

Stieltjesweg 1
Postbus 155
2600 AD Delft

www.tno.nl

T +31 88 866 20 00
F +31 88 866 06 30
info-lenT@tno.nl

TNO-rapport

TNO-RPT-2011-00091

Well-to-tank broeikasgas emissies van aardgas, biogas en diesel in Nederland – analyse van 2010 en projectie naar de toekomst

Datum	15 december 2010
Auteur(s)	Sebastiaan Bleuanus Bart Bos Amber Hensema Gerrit Kadijk Pieter Kroon (ECN) Peter Mesman
Opdrachtgever	Provincie Zuid-Holland T.a.v. de heer ing. H.A. Kruyt Postbus 90602 2509 LP DEN HAAG`
Projectnummer	033.23791
Aantal pagina's	49

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2011 TNO

Samenvatting

Wegtransport is verantwoordelijk voor een significant deel van de broeikasgasemissies in Nederland. Behalve bij het verbruiken van brandstof komen tijdens de productie van brandstof ook broeikasgassen vrij. Dit rapport bevat de uitkomsten van een project uitgevoerd door TNO in 2010 om de broeikasgasemissies die ontstaan bij de productie van een aantal in Nederland gebruikte wegtransportbrandstoffen (de zogenaamde Well To Tank of WTT emissies) te kwantificeren. Dit is belangrijke input om een gefundeerde keuze tussen deze brandstoffen te kunnen maken door rekening te houden met de broeikasgasemissies van de gehele keten. Naast een analyse van de huidige situatie is een inschatting gemaakt van de waarschijnlijke evolutie van de broeikasgasemissies in 2020.

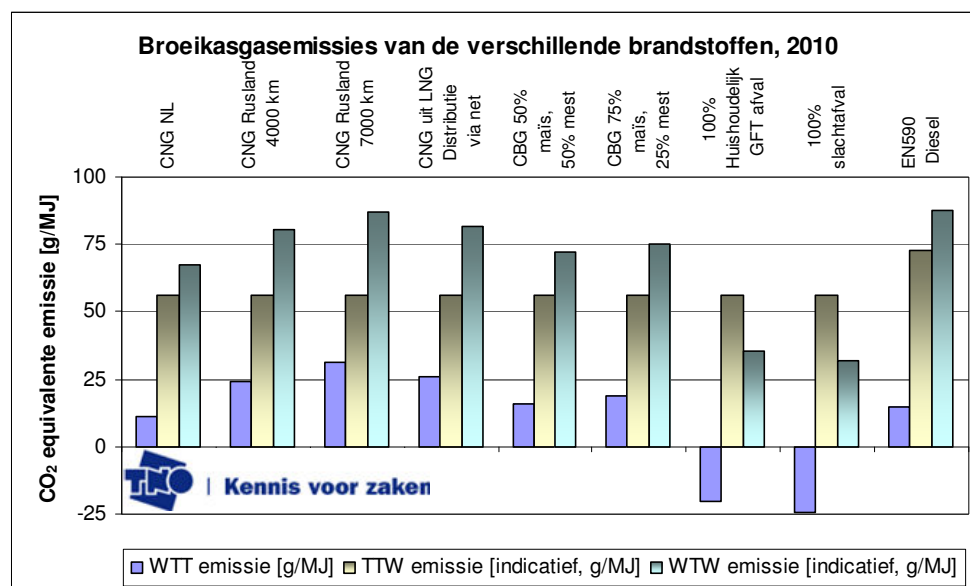
De vergeleken brandstoffen zijn:

- 1) Standaard dieselbrandstof.
- 2) Gecomprimeerd aardgas uit Nederlandse bron
- 3) Gecomprimeerd aardgas uit Russische bron
- 4) Gecomprimeerd aardgas gemaakt van uit Qatar geïmporteerd LNG
- 5) Gecomprimeerd biogas uit covergisting van mest en maïs
- 6) Gecomprimeerd biogas uit vergisting van GFT of slachtafval

De berekeningen in dit project zijn uitgevoerd met SIMAPRO, een veelgebruikt softwarepakket voor ketenemissie-analyse. Waar mogelijk zijn procesparameters uit de Nederlandse praktijk gebruikt. De broeikasgassen CO₂, CH₄ en N₂O zijn in deze analyse met hun relatieve weegfactoren (respectievelijk 1, 25 en 298) gebruikt. De eindresultaten zijn vermeld in CO₂-equivalenten. Indirecte emissies, bijvoorbeeld veroorzaakt door veranderend landgebruik, zijn in deze analyse niet meegenomen.

De resultaten laten zien dat Nederlands aardgas en diesel wat betreft WTT emissies met elkaar vergelijkbaar zijn. Voor buitenlands aardgas (gasvormig getransporteerd uit Rusland over 4000km of als LNG uit Qatar) zijn de WTT emissies grofweg een factor twee hoger dan voor Nederlands gas en standaard diesel. Of het gas als LNG uit Qatar komt of gasvormig uit Rusland is van mindere invloed dan de transportafstand. De resultaten zijn grafisch weergegeven in Figuur 1. Naast de WTT emissies zijn in deze figuur ook de TTW (Tank-To-Wheel, de emissies die ontstaan bij het verbruiken van de brandstof) en de WTW (Well-To-Wheel, de som van de WTT en TTW emissies) weergegeven om een indicatie te krijgen van het totaalbeeld over de hele keten¹.

¹ Hierbij moet opgemerkt worden dat in de figuur enkel de emissies die vrijkomen bij de verbranding van 1MJ brandstof zijn opgenomen. Om een uitspraak te kunnen doen over de emissies per gereden kilometer dient dus ook het energieverbruik van het voertuig (bijvoorbeeld in MJ/km) bekend te zijn. Deze informatie varieert per voertuigsoort, merk en gebruik.



Figuur 1: Broeikasgasemissies van verschillende brandstoffen voor de Nederlandse situatie in 2010

Biogas uit covergisting van maïs en mest levert ten opzichte van Nederlands aardgas en standaard diesel een WTT winst op van ongeveer 15 g/MJ. Deze winst is minder dan vooraf werd verondersteld en wat uit andere publicaties bekend is, onder andere [JRC 2007]. De oorzaak hiervan ligt voornamelijk in methaanemissies t.g.v. lekkages in verschillende delen van de keten.

Als reststromen gebruikt worden om biogas te produceren en hierbij voldoende aandacht geschonken wordt aan het voorkomen van methaan (lekkage)emissies in de keten kunnen de WTT emissies verder dalen.

De evolutie van de broeikasgasemissies tussen 2010 en 2020 verandert zeer waarschijnlijk weinig aan de onderlinge verhoudingen tussen de verschillende brandstoffen. Als nieuwe technologie (bijvoorbeeld op het gebied van biogasproductie) geïntroduceerd wordt, kan dit wel gevolgen hebben op deze onderlinge verhoudingen.

De volgende aanbevelingen kunnen worden gemaakt:

- Update deze studie periodiek (jaarlijks of tweejaarlijks) om de evolutie van broeikasgasemissies door brandstofproductie te volgen. Een vergelijkbare aanpak zoals gebruikt wordt voor het vaststellen van de emissiefactoren (voor onder andere fijnstof en NO_x) is hierbij aan te bevelen.

- Neem in een volgende studie (of een update, zie hierboven) ook andere wegtransport brandstoffen mee om een vollediger beeld te kunnen schetsen van de beschikbare opties. Voorbeelden hiervan zijn:
 - Benzine
 - Synthetische brandstoffen (waaronder GTL, een synthetische dieselbrandstof gemaakt uit aardgas)
 - E85, een mengsel van grofweg 15% benzine en 85% (bio)ethanol
 - Biogas uit de vergisting van enkel mest
 - Liquified Biogas (LBG)
 - LPG
 - Elektriciteit als “brandstof” voor elektrische voertuigen, al moet hierbij opgemerkt worden dat de met elektriciteitsproductie gepaard gaande broeikasgasemissie reeds jaarlijks berekend wordt. CE delft heeft daarnaast in 2010 een overzicht gemaakt van de te verwachten broeikasgasemissies van verschillende bronnen van hernieuwbare elektriciteit.
- Koppel CNG stations zo veel mogelijk aan het hogedruk gasnet. Dit vermindert de broeikasgasemissies significant.
- Probeer de methaanemissie van tijdelijk opgeslagen cosubstraat (bijvoorbeeld maïs) zo veel mogelijk te reduceren.

Summary

Road transport accounts for a significant part of the total greenhouse gas emissions in the Netherlands. Greenhouse gases are released into the atmosphere not only when fuel is burnt, but also as a result of the fuel production process. This report contains the results of a project carried out by TNO in 2010 aimed at quantifying the greenhouse gas emissions associated with the production of a number of commonly used road transport fuels specific to the Dutch situation. These emissions are commonly called the Well-To-Tank (WTT) greenhouse gas emissions. Knowing what these WTT emissions are is prerequisite to making a well-founded decision for or against using a certain fuel.

The main assessment is based on the current (2010) situation. Besides this, an indication of the future development of these emissions until 2020 is also included.

The following fuels are included in this report:

- 1) Standard diesel fuel.
- 2) Compressed natural gas from Dutch wells
- 3) Compressed natural gas from Russian wells
- 4) Compressed natural gas made from LNG imported from Qatar
- 5) Compressed biogas from anaerobic digestion of maize and manure
- 6) Compressed biogas from the anaerobic digestion of organic household waste or slaughterhouse waste.

The calculations were carried out using SIMAPRO, a software package commonly used for calculating lifecycle emissions. Wherever possible, process data relevant to the Dutch situation has been used. Indirect emissions (as caused by land use change, for instance) are not included.

The results show that Dutch natural gas and standard diesel fuel have comparable WTT emissions. If the natural gas is sourced from outside the Netherlands, the WTT emissions are roughly doubled. The key factor in this is the transport distance.

Biogas from anaerobic digestion of maize and manure has lower WTT emissions than Dutch natural gas by some 15 g/MJ. This benefit is lower than expected and lower than published in other studies, for example [JRC 2007]. This is primarily caused by the emission of methane throughout the fuel production process.

If municipal waste or slaughterhouse waste is used to produce biogas, the WTT emissions can drop further if sufficient attention is paid to methane emissions.

From now until 2020, the WTT emissions of the fuels included in this study are expected to remain relatively constant. If new technology is introduced (for instance the anaerobic digestion of manure without maize), this can change.

The following recommendations can be made:

- Try to update this study on a regular (annual) basis to follow the evolution of greenhouse gas emissions related to transport fuel production
- Include other fuels in a follow-up study. Examples are:
 - Petrol
 - Synthetic fuels such as GTL

- E85 (a mixture of ~15% petrol and ~ 85% (bio) ethanol)
 - Biogas from anaerobic digestion of manure without maize
 - Liquified Biogas (LBG)
 - LPG
 - Electricity as “fuel” for electric vehicles.
- Couple CNG filling stations to the high pressure natural gas grid wherever possible. This will significantly reduce GHG emissions from gas compression.
- Try to avoid as much of the methane emissions from co-digestion material in storage.

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	8
1.1	Context.....	8
1.2	Doelstellingen	8
1.3	Leeswijzer.....	9
2	Methodiek.....	10
3	Inventarisatie van bestaande WTT analyses	13
3.1	Inleiding	13
3.2	Geïnventariseerde studies	13
3.3	Overzicht van WTT emissies uit de studies.....	15
4	Beschrijving, becijfering en berekening van ketens	19
4.1	Aardgas uit Nederland	19
4.2	Aardgas uit Rusland of Midden Oosten.....	23
4.3	LNG uit Midden Oosten	25
4.4	Biogas uit natte biomassa (mest en maïs) I, 50/50.....	27
4.5	Biogas uit natte biomassa (mest en maïs) II, 75/25	31
4.6	Additionele ketenemissie-inschatting: biogas uit GFT en slachtafval	31
4.7	Standaard EN590 dieselbrandstof.....	33
4.8	Totaaloverzicht kwantitatieve WTT-analyses	39
5	Semi-kwantitatieve toekomstanalyse	41
5.1	Mogelijke toekomstige veranderingen in Nederland	41
5.2	Implicaties van mogelijke veranderingen voor de emissies per keten	42
6	Conclusies & aanbevelingen	44
7	Ondertekening.....	46
	Afkorting	47
	Referenties	48

1 Inleiding

1.1 Context

Duurzaamheid wordt een steeds belangrijker criterium bij het kiezen tussen verschillende brandstoffen voor voertuigen en voertuigvloten. Door de toenemende diversiteit in brandstoffen wordt het steeds moeilijker om de duurzaamheidsaspecten van de diverse concepten objectief met elkaar te vergelijken. Om een gefundeerde keuze te kunnen maken is er behoefte aan een objectieve analyse van de broeikasgasemissies van verschillende brandstofconcepten die op de markt gebracht worden.

Het doel van dit onderzoek is het vergelijken van de duurzaamheid van een aantal transportbrandstoffen aan de hand van de broeikasgasemissies die tijdens de productie en transport van die brandstoffen vrijkomen. Deze emissies worden ook wel de “Well-to-tank” (WTT) emissies genoemd en betreffen de winning van primaire energiedragers of de productie van grondstoffen (bijv. biomassa) en de productie van de brandstof uit de primaire energiedrager(s) / grondstoffen. Ook alle vormen van transport en energieverliezen voordat de brandstof in de tank van het voertuig zit worden meegerekend. De WTT broeikasgasemissies worden in principe niet beïnvloed worden door de gebruiker. Het “Tank-to-wheel” (TTW) gedeelte gaat over het gebruik van de brandstof in een bepaald voertuig. Dit deel wordt in deze studie niet meegenomen. Ook eventuele indirecte emissies, bijvoorbeeld veroorzaakt door veranderend landgebruik, zijn in deze analyse niet meegenomen.

Op basis van deze informatie, gekoppeld met de al bekende broeikasgasemissies die vrijkomen bij het gebruik van het voertuig, kunnen de broeikasgasemissies van verschillende brandstoffen op een juiste manier met elkaar vergeleken worden. Naast een vergelijking van de broeikasgasemissies voor de huidige (2010) situatie is een vooruitblik naar 2020 gemaakt waarin de belangrijkste te verwachten wijzigingen in de verschillende brandstofpaden geïdentificeerd zijn, samen met hun impact op de te verwachten Well-to-tank emissies.

1.2 Doelstellingen

Dit onderzoek heeft twee doelstellingen:

1. Een grondige kwantitatieve analyse van de huidige (2010) Well-to-tank broeikasgasemissies van aardgas, biogas en diesel voor gebruik als transportbrandstof in Nederland.
2. Een semikwantitatieve analyse van veranderingen die in de toekomst kunnen plaatsvinden en de uitkomst van de analyse zouden kunnen veranderen. Richtjaar voor deze analyse is 2020 (een aantal beleidsdoelstellingen zijn voor 2020 vastgesteld).

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2: Inventarisatie bestaande WTT analyses

Dit hoofdstuk bevat een korte beschrijving van een aantal relevante eerdere analyses. De bekendste en meest gerefereerde bron is de studie van Eucar, Concawe en het Joint Research Centre van de Europese Commissie [JRC 2007], recent voor het geval van aardgas samengevat en van commentaar voorzien door ECN [ECN 2008].

Hoofdstuk 3: De Nederlandse situatie en ketendefinitie

In dit hoofdstuk worden de ketens zoals deze in dit project gekozen zijn kort beschreven. Naast deze korte beschrijving wordt ook onderbouwd waarom juist voor deze ketens gekozen is.

Hoofdstuk 4: Beschrijving, becijfering en berekening van ketens

In dit hoofdstuk worden de ketens stap voor stap doorlopen en voorzien van relevante data. Daarbij wordt zoveel mogelijk gebruik gemaakt van gegevens die specifiek zijn voor de Nederlandse situatie. Aanvullingen worden gehaald uit internationale literatuur en de EcoInvent database met Life Cycle Inventory (LCI)-gegevens. Vervolgens worden de WTT-ketens doorgerekend.

Hoofdstuk 5: Semikwantitatieve toekomstanalyse

Toekomstige veranderingen in de energievoorziening kunnen zorgen voor veranderingen in de (verhouding tussen de) uitkomsten van de WTT analyse van broeikasgasemissies van de onderzochte brandstoffen. Daarom is een projectie voor de toekomst (2020) gemaakt. Deze projectie is gebaseerd op de in deel 1 berekende WTT emissies, waarbij de relevante parameters voor de berekeningen aangepast zullen worden aan de situatie zoals de in Nederland in 2020 verwacht wordt. Het rapport beschrijft de belangrijkste veranderingen die verwacht worden in de toekomst.

2 Methodiek

Om de broeikasgasemissies van de verschillende transportbrandstoffen door te rekenen is een aantal ketens specifiek voor de Nederlandse situatie gedefinieerd. Deze ketens zijn vervolgens met het softwarepakket SIMAPRO² doorgerekend. De projectie naar 2020 is gebaseerd op de resultaten voor de huidige situatie. Hierbij moet wel aangetekend worden dat de resultaten voor 2020 als indicatief beschouwd moeten worden.

De in deze studie opgenomen brandstoffen zijn:

- 1) Standaard dieselbrandstof
- 2) Gecomprimeerd aardgas uit Nederlandse bron
- 3) Gecomprimeerd aardgas uit Russische bron
- 4) Gecomprimeerd aardgas gemaakt van uit Qatar geïmporteerd LNG
- 5) Gecomprimeerd biogas uit covergisting van mest en maïs
- 6) Biogas uit restafvalstromen (groente-, tuin- en fruit- en slachtafval)

Deze brandstoffen zijn gekozen om de volgende redenen:

- 1) Standaard dieselbrandstof: Dit is de referentiebrandstof voor veel voertuigen. Het merendeel van alle commercieel ingezette voertuigen maakt gebruik van diesel als brandstof.
- 2) Gecomprimeerd aardgas uit Nederlandse bron: Gecomprimeerd aardgas (CNG) is een alternatief voor dieselbrandstof en benzine. Een groeiend aantal commerciële en personenvoertuigen is verkrijgbaar met een aardgasmotor. Afhankelijk van een aantal factoren (gebruikte motortechnologie, inzet, etc.) kan door de inzet van aardgas als transportbrandstof een significant luchtkwaliteitsvoordeel behaald worden. Het betreft hier alleen aardgas uit Nederlandse bodem en dus niet de gemiddelde gridmix die gedeeltelijk uit geïmporteerd aardgas bestaat.
- 3) Gecomprimeerd aardgas uit Russische bron: Gezien het feit dat al het huidige in Nederland geproduceerde aardgas bestemd is voor gebruik in al bestaande toepassingen, zal aan een additionele vraag naar aardgas voldaan moeten worden door of het opschalen van de Nederlandse productie of door het importeren van aardgas uit het buitenland. In deze studie is als bron van importgas gekozen voor Rusland, waarbij onderscheid is gemaakt tussen twee verschillende transportafstanden: 4000 en 7000 kilometer.
- 4) Gecomprimeerd aardgas gemaakt van uit Qatar geïmporteerd LNG: LNG is opgenomen in deze studie omdat het een alternatief kan zijn voor de import van aardgas via pijpleidingen. Er wordt in deze studie in eerste instantie uitgegaan van een scenario waarin het LNG centraal vergast en via het bestaande aardgasnetwerk gedistribueerd wordt.

² SIMAPRO is een softwarepakket wat wereldwijd ingezet wordt om LCA (Life Cycle Analyses) uit te voeren. De software is voor het eerst uitgebracht in 1990 en werkt volgens de aanbevelingen van ISO 14040. SIMAPRO wordt op de markt gebracht door Pre Consultants. Zie www.pre.nl/simapro voor meer informatie.

- 5) Gecomprimeerd biogas uit covergisting van mest en maïs: Biogas kan gebruikt worden als vervanging voor aardgas in aardgasvoertuigen en kan gemaakt worden uit verschillende bronnen. In deze studie is gekozen voor biogas uit de covergisting van mest en maïs, daar dit de in Nederland meest voorkomende manier van biogasproductie is³. Om het een en ander overzichtelijk te houden is er gekozen voor vergisting van enkel mest en maïs zonder toevoeging van andere producten (bijvoorbeeld glycerine wat als restproduct bij biodieselproductie ontstaat). Net als bij LNG is er van uit gegaan dat het biogas ingevoerd wordt in het bestaande aardgasnetwerk en zo gedistribueerd wordt.

De volgende broeikasgasemissies zijn meegenomen in deze studie

- CO₂ (koolstofdioxide)
- CH₄ (methaan)
- N₂O (distikstofoxide)

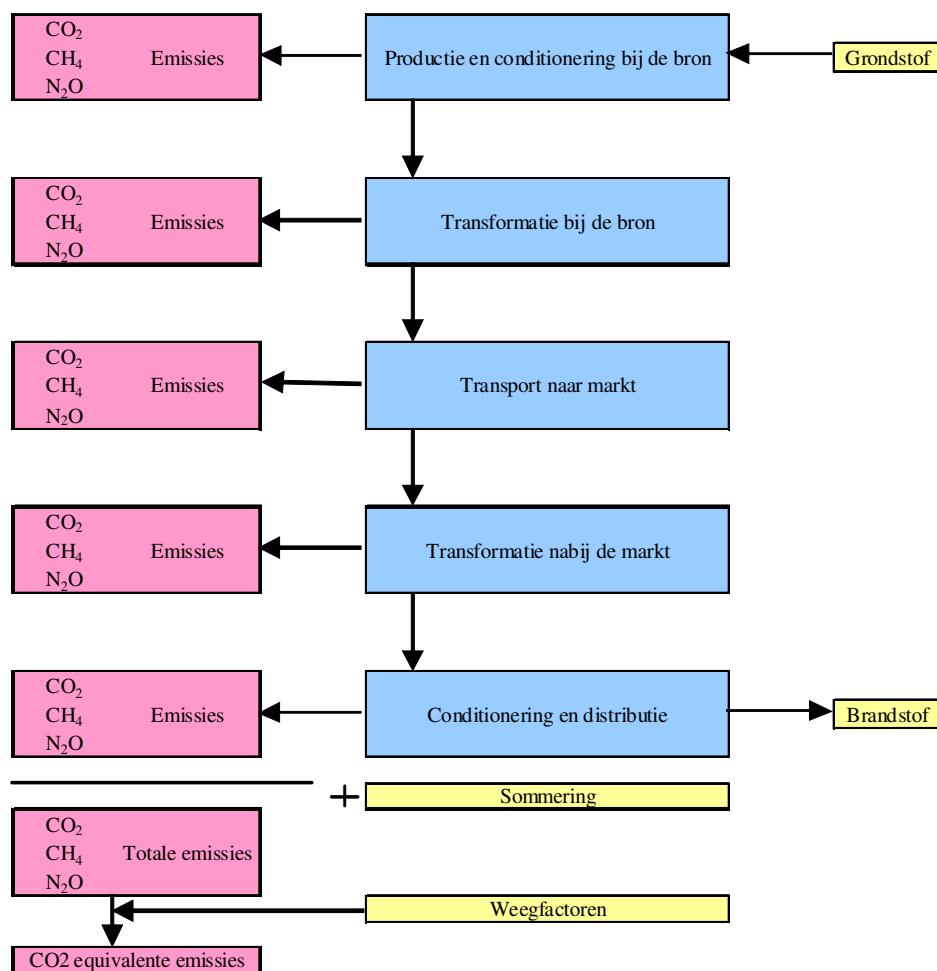
Dit zijn de voor klimaatverandering meest relevante emissies die ontstaan tijdens de productie van verschillende transportbrandstoffen. Componenten die een rol spelen in de lokale luchtkwaliteit (NO_x, PM, CO en HC) worden in deze studie niet meegenomen. Voor CH₄ en N₂O zijn als weegfactoren respectievelijk 25 en 298 gebruikt. Dit wil zeggen dat er van uit is gegaan dat 1 kg CH₄ in de atmosfeer eenzelfde impact heeft op de verandering van het klimaat als 25 kg CO₂ en 1 kg N₂O eenzelfde impact als 298 kg CO₂. Deze weegfactoren zijn gelijk aan de door het IPCC gebruikte weegfactoren. [IPCC2007] Door gebruik te maken van deze weegfactoren is voor iedere brandstof een “CO₂-equivalente emissie” berekend, gebruikmakend van de volgende formule:

$$CO_{2eq} = CO_2 \text{ emissie} + 25 * CH_4 \text{ emissie} + 298 * N_2O \text{ emissie}.$$

Alle emissies zijn berekend per megajoule energie-inhoud (onderste verbrandingswaarde) van de transportbrandstof, waardoor de eenheid van de CO₂ equivalente emissie gram/MJ wordt. Hierdoor kunnen verschillende brandstoffen met verschillende verbrandingswaarden goed met elkaar vergeleken worden.

De WTT broeikasgasemissies zijn berekend over een zogenoemde keten. De keten veronderstelt een bepaald winningproces, transport van grondstoffen, productieproces, transport van de brandstof, etc. Deze ketens zijn opgebouwd als aangegeven in figuur 1.

³ Een andere bron van groen gas is het vergisten van GFT-afval. De afgelopen tijd zijn een aantal projecten opgestart en er zijn er ook nog een aantal in de planning. Doordat het om grote projecten gaat lenen deze zich goed voor koppeling aan het aardgasnet. Bij biogas uit co-vergisting van mest zal eerst een biogasnet aangelegd moeten worden, waarvoor bijvoorbeeld in Friesland plannen zijn. Hier is gekozen voor de co-vergistingsoptie. De huidige biogas productie uit co-vergisting ligt al op het dubbele van het potentieel van GFT-vergisting.



Figuur 2: verschillende stappen in de WTT keten.

Per processtap zijn de CO₂, CH₄ en N₂O emissies bepaald, waarna deze voor de gehele keten opgeteld worden tot een totale Well To Tank emissie in CO₂ equivalenten. In de ketens waar biomassa een rol speelt is aangenomen dat de biomassa zelf CO₂ neutraal is. Vanzelfsprekend zijn de emissies gerelateerd aan het verwerken van de biomassa (telen, oogsten, transporteren, etc.) wel meegenomen in de analyse.

Voor de analyse is gebruik gemaakt van SimaPro, een van de meest gebruikte softwarepakketten voor het uitvoeren van LCA's (Life Cycle Analyses). In dit project is gebruik gemaakt van de in SimaPro aanwezige database (Ecoinvent), waar mogelijk aangevuld met voor de Nederlandse situatie specifieke informatie.

3 Inventarisatie van bestaande WTT analyses

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van eerdere studies naar WTT analyses van brandstoffen die internationaal zijn gepubliceerd. Deze dienen als benchmark en ter vergelijking met de WTT analyse die in deze studie gedaan wordt. De bekendste en meest gerefereerde bron is de studie van Eucar, Concawe en het Joint Research Centre van de Europese Commissie [JRC 2007], recent voor het geval van aardgas samengevat en van commentaar voorzien door ECN [ECN 2008]. In dit hoofdstuk wordt gekeken naar de methode die deze studie heeft gebruikt. Er wordt gekeken of de methode aangepast dient te worden voor dit onderzoek of er getallen zijn die wel overgenomen kunnen worden en waar de aanpassingen plaats moeten vinden. Daarnaast zijn andere relevante recente studies verzameld en geanalyseerd.

3.2 Geïntervieweerde studies

3.2.1 JRC rapport

In het JRC rapport is gewerkt volgens een methode die (in het WTT gedeelte) uitgaat van de benodigde energie en geëmitteerde broeikasgassen voor de productie van 1 megajoule brandstof. De productie van de verschillende brandstoffen is in een aantal verschillende stappen verdeeld:

- 1) Productie en conditionering bij de bron
- 2) Bewerking bij de bron
- 3) Transport naar de Europese Unie
- 4) Transport in de Europese unie
- 5) Conditionering en distributie

Vervolgens zijn voor al deze stappen de kosten, broeikasgasemissies en het energieverbruik bepaald. Dit is gedaan op basis van de TES (Transport Energy Strategy partnership) database, een eerder voor General Motors door L-B systemtechniek uitgevoerde Well-to-Wheel analyse, aangevuld met beschikbare literatuur en expertkennis binnen het projectteam. In de GM 2002 studie is gebruik gemaakt van een database-gebaseerd rekensysteem vergelijkbaar met SimaPro.

De gebruikte GWP weegfactoren in dit rapport voor CO₂, CH₄ en N₂O zijn respectievelijk 1, 23 en 296, zoals deze gepubliceerd zijn in [IPCC 2001]. Later zijn deze factoren door het IPCC bijgesteld naar 1, 25 en 298 [IPCC 2007]

De productie van biobrandstoffen leidt ook tot productie van bijproducten. In dit rapport zijn het energieverbruik en de emissies primair toegerekend aan het primaire product (in dit geval de biobrandstof). Het energieverbruik en de emissies die gepaard gaan met de normale productie van een bijproduct worden in mindering gebracht op het energieverbruik en de emissies van het primaire product.

Het rapport is zeer divers en behandelt een groot aantal transitiepaden van verschillende brandstoffen. De bijbehorende invoergegevens van de emissie berekeningen zijn uit vele bronnen betrokken. Het resultaat is een krachtig en lijvig rapport. Een toelichting

over de gemaakte keuzes en de aannames is zeer beperkt of ontbreekt echter. Hierdoor is een vergelijk met andere studies slechts beperkt mogelijk.

3.2.2 *Environment Agency, 2009*

In de publicatie van het Environment Agency [EA2009], een Britse overheidsinstantie, wordt gebruik gemaakt van de Biomass Environmental Assessment Tool Version 2 (BEAT). Met dit programma wordt de CO₂, CH₄ en N₂O emissie berekend over de gehele levenscyclus van biobrandstoffen, beginnend bij het verbouwen van het gewas, de verwerking en het transport van de brandstof, de verbranding en de afvoer van het afval.

Als hulpmiddel wordt voorgesteld om grenswaarden aan het vervangingspercentage van fossiele brandstof te hanteren bij het beantwoorden van de vraag of een bepaalde biobrandstof aanvaardbaar is als vervangende brandstof. In dit rapport wordt er op gewezen dat de broeikasgasemissies die vrijkomen bij het gebruik van biomassa als energiebron meestal lager zijn dan bij het gebruik van fossiele brandstoffen. De manier waarop een biogas geproduceerd wordt, heeft echter een zeer grote invloed op de emissies. Bij sommige biogassen is er zelfs sprake van een toename van broeikasgasemissies t.o.v. fossiel aardgas. Het rapport geeft alleen resultaten van WTW-emissies waardoor een vergelijk met andere rapporten niet mogelijk is.

3.2.3 *TIAX, 2007*

Het TIAX rapport [TIAX 2007] is een publicatie, die opgesteld is voor de California Energy Commission om het gebruik van alternatieve brandstoffen te vergroten. Er zijn niet alleen broeikasgassen vergeleken. Het rapport heeft als basis het GREET⁴ model.

3.2.4 *National Society for Clean Air and Environment Protection, 2006*

Een rapport van de NSCA [NSCA 2006] geeft een goed overzicht van de aspecten die spelen bij biogas als automotieve brandstof. Er is echter zeer beknopte informatie over TTW en WTW emissies voor bussen en zware voertuigen en kan daarom niet als aanvulling gebruikt worden op de WTT analyse. Ook wordt er geen enkele referentie genoemd.

3.2.5 *Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, 2006*

ADEME [ADEME 2006] heeft in een onderzoek drie studies vergeleken, waaronder het JRC rapport [JRC 2007]. Er zijn slechts vloeibare transportbrandstoffen met elkaar vergeleken. De systeemgrenzen voor de drie studies zijn gelijk en ze gebruiken alle drie dezelfde eenheid namelijk afgifte van 1 MJ eindproduct in de brandstoftank van het voertuig. Ook het raffinageproces is gebaseerd op dezelfde parameters. De berekeningen van GHG emissie gebeurt in alle studies volgens de IPCC (100 jaar) methodologie.

De berekening van het energieverbruik is niet in alle drie de studies hetzelfde. Twee van de drie studies gaan uit van de totale energie die benodigd is voor de productie van brandstoffen. Ze berekenen de toegevoerde energie en concluderen vervolgens, dat alle energie die niet beschikbaar is in het eindproduct, is verloren. Ook wordt in deze studies geen rekening gehouden met bijproducten.

Bij de andere studie wordt uitsluitend de fossiele energie meegenomen die verbruikt is bij het produceren van de brandstof. Er wordt dus geen rekening gehouden met toevoer

⁴ GREET is ontwikkeld door Argonne National Laboratory

van eventuele duurzame energie. In deze studie wordt wel rekening gehouden met bijproducten.

3.2.6 *Institute of Transportation Studies, University of California, 2006*

In een studie uitgevoerd door het Institute of transportation Studies van de universiteit van California [DELUCHI 2006] wordt er een aantal fundamentele fouten gemaakt bij de huidige LCA's voor biobrandstoffen. Deluchi gebruikt CEF's (CO₂ –equivalente broeikasgasemissies) in plaats van de GWP's die door het IPPC gehanteerd worden. Met de CEF's wordt wel rekening met de veranderingen ten gevolge van ander bodemgebruik bij het verbouwen van biobrandstoffen. Voor CH₄ wordt de CEF waarde dan 18,8 in plaats van de GWP van 23 en voor N₂O 251 in plaats 296.

3.2.7 *CE Delft, 2010*

CE Delft [CE 2007] heeft een studie uitgevoerd waarin de kosten en milieueffecten van aardgas als brandstof voor wegtransport en de scheepvaart wordt onderzocht. CE gebruikt SIMAPRO voor het berekenen van de broeikasgasemissies. Dit is een commercieel programma dat gegevens van een studie van CE Delft voor de International Gas Union en EcoInvent gebruikt. EcoInvent is een Zwitserse database die gegevens over biobrandstoffen van onder andere de Technische Hogeschool in Zürich bevat.

3.3 Overzicht van WTT emissies uit de studies

In Tabel 1 t/m Tabel 6 zijn de WTT-emissies van verschillende bronnen weergegeven. Sommige bronnen bevatten geen volledige rapportage van deelaspecten van de berekeningen waardoor een verklaring voor de gevonden verschillen niet is vast te stellen.

3.3.1 *Nederlands aardgas*

In Tabel 1 zijn de WTT-emissies van Nederlands aardgas uit de diverse studies weergegeven.

Tabel 1: WTT emissies Nederlands aardgas (transportafstand 200 km)

Bron	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total
	[g/MJ]	[g/MJ]	[g/MJ]	[g CO ₂ eq./MJ]
EC-JRC	4,5	0,11	0,000	7,0*
TIAX	-	-	-	9*
CE	-	-	-	2
ECN	4,5	0,02	0,0003	6,0

* gecorrigeerd voor transportafstand

3.3.2 *Russisch aardgas*

In Tabel 2 zijn de WTT-emissies van Russisch aardgas weergegeven dat over 4000 km is getransporteerd.

Tabel 2: WTT emissies Russisch aardgas (transportafstand 4000 km)

Bron	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total
	[g/MJ]	[g/MJ]	[g/MJ]	[g CO ₂ eq./MJ]
EC-JRC	9,20	0,20	0,0000	14,5
ECN	9,20	0,20	0,0000	14,0

In Tabel 3 zijn de WTT-emissies van Russisch aardgas weergegeven dat over 7000 km is getransporteerd.

Tabel 3: WTT emissies Russisch aardgas (transportafstand 7000 km)

Bron	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total
	[g/MJ]	[g/MJ]	[g/MJ]	[g CO ₂ eq./MJ]
EC-JRC	14,7	0,29	0,001	22,3
ECN	14,7	0,29	0,001	21,7

De verschillen in totale CO₂ equivalente emissie zijn terug te voeren op afrondingsverschillen.

3.3.3 LNG

In Tabel 4 zijn de WTT-emissies van LNG weergegeven dat over 10000 km is getransporteerd.

Tabel 4: WTT emissies LNG (transportafstand 10.000 km), gasvormige distributie

Bron	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total
	[g/MJ]	[g/MJ]	[g/MJ]	[g CO ₂ eq./MJ]
EC-JRC	16,5	0,14	0,000	20,2
TIAX	-	-	-	20
CE	-	-	-	14
ECN	16,5	0,14	0,000	19,9

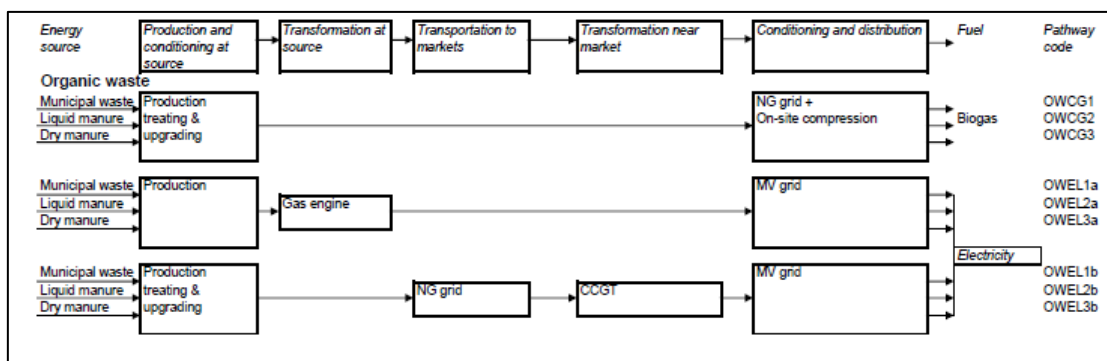
3.3.4 Biogas

De verscheidenheid aan biogas installaties, processen en grondstoffen is groot. Er kan sprake zijn van vergisting van mest of van biomassa (bijv. snijmaïs of GFT-afval), een combinatie van deze producten of ieder apart. In Nederland worden tot nu toe biogasinstallaties vrijwel alleen toegepast voor opwekking van elektriciteit in WKK-installaties. Dit biogas wordt meestal op beperkte schaal gezuiverd. Voor het opwerken van biogas naar aardgaskwaliteit zijn meerdere behandelingen noodzakelijk en is een kostbare installatie nodig. Verder moet het opgewerkte biogas in het aardgasnet worden gepompt. Dit laatste gebeurt inmiddels op enkele plaatsen in Nederland.

In het JRC [Concawe 2007] rapport wordt het onderstaande traject gehanteerd voor het verwerken van organisch afval tot bijvoorbeeld biogas. Het pad voor de omzetting naar elektriciteit is voor dit rapport buiten beschouwing gelaten.

De stappen in de keten zijn (zie JRC WTT Appendix 2):

- Transport van mest
- Productie, behandeling en opwerken
- Distributie via de pijplijn
- Vulstation



Figuur 3: Biogas transitiepad (bron [Concawe 2007])

De afkortingen in Figuur 3 geven de verschillende paden aan die door JRC zijn doorgerekend. De afkortingen staan aan de rechterzijde in de bovenstaande figuur vermeld. Bij OWCG1 wordt huishoudelijk afval verwerkt tot biogas. Dit pad wordt verder niet in de beschouwing meegenomen. Voor OWCG2 wordt vloeibare mest als uitgangspunt genomen. De uitgangspunten zijn:

- Er is een medium size biogasinstallatie, waarbij de mest op de verschillende boerderijen wordt verzameld en getransporteerd naar de installatie over een afstand van 10 km.
- De biogasinstallatie heeft afhankelijk van de grondstof verschillende hoeveelheden warmte en elektriciteit nodig (WKK installatie).
- Er is een vulstation, waarbij het gas lokaal op druk gebracht wordt.
- Het digestaat dat overblijft na vergisting bevat nog steeds de mineralen en stikstof uit de oorspronkelijke grondstof en kan dus als mest benut worden.
- Het grootste voordeel wordt bereikt, doordat de mest niet meer op de traditionele wijze wordt gebruikt en daardoor de bijbehorende methaanemissies vermeden worden.

JRC wordt veel geciteerd en toont gunstige emissiewaarden voor vergisting van 100% natte mest. Dit wordt hoofdzakelijk gerealiseerd door de vermeden methaanemissies die leiden tot een CO₂-credit van 94,7 g CO₂eq/MJ. Deze vermeden methaanemissies zijn 15% van methaanproductie in geval van vergisting.

Daarnaast wordt een bijdrage van -55 g CO₂eq/MJ toegerekend voor de verbranding van “renewable combustion CO₂” omdat het digestaat een beter product is dan gewone mest (snellere stikstofopname door gewassen). De broeikasgassen die vrijkomen bij de productie van de niet gebruikte kunstmest worden in dit geval verrekend met de WTT-emissies.

In Tabel 5 zijn WTT-emissies van biogas uit diverse bronnen weergegeven.

Tabel 5: WTT emissies biogas

Bron	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total
	[g/MJ]	[g/MJ]	[g/MJ]	[g CO ₂ eq./MJ]
EC-JRC dry 100/0	-31,5	0,48	-0,005	-31,5
ECN dry 100/0	26,3	0,46	-0,0006	35,2
EC-JRC wet 0/100	0,5	-3,39	-0,004	- 140,6
ECN wet 0/100	21,0	-3,39	-0,004	-58,3
CE	-	-	-	13

3.3.5 Diesel

In Tabel 6 zijn de WTT-emissies van dieselbrandstof weergegeven. In Europa wordt diesel over relatief korte afstanden getransporteerd (100 – 500 km) en de berekeningen van JRC, ECN en CE komen goed overeen. Het Amerikaanse TIAX rekent met een transportafstand van 9800 mijl (~16.000 km) voor ruwe olie. In de andere studies wordt meestal gerekend met een transportafstand van 8000km. Dientengevolge komt de TIAX studie op een hogere WTT-emissie van 17 g CO₂eq/MJ uit.

Tabel 6: WTT emissies diesel

Bron	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total
	[g/MJ]	[g/MJ]	[g/MJ]	[g CO ₂ eq./MJ]
EC-JRC	14,2	-	-	14,2
TIAX				17*
ECN	14,4	0,0	0,0	14,4
CE				14

* transportafstand 9800 miles

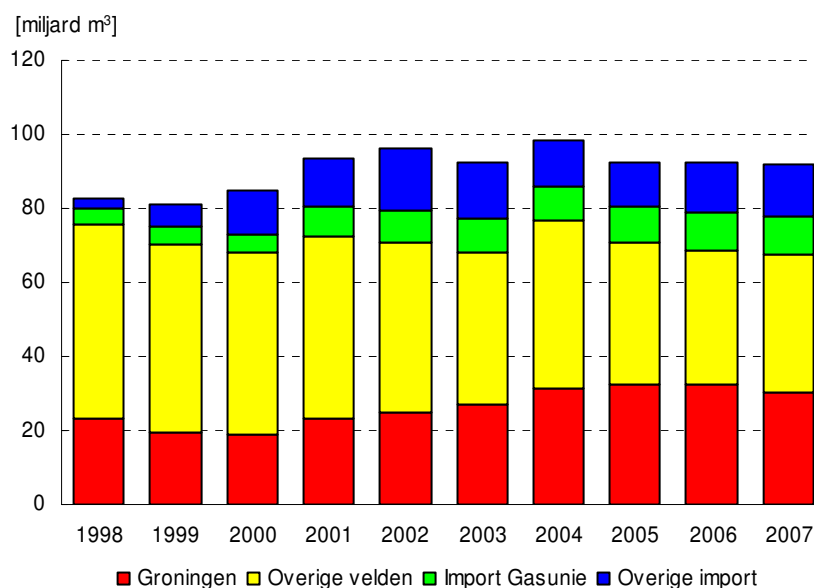
4 Beschrijving, becijfering en berekening van ketens

In dit hoofdstuk wordt uiteengezet hoe de verschillende productiepaden, dus de well-to-tankketens, lopen voor de 6 geselecteerde brandstoffen. Het betreft situaties die in Nederland van toepassing zijn. De resultaten zullen worden besproken en vergeleken met andere studies. De WTT emissies van aardgas zijn berekend met het softwarepakket SIMAPRO en de invoergegevens zijn betrokken van de Ecoinvent-database (versie 2.0) [EcoInvent].

4.1 Aardgas uit Nederland

In Nederland wordt aardgas grotendeels betrokken uit Nederlandse bodem en dit wordt zowel op land als op de Noordzee gewonnen. Het restant is afkomstig uit het buitenland en wordt via een hoge druk pijpleiding getransporteerd. In Figuur 4 is de herkomst van Nederlands aardgas weergegeven en hierin zijn twee trends waar te nemen:

- 1) Het aandeel buitenlands aardgas neemt in de loop van de jaren toe
- 2) Voor het aardgas dat in Nederland wordt gewonnen neemt het aandeel uit Groningen toe ten koste van de overige velden (Noordzee).



Figuur 4: Herkomst Nederlands aardgas (bron CBS)

In de berekening in dit rapport is enkel in Nederland geproduceerd aardgas meegenomen en geen geïmporteerd aardgas. De gebruikte aanname is dat 55% uit velden in de Noordzee wordt gewonnen en 45% in Groningen. De benodigde energie voor kompressie van aardgas in het tankstation is opgenomen in “Conditionering en distributie”. In de paragrafen 4.1.1 t/m 4.1.4 worden de verschillende stappen van de WTT-keten toegelicht.

4.1.1 Gaswinning

Gaswinning valt in de Concawe studie onder “Productie en conditionering bij de bron”. Voor de winning van aardgas verschilt de benodigde hoeveelheid energie en de geproduceerde emissies per bron. In Nederland wordt bijvoorbeeld aardgas zowel op land als op zee gewonnen.

Verder worden de volgende gasbehandelingen bij de winning uitgevoerd:

- Separatie. Aardgas bestaat gedeeltelijk uit zwaardere bestanddelen die relatief snel condenseren. Deze fracties moeten worden gescheiden van de lichtere fracties.

De gebruikte data komen gedeeltelijk uit de Ecoinvent database en gedeeltelijk uit de emissierapportage 2009 [ER2009].

4.1.2 Transformatie aan de bron

Gasbehandeling. In Nederland gebruiken we laagcalorisch aardgas, ongeveer 15% bestaat uit inerte componenten zoals CO₂ en N₂. Indien nodig wordt extra N₂ toegevoegd om aan de specificatie van laagcalorisch gas te voldoen. In deze studie is aangenomen dat het toevoegen van N₂ aan het ruwe aardgas CO₂ neutraal gebeurt. In werkelijkheid is dit niet het geval maar het is aannemelijk dat de invloed van deze stap op het eindresultaat te verwaarlozen (<2%) is.

4.1.3 Transport naar de markt

De gemiddelde gas transportafstand vanuit Groningen is 150 km en vanaf de Noordzee 250 km. De benodigde hoeveelheid energie en bijbehorende emissies zijn relatief gering.

4.1.4 Transformatie nabij de markt.

Vanwege de geringe transportafstanden in Nederland wordt het gas volledig behandeld bij de bron en vindt er geen behandeling of transformatie nabij de markt plaats.

4.1.5 Conditionering en distributie

De gasdistributiebedrijven verzorgen het laatste traject van het aardgas voordat het bij de gebruiker wordt aangeboden. De kwaliteit van dit distributienet en de staat van onderhoud evenals de onderhouds- en reparatieprocedures bepalen de emissies t.g.v. lekkage. Voor al het aangeboden aardgas dat in Nederland wordt verbruikt wordt één distributienet gebruikt. Het Nederlandse aardgasnet is kwalitatief goed. Tijdens onderhoudswerkzaamheden worden leidingen soms drukloos gemaakt en dit levert enige methaanemissie in de vrije lucht op. De CH₄ en N₂O emissies van dit distributienet zijn in de Nederlandse emissieregistratie opgenomen en bedragen jaarlijks 13537 en 0,04 ton bij een jaarlijkse levering van aardgas van 45835 miljoen m³. [ER2009].

4.1.6 Vullen aardgastank

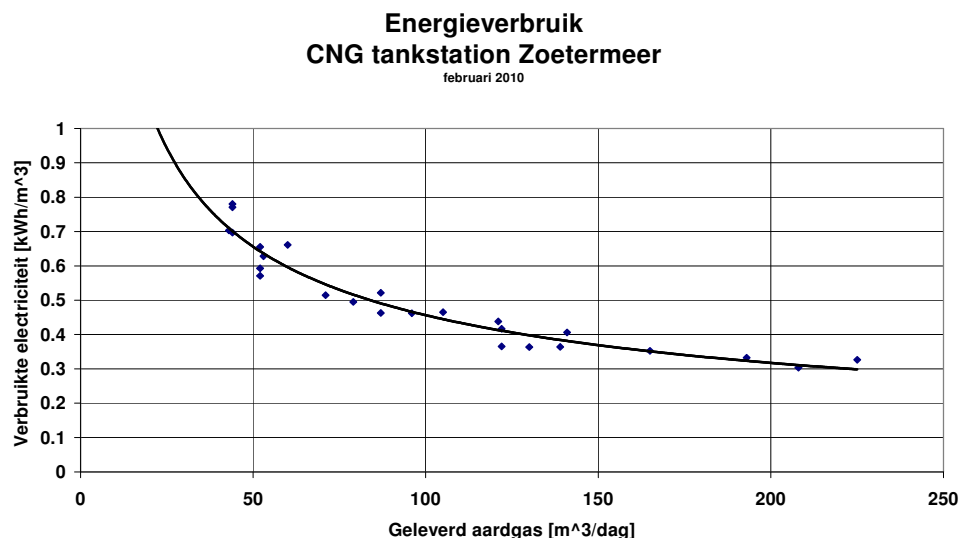
De benodigde hoeveelheid energie voor de kompressie van aardgas is substantieel en vormt verreweg het grootste deel van de benodigde WTT-energie. De compressor op het tankstation die het aardgas comprimeert, is aangesloten op het lokale aardgasnet dat een systeemdruk heeft van 3 of 8 bar en draait op elektriciteit. Deze compressor vult een aantal voorraadtanks tot een druk van 250-300 bar van waaruit de voertuigen worden gevuld tot 200 bar. Door dit drukverschil tussen de voorraadtanks en de voertuigtanks blijft de benodigde tijd voor het aftanken van een voertuig beperkt. In Figuur 5 is een praktijkvoorbeeld van een aardgas tankstation in februari 2010

weergegeven. In de grafiek wordt per dag de benodigde hoeveelheid energie voor kompressie van een bepaald aardgasvolume getoond. Uitgaande van een gemiddelde personen- of bestelwagen die 12-21 kg aardgas (14-25 m³) tankt (gemiddelde tankinhoud is 20 m³) tanken 2-12 voertuigen per dag op dit aardgas tankstation.

De grafiek laat zien dat bij een dagelijks getankte hoeveelheid van meer dan 150 m³ de benodigde hoeveelheid kompressie energie stabiliseert op 0,32 kWh/m³. Bij een dagelijkse afname van 50 m³ stijgt de benodigde hoeveelheid energie tot wel 0,60 – 0,70 kWh/m³. Dit verhoogde energieverbruik bij geringe afname is vermoedelijk te wijten aan de afkoeling (en de bijbehorende drukdaling) van het aardgas in de voorraad tanks van het tankstation. Het systeem zal de druk willen handhaven op een bepaalde druk en zal bij drukdaling de compressor inschakelen.

Voor de WTT berekeningen is een gekozen voor een benodigd energieverbruik van 0,054 MJel/MJ (0,49 kWh/m³). Dit is een middenwaarde voor dit tankstation. De bijbehorende CO₂ emissie is 9,7 g/MJ.

Op een drukke dag (> 10 voertuigen) zal het benodigde energieverbruik sterk dalen en het energieverbruik zal dalen tot een waarde van 0,32 kWh/m³. De WTT-emissies zullen een soortgelijke afname vertonen. Voor tankstations van stadsbussen die over het algemeen een hoge bezettingsgraad hebben zijn energieverbruiken van 0,035 MJel/MJ (0,32 kWh/m³) realistisch, de bijbehorende CO₂ emissie is dan lager en zou uitkomen op 6,3 g/MJ. Om de resultaten van deze studie algemeen (dus ook voor andere toepassingen dan stadsbussen) te kunnen gebruiken is voor de middenwaarde gekozen.

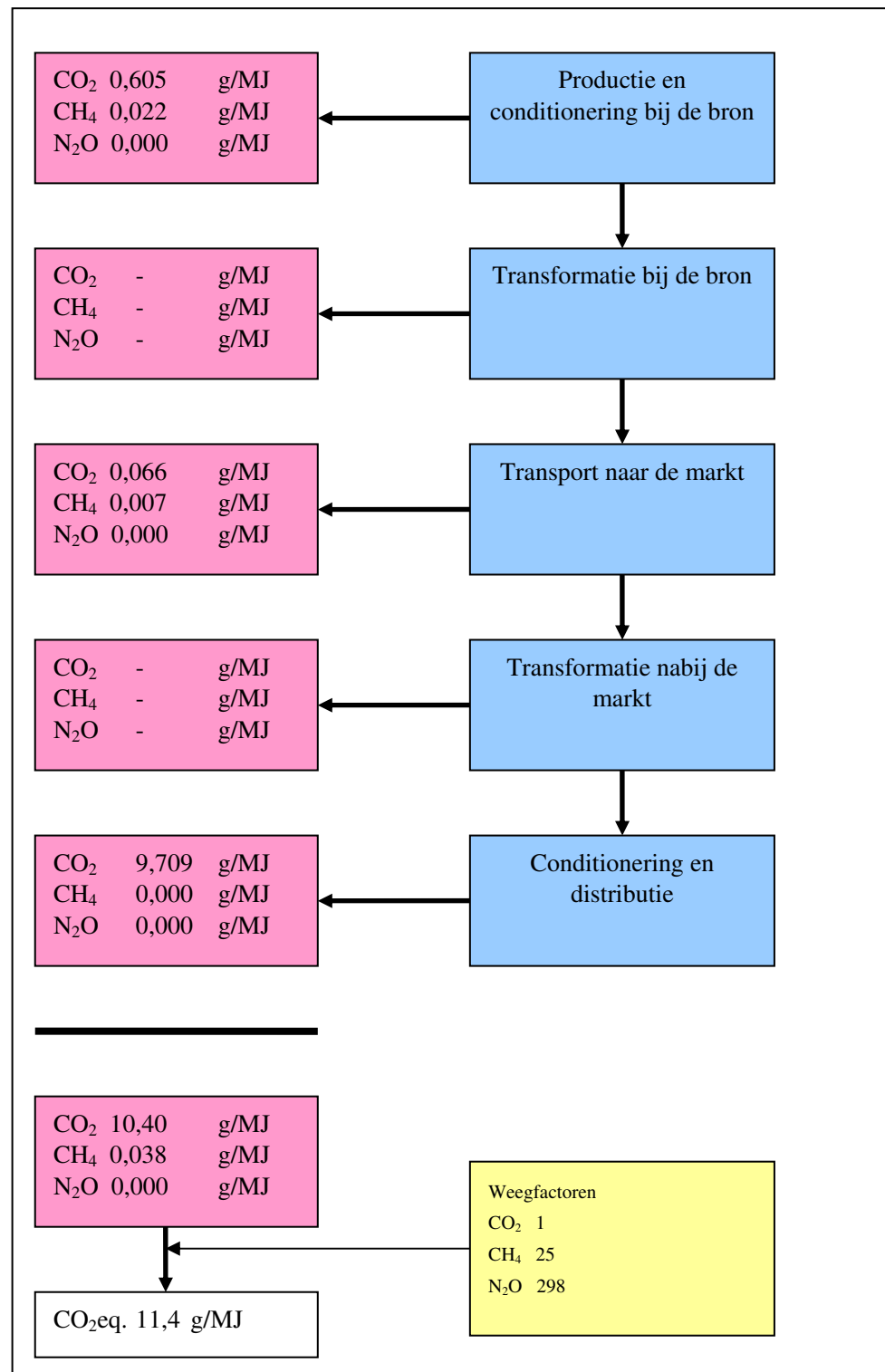


Figuur 5: Energieverbruik aardgascompressor tankstation (bron: CNG-net)

Uit de TNO-berekeningen hierboven blijkt dat het comprimeren van aardgas in het tankstation verreweg het grootste deel van de broeikasgasemissies veroorzaakt. Tevens blijkt dat deze post kan variëren omdat het compressor rendement op het tankstation zeer verschillend kan zijn.

Het hier berekende getal is hoger dan wat er over het algemeen in de literatuur gevonden wordt. De reden hiervoor is dat in dit project uitgegaan wordt van een werkelijk in de praktijk gemeten elektriciteitsverbruik. Overigens kan hier opgemerkt worden dat wanneer CNG stations gevoed worden vanuit het hogedruk aardgasnet (wat

opereert op een druk van tot 80 bar) de benodigde compressie-energie significant daalt. Het koppelen van CNG compressiestations aan dit hogedruk net is dus vanuit het perspectief van broeikasgasemissies zeker aan te bevelen.



Figuur 6: Schema van WTT-emissies Nederlands aardgas

4.2 Aardgas uit Rusland of Midden Oosten

Volgens IGU (International Gas Union) vormen de gasvoorraden in Rusland en het Midden Oosten 75% van de totale wereldreserves. Deze zullen vooral na 2020 nodig zijn om aan de vraag in West Europa te voldoen. De hierbij gekozen transportafstanden voor geïmporteerd aardgas dat per pijpleiding wordt getransporteerd zijn 4000 en 7000 km.

4.2.1 Gaswinning en conditionering aan de bron

De gaswinning en conditionering vallen in de categorie “Productie en conditionering bij de bron”. Voor de winning en conditionering van aardgas in Rusland en/of het Midden Oosten is data gebruikt uit de EcoInvent database. Voor de gaswinning zijn de totale broeikasgasemissies gelijk aan 5,4 g CO₂-eq/MJ.

4.2.2 Transport naar de markt

Het transport naar de markt is voor dit pad gesplitst in twee delen:

- 1) het transport over lange afstand naar Nederland
- 2) het transport binnen Nederland.

Voor het transport over lange afstand naar Nederland is gedeeltelijk data uit de EcoInvent database gebruikt, aangevuld met energieverbruikdata uit het GREET model van het Argonne National Laboratory [GREET 2009]. De totale broeikasgasemissies voor het transport over lange afstand naar Nederland zijn 15,4 g CO₂-eq/MJ. Hierin is de methaanlekage tijdens het transport meegenomen.

4.2.3 Transformatie nabij de markt.

Deze stap is overgenomen uit het Nederlands aardgas pad.

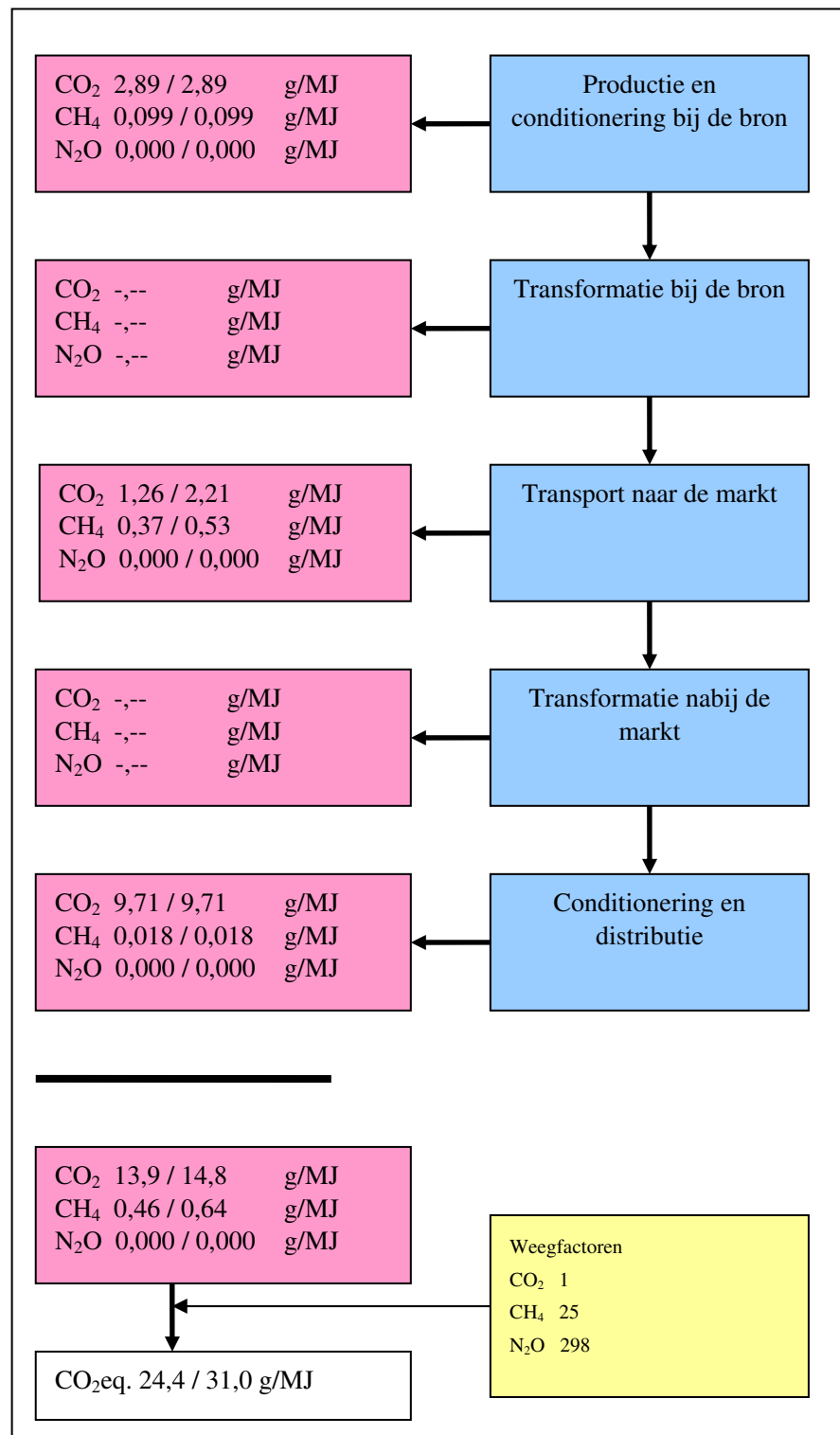
4.2.4 Conditionering en distributie

Deze stap is overgenomen uit het Nederlands aardgas pad.

4.2.5 Vullen aardgastank

Deze stap is overgenomen uit het Nederlands aardgas pad.

De bijbehorende WTT-emissies zijn weergegeven in Figuur 7. Uit de WTT-emissies uitgedrukt in CO₂-eq. blijkt dat 40-50% van de WTT-emissies van dit aardgas wordt veroorzaakt door lekkages tijdens transport.



Figuur 7: Schema van WTT-emissies Russisch aardgas met transportafstanden van 4000 / 7000 km

4.3 LNG uit Midden Oosten

In toenemende mate wordt aardgas als LNG (Liquefied Natural Gas) over lange afstanden per zeegaande tanker vervoerd. Hoewel op dit moment in Nederland nog geen geïmporteerd LNG gebruikt wordt⁵ is dit pad wel doorgerekend omdat het voor de toekomst een van de voor de hand liggende opties is en omdat op dit moment op de Maasvlakte door de Gasunie en Vopak een eerste LNG importterminal met een capaciteit van 12 miljard kubieke meter LNG gebouwd wordt (de zogenaamde Gate-terminal). De oplevering van deze terminal staat gepland voor 2011.

Het “LNG uit het Midden Oosten” pad is gedefinieerd als het per tanker importeren van LNG uit het midden oosten, waarna het LNG centraal verdampt wordt en ingevoerd in het Nederlandse aardgasnetwerk. Vanaf dat punt is dit pad gelijk aan het Nederlands aardgas pad.

4.3.1 Gaswinning, conditionering en transformatie aan de bron

De gaswinning en conditionering vallen in de categorie “Productie en conditionering bij de bron”. Voor de winning en conditionering van aardgas in het Midden Oosten zijn data gebruikt uit de EcoInvent database, aangevuld met data uit de IPCC guidelines [IPCC 2006]. In deze stap is ook het transformeren van het gewonnen aardgas in LNG opgenomen, gebruikmakend van data uit de Ecoinvent database. Voor de gaswinning en omzetting naar LNG zijn de totale broeikasgasemissies gelijk aan 11,2 g CO₂-eq/MJ.

4.3.2 Transport naar de markt

Het transport naar de markt bestaat voor dit pad uit het transport per zeegaande tanker naar Nederland vanuit Qatar met een tanker die draait op het vervoerde aardgas. Hierbij is uitgegaan van een energieverbruik van 0,105 tonkm/MJ. Deze waarde is berekend op basis van data uit de Ecoinvent database. Er is aangenomen dat het gasverbruik van de scheepsmotor voldoende groot is om te voorkomen dat LNG afgefakkeld moet worden.

4.3.3 Transformatie nabij de markt.

Deze stap bestaat uit het overslaan van het LNG vanuit het schip in een opslagterminal en het vergassen van het LNG. Aangenomen is dat het overslaan 0,106 kWh elektriciteit per megajoule kost [ECN 2008] en dat het vergassen energie- en CO₂ neutraal gebeurt door het gebruik van restwarmte. Bij de Gate terminal gaat restwarmte van een nabijgelegen EON centrale gebruikt worden.

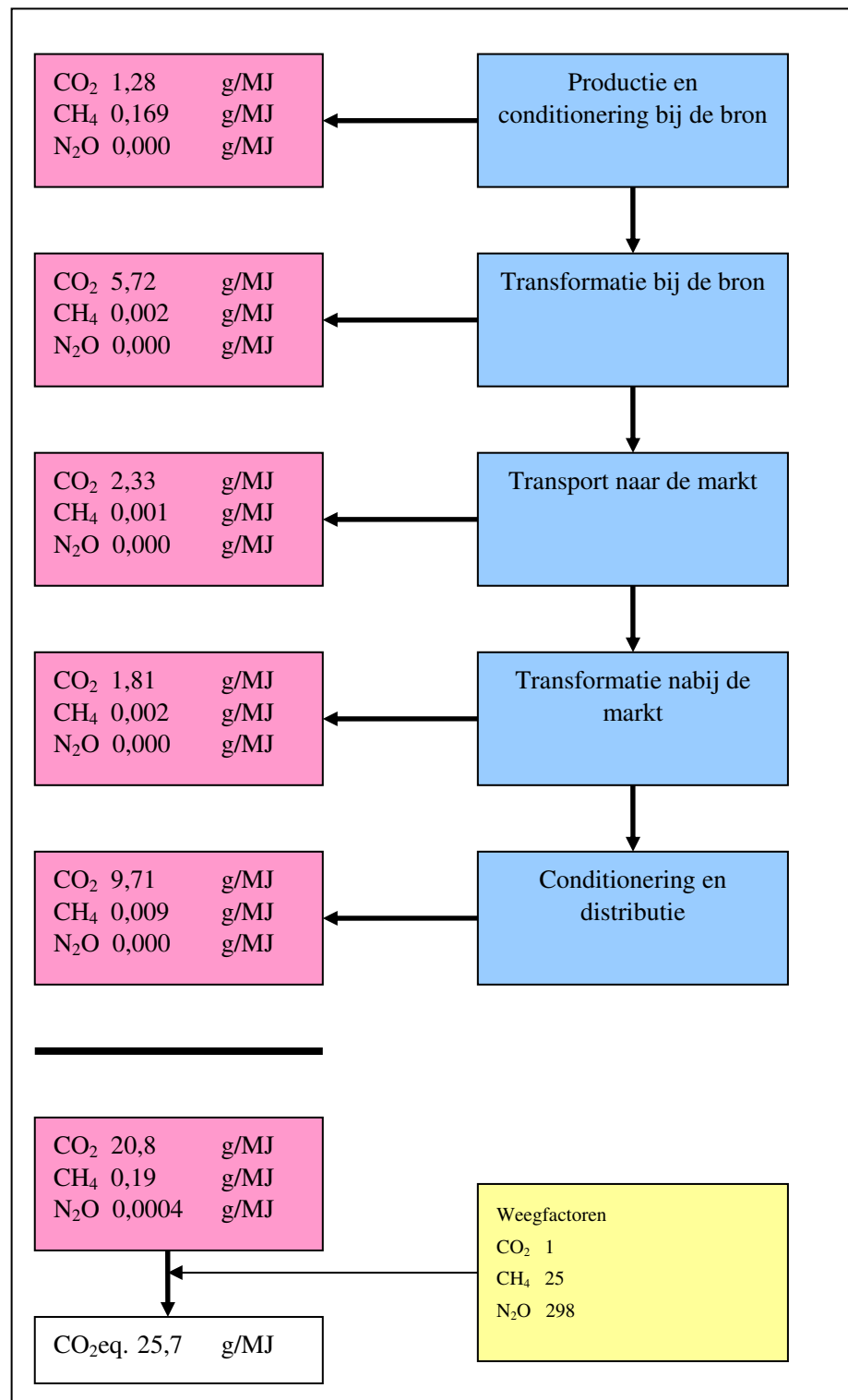
4.3.4 Conditionering en distributie

Deze stap is overgenomen uit het Nederlands aardgas pad.

4.3.5 Vullen aardgastank

Deze stap is overgenomen uit het Nederlands aardgas pad.

⁵ In Nederland wordt door de Gasunie een op LNG gebaseerde peakshaver gebruikt waarin een significante hoeveelheid LNG op voorraad wordt gehouden om aan pieken in de vraag naar aardgas te kunnen voldoen. Deze peakshaver wordt echter gevoed met Nederlands aardgas.



Figuur 8: Schema van WTT-emissies van LNG uit het Midden Oosten

4.4 Biogas uit natte biomassa (mest en maïs) I, 50/50

De productie van biogas en de berekening van WTT-emissies is onderzocht door Alterra [ALTERRA 2009]. Dit betreft vooral de Nederlandse situatie en geeft een goed beeld van de complexiteit van dit onderwerp. De door Alterra gekozen installatie is veelal te vinden bij agrarische bedrijven en heeft een inhoud van 1600 ton, in geval van een cirkelvormige silo met een hoogte van 3 meter is de diameter dan 27 meter.

Onderstaande aannamen zijn gebaseerd op het concept van Alterra. Voor deze berekening is gekozen voor een te vergisten massa van 50% varkensmest en 50% snijmaïs.

De door TNO berekende broeikasgasemissies van biogas zijn weergegeven in figuur 8. In 4.4.1 t/m 4.4.8 worden de verschillende stappen van de WTT-keten toegelicht. De gebruikte input waarden van de WTT-berekeningen zijn grotendeels gebaseerd op de studie van Zwart.

4.4.1 Voeding vergistinginstallatie

Biogasproductie uit pure mest is economisch niet rendabel omdat de methaan productie per mesteenheid zeer laag is, ongeveer 21 m³ biogas per ton mest. De gehele massa moet immers worden opgewarmd, hiervoor is een groot deel van de geproduceerde methaan nodig waardoor er slechts een beperkte hoeveelheid methaan wordt geproduceerd. In Nederland worden om die reden co-vergistingsinstallaties gebouwd die een mengsel van mest en co-substraat als voeding gebruiken.

Co-substraat kan ook uit verschillende producten bestaan, hierbij kan men denken aan snijmaïs, gerst, rogge en GFT-afval. De methaanopbrengst van een gemiddeld co-substraat is 165 m³ biogas per ton. In de TNO-berekeningen is gekozen voor een installatie die 50% mest en 50% co-substraat gebruikt.

4.4.2 Verbouw gewassen

De oogst levert 7.0 droge stof per hectare op en hiervoor is een bepaalde hoeveelheid kunstmest gebruikt die leidt tot N₂O en NH₃ emissies. De geabsorbeerde CO₂ uit de atmosfeer is verrekend en dientengevolge is de CO₂ emissie aan de bron negatief.

4.4.3 Transport biomassa

Voor het transport van de biomassa is uitgegaan van een gemiddelde transportafstand van 30 km met de volgende kentallen: Energieverbruik 12 MJ/km en een CO₂ emissie van 43.8 g/ton.km.

4.4.4 Opslag biologische gewassen

De opslag van gewassen brengt bepaalde N₂O en CH₄ emissies met zich mee. Deze worden gelijk gesteld aan de emissies van mest en bedragen voor methaan 5.0 kg/ton, en voor N₂O 0.1 kg/ton.

4.4.5 Methaanemissies tijdens opslag van producten

In Tabel 7 zijn enkele kengetallen van methaanopbrengsten en emissies bij langdurige opslag weergegeven. Door vergisting van mest in een biogasinstallatie worden de methaanemissies die met opslag in de buitenlucht gepaard zouden gaan voor 90% vermeden. Daarentegen is de langdurige opslag van biomassa ten behoeve van

covergisting een bron van methaanemissies die in dezelfde ordegrootte ligt als de vermeden methaanemissies van mest.

Tabel 7: Kengetallen vergisting van mest en biomassa (bron: Alterra 2009)

	Opbrengst biogas	Opbrengst methaan	Methaanemissie uit opslag	Rel. Emissie uit opslag
	[m ³ /ton]	[m ³ /ton]	[m ³ /ton]	[%]
Varkensmest	18-27	11-16	4.65	29-42
Rundermest	17-21	10-13	1.80	14-18
Snijmaïs	115-175	69-105	3.10	3-4
Rogge	135-180	81-108	3.10	3-4

4.4.6 Vergisting

Voor het berekenen van de broeikasgasemissies van biogasproductie door covergisting zijn de volgende aannames gemaakt: De biomassa wordt vergist in een vergister met een capaciteit van 1600 ton. De verblijfstijd van de biomassa, die bestaat uit 50% varkensmest en 50% snijmaïs, in de reactor is 60 dagen. Van de methaanproductie lekt 2 vol% uit het systeem en wordt een gedeelte gebruikt om het vergistingsproces gaande te houden. De constructie van de vergister bepaalt in hoge mate de warmteverliezen en het energetisch rendement van het proces. Om de vergisting op gang te houden is warmte nodig. Daarnaast verbruikt de vergister elektriciteit (onder andere om het substraat te roeren). Deze warmte en elektriciteit worden door een gasmotor geproduceerd die voor wat betreft vermogen afgestemd is op de energiebehoefte van de totale biogasinstallatie. De gasmotor heeft een specifiek brandstofverbruik van 250 g/kWh en een methaanemissie van 0,10 g/kWh. Voor de generator wordt een rendement van 85% aangenomen.

4.4.7 Opwaardering biogas tot aardgas

Als biogas opgewaardeerd moet worden naar aardgaskwaliteit, hetgeen technisch mogelijk is, is een hoogwaardige kostbare installatie nodig. Onlangs werd bekend dat er plannen worden gemaakt voor een biogas transportleiding in Noordoost Friesland die biogas vanaf verschillende boerderijen transporteert naar de opwerkingsinstallatie alwaar het biogas wordt opgewaardeerd naar aardgaskwaliteit. De opwerkingskosten per volume geproduceerd biogas zijn dan relatief gunstig. De installatie in deze studie voor het zuiveren van biogas tot aardgas is kleinschalig (dus minder gunstig) en heeft een aangenomen energieverbruik van 0,14 MJ/MJ en er is een methaanlekkage aangenomen van 2 vol%⁶.

4.4.8 Bijproducten

Na vergisting houdt een eigenaar van een biogasinstallatie een hoogwaardige meststof (digestaat) over die afgezet moet worden op de (mest)markt. Er is echter sprake van een mestoverschot in Nederland met als gevolg dat digestaat moeilijk of niet afgezet kan worden. Een eigenaar van een biogasinstallatie zal dientengevolge proberen alleen eigen mest aan te wenden en dientengevolge het mestgehalte in de vergister zo laag

⁶ Hierbij moet opgemerkt worden dat er opwaarderingsystemen zijn voor biogas met een lagere methaanlekkage. De hier gebruikte 2% is dus een worst-case aanname. (zie bijvoorbeeld http://www.senternovem.nl/mmfiles/Van%20Biogas%20naar%20Groen%20Gas_tcm24-227064.pdf) In de "2020" case wordt gerekend met een lagere methaanlekkage.

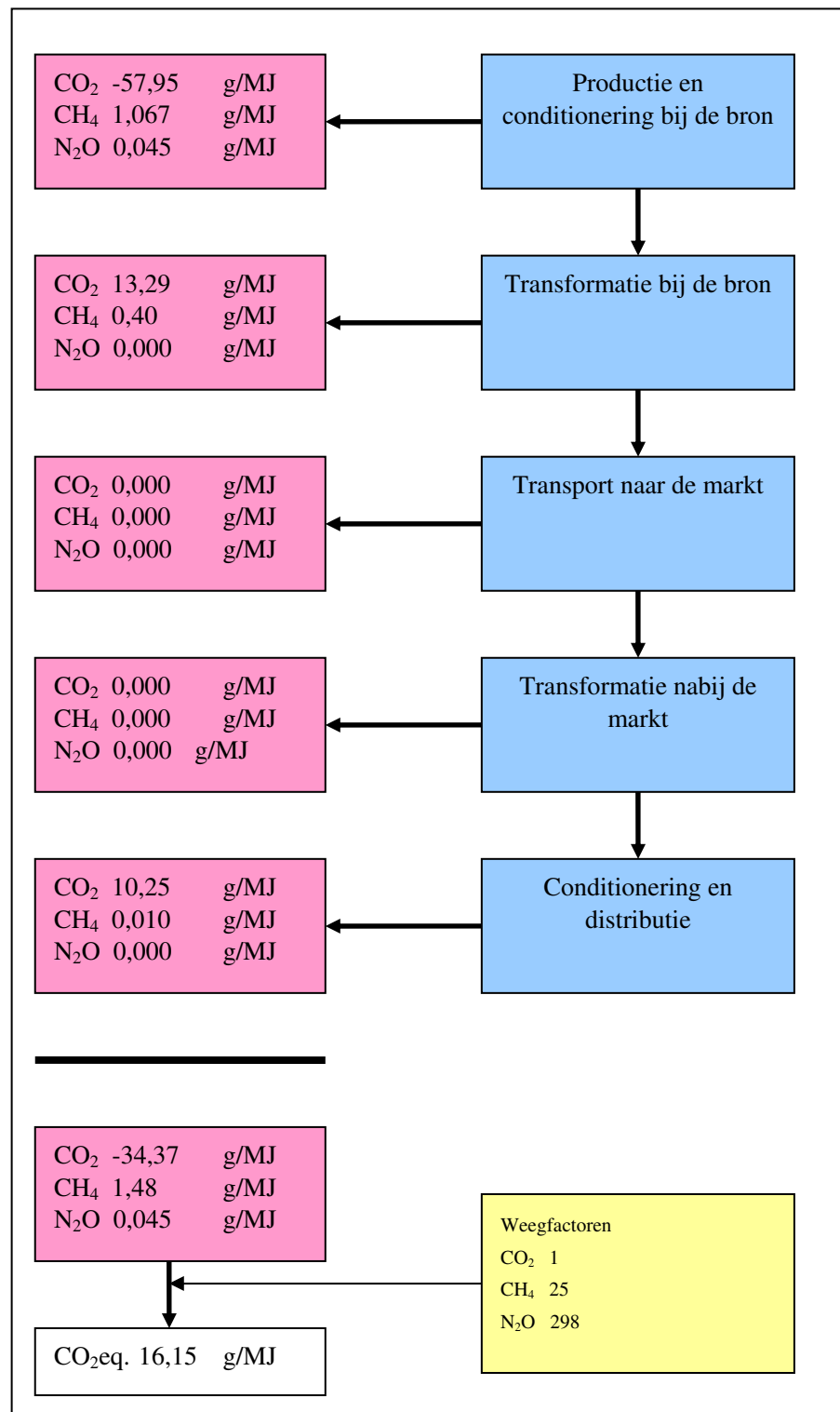
mogelijk houden. In deze berekeningen wordt al het digestaat voor eigen gebruik aangewend.

4.4.9 *Commentaar op de berekeningen*

In figuur 8 zijn alle stappen uit de paragrafen 4.4.1 t/m 4.4.8 gegroepeerd en zijn de broeikasgasemissies van biogas gekwantificeerd. Het eindresultaat; 16,15 g CO₂eq/MJ is veel hoger dan de berekeningen van andere partijen, zie 3.2. Dit wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door de methaanemissies die bij opslag van co-substraat en tijdens vergisting vrijkomen, en die in eerdere studies niet of in onvoldoende mate zijn meegerekend. De lektheid van opslagfaciliteiten en vergisters bepalen dus in hoge mate de hoeveelheid broeikasgasemissies.

In Nederland blijken er op dit moment slechts een zeer klein aantal vergistinginstallaties te zijn die als grondstof 100% mest gebruiken. Dit zou in de toekomst echter kunnen veranderen. De meeste huidige installaties gebruiken een mengsel van 25-50% mest en 75-50% co-product omdat de methaanproductie per massa-eenheid invoerproduct veel hoger is dan in het geval van pure mest en het economisch veel aantrekkelijker is dan vergisting van pure mest. Het co-product kan bijvoorbeeld GFT afval of snijmaïs zijn. Tevens speelt het mestprobleem. De druk op de mestmarkt is groot omdat er sprake is van meer aanbod dan vraag. Dit betekent dat het digestaat van een mestvergister moeilijk af te zetten is op de markt. Een ondernemer streeft er dan ook naar het digestaat in te zetten voor eigen gebruik. Aangezien deze individuele mestbehoefte beperkt is, zal een ondernemer de voeding van een vergister willen aanvullen met co-product. De gunstige emissiecijfers voor de 100% mest vergisting zijn dan ook niet van toepassing in Nederland.

Verder blijkt dat de onderlinge verschillen tussen in resultaten zeer groot zijn. De reden voor deze verschillen is hoofdzakelijk gelegen in de toegepaste systematiek en de bronnen/aannames van bepaalde emissies (bijv. de methaanemissies t.g.v. opslag van biomassa).



Figuur 9: Schema van WTT-emissies van biogas uit een co-vergistingsinstallatie

4.5 Biogas uit natte biomassa (mest en maïs) II, 75/25

Dit pad is vergelijkbaar aan het pad zoals beschreven in de voorgaande paragraaf. Echter wordt in deze berekening de 50/50% mengverhouding tussen maïs en mest vervangen door 75% maïs met 25% mest om een inzicht te verkrijgen in de gevoeligheid van de emissies op de mengverhouding. De berekeningswijze is identiek aan de berekening in 4.4. In het 75/25 scenario zijn de vermeden methaanemissies lager dan in het 50/50 scenario wat op zich een ongunstig effect heeft op het eindresultaat. In deze berekening zijn de methaanemissies t.g.v. opslag van co-substraat gunstiger gekozen (de installatie is dus kwalitatief beter). Het eindresultaat van deze berekening is 19,15 g CO₂eq/MJ en ligt op het zelfde niveau als het 50/50 scenario.

4.6 Additionele ketenemissie-inschatting: biogas uit GFT en slachtafval

Naast de hiervoor behandelde ketens is gedurende het project besloten om een additionele keten op te nemen om de potentieel lagere WTT emissies van het produceren van biogas uit reststromen in te schatten. *De in deze paragraaf weergegeven berekeningen moeten gezien worden als indicatief. Een meer gedetailleerde berekening van deze ketens zou in een volgend project plaats kunnen vinden. Binnen het huidige project was enkel een eerste inschatting mogelijk.*

Als reststromen zijn zowel huishoudelijk GFT afval (opgehaald per vuilniswagen) en slachtafval gekozen. Beiden hebben als voordeel ten opzichte van maïs als feedstock dat er een continue aanvoer van feedstock bestaat⁷. Om deze reden is aangenomen dat er geen methaanemissie tijdens opslag van de feedstock ontstaat zoals dat typisch bij maïs (tijdens silage of inkuilen) wel het geval is.

De volgende aannames zijn gebruikt in de berekeningen:

- Het gebruikte GFT afval is voor 100% afkomstig van huishoudens en wordt opgehaald met een vuilniswagen.
- Het gebruikte slachtafval wordt centraal ingezameld en per vrachtwagen vervoerd naar de vergistinginstallatie.
- Zowel het GFT als het slachtafval worden vergist in een vergelijkbare vergistinginstallatie als aangenomen in het covergisting scenario.
- De droge stof gehalten en gasopbrengst van GFT en slachtafval zijn overgenomen uit [BORJESSON 2004].
- Alle overige procesparameters zijn overgenomen uit het covergisting scenario.

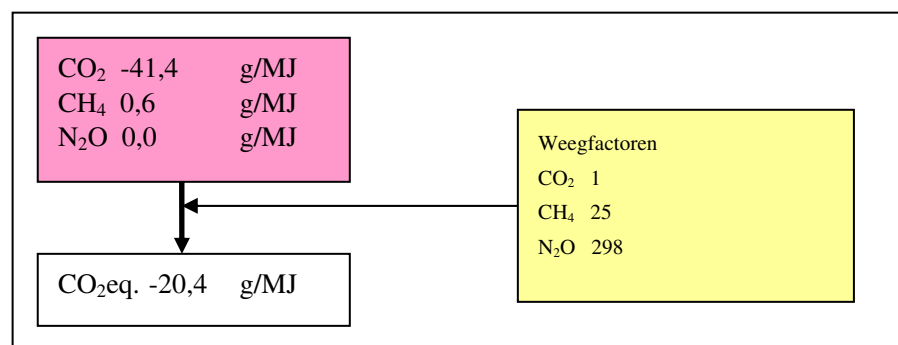
De resultaten zijn opgenomen in de volgende paragraaf. Deze resultaten moeten als indicatief beschouwd worden omdat in de berekening ervan minder detail is meegenomen dan in de berekening van de overige well-to-tank emissiefactoren. Om deze reden is ook geen overzicht per stap opgenomen zoals voor de andere paden wel gedaan is. Het doel van het opnemen van deze aanvullende paden is het verkrijgen van inzicht in de mogelijk haalbare emissies wanneer reststromen gebruikt worden als feedstock.

⁷ Bij GFT is wel sprake van een seizoensinvloed op de fractie tuinafval in huishoudelijk GFT. In deze inschatting is hiermee echter geen rekening gehouden omdat een gedeelte van het GFT aanbod niet seizoensafhankelijk is.

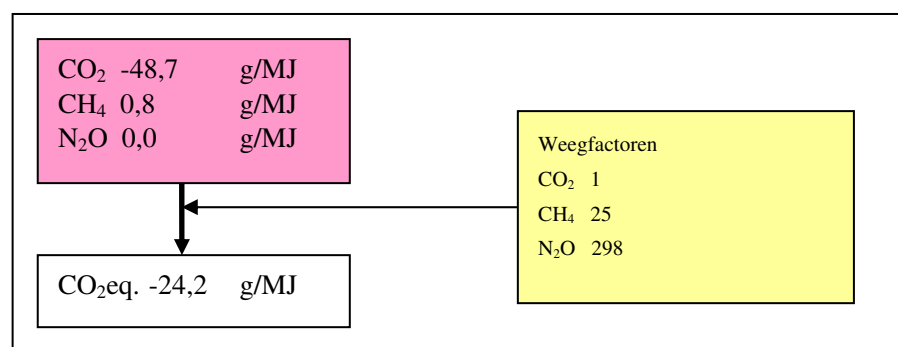
Bij gebruik van slachtafval moet opgemerkt worden dat de opbrengst uit de vergister zeer laag is door het lage droge stof gehalte in slachtafval en de lage ruwe biogas opbrengst uit deze feedstock. Het proces is dus energie-intensiever dan de GFT route, die bijna driemaal zoveel MJ methaan oplevert per ton feedstock (3269 MJ/ton versus 1189 MJ/ton). Hoewel de broeikasgasemissie van deze twee paden zeer vergelijkbaar zijn is het vergisten van GFT afval dus te prefereren boven het vergisten van slachtafval.

Voor de 2020 projectie zijn dezelfde wijzigingen in de ketens aangenomen als in het covergisting scenario, gericht op het verminderen van de methaanemissie door de hele keten heen en het vergroten van het vergister rendement.

Bij slachtafval moet opgemerkt worden dat de broeikasgasemissie iets toeneemt doordat er voor het opwaarderen van het biogas elektriciteit uit het net (gemiddelde grid-mix) gebruikt moet worden omdat de gasmotor die in de installatie voorzien is niet voldoende elektriciteit levert. De gasmotor is in alle gevallen zo uitgelegd dat deze voldoende warmte levert om het vergistingsproces draaiende te houden. Deze keuze is gemaakt omdat het opwekken van warmte met een groter rendement gebeurt dan elektriciteit en omdat overtollige elektriciteit eventueel terug aan het net geleverd kan worden terwijl overtollige warmte als verloren moet worden beschouwd.



Figuur 10: Schema van WTT-emissies van biogas uit een vergistinginstallatie voor slachtafval



Figuur 11: Schema van WTT-emissies van biogas uit een vergistinginstallatie voor GFT afval

4.7 Standaard EN590 dieselbrandstof

4.7.1 Oliewinning

In de oliewinning zijn een drietal posten te onderscheiden:

- Energieverbruik voor de oliewinning;
- Emissies bij blow outs (door de gasdruk breken leidingen, afsluiters of koppelingen waardoor het olie en gas uit de grond spuit);
- Associated gas. Olie en gas wordt vaak in combinatie gevonden. Een vaak genoemd gemiddeld is 90% olie en 10% gas. Relevant voor de emissies is wat er gebeurt er met het vrijkomende gas, wordt dit gebruikt, teruggepompt, verbrand of geventileerd (zo de lucht in gelaten). In de laatste twee situaties gaat het vooral om het vrijkomen van methaan.

Een overzicht van deze gegevens staat in Tabel 8, bron [Rijkeboer 1992]. Het gaat hierbij om een schatting voor 2010.

Tabel 8: Emissiegegevens oliewinning

	% van winning	CO ₂ kg/GJ olie	CH ₄ g/GJ olie	N ₂ O g/GJ olie
Oliewinning				
Energie-inzet	0.60%	0.44	0.02	
Olie lekkage/blow out	0.02%	0.01	0.04	
Affakkeling en ventilatie	1.60%	0.90	24.24	
Totaal winning	2.22%	1.35	24.30	0.00
Totaal winning 2020	2.47%	1.53	24.30	0.00

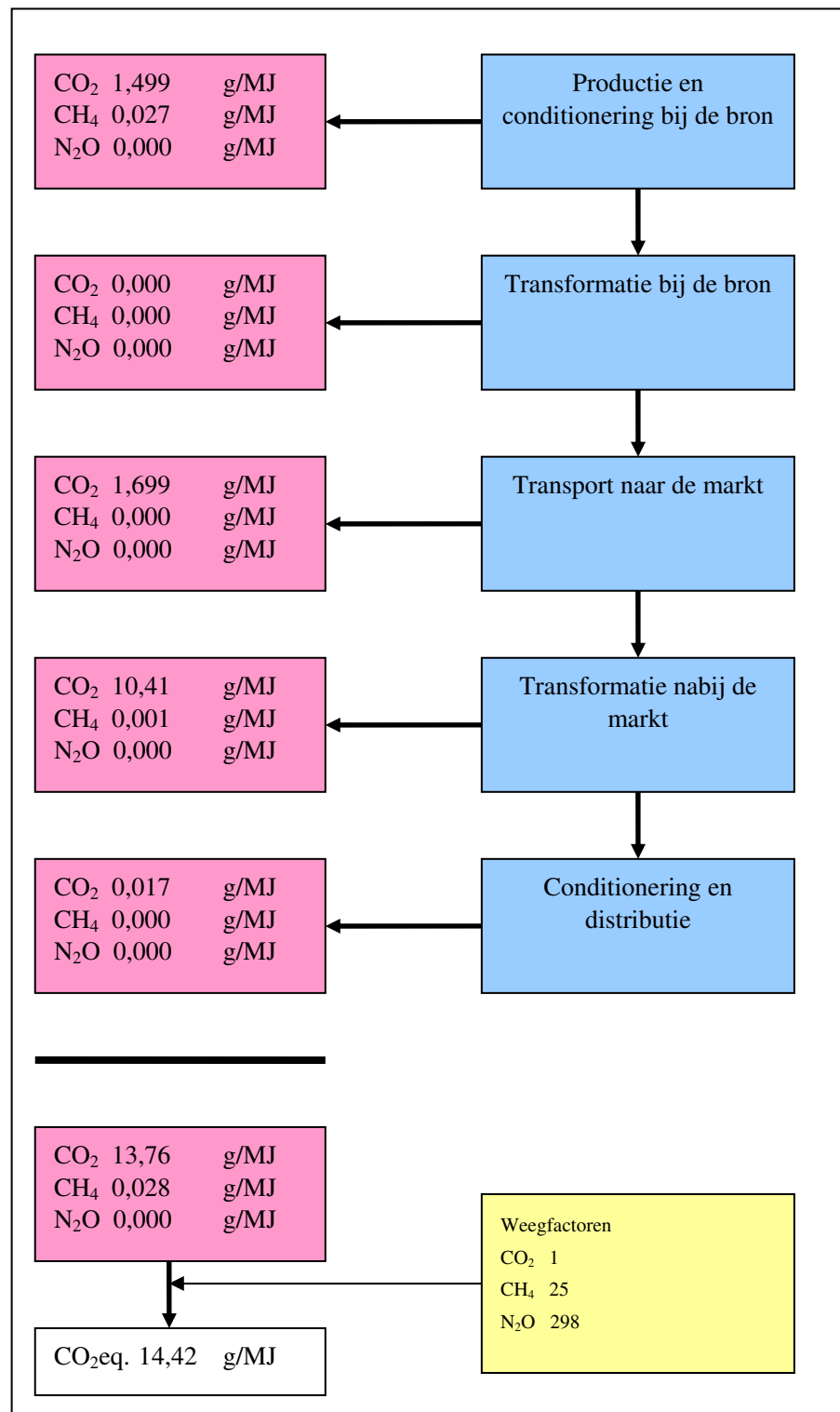
Er zijn hierbij nog twee situaties die apart genoemd kunnen worden.

- Het winnen van olie uit teerzanden. Dit gebeurt o.a. in Canada en vergt veel energie. Hier zal worden verondersteld dat deze olie niet naar Nederland komt.
- Het winnen van olie uit aardgascondensaat. Bij het winnen van aardgas, komt ook lichte olie vrij, die in Nederland wordt verwerkt. Het gaat hierbij voor een belangrijk deel om LPG- en benzinecomponenten. Voor diesel is deze route minder relevant.

Het verbruik voor winning hangt sterk af van de locatie waar de ruwe olie vandaan komt. In het Midden Oosten ligt het lager, op andere locaties kan het hoger liggen.

Binnenlandse oliewinning

De binnenlandse oliewinning in Nederland is met het uitputten van de Noordzeevelden aan het dalen. Waarschijnlijk komt dit in 2010 beneden de 3% uit (inclusief aardgascondensaat) ten opzichte van de verwerkte hoeveelheid ruwe olie. Dit zou daarna snel verder dalen als het Schoonebeekveld niet heropend zou worden. De oliewinning die hier plaats vindt gaat gepaard met een behoorlijk energieverlies (circa 25%). Omdat het uiteindelijk maar om 1% van de verwerkte ruwe olie gaat, levert deze slecht een beperkte bijdrage op het totaal. Dit extra verbruik is verwerkt in de 2020 cijfers van tabel 8. De cijfers voor 2020 komen door deze aanpassing dicht bij de JRC-cijfers [Concawe 2007].



Figuur 12: Schema van WTT-emissies van dieselbrandstof (exclusief biobrandstof bijmenging)

Blow outs

Een onderzoek in Californië over de periode 1991-2005 laat zien dat bij 1 op de 1900 olieboringen een blow out plaatsvindt, bij ongeveer 25% is er sprake van milieuschade en bij 10% lichamelijk letsel [Jordan 2007]. De tijd dat de bron spuit kan variëren van enkele seconden tot een half jaar met een gemiddelde van 6 uur. Uitgaande van de 95% percentiel waarde (van de blow outs hebben 95% minder verlies en 5% is meer) levert deze studie een gemiddeld energieverlies op van 0,0012%. Hiervan is 60% olie en 40% gas. Per saldo levert dit, door het hogere gasaandeel een emissie op aan CO₂-eq van 0,01 kg/GJolie. Een gemiddelde emissie van zeer beperkte omvang gaat, ten opzichte van de andere bronnen.

4.7.2 Olietransport naar raffinaderij

Het energieverbruik van olietransport staat in Tabel 9. Hierbij is uitgegaan van een transportafstand van 8000 km en rekening gehouden met een (lege) terugvaart. De JRC studie komt tot een lager verbruik voor transport.

Tabel 9: Emissiegegevens olietransport

	% van winning	CO ₂ kg/GJ olie	CH ₄ g/GJ olie	N ₂ O g/GJ olie
Olietransport				
Tankertransport	2.00%	1.52	0.16	
Verlies op zee	0.01%	0.01	0.01	
Totaal ruwe olie transport	2.01%	1.53	0.17	0.00

Olie verlies op zee

In [WEC,1988] wordt een cijfer genoemd voor de hoeveelheid olie die jaarlijks in de zee komt, namelijk 3,5 mln. ton (0,1% van het mondiale olieconsumptie). Ongeveer 10% hiervan wordt veroorzaakt door tankerongelukken. In een publicatie van Shell uit 1992 wordt een hoeveelheid van 2 mln. ton genoemd. Hiervan komt 5% in zee door ongelukken en 8% door tankerexploitatie. Ook dit levert een cijfer in dezelfde orde van grootte (0,01%) op. De herkomst van de andere olie die in zee komt staat los van het ruwe olie transport.

Een meer recente publicatie is o.a. voor IMO gemaakt door de GESAMP werkgroep [GESAMP, 2007]. Deze schat de hoeveelheid olie die in zee terecht gekomen in de periode 1988-1997 op 0,46 mln. ton/jaar. Hiervan komt 0,25 mln. ton/jaar door tankertransport, wellicht opgehoogd met 0,02 mln. ton aan brandstofverliezen. Na combinatie met de wereldolieproductie komt dit neer op 0,008%. Uit deze analyse kan geconcludeerd worden dat deze emissie, zeker relevant is uit het oogpunt van watervervuiling maar op de totale ketenanalyse van de broeikasgasemissie weinig invloed heeft.

Inmiddels zijn er in veel havens faciliteiten aangelegd om de olieresten die vrijkomen bij het schoonmaken van olietankers op te vangen en te verwerken. Bovendien wordt verwacht dat door de introductie van dubbelwandige olietankers (verplicht na 1990) de olie lekkage door ongelukken verminderd gaat worden. Waarschijnlijk zullen meer recente cijfers dan ook lager liggen.

4.7.3 Emissies tijdens de raffinage

Methaan en lachgas (en CO₂) tijdens raffinage

In de raffinaderijen ontstaan ook emissies van methaan en lachgas. Het delen van deze emissie door de hoeveelheid ruwe aardolie geeft een indicatie van de emissie per liter diesel. Een goede bron voor de emissies van de raffinagesector zijn de zogenaamde CRF-tabellen die gekoppeld zijn aan de jaarlijkse rapportage van Nederland over de emissies van broeikasgassen het zogenaamde Nationale Inventory Report (PBL, 2009)⁸. In Tabel 10 is een overzicht gegeven van de verbrandingsemissies van de Nederlandse raffinagesector. In de cijfers over de methaan zijn ook de emissies uit opslag meegenomen. In de scenario berekeningen van het PBL worden voor CH₄ en N₂O geen reducties voorzien zodat deze cijfers ook voor 2020 zijn verondersteld.

Ook CO₂-cijfers zijn in de tabel opgenomen. De emissies kunnen gedeeld worden door de netto productie aan aardolieproducten. Dit levert emissiefactoren op, waarbij de aanname is dat elk productie evenveel bijdraagt aan de emissie. Voor de emissie van CH₄ en N₂O is dit een bruikbare aanname. Voor CO₂ is het goed om ook een andere methode te hanteren.

Tabel 10: Verbrandingsemissies olieraffinaderijen in Nederland

jaar	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Aardolie producten	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
	mln. kg	mln. kg	mln. kg	PJ	kg/GJ olie	g/GJ olie	g/GJ olie
2008	11800	0.98	0.04	2218	5.32	0.44	0.02
2000	12094	0.90	0.04	2290	5.45	0.40	0.02
1995	11665	1.03	0.05	2331	5.26	0.46	0.02

CO₂-emissies tijdens de raffinage: methodologie

In het traject van winning tot verbruik (well-to-wheels; WTW) is voor olieproducten, na de emissie in de auto, de emissie door het energiegebruik in de raffinaderijen het belangrijkste. Het energiegebruik van de olieraffinage vergt ongeveer 7% van de oliedoorzet. Er zijn verschillende methoden om dit energieverbruik (en de bijbehorende emissies) in een WTW-studie aan de producten toe te delen. Het toedelingprobleem speelt trouwens ook op andere plekken, bijvoorbeeld bij biobrandstoffen.

De eerste is om aan elk product evenveel toe te rekenen (per ton of per energie-inhoud). Een andere methode is om het verbruik te verdelen op basis van de economische waarde. Afhankelijk van de verkoopprijs ten opzichte van de ingekochte ruwe olie wordt het verbruik toegerekend (hoe hoger de verkoopprijs, hoe meer energie er aan toegerekend wordt). Omdat benzine en diesel de hoogste toegevoegde waarde hebben, krijgen deze het meeste verbruik toegerekend (ten opzichte van de 7% kan dit best verdubbelen of verdrievoudigen). Nadeel van deze methode is dat deze afhankelijk wordt van de marktprijzen en daardoor niet erg stabiel in de tijd. Deze methode wordt soms wel toegepast bij biobrandstoffen, waarbij er naast biobrandstof ook veevoer wordt geproduceerd. Een deel van het brandstofverbruik wordt dan toegerekend aan de opbrengst van het veevoer.

Een derde methode is een detailanalyse van het raffinageproces: welke processtap vergt hoeveel energie en voor welke producten wordt deze processtap gebruikt. Dit is een vrij

⁸ <http://www.broeikasgassen.nl/>

bewerkelijke methode. Door ECN is dit 15 jaar geleden uitgebreid onderzocht met het raffinaderijmodel SERUM [Rijkeboer 1992]. Uit dit onderzoek blijkt dat het maken van benzine en diesel aanzienlijk meer energie vergt dan de andere raffinageproducten (circa 2 keer zoveel). Dit is belangrijk omdat een verdubbeling van de raffinage-toerekening, ten opzichte van de simpele methode, zich direct doorvertaalt in 7% hogere ketenemissies.

Een vierde methode staat in de JRC-studie [Concawe 2007], die in dit rapport veelvuldig gebruikt wordt. Voor de raffinage wordt hier gebruikt gemaakt van de marginale emissie voor de productie van benzine en diesel zoals deze door CONCAWE is opgegeven. Dit is de omvang van de emissie en het energieverbruik die gekoppeld zijn aan het produceren binnen een raffinaderijmodel van 1 MJ (of een ander volume) aan meer benzine of diesel ten opzichte van een referentiesituatie. Uit de berekeningen van CONCAWE komt naar voren dat het maken van meer diesel moeilijker is (kost meer energie) dan het maken van meer benzine. Het punt van moeilijker productie is correct, en ook zichtbaar in de Europese import en export. Europa importeert diesel (en kerosine) uit Rusland en het Midden Oosten en exporteert benzine naar de VS.

In dit rapport zal de vierde methode worden gebruikt. Deze is veel meer gekoppeld aan de realiteit dan de eerste. De verschillen met de derde methode zijn waarschijnlijk beperkt. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat de Nederlandse raffinaderijen zodanig veel exporteren dat mutaties in de binnenlandse vraag, waarschijnlijk via import en export worden opgevangen en niet direct door de eigen raffinaderij aan te passen.

CO₂-emissies tijdens de raffinage: uitkomsten van de berekeningen

Met het ECN-model SERUM zijn een aantal berekeningen uitgevoerd met variaties van 0,2 mln. ton (circa 1,6% van de productie) meer of minder dieselproductie in Nederland. Als achtergrond voor de berekeningen is een scenario gebruikt dat medio 2010 door ECN wordt gepubliceerd.

Tabel 11: Marginale CO₂ emissie uit modelberekeningen

kg CO ₂ /GJ product	2005	2010	2015	2020
Minder diesel	4.1	10.4	10.4	8.1
Meer diesel	13.8	10.1	10.5	8.2
Gemiddeld diesel	9.0	10.3	10.4	8.2
Minder benzine	-3.6	8.6	5.1	6.4
Meer benzine	11.1	8.5	4.5	9.0
Gemiddeld benzine	3.8	8.6	4.8	7.7

In dit project worden alleen de cijfers voor 2010 en 2020 gebruikt. Ter vergelijking zijn ook de benzine cijfers toegevoegd, met dezelfde variatie, en nog enkele ander jaren. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de ECN-berekeningen, net als in het JRC-rapport, laten zien dat het maken van extra benzine in de West Europese situatie minder energie vergt dan extra diesel. Ook is duidelijk dat de productie van benzine en diesel meer energie en CO₂-emissies vergt dan het gemiddelde olieproduct dat de raffinaderij verlaat. In de jaren 2010 en 2020 liggen de specifieke emissies van CO₂ per GJ product duidelijk boven de 2008 waarde van 5,8 kg CO₂/GJ product. Dat de emissie in 2020 lager is dan in 2010, komt onder andere omdat circa 10% energiebesparing in de beelden zit tussen beide jaren. Het model heeft wel een behoorlijke onzekerheidsmarge.

In 2010 kost de (marginale) dieselproductie ongeveer 15% van de energie-inhoud verdeeld over 60% olie en 40% gas. Het rendement op oliebasis is 91% (hier moet energetisch nog 6% aardgas bij). In 2020 is dit 12% van de energie-inhoud verdeeld over 70% olie en 30% gas. Het rendement op oliebasis is dan 91,6% (hier moet energetisch nog 3,6% aardgas bij). Het olierendement wordt uiteindelijk gebruikt om te bepalen hoeveel ruwe olie er gewonnen moet worden voor 1 liter diesel. Bij de gasinzet moet rekening worden gehouden met het energieverbruik voor productie van dit gas. Uiteindelijk blijkt dit laatste maar 1 of 2% van de WTT emissie te bedragen.

4.7.4 Emissies bijmenging biobrandstoffen

In 2010 is het in Nederland verplicht om in diesel 4% biobrandstof bij te mengen. In 2020 stijgt deze verplichting door EU wetgeving naar 10%. Deze verplichting kan wat lager uitvallen (circa 8,5%) door het gebruik van elektrische voertuigen of voertuigen op waterstof, toepassing van groengas in de transportsector of het gebruik van bepaalde (2^e generatie) biobrandstoffen die dubbel meegeteld mogen worden [EU 2009].

In de duurzame energie richtlijn zijn ook ketenemissiewaarden voor een groot aantal biobrandstoffen opgenomen. In Nederland wordt nu een mix van biodiesel uit verschillende soorten plantenolie gebruikt. Op basis van de cijfers uit de richtlijn wordt geschat dat de huidige emissie van bijgemengde biodiesel rond de 42 kg CO_{2-eq}/GJ ligt (marge 35-46). Ten opzichte van de standaardwaarde van de ketenemissie die de EU aangeeft van 83,8 kg CO_{2-eq}/GJ betekent dit een reductie van 50%. In 2017 is een reductie van ten minste 50% door de EU verplicht gesteld. Uitgaande van 1,5% dubbeltellende biobrandstoffen, 1% biobrandstof die een waterstofbehandeling heeft gehad en 6% gewone biodiesel, komt de CO₂-emissie in 2020 rond de 35 kg CO_{2-eq}/GJ uit (marge 30-42). Het bijmengen van biobrandstof is niet verwerkt in Figuur 12.

Tabel 12: Ketenemissie van de bij te mengen biobrandstof

	Aandeel in de diesel	kg CO _{2-eq} /GJ biobrandstof
Biobrandstof		
Transport 2010	4%	42
Transport 2020	8,5%	35

Voor de berekening van de ketenemissie van bij het dieselverbruik betekent dit dat in 2010 de totale ketenemissies van diesel vermeerderd met de emissie van diesel bij verbranding (74,3 kg CO₂/GJ) met 0,96 vermenigvuldigd moet worden en dat hier 0,04 maal 42 kg/GJ biobrandstof bij opgeteld moet worden.

4.7.5 Emissies tijdens distributie

In Nederland zijn een 6 tal raffinaderijen waarvan er vijf diesel voor het Nederlandse wegtransport maken. Bij de raffinaderijen bevinden zich depots waar tankauto's beladen kunnen worden. Hiermee wordt de Randstad voorzien (70%). Daarnaast zijn er nog 20 tot 25 lokale depots die brandstoffen leveren aan de rest van het land (30%). De verschillende maatschappijen maken gebruik van elkaars depot. De lokale depots krijgen hun brandstof vaak per binnenvaart aangeleverd [Ecorys 2009]. Met behulp van aannames over de transportafstand en verbruikcijfers voor de diverse transportmiddelen [CE 2008] kan een schatting gemaakt worden van de emissies bij de distributie van de diesel. Deze bedragen circa 1% van de hele WTT-keten en zullen richting 2020 ook nauwelijks wijzigen.

4.7.6 Totaalbeeld diesel

Het totaal beeld van diesel staat is zichtbaar in Figuur 12. Hierbij is rekening gehouden met het feit dat er ongeveer 1,1 liter olie gewonnen moet worden om na verrekening van het energiegebruik voor winning, transport en raffinage 1 liter diesel over te houden. Vooral door verbeteringen in de raffinage, 70% van de emissie, gaan de WTT-emissies tussen 2010 en 2020 met circa 10% naar beneden.

Omdat dit het beeld sterk zou verstoren, en omdat er dan bij diesel eigenlijk over verschillende brandstoffen gesproken zou moeten worden, is de bijmenging van biobrandstof bij diesel niet direct in de WTT cijfers verwerkt. De grondstoffen van biobrandstof onttrekken eerste CO₂ uit de lucht en dit heeft dit een negatieve WTT-keten emissie tot gevolg. Ten opzichte van de standaarddiesel daalt de ketenemissie bij 4% bijmenging in 2010 van 14,4 naar 12,5 g CO_{2eq}/MJ en in 2020 bij 8,5% bijmenging van 12,5 naar 8,1 g CO_{2eq}/MJ. Rekening houdend met de diverse onzekerheden kan de feitelijke emissie 3 g/MJ hoger of lager uitvallen. Waarvan ruim 2 g/MJ in de dieselketen en minder dan 1 g/MJ via biodiesel.

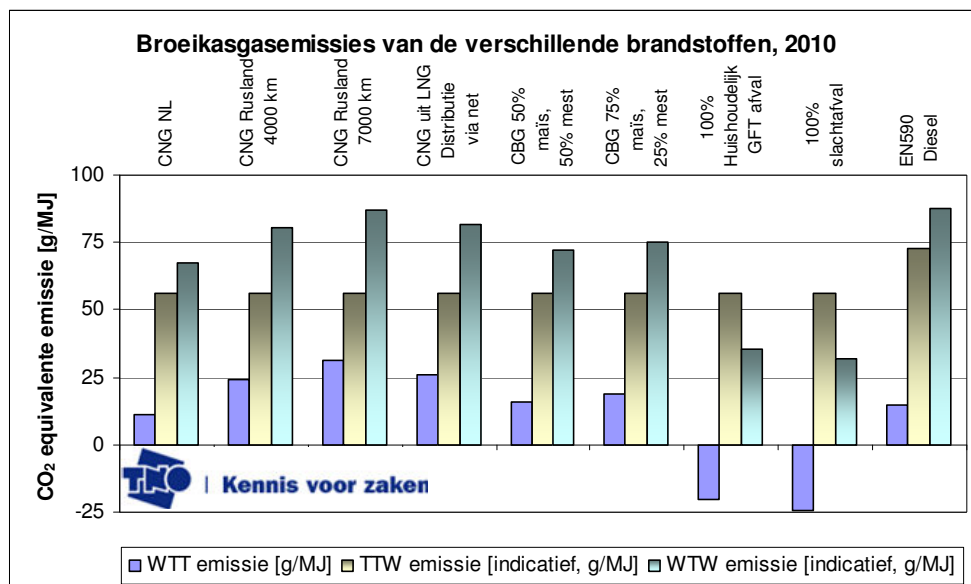
4.8 Totaaloverzicht kwantitatieve WTT-analyses

In Tabel 13 zijn de eindresultaten van alle transitiepaden weergegeven.

Tabel 13: Overzicht WTT emissies transitiepaden 2010

Overzicht broeikasemissies 6 transitiepaden 2010									
			emissies			CO ₂ -equivalenten			
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Totaal
Aardgas	CNG NL	[g/MJ]	10,4	0,0	0,0	10,4	0,9	0,1	11,4
Aardgas	CNG Rusland 4000 km	[g/MJ]	13,9	0,4	0,0	13,9	10,4	0,1	24,4
Aardgas	CNG Rusland 7000 km	[g/MJ]	14,8	0,6	0,0	14,8	16,1	0,1	31,0
LNG	CNG uit LNG Distributie via net	[g/MJ]	20,8	0,2	0,0	20,8	4,9	0,1	25,7
Biogas A	CBG 50% maïs, 50% mest	[g/MJ]	-34,4	1,5	0,0	-34,4	37,0	13,5	16,2
Biogas B	CBG 75% maïs, 25% mest	[g/MJ]	-31,4	1,5	0,0	-31,4	37,0	13,6	19,1
Reststoffen	100% Huishoudelijk GFT afval	[g/MJ]	-41,4	0,6	0,0	-41,4	15,2	5,8	-20,4
Slachtafval	100% slachtafval	[g/MJ]	-48,7	0,8	0,0	-48,7	18,8	5,7	-24,2
Diesel	EN590 Diesel	[g/MJ]	13,8	0,0	0,0	13,8	0,8	0,0	14,5
Weegfactoren						1	25	298	

Voor een indicatie van de schaalgrootte is het belangrijk om te weten dat bij de verbranding van een MJ diesel +/- 73 gram CO₂ vrijkomt. Voor een MJ aardgas is dit +/- 56 gram CO₂. Figuur 13 laat de Well To Tank emissies per pad zien met daarbij opgeteld de directe CO₂ emissie die vrijkomt bij de volledige verbranding van 1 MJ brandstof.



Figuur 13: Berekende WTT emissies voor de verschillende brandstoffen met daarbij, indicatief, de Tank To Wheel (TTW) en resulterende Well To Wheel (WTW) emissies

5 Semi-kwantitatieve toekomstanalyse

In dit hoofdstuk worden per keten de waarschijnlijke veranderingen in de Nederlandse situatie tot 2020 gepresenteerd. Deze waarschijnlijke veranderingen zijn vervolgens vertaald in implicaties voor de kengetallen per keten, waarna de voor 2020 waarschijnlijke ketens doorgerekend zijn om te komen tot een voorspelling van de in 2020 waarschijnlijke WTT emissies van de verschillende transportbrandstoffen. Duidelijk moet zijn dat deze toekomstanalyse geen volledig beeld geeft van de te verwachten veranderingen in de diverse paden en bedoeld is om een algemene trend en de ordegrootte van de te verwachten ontwikkeling in WTT emissies weer te geven.

5.1 Mogelijke toekomstige veranderingen in Nederland

De voorziene veranderingen in de verschillende paden zijn als volgt:

5.1.1 Aardgas uit Nederland

- Gaswinning. In 2010 is de verhouding tussen Noordzee gas, on shore (voornamelijk Slochteren) en import gas 41%, 33% en 26%. Vanwege de teruglopende opbrengst van de nationale gasvelden is ervoor gekozen om in deze toekomstanalyse deze verhouding te wijzigen in 27%, 21% en 52%. Deze percentages houden een verdubbeling van de hoeveelheid geïmporteerd gas en een gelijkblijvende verhouding tussen on- en offshore gas uit Nederland in.

5.1.2 Aardgas uit Rusland

- Lekkageverliezen. Door het verbeteren van de kwaliteit van de transportleidingen is aangenomen dat de lekkageverliezen in het buitenland met ongeveer 20% zullen kunnen afnemen. Hoewel onduidelijk is of dit in de (nabije) toekomst ook echt het geval zal zijn is hier gekozen voor een vermindering met 20% om de gevoeligheid van het eindresultaat op verminderende methaanlekkage zichtbaar te maken.

5.1.3 LNG uit Qatar

- Het LNG wordt niet meer centraal vergast en ingevoerd in het aardgasnetwerk maar in plaats daarvan per truck over een afstand van 150 km vervoerd en lokaal omgezet in CNG. De directe omzetting vanuit LNG naar CNG is energie-efficiënter dan het comprimeren van aardgas tot CNG

5.1.4 Biogas uit covergisting

- Grotere installaties met lager energieverbruik per kg gegenereerd biogas.
- Lagere methaanemissies uit de vergister (afnemend van 2% naar 0,5% van het gegenereerde methaan).
- Lagere methaanemissies uit de gasmotor zoals deze gebruikt wordt om de vergister te verwarmen en aan te drijven (afnemend van 4 g/kWh naar 1 g/kWh).
- Lagere methaanemissies tijdens het opwaarderen van het biogas tot aardgas specificatie (afnemend van 2% naar 0,5% van het gegenereerde methaan).

Naast bovenstaande wijzigingen (die meegenomen zijn in de emissievoorspelling naar 2020) is een van de mogelijke wijzigingen het produceren van LBM (Liquified BioMethane, biogas wat opgewaardeerd is en vervolgens door afkoeling vloeibaar

gemaakt, analoog aan LNG; Liquefied Natural Gas). Dit LBM zou direct als motorbrandstof voor onder andere zware voertuigen en wellicht schepen gebruikt kunnen worden. Hiermee worden de relatief hoge emissies door compressie vermeden. Omdat dit feitelijk een nieuw pad oplevert is deze optie niet meegenomen in de voorspelling naar 2020. Dit pad zou in een volgend project zeker wel meegenomen kunnen worden.

5.1.5 Diesel

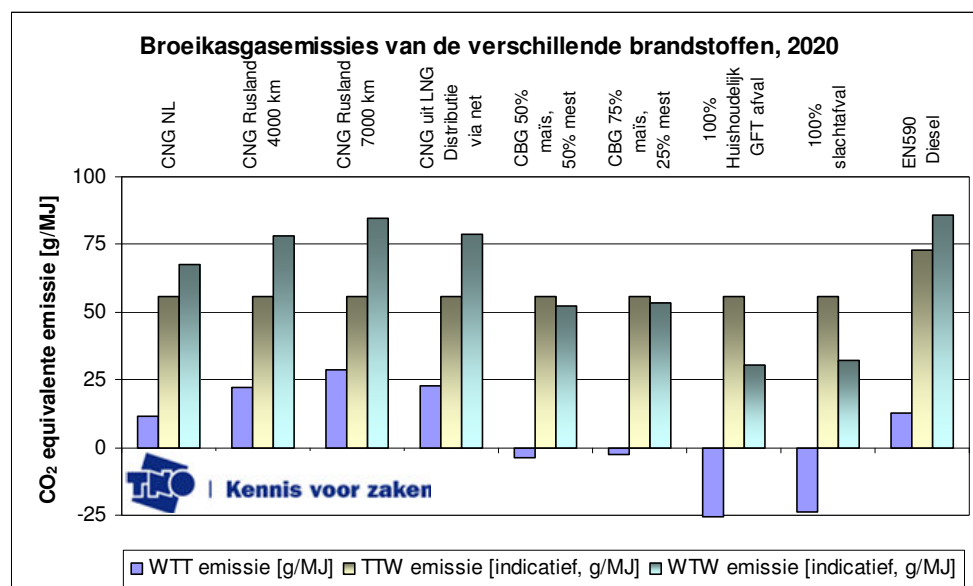
- De wijzigingen zoals deze verwacht worden in de dieselketen zijn al beschreven in paragraaf 4.7 en zullen hier niet herhaald worden.

5.2 Implicaties van mogelijke veranderingen voor de emissies per keten

Als de hiervoor geïdentificeerde wijzigingen meegenomen worden in de ketenberekeningen van de diverse transportbrandstoffen ontstaat het volgende beeld:

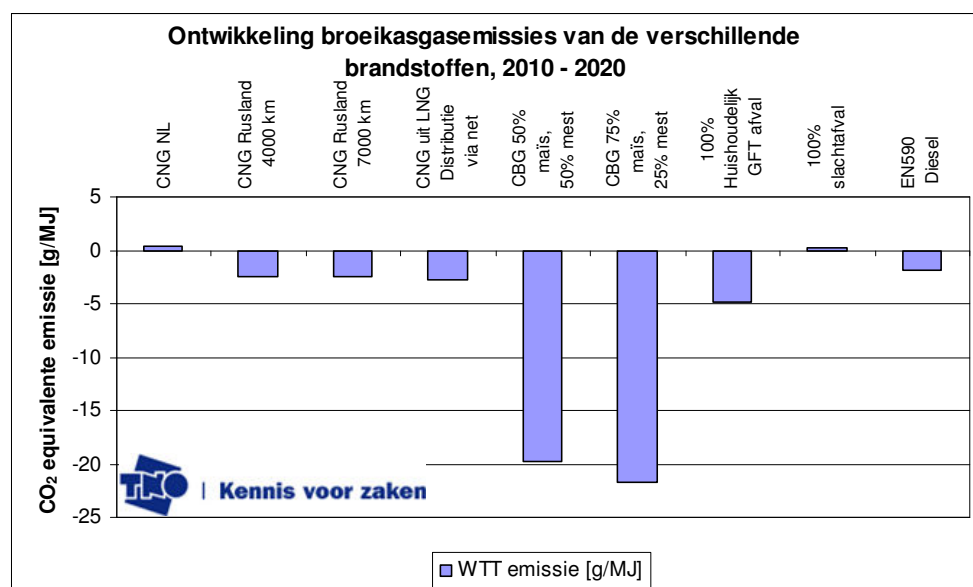
Tabel 14: Overzicht WTT emissies transitiepaden 2020

Overzicht broeikasemissies 6 transitiepaden 2020										
			emissies			CO ₂ -equivalenten				
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Totaal	
Aardgas	CNG NL	[g/MJ]	10,7	0,0	0,0	10,7	0,9	0,1	11,7	
Aardgas	CNG Rusland 4000 km	[g/MJ]	14,4	0,3	0,0	14,4	7,4	0,1	21,9	
Aardgas	CNG Rusland 7000 km	[g/MJ]	15,4	0,5	0,0	15,4	13,0	0,1	28,5	
LNG	CNG uit LNG Distributie via net	[g/MJ]	20,6	0,1	0,0	20,6	2,3	0,1	22,9	
Biogas A	CBG 50% maïs, 50% mest	[g/MJ]	-34,2	0,7	0,0	-34,2	18,6	11,9	-3,6	
Biogas B	CBG 75% maïs, 25% mest	[g/MJ]	-35,5	0,8	0,0	-35,5	20,6	12,4	-2,5	
Reststoffen	100% Huishoudelijk GFT afval	[g/MJ]	-36,8	0,2	0,0	-36,8	6,1	5,4	-25,4	
Slachtafval	100% slachtafval	[g/MJ]	-36,2	0,3	0,0	-36,2	6,8	5,4	-24,0	
Diesel	EN590 Diesel	[g/MJ]	11,9	0,0	0,0	11,9	0,7	0,0	12,6	
Weegfactoren						1	25	298		



Figuur 14: Berekende WTT emissies voor de verschillende brandstoffen met daarbij, indicatief, de Tank To Wheel (TTW) en resulterende Well To Wheel (WTW) emissies voor 2020

In vergelijking met de emissies in de huidige (2010) situatie, nemen de emissies voor de meeste paden af. Figuur 15 laat de relatieve verandering in de verschillende paden tussen 2010 en 2020 zien.



Figuur 15: Relatieve verandering broeikasgasemissies van 2010 naar 2020

Duidelijk is dat de grootste wijzigingen optreden in de paden voor covergisting. Dit wordt veroorzaakt door de aanname dat in 2020 de methaanemissies verminderd worden. Hieraan is duidelijk te zien dat de resulterende emissies van de covergistingpaden zeer gevoelig zijn voor methaanemissies (lekkage).

6 Conclusies & aanbevelingen

Met de resultaten van dit project is een objectief vergelijk van verschillende transportbrandstoffen op het gebied van broeikasgasemissies mogelijk gemaakt. Dit maakt een onderbouwde keuze voor een bepaalde brandstof voor een wagenpark mogelijk waarin nu ook de broeikasgasemissies van de volledige keten meegewogen kan worden. Voorheen waren de Well To Tank emissies van de hier onderzochte brandstoffen veel minder goed bekend.

Wat betreft de berekende Well To Tank emissies kunnen de volgende beleidsrelevante conclusies getrokken worden:

- Nederlands aardgas en diesel zijn wat betreft WTT emissies vergelijkbaar.
- In de bestudeerde eerdere studies wordt de benodigde compressie-energie voor CNG vaak onderschat.
- Voor buitenlands aardgas (gasvormig uit Rusland over 4000 km of als LNG uit Qatar) zijn de WTT emissies grofweg een factor twee hoger dan voor Nederlands gas en standaard diesel. Of het gas als LNG uit Qatar komt of gasvormig uit Rusland is van mindere invloed dan de transportafstand.
- Biogas uit covergisting levert ten opzichte van Nederlands aardgas en standaard diesel een WTT winst op van ongeveer 15 g/MJ. Deze winst is minder dan vooraf werd verondersteld en wat uit andere publicaties bekend is, onder andere [Concawe 2007].
- Als reststromen gebruikt worden om biogas te produceren en hierbij voldoende aandacht geschonken wordt aan de methaanemissies in de keten kunnen de WTT emissies verder dalen.
- De evolutie van de broeikasgasemissies tussen 2010 en 2020 verandert waarschijnlijk weinig aan de onderlinge verhoudingen tussen de verschillende brandstoffen. Als nieuwe technologie (bijvoorbeeld op het gebied van biogasproductie) geïntroduceerd wordt, kan dit wel gevolgen hebben op deze onderlinge verhoudingen.
- Voor biogas geldt dat voornamelijk de emissie van methaan op verschillende punten in de keten zorgt voor een grote variatie in de uiteindelijke Well To Tank broeikasgasemissies. Het is aan te bevelen hier in de ontwikkeling van beleid rondom biogas rekening mee te houden (bijvoorbeeld door het stellen van maximale methaanemissies en het met enige regelmaat meten van deze emissies) om zo lage methaanemissies en daarmee lage broeikasgasemissies te garanderen. Binnen de in deze studie gebruikte aannames is het wel zo dat biogas altijd beter scoort dan fossiel aardgas of standaard diesel.

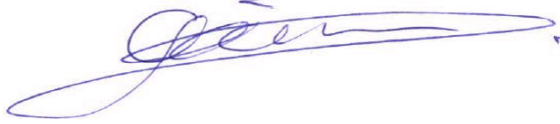
Daarnaast kunnen de volgende aanbevelingen worden gemaakt:

- Mogelijk kan deze studie periodiek (jaarlijks of tweejaarlijks) geupdate worden om zo de huidige ontwikkelingen op het gebied van biobrandstoffen doorlopend te kunnen blijven kwantificeren. Een vergelijkbare aanpak zoals gebruikt wordt voor het vaststellen van de emissiefactoren (voor onder andere fijnstof en NO_x) is hierbij aan te bevelen.

- In een volgende studie (of een update, zie hierboven) zou het zeker nuttig zijn om ook andere wegtransport brandstoffen mee te nemen om zo een vollediger beeld te kunnen schetsen van de beschikbare opties. Voorbeelden hiervan zijn:
 - Benzine
 - Synthetische brandstoffen (waaronder GTL, een synthetische dieselbrandstof gemaakt uit aardgas)
 - E85, een mengsel van grofweg 15% benzine en 85% (bio)ethanol
 - Biogas uit de vergisting van enkel mest
 - Liquified Biogas (LBG)
 - LPG
 - Elektriciteit als “brandstof” voor elektrische voertuigen, al moet hierbij opgemerkt worden dat de met elektriciteitsproductie gepaard gaande broeikasgasemissie reeds jaarlijks berekend wordt. CE delft heeft daarnaast in 2010 een overzicht gemaakt van de te verwachten broeikasgasemissies van verschillende bronnen van hernieuwbare elektriciteit.
- Koppel CNG stations zo veel mogelijk aan het hogedruk gasnet. Dit vermindert de broeikasgasemissies significant.
- Probeer de methaanemissie van tijdelijk opgeslagen cosubstraat (bijvoorbeeld maïs) zo veel mogelijk te reduceren.

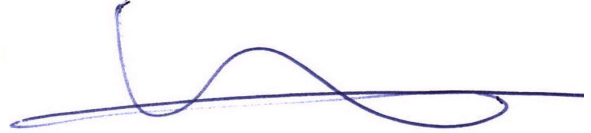
7 Ondertekening

Delft, 25 januari 2011

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Gerben Passier', with a long horizontal stroke extending to the right.

Gerben Passier
Afdelingshoofd

TNO

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Sebastiaan Bleuanus', with a long horizontal stroke extending to the right.

Sebastiaan Bleuanus
Auteur

Afkortingen

BCM	billion cubic metres=0,83 MToe
BTL	Biomass to Liquid
CNG	Compressed Natural Gas
CTL	Coal to Liquid
FT	Fischer-Tropsch
GECF	Gas Exporting Countries Forum
GHG	Green House Gas
GREET	Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation
GTL	Gas to Liquid
GWP	Global Warming Potential
HTFT	High Temperature Fischer-Tropsch proces
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JRC	Joint Research Centre
LBM	Liquefied Bio Methane
LCA	Life Cycle Assessment
LCNG	Vloeibaar gemaakt aardgas
LHV	Lower Heating Value
LNG	Liquefied Natural Gas
LPG	Liquefied Petroleum Gas
LTFT	Low Temperature Fischer-Tropsch process
LULCC	Land-Use and Land-Cover Change
NExBTL	Diesel gemaakt uit bio-olie met een process van Neste Oil
PCEM	Production and Consumption of Energy and Materials
SDE	Stimulerend Duurzame Energieproductie
SNG	Synthetic Natural Gas
Tcm	trillion cubic metres
TTW	Tank-to-Wheels
WTT	Well-to-Tank
WTW	Well-to-Wheels

Referenties

- ADEME 2006 *Energy and GHG balances of biofuels and conventional fuels - Convergences and divergences of main studies*, M.Dohy/E.Poitrat, ADEME/Ecobilan, July 2006
- ALTERRA 2009 *Duurzaamheid co-vergisting van dierlijke mest*, K.B. Zwart, D.A. Oudendag, P.A.I. Ehlert, P.J. Kuikman, Alterra Wageningen UR, 2009
- BORJESSON 2004 *Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production* Berglund, M.; Börjesson, P., Energy and Environmental Systems Studies, Lund University, Lund, Sweden, September 2004
- CE 2007 *The Natural Gas Chain - Toward a global life cycle assessment 2006*, Maartje Sevenster, Harry Croezen, publicatienummer: 07 6005 21, Delft, januari 2007
- CE 2008 *STREAM; Studie naar TRansport Emissies van Alle Modaliteiten*. Versie 2.0. Boer, L.C. den, F.P.E. Brouwer, H.P. van Essen, CE, Delft, september 2008.
- CONCAWE 2007 *Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. WELL-to-TANK Report Version 2c*, March 2007.
- DELUCHI 2006 *Lifecycle Analyses of Biofuels*, M.A.Deluchi, Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, 2006
- EA 2009 *Minimising greenhouse gas emissions from biomass energy generation*, J.Bates/O.Edberg/C.Nuttall, Environment Agency, April 2009
- ECN 2008 *Concept rapport Ketenemissies van nieuwe transportbrandstoffen – broeikasgasemissies van winning tot verbruik*, Pieter Kroon, december 2008 (nog niet gepubliceerd).
- ECOINVENT *Ecoinvent LCI database, version 2.0*, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 1998-2006.
- ECORYS 2009 *Hoogte en totstandkoming benzineprijzen*. Schijndel, M. van. et.al. , ECORYS Nederland BV, Rotterdam, 25 juni 2009.
- ER 2009 *Emissieregistratie 2009; cijfers voor 2008*. <http://www.emissieregistratie.nl>
- EU 2009 *Richtlijn 2009/28/EG van het Europees Parlement en de Raad van 23 april 2009 ter bevordering van het gebruik van energie uit hernieuwbare bronnen en houdende wijziging en intrekking van Richtlijn 2001/77/EG en Richtlijn 2003/30/EG*. L 140/16 NL Publicatieblad van de Europese Unie, 5 juni 2009
- GESAMP 2007 *Estimates of Oil Entering the Marine Environment from Sea-Based Activities*. International Maritime Organization, London, 2007 <http://www.cep.unep.org/publications-and-resources/databases/document-database/unep/gesamp-estimates-of-oil-entering-marine-environment-2007.pdf>
- GM 2002 *GM Well-to-wheel Analysis of energy use and greenhouse gas emissions of advanced Fuel / vehicle systems – a European study*, L-B systemtechnik, 2002
- GREET 2009 *The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model*, US Department of Energy, 2009.

IPCC 2001	<i>Radiative Forcing of Climate Change, The Scientific Basis.</i> Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001. Climate Change 2001, Cambridge University Press, UK
IPCC 2006	<i>2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, volume 2: Energy, chapter 4: fugitive emissions,</i> Task force on national greenhouse gas inventories.
IPCC 2007	<i>Climate Change 2007: The Physical Science Basis.</i> (Cambridge University Press: Cambridge).
JRC 2007	<i>Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context.</i> Well-to-Wheels Report v2c. Concauwe, Eurocar and JRC, 2007.
JORDAN 2007	<i>Well Blowout Rates and Consequences in California Oil and Gas; District 4 from 1991 to 2005: Implications for Geological Storage of Carbon Dioxide.</i> Environmental Geology, augustus 2008. Jordan, P.J., S.M. Benson.
KAVALOV 2004	<i>Techno-economic analysis of natural gas applications an energy source for road transport in the EU,</i> B.Kavalov, IPTS, Technical Report Series, EUR 21013 EN, January 2004
NSCA 2006	<i>National Society for Clean Air and Environment Protection Biogas as a road transport fuel-an assessment of the potential role of biogas as a renewable transport fuel,</i> NSCA, June 2006
OE 2008	<i>Open Europe What Works? How to cut emissions at the lowest cost,</i> H.Robinson, Open Europe, March 2008
PBL 2009	<i>Greenhouse Gas Emissions in the Netherlands 1990-2007;</i> National Inventory Report 2009, Planbureau voor de Leefomgeving, April 2009 http://www.broeikasgassen.nl/
RIJKEBOER 1992	<i>Wijziging brandstofmix; Een studie naar de gevolgen voor energieverbruik en emissie van een drastische wijziging van de verdeling benzine diesel LPG bij personen en bestelwagens.</i> TNO-rapport no. 92.OR.VM001.0/RR, TNO-IW, Delft, oktober 1992 Rijkeboer, R.C., Sloten, P. van, Kroon, P., Elderman, M., Haspel, B. van den
TIAX 2007	<i>TIAX LLC Full Fuel Cycle Assessment Well to tank Energy Inputs, Emissions, and Water Impacts,</i> TIAX LLC, CEC-600-2007-002-D, February 2007
VDI 2010	<i>VDI nachrichten</i> 12.März 2010
VOLKSKRANT 2010	<i>Volkskrant</i> 23 maart 2010
VDI2 2010	<i>VDI nachrichten</i> 19.März 2010
WEC 1998	<i>Environmental Effects Arising from Electricity Supply and Utilisation and the Resulting Cost to the Utility.</i> World Energy Conference. Report 1988, London, WEC, October 1988.