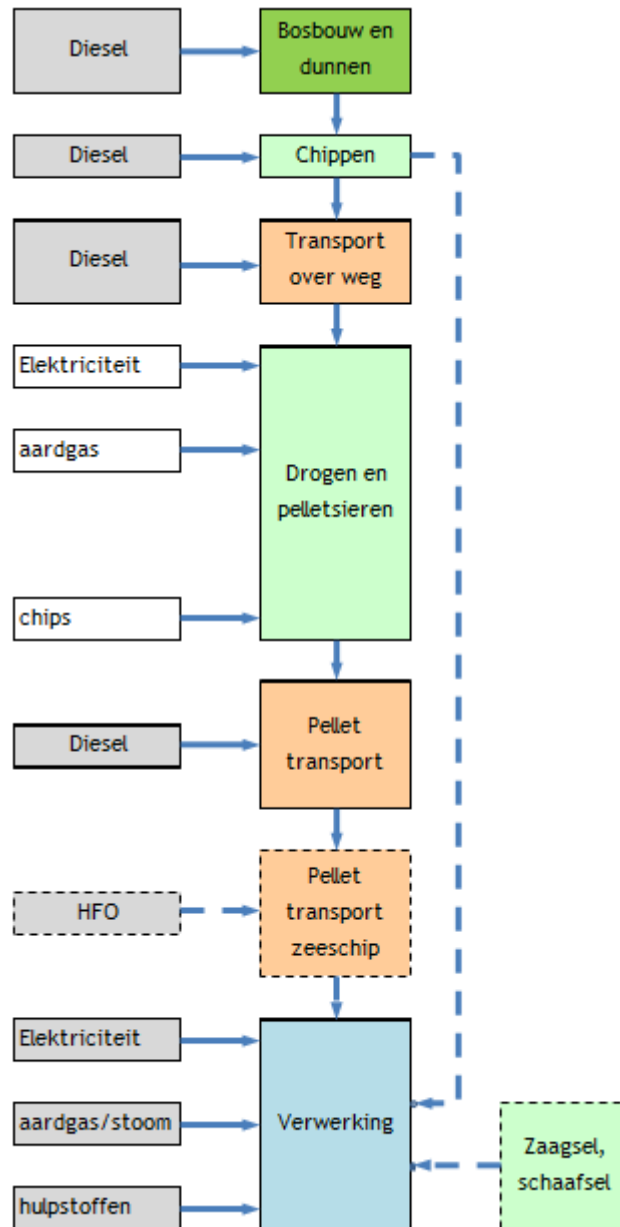
Een beheerd bos doorloopt in de regel een cyclus van aanplant van een groot aantal boompjes of stekjes²⁰ tot eindkap - het rooien van de resterende bomen - van een beperkt aantal bomen met een grote diameter, waarna de cyclus weer van voren af aan begint.

In de cyclus vinden tussentijds vinden dunningen plaats waarbij het aantal boompjes per hectare wordt gereduceerd. De overblijvende bomen krijgen meer ruimte en gebruiken die om dikker en hoger te worden.

²⁰ Het aantal stekjes is groot omdat een deel van de stekjes verloren gaat (van afsterven door koude tot opgegeten worden).



Figuur 24 Globale opbouw van ketens gebaseerd op bosbouw



De toepassing van de gerooide bomen hangt af van hun leeftijd en stamdiameter:

- boompjes uit de eerste dunning - de precommerciële dunningen - en zijn vaak zo klein en dun dat ze in het bos worden achtergelaten;
- boompjes en bomen uit latere dunningen en met toenemende stamdiameter worden toegepast voor pulp en papier, fineer, plaatmaterialen als spaanplaat en multiplex en in toenemende mate ook voor gezaagd hout;
- bomen uit de eindkap - waarbij het bosareaal vrijwel volledig wordt geroid - zijn over het algemeen vooral bestemd voor productie van gezaagd hout.

De bij de latere dunningen gerooide bomen worden ter plekke ontdaan van takken en boomtop - het tak en tophout - waarna enkel de stam naar de verwerking wordt afgevoerd.

Bij verzagen wordt een deel van de stam omgezet in bijproducten zaagsel en schaafsel. Deze bijproducten hebben afhankelijk van de regio en de houtsoort afzet in pulpproductie en plaatproductie of zijn enkel een afvalstof zonder nuttige toepassing.

In de praktijk zijn er legio uitzonderingen op bovenstaande algemeen gestelde schets. In Portugal aangeplante Eucalyptus bossen en in het Zuidoosten van de VS aangeplante 'slash pine' bossen zijn voornamelijk bedoeld voor pulp-productie en leveren niet of nauwelijks gezaagd hout.

Aan de andere kant zijn de beukenbossen in Duitsland weer vooral bedoeld voor gezaagd hout productie.

Een bosbouw cyclus duurt meerdere decennia, afhankelijk van de boomsoort en het voornaamste product. Gezaagd hout vraagt om dikke bomen, dus duurt de cyclus lang. Bij productie van pulp of plaatmateriaal is de houtvezel zelf nodig en is de dikte niet echt van belang, dus duurt de cyclus van een bos bedoeld voor productie van enkel pulphout veel korter (20-30 jaar in het Zuidoosten van de VS).

Bosbeheer in gematigde klimaatzones in met name Europa verschilt nogal van productiesystemen voor hout uit bos in andere delen van de wereld.

Vaak wordt in andere regio's een natuurlijk bos of semi-natuurlijk bos compleet gekapt en wordt stamhout van een deel van de gekapte bomen verzaagd voor gebruik in bouw en meubels. Soms wordt selectief gekapt, waarbij alleen bepaalde bomen met waardevol hout worden gekapt en afgevoerd via gangen door het bos, terwijl de rest van het bos (de opstand) intact blijft.

A.2.2 Biomassa uit bos voor energietoepassingen en grondstoffen

Hout relevant voorgebruik als grondstof voor biobased producten betreft met name de goedkopere productstromen en reststromen als:

- Pre-commerciële dunningen;
- tak- en tophout uit commerciële dunningen;
- stamhout uit commerciële dunningen;
- zaagsel en schaafsel van houtzagerijen.

Stamhout geschikt voor productie van gezaagd hout is in de regel te duur. Deze productstromen en reststromen zijn echter ook geschikt voor productie van chips en pellets voor energietoepassingen. Er zal dan ook een forse concurrentie om dit soort stromen zijn.

Of en hoeveel tak- en tophout en pre-commerciële dunningen eventueel kunnen worden gebruikt voor pelletproductie of als chips hangt af van het type beheer en de beoogde duurzaamheid van het beheer.

Hoe hoger de ambities op gebied van duurzaamheid, des te minder ruimte is er om deze houtresten te gebruiken:

- boompjes uit pre-commerciële dunningen en tak- en tophout bevatten de veel nutriënten en zijn van groot belang bij het in stand houden van de bodemvruchtbaarheid;
- het hout en de bladeren van deze houtresten helpen bij het opbouwen en in stand houden van de bodemorganische stof;
- dood hout en strooisel zijn zeer belangrijk voor biodiversiteit in een bos.



A.2.3 De keten voor grondstoffen uit bosbouw

Voor een productstroom als dunningshout ziet de productieketen er over het algemeen uit als weergegeven in Figuur 24.

De keten start bij het kappen en ontoppen van de bomen. Bij gebruik voor productie van grondstoffen (of bij gebruik voor productie van warmte en/of elektriciteit) wordt het hout gechipt. Dat kan direct op locatie van de kap, maar gebeurt in de regel op een centrale locatie. De chips worden afhankelijk van de afstand tot de afnemer:

- ofwel direct naar de afnemer afgevoerd;
- ofwel eerst gedroogd en gepelletiseerd en daarna naar de afnemer afgevoerd.

Behalve vers stamhout uit dunningen wordt ook als bijproducten van stamhout verwerking vrijkomend schaafsel en zaagsel gebruikt als grondstof of als brandstof. Voor een betere hanteerbaarheid bij transport worden deze bijproducten vaak gepelletiseerd.

In de keten gebruikte hulpstoffen zijn vooral:

- diesel voor mobiele werktuigen en transportmiddelen;
- chips voor drogen van te pelletiseren chips en zaagsel;
- aardgas als hulpbrandstof bij het droogproces;
- elektriciteit voor aandrijving van machinerie bij pelletiseren.

Directe emissies van broeikasgassen relevant voor biomassa uit bosbouw zijn vooral emissies gerelateerd aan veranderingen in de hoeveelheden koolstof vastgelegd in vegetatie, strooisel en bodem.

Daarnaast veroorzaakt gebruik van brandstoffen als diesel, aardgas en hout directe emissies van broeikassen.

In sommige bosbeheersystemen wordt bemest met kunstmest, maar dat is eerder uitzondering dan regel.



Bijlage B Emissiefactoren voor hulpstoffen en energiedragers

De onderstaande tabellen zijn overgenomen uit de Biograce spreadsheet tools en dienen uitsluitend voor de in deze handleiding uitgewerkte voorbeelden.

Tabel 10 Standaard data voor energiedragers uit de Biograce tools

Energiedrager	Eenheid	Dichtheid (kg/eenheid)	LHV (MJ/kg)	Emissies in gram per eenheid, verbranding en productieketen			
				CO ₂	CH ₄	N ₂ O	[overig...]
Diesel	liter	0,832	43,1	3.369	0,00	0,000	
Gasoline	liter	0,745	43,2	2.974	0,00	0,000	
Fuel oil (1.8% S)	liter	0,970	40,5	3.665	0,00	0,000	
Fuel oil (3.5% S)	liter	0,970	40,5	3.665	0,00	0,000	
Ethanol	liter	0,794	26,81				
Methanol	liter	0,793	19,95	1.546	4,80	0,008	
Natural gas (marginal supply)	MJ		49,2	66	0,21	0,000	
Methane	MJ	0,72	50				
LPG	MJ		46	73	0,02	0,000	
Electricity EU mix (10-20 kV)	kWh			642	2,30	0,023	
Electricity EU mix (0.4 kV)	kWh			683	2,45	0,025	
Electricity Canada	kWh			188	0,28	0,007	

Tabel 11 Standaard data voor kunstmest uit de Biograce tools

Hulpstof	Eenheid	Emissies in gram per eenheid, totaal			
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	[overig...]
Synthetic N-fertiliser (kg N)	kg N	3.680	7,5	23,17	
P ₂ O ₅ -fertiliser (kg P ₂ O ₅)	kg P ₂ O ₅	1.112	1,9	0,05	
K ₂ O-fertiliser (kg K ₂ O)	kg K ₂ O	589	1,7	0,01	
CaO-fertiliser (calculated as kg CaO)	kg CaO	83	0,2	0,00	
CaO-fertiliser (calculated as kg CaCO ₃)	kg CaCO ₃	46	0,1	0,00	
Ammonium nitrate (AN)	kg N	2.671	6,9	22,92	
Ammonium sulphate (AS)	kg N	2.560	6,5	20,82	
Ammonium nitrate sulphate (ANS)	kg N	2.561	8,9	22,09	
Anhydrous ammonia	kg N	2.662	6,8	20,82	
Calcium ammonium nitrate (CAN)	kg N	2.863	7,3	22,92	
Calcium nitrate (CN)	kg N	2.653	7,0	25,93	
Urea	kg N	3.293	9,3	20,82	
Urea ammonium nitrate (UAN)	kg N	3.772	7,5	21,91	
Triple superphosphate (TSP)	kg P ₂ O ₅	517	0,9	0,02	
Rock phosphate 21%P ₂ O ₅ 23%SO ₃	kg P ₂ O ₅	95	0,0	0,00	
Mono ammonium phosphate (MAP) 11%N 52%P ₂ O ₅	kg P ₂ O ₅	967	2,5	0,00	
Di-Ammonium-Phosphate (DAP) 18%N 46%P ₂ O ₅	kg P ₂ O ₅	1.459	3,7	0,00	
Muriate of Potash (MOP) 60%K ₂ O	kg K ₂ O	409	0,2	0,00	



Tabel 12 Standaard data voor hulpstoffen (chemicalien)

Hulpstof	Eenheid	Emissies in gram per eenheid, productieketen			
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	[overig...]
Acetic acid	kg	1.570	0,0	0,00	
Ammonia	kg	2.367	7,3	0,01	
alpha-amylase	kg	1.000	0,0	0,00	
Antioxidant BHT (butylated hydroxytoluene)	kg	10.000	0,0	0,00	
Citric acid	kg	963	0,0	0,00	
Glucosylase	kg	7.500	0,0	0,00	
Hexane	kg	723	0,0	0,00	
n-Hexane	kg				
Fuller's earth	kg	197	0,0	0,01	
Hydrochloric acid (HCl)	kg	1.253	4,4	0,04	
Hydrogen (for HVO)	kg				
Isobutene	kg	1.501	0,0	0,00	
Limestone	kg	12	0,0	0,00	
Lubricants	kg	947	0,0	0,00	
Nitrogen	kg	71	0,3	0,00	
Phosphoric acid (H ₃ PO ₄)	kg	2.826	11,5	0,11	
Potassium hydroxide (KOH)	kg	569	2,0	0,02	
Pure CaO for processes	kg	1.074	1,0	0,01	
Sodium carbonate (Na ₂ CO ₃)	kg	1.149	4,7	0,01	
Sodium hydroxide (NaOH)	kg	693	2,5	0,03	
Sodium methylate (Na(CH ₃ O))	kg	2.925	12,8	0,10	
Sodium silicate (37% in water)	kg	1.145	0,0	0,00	
Sulphuric acid (H ₂ SO ₄)	kg	247	0,8	0,01	
Zeolith	kg	4.000	0,0	0,00	
Nitrogen	kg	434	0,0	0,00	
Potassium hydroxide (KOH)	kg	1.824	3,8	0,05	
Sodium methylate	kg	4.885	0,0	0,00	
Pesticides	kg	12.480	36,1	1,72	
Seeds- wheat	kg	163	0,3	0,40	
Seeds- sugarbeet	kg	2.431	5,3	4,22	



Tabel 13 Standaard data voor transportmiddelen

Transportmiddel	Eenheid	Emissies in gram per eenheid			
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	[overig...]
Truck (40 ton) for dry product (Diesel)	tonkm	76,2	0,003	0,0015	
Truck (40 ton) for chips (and similar size dry product) (Diesel)	tonkm	79,1	0,004	0,0016	
Truck (40 ton) for pellets (Diesel)	tonkm	82,3	0,004	0,0016	
Truck (40 ton) for liquids (Diesel)	tonkm	82,1	0,004	0,0016	
Truck (40 ton) for manure (Diesel)	tonkm	82,3	0,004	0,0016	
Truck (40 ton) for biowaste (Diesel)	tonkm	79,1	0,004	0,0016	
Truck (40 ton) for sugar cane transport	tonkm	129,1	0,001	0,0039	
Truck (20 ton) for Jatropha seed transport (Diesel)	tonkm	169,1	0,002	0,0012	
Truck (12 ton) for FFB transport (Diesel)	tonkm	210,2	0,002	0,0015	
Dumpster truck MB2213 for filter mud transport	tonkm	338,2			
Tanker truck MB2318 for vinasse transport	tonkm	202,9			
Tanker truck MB2318 for cane seed transport	tonkm	245,1			
Tanker truck with water cannons for vinasse transport	tonkm	87,9			
Ocean bulk carrier Panamax (Fuel oil)	tonkm	9,4			
Inland bulk carrier 8.8 kt (diesel)	tonkm	30,4	0,093	0,0004	
Inland ship for oil transport, 1.2 kt (diesel)	tonkm	47,3	0,030		
Chemical tanker for vegetable oil transport	tonkm	9,0			
Product tanker 22.56 kt (Fuel oil)	tonkm	8,9			
Product tanker 15 kt (Fuel oil)	tonkm	16,0			
Product tanker 12.617 kt (Fuel oil)	tonkm	10,7			
Bulk Carrier 'Handysize' - wood chips (Fuel oil) with bulk density 220 kg/m ³	tonkm	22,5			
Bulk Carrier 'Supramax' - wood chips (Fuel oil) with bulk density 220 kg/m ³	tonkm	14,2			
Bulk Carrier 'Handysize' - pellets (Fuel oil) with bulk density 650 kg/m ³	tonkm	9,5			
Bulk Carrier 'Supramax' - pellets (Fuel oil) with bulk density 650 kg/m ³	tonkm	6,1			
Bulk Carrier 'Handysize' - agri-residues with low bulk density (125 kg/m ³)	tonkm	37,1			
Bulk Carrier 'Supramax' - agri-residues with low bulk density (125 kg/m ³)	tonkm	23,2			
Bulk Carrier 'Handysize' - agri-residues with high bulk density (300 kg/m ³)	tonkm	17,4			
Bulk Carrier 'Supramax' - agri-residues with high bulk density (300 kg/m ³)	tonkm	11,1			
Bulk Carrier 'Handysize' - PKM	tonkm	11,7			
Bulk Carrier 'Supramax' - PKM	tonkm	6,7			
Local (10 km) pipeline	tonkm				
Freight train USA (diesel)	tonkm	23,5	0,005	0,0010	
Rail (Electric, MV)	tonkm				



Bijlage C Karakterisatiefactoren

Figuur 25 Overzicht van broeikasgassen en hun karakterisatiefactoren

	Karakterisatie Factor Kg CO ₂ -eq./kg		Karakterisatie Factor Kg CO ₂ -eq./kg
1,1,1-trichloroethaan	146	HFC-125	3.500
Carbon dioxide	1	HFC-134a	1.430
CFC-11	4.750	HFC-143a	4.470
CFC-113	6.130	HFC-152a	124
CFC-114	10.000	HFC-227ea	3.220
CFC-115	7.370	HFC-23	14.800
CFC-12	10.900	HFC-236fa	9.810
CFC-13	14.400	HFC-32	675
Dichloromethaan	9	HFC-43-10mee	1.640
Distikstof oxide	298	Methaan	25
HALON-1211	1.890	Methyl Chloride	13
HALON-1301	7.140	methylbromide	5
HALON-2402	1.640	Perfluorobutaan	8.860
HCFC-123	77	Perfluorocyclobutaan	10.300
HCFC-124	609	Perfluoroethaan	12.200
HCFC-141b	725	Perfluorohexaan	9.300
HCFC-142b	2.310	Perfluoromethaan	7.390
HCFC-22	1.810	Perfluoropropaan	8.830
HCFC-225ca	122	Sulphur hexafluoride	22.800
HCFC-225cb	595	Tetrachloromethaan	1.400



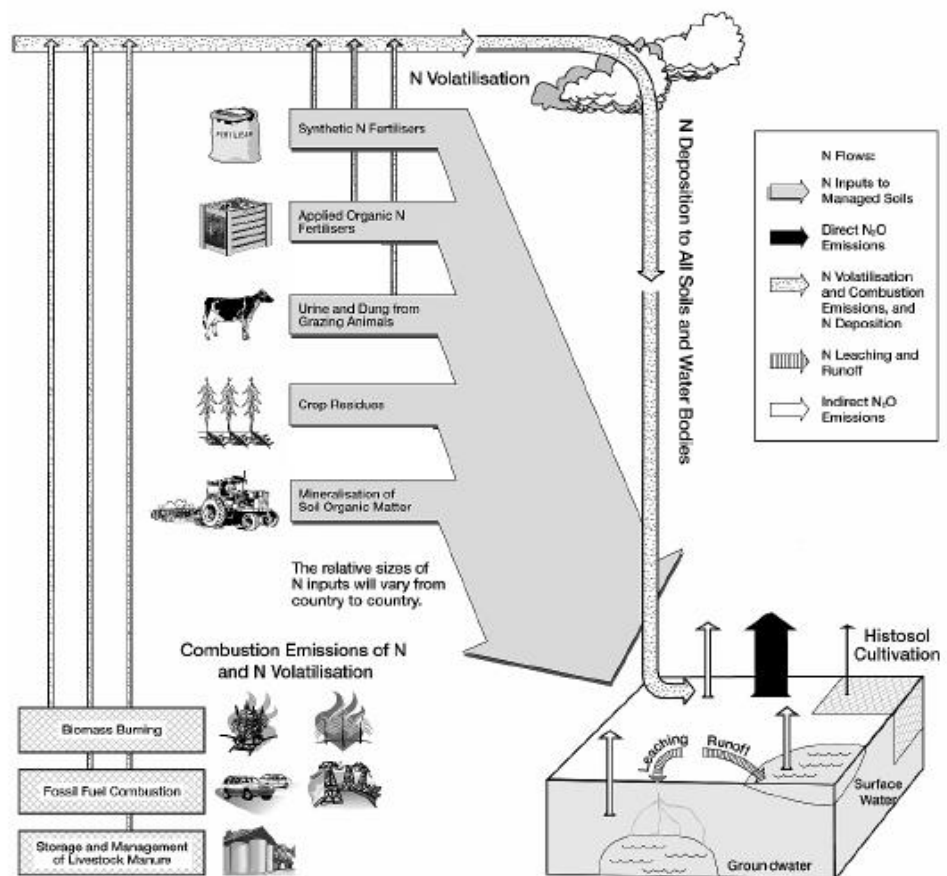
Bijlage D Nutriëntenbalansen en broeikasgasemissies

In akkerbouw en bosbouw kunnen broeikasgasemissies optreden in de vorm van N_2O -emissies. N_2O -emissies ontstaan bij:

- gebruik van stikstof houdende dierlijke mest, kunstmest;
- gebruik van organisch materiaal als compost of groenbemester;
- natuurlijke afbraak van gewasresten in akkerbouw of strooisel en organische stof in de bodem in bosbouw.

De N_2O -emissies ontstaan zowel direct als indirect:

- Een deel van de stikstof in bovengenoemde meststoffen, gewasresten en organische materialen wordt door natuurlijke processen in de bodem direct omgezet in N_2O .
- Een ander deel wordt omgezet in NH_3 en NO_3 en verdampt, respectievelijk spoelt uit. Een deel van de gevormde NH_3 en NO_3 wordt vervolgens weer in tweede instantie in N_2O omgezet.



Bron: IPCC, 2006, rapport 4, hoofdstuk 11, bladzijde 11.8.

In de IPCC-methodiek (IPCC, 2006) worden voor broeikasgasbalansen volgende emissiefactoren gehanteerd:

- in vochtige klimaten spoelt 30% van de beschikbare stikstof uit. Beschikbare stikstof betreft elke vorm van voor de plant opneembare stikstof: stikstof in kunstmest, dierlijke mest, in een ander type meststof (compost, groenbemester, anders) of de bij afbraak van organische stof in de bodem vrijkomende stikstof (gemineraliseerde stikstof - zie Bijlage E.1).
- van de gegeven stikstof verdampt als ammoniak:
 - 10% van de als kunstmest gegeven stikstof;
 - 20% van de in een andere vorm beschikbare stikstof (dierlijke mest, overige meststoffen, gemineraliseerde stikstof uit bodemorganische stof);
- van de gegeven stikstof wordt geëmitteerd als N_2O :
 - 1% van de stikstof in kunstmest en overige organische meststoffen (inclusief overige dierlijke mest) of stikstof vrijkomend bij afbraak van bodemorganische stof;
 - 2% van de stikstof in varkensmest, rundveemest en kippenmest;
- Van de als nitraat uitgespoelde stikstof wordt 0,75% omgezet in N_2O , van de als verdampte ammoniak afgevoerde stikstof is dat 1%.

De enige parameters die van invloed zijn op de emissiefactoren in deze globale benadering zijn de aard van de toegevoerde stikstof en de hoeveelheid neerslag.

De resulterende balansen, inclusief de door gewassen opgenomen fracties stikstof zijn gegeven in Tabel 14 en Tabel 15.

Meer gedetailleerde modellen voor emissies van N_2O , waarin bijvoorbeeld rekening wordt gehouden met de bodemsamenstelling, water- en luchtdoorlatendheid en bodemtemperatuur, zijn bijvoorbeeld te vinden in de Biograce-spreadsheets, werkblad *N_2O emissions GNOC*. De Biograce-spreadsheettools zijn geaccrediteerd onder de Europese Renewable Energy Directive. Een andere redelijk eenvoudig toepasbare methode met meer detailniveau dan de IPCC benadering wordt beschreven in (RSB, 2011).

Overigens moet bij verdisconteren van stikstof in organische stof in de bodem rekening worden gehouden met eventuele vastlegging van stikstof in organische stof in de bodem wanneer er netto opbouw van organische stof in de bodem plaatsvindt. Volgens de IPCC methodiek bevat organische stof in de bodem 57% koolstof en 3,8% stikstof.

Per ton gevormd bodemorganisch materiaal wordt dus 38 kilo stikstof vastgelegd.



Tabel 14 Stikstofbalans voor droog klimaat

	Kunstmest			Gewasresten, afgebroken bodemorganische stof, compost, groenbemester, overige dierlijke mest			Dierlijke mest van rundvee, varkens en kippen		
	Stikstofbalans	N ₂ O-emissie		Stikstofbalans	N ₂ O-emissie		Stikstofbalans	N ₂ O-emissie	
N ₂ O, direct	1%	1%	direct	1%	1%	direct	2%	2%	direct
NH ₃ , verdampt	10%	0,1%	indirect	20%	0,2%	indirect	20%	0,2%	indirect
NO ₃ , uitgespoeld		0	indirect		0	indirect		0	indirect
Voor gewas beschikbaar	89%	1,1%		79%	1,2%		78%	2,2%	

Bron: (IPCC, 2006).

Tabel 15 Stikstofbalans voor nat klimaat

	Kunstmest			Gewasresten, afgebroken bodemorganische stof, compost, groenbemester, overige dierlijke mest			Dierlijke mest van rundvee, varkens en kippen		
	Stikstofbalans	N ₂ O-emissie		Stikstofbalans	N ₂ O-emissie		Stikstofbalans	N ₂ O-emissie	
N ₂ O, direct	1%	1%	direct	1%	1%	direct	2%	2%	direct
NH ₃ , verdampt	10%	0,1%	indirect	20%	0,2%	indirect	20%	0,2%	indirect
NO ₃ , uitgespoeld	30%	0,23%	indirect	30%	0,23%	indirect	30%	0,23%	indirect
Voor gewas beschikbaar	59%	1,3%		49%	1,4%		48%	2,4%	

Bron: (IPCC, 2006).

Bijlage E Biomassa en bodemorganische stof

E.1 Koolstofbalans

Koolstof is aanwezig in de vorm van vegetatie, strooisel (dood organisch materiaal op de bodem zoals afgevallen blad en afgevallen takjes) en in de vorm van organische stof in de bodem.

Deze drie vormen van koolstofvastlegging kunnen worden gezien als voorraden die afhankelijk van de verhouding tussen:

1. aanvoer en bijgroei aan de ene kant; en
2. onttrekkingen en natuurlijke afbraak aan de andere kant in evenwicht zijn, toenemen of afnemen (zie Figuur 26).

Koolstof in de vorm van CO₂ uit de lucht wordt in zo'n systeem bij groei van vegetatie vastgelegd in de vegetatie. De vegetatie sterft na bepaalde tijd af, waarna de vegetatie strooisel wordt, die door verdere natuurlijke afbraak wordt omgezet in CO₂ en in bodemorganische stof. Maar ook organische stof in de bodem wordt na verloop van tijd weer afgebroken tot CO₂, waardoor de koolstofcyclisch weer rond is.

In een natuurlijk bos of in een natuurlijk grasland zijn alle drie de 'voorraden' in evenwicht en hebben deze voorraden een constante omvang, uitgedrukt in ton koolstof/hectare.

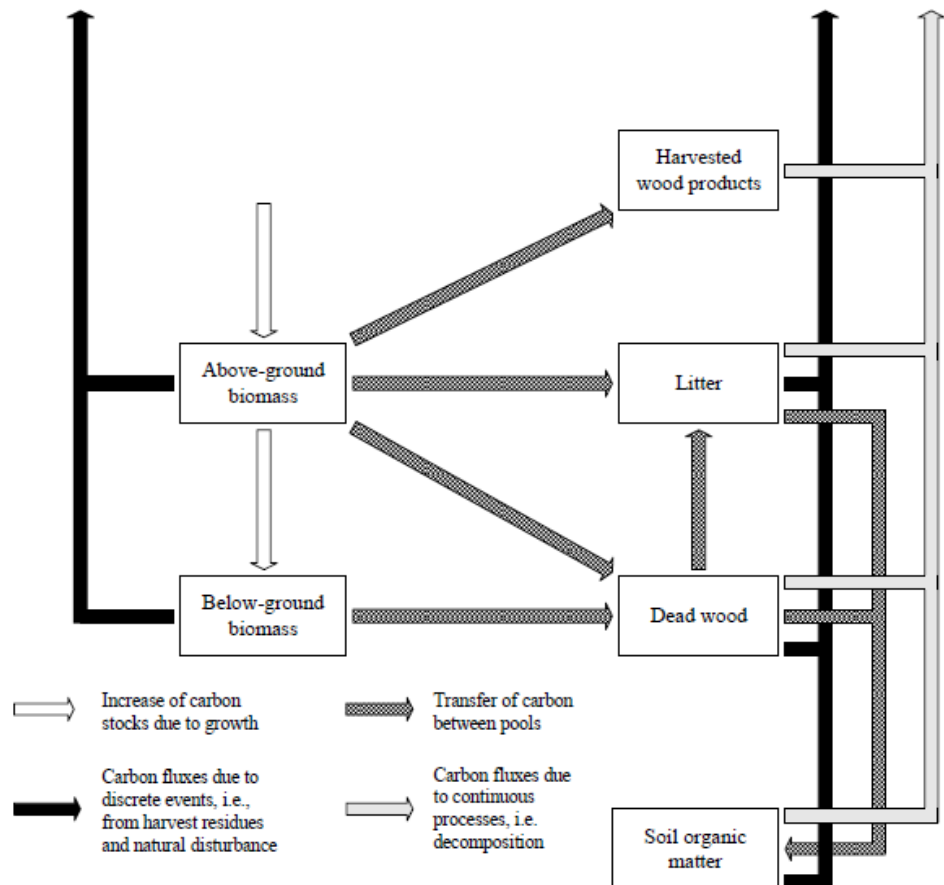
In bosbouw of akkerbouw kan sprake zijn van toename of afname van de hoeveelheden koolstof vastgelegd in de drie typen 'voorraden' doordat additioneel koolstof wordt toegevoerd of afgevoerd. Hierdoor zullen de vastgelegde hoeveelheden na verloop van tijd een nieuw evenwicht bereiken.

Een voorbeeld voor veranderingen in de voorraden koolstof in bossen:

- additionele oogst van biomassa voor energiedoelinden uit beheerd bos leidt tot meer afvoer van hout en dus koolstof uit het bos;
- het afgevoerde hout wordt verbrand, de koolstof komt vrij als CO₂;
- wanneer de additioneel geoogste hoeveelheid biomassa in de tijd constant blijft zullen de koolstofvoorraden een nieuwe contante (maar lagere) waarde aannemen;
- het verschil tussen de oorspronkelijke omvang van de koolstofvoorraden in het bos en de nieuwe omvang betekent dat minder koolstof is vastgelegd en er dus netto meer koolstof in de atmosfeer is - een emissie.



Figuur 26 Vereenvoudigde weergave koolstofbalans in landschap



Bron, IPCC 2006, deel 4, hoofdstuk 2, bladzijde 2.8.

Voor akkerbouw gelden vergelijkbare mechanismen. Vegetatie en strooisel spelen hier geen echte rol van betekenis omdat de vegetatie jaarlijks wordt verwijderd of als gewasrest op de bodem eindigt, conform het doel van de activiteit. Maar voor bodemorganisch stof geldt wel degelijk eenzelfde soort mechanisme.

E.2 Vuistregels

Als vuistregels voor afbraaksnelheid van organische stof in de bodem kunnen worden aangehouden:

- in gematigd droog klimaat wordt bij conventionele intensieve grondbewerking jaarlijks 1,3% van de organische stof in de bodem afgebroken;
- in gematigd koel en vochtig klimaat zoals in Nederland wordt jaarlijks circa 2% van de bodemorganische stof afgebroken²¹;
- met een wat specifiekere benadering, zoals uitgewerkt in het RothC-model worden afhankelijk van het landbeheer percentages van 1,5% (niet

²¹ Zie: <http://www.kennisakker.nl/kenniscentrum/document/30-vragen-en-antwoorden-over-bodemvruchtbaarheid> en <http://www.kennisakker.nl/kenniscentrum/handleidingen/teelthandleiding-groenbemesters>

- ploegen) tot 1,8% (conventioneel intensief ploegen) gevonden (zie ook (CE Delft ; Biomass Research, 2013);
- in tropisch nat klimaat (regenwoud) wordt per jaar ongeveer 4% van de organische stof in de bodem afgebroken;
 - in tropisch vochtig klimaat wordt jaarlijks ongeveer 3% van de organische stof in de bodem afgebroken.

Om en gevoel te geven voor hoeveelheden het volgende voorbeeld op basis van (Schils, 2012):

- conform (Schils, 2012) bevat een bodem in Nederland - de bovenste 30 cm - bij een gehalte van 2% organische stof in de bodem 70.000 kg/ha;
- de bovenste 30 cm van 1 hectare heeft een totaal volume 3.000 m³;
- de dichtheid van bodem bedraagt ongeveer 1.150 kg/m³;
- het product van dichtheid en volume geeft 3.450.000 kg/ha aan bodem;
- er kan bij wijze van eerste orde aanname worden aangenomen dat hiervan 2%/jaar wordt afgebroken, circa 1.400 kg organische stof per hectare per jaar.

In de teelt moet een vergelijkbare hoeveelheid koolstof worden toegevoerd als wordt afgebroken om het koolstofgehalte in de bodem op peil te houden.

De hoeveelheid koolstof in organische stof in de bodem kan ook worden opgebouwd door meer organisch materiaal aan te voeren in de vorm van compost, groenbemester of dierlijke mest dan van nature wordt afgebroken. Dit wordt gezien als één van de mogelijkheden om klimaatverandering door toename van broeikassen in de atmosfeer gedeeltelijk tegen te gaan. De mate waarin een groenbemester, dierlijke mest, compost of een andere organisch materiaal bevattend product bijdraagt aan vorming en opbouw van organische stof in de bodem wordt uitgedrukt in de humificatiefactor, ook wel het aandeel effectieve organische stof genoemd: de hoeveelheid materiaal die na 1 jaar nog over is. Enkele humificatiefactoren zijn gegeven in Tabel 16.

Tabel 16 Humificatiefactoren voor gematigd vochtig klimaat zoals in Nederland

Organische stof	Humificatiefactor (%)
Groene massa	20
Stro	30
Plantenwortels	35
Dierlijke mest	30-50
Gft-compost	75

Om verandering in hoeveelheid organische stof in de bodem te kunnen omrekenen naar CO₂-emissie is nodig te weten hoeveel koolstof organische stof in de bodem bevat. Conform IPCC, 2006 is dat koolstofgehalte 57% en heeft organische stof in de bodem een C:N-verhouding van ongeveer 15:1.

De stikstof in organische stof in de bodem komt bij afbraak vrij en is dan beschikbaar voor gewassen om op te nemen bij groei.



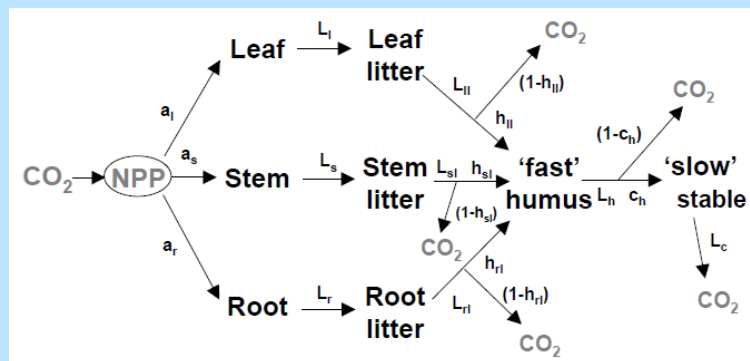
E.3 C-cycle-model (in concept)

De in deze handleiding voorgestelde en gehanteerde methodiek voor het berekenen van veranderingen in bodemorganische stof verschilt van de in de IPCC 2006-methodiek gehanteerde benadering, zoals bijvoorbeeld in Biograce wordt gebruikt. De in de IPCC 2006-methodiek gehanteerde benadering is te generiek en legt te weinig een direct kwantitatief verband tussen de aan de bodem toegevoerde organische materialen, de hoeveelheid organisch materiaal in de bodem zelf en de afbraak van dit bodemorganische materiaal. Dit vertroebelt het zicht op de keuzes die in het primaire proces gemaakt kunnen worden om de CO₂-emissie te verminderen en die van groot belang zijn voor de bodemvruchtbaarheid.

Daarom is in deze handleiding gekozen voor de hieronder uitgelegde aanpak op basis van het C-cycle-model, dat o.a. wordt gebruikt als onderdeel van het IMAGE 2.0-model van PBL.

IMAGE 2.0-koolstofmodel

In het IMAGE 2.0-model wordt de dynamiek van koolstof in bos, grasland of bouwland beschreven volgens onderstaand schema:



Hierin is:

- L de gemiddelde levensduur van een koolstofvoorraad in de vorm van afgefallen blad, takken en stukken wortel (respectievelijk leaf litter, stem litter en root litter), en humus
- a_i , h_i en c_i steeds fracties die aan een bepaalde volgende koolstofvoorraad worden gealloceerd. Zo is c_h de fractie snel afbreekbare humus die wordt omgezet in stabiele humus. Het overige snel afbreekbare humus wordt direct omgezet in CO₂.

De vorming van snelle humus (C_{fh}) bij afbraak van hout (C_s) uit niet commerciële dunningen (beschouwd als 'stem litter') wordt gegeven door: $h_{sl} \times (C_{sl} / L_{sl})$. De factor h_{sl} wordt de humificatiefactor genoemd. Het hout uit de dunningen wordt verder voor $(1 - h_{sl})$ % omgezet in CO₂.

De afbraak van snelle humus wordt gegeven door C_{fh} / L_{fh} , waarvan c_h % - de carbonisatie fractie - wordt omgezet in stabiele humus (C_{sh}) en $(1 - c_h)$ % in CO₂. Stabiele humus tenslotte wordt met een snelheid C_{sh} / L_c omgezet in CO₂.

Niet relevant voor de in deze handleiding beschouwde analyses zijn de grootheden NPP (net primary production) - de jaarlijkse groei van het beschouwde gewas (ton/ha) - de verdeling daarvan over blad, stam(/tak) en wortels en de gemiddelde levensduur van die plantonderdelen.

Overigens zijn er nog vele andere modellen voor opbouw en afbraak van bodemorganische stof beschikbaar dan alleen de module uit het IMAGE 2.0-model²².

IMAGE model van PBL

IMAGE staat voor Integrated Model to Assess the Global Environment. IMAGE is een ecologisch-model dat de milieugevolgen van menselijke activiteiten wereldwijd simuleert. Het simuleert de interacties tussen de samenleving, de biosfeer en het klimaatstelsel en evalueert effecten op aspecten als klimaatverandering, biodiversiteit en het welzijn van de mens. Het bevat onder meer een mondiaal simulatiemodel voor de effecten op koolstofbalansen, stikstofbalansen en fosforbalansen

De in het C-cycle-model gehanteerde benadering is toegepast om voor een aantal klimaatzones te schatten hoeveel koolstof van niet commerciële dunningen gemiddeld over een periode van 100 jaar wordt vastgelegd in bodemorganische stof.

Door iteratieve berekening op basis van de C-Cycle-benadering is voor verschillende klimaatzones bepaald hoeveel koolstof uit hout van niet commerciële dunningen over een periode van 100 jaar in de bodem als humus vastgelegd wordt wanneer het hout in het bos zou worden achtergelaten.

In Tabel 17 zijn de waarden van de verschillende factoren in de beschouwde klimaatzones gegeven.

Tabel 17 Gehanteerde factoren en berekende vastleggingspercentages

	Levensduur dunnings- hout strooisel (jaar)	Humificati e factor	Levensduur snelle humus (jaar)	Carbonisatie fractie	Levensduur stabiele humus (jaar)	Gemiddeld vastgelegd in humus over 100 jaar
Symbool	L_{sl}	h_{sl}	L_{fh}	C_h	L_c	
Klimaatzone						
Boreaal, droog	3	60%	73	0,07%	732	36%
Boreaal, nat	3	60%	47	0,07%	474	28%
Gematigd, Droog	3	50%	57	0,07%	707	27%
Gematigd, nat	3	50%	49	0,07%	614	25%
Subtropisch, Droog	2	40%	55	0,07%	683	21%
Subtropisch, nat	2	40%	48	0,07%	594	19%
Tropisch, montaan, nat	2	40%	24	0,07%	594	12%
Tropisch, montaan, droog	2	40%	27	0,07%	683	13%
Tropisch, droog	2	40%	27	0,07%	683	13%
Tropisch, nat	2	40%	24	0,07%	594	12%
Tropisch regenwoud	2	40%	18	0,07%	454	10%

²² Zie bijvoorbeeld CO₂-fix voor bodems in beheerd bos of de koolstofsimulator van LNE (Departement Leefomgeving, Milieu en Energie) in Brussel of NDICEA van het Louis Bolk Instituut in Driebergen.

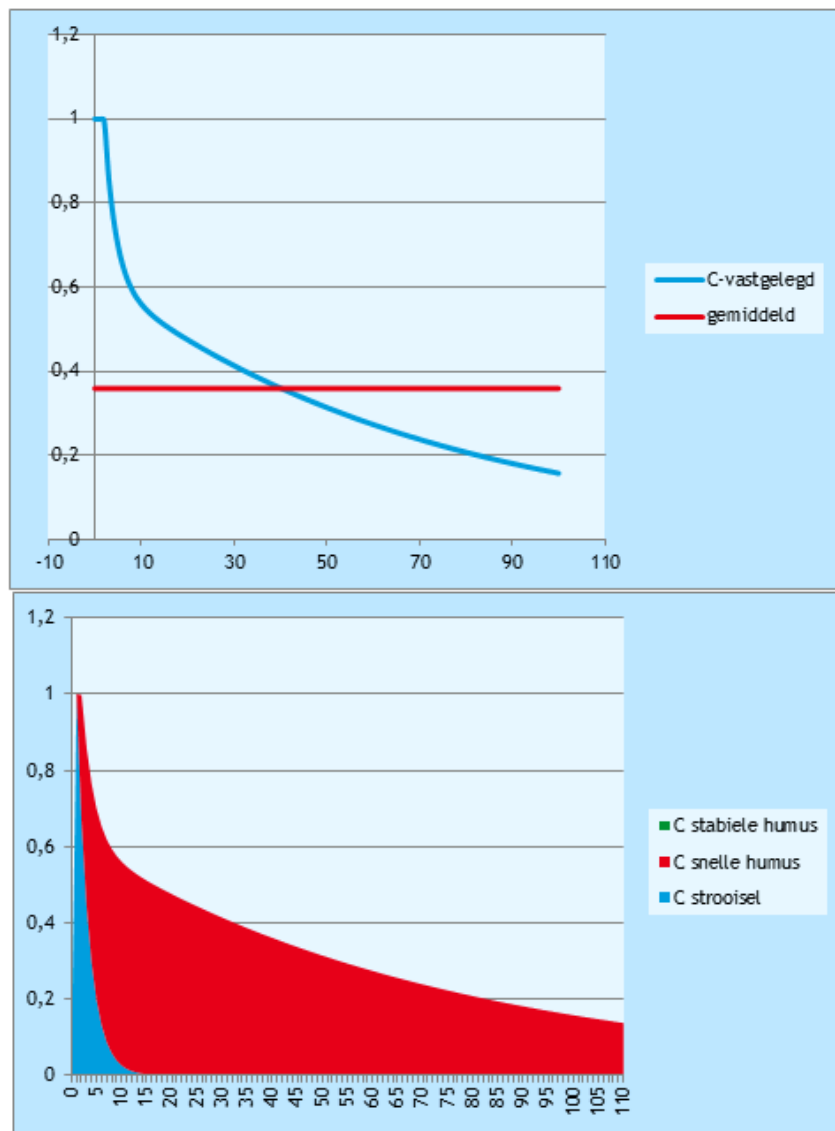


De verschillende klimaatzones zijn gegeven in Figuur 28.

De gehanteerde levensuren voor snelle en stabiele humus zijn gecorrigeerd voor temperatuur en verhouding tussen neerslag en verdamping in de verschillende klimaatzones. Zoals geïllustreerd door de gegeven waarden voor de levensduur neemt de afbraaksnelheid toe met temperatuur en met beschikbaarheid van vocht.

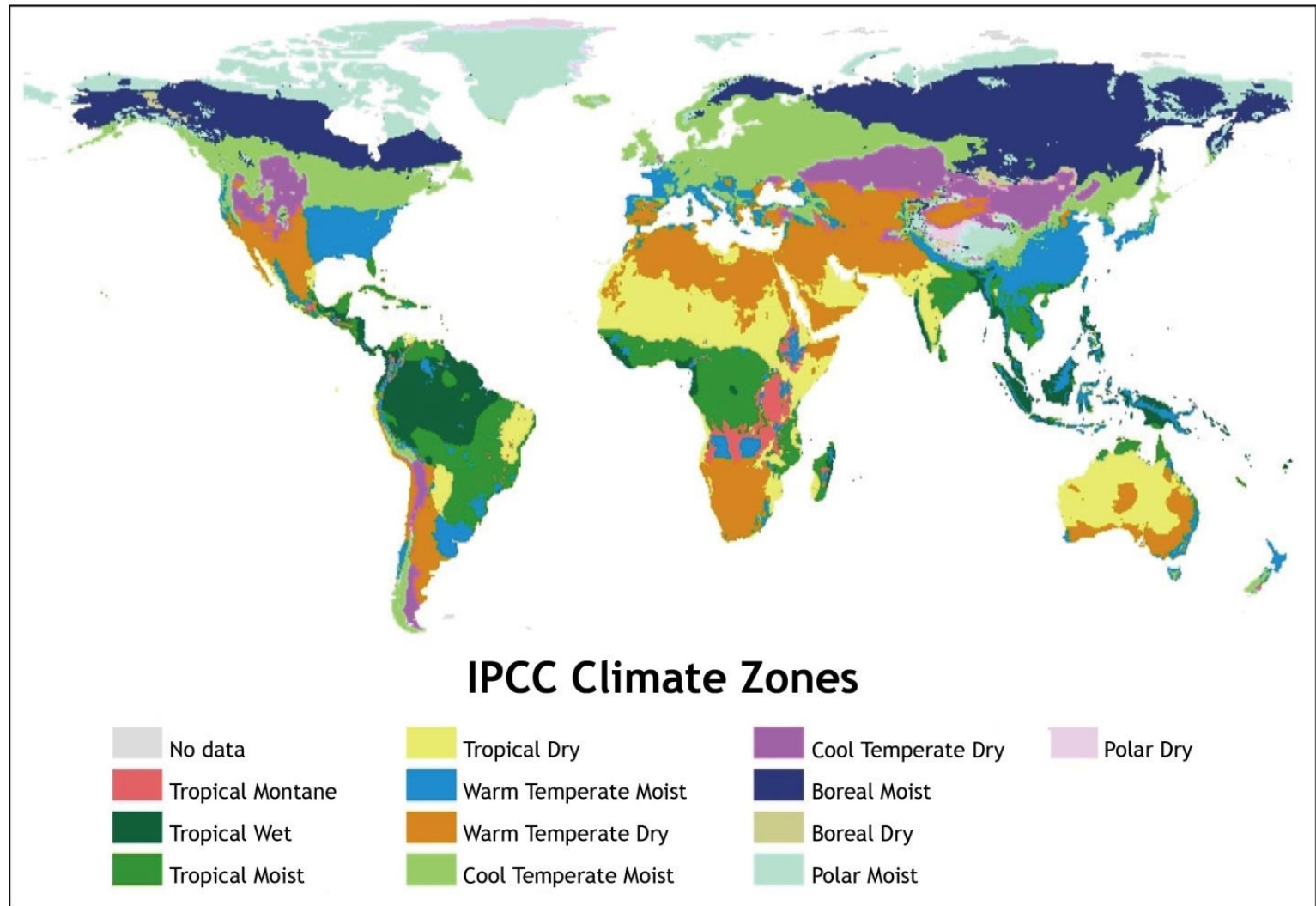
In de praktijk zal de afbraaksnelheid van strooisel (het op de grond gevallen dode houtachtige materiaal) ook af van de samenstelling van het houtachtige materiaal (met name ligninegehalte) en de dikte van het hout. Afbraak van humus wordt beïnvloed door het kleigehalte in de bodem. In is een voorbeeld gegeven van het verloop van de in strooisel en humus vastgelegde hoeveelheden koolstof.

Figuur 27 Verloop van de in strooisel en humus vastgelegde hoeveelheden koolstof in de tijd





Figuur 28 Klimaatzones



Bron: IPCC, 2006.

