

Onderzoek naar waterstoftransport

Eindrapportage

C.C. Cantarelli - 1116452

E.J.L. Chappin - 1101870

A.M. Klompenhouwer - 1109170

SPM3910 Extern vrij project
Februari 2004



Inhoud

Taakverdeling

Conceptuele analyse

Kwantitatieve analyse

Onderzoek naar waterstoftransport

Conceptuele analyse

C.C. Cantarelli - 1116452
E.J.L. Chappin - 1101870
A.M. Klompenhouwer - 1109170

SPM3910 Extern vrij project
Februari 2004



Voorwoord

Dit rapport is geschreven voor het extern project SPM3910 van de opleiding Technische Bestuurskunde aan de Technische Universiteit Delft.

Opdrachtgever is de sectie Energie en Industrie van de faculteit Techniek, Bestuur en Management aan de Technische Universiteit Delft.

Het rapport bevat een conceptuele analyse van waterstoftransport en is daarmee de aanzet tot een kwantitatieve analyse.

Chantal Cantarelli
Emile Chappin
Marlene Klompenhouwer

Samenvatting

Binnen dit project wordt onderzoek gedaan naar waterstofketens. Doordat de ketens nog nauwelijks bestaan dienen de haalbaarheid, de voor- en nadelen van verschillende mogelijkheden te worden onderzocht. om de prestaties van de totale ketens inzichtelijk te maken voor de eindgebruiker wordt gebruik gemaakt van een softwareprogramma.

Dit rapport bevat de resultaten van de eerste fase van het onderzoek, de conceptualisatie. Het onderzoek gaat in op de vraag op welke manier het transport van waterstof kan worden vorm gegeven. Daarbij is de aandacht is voornamelijk gericht op een deelaspect van waterstofketens, namelijk het transport van waterstof.

Het transport kan plaatsvinden via trein, vrachtwagen, schip en pijpleiding. Voor de keuze van een bepaalde transportmodaliteit dienen een aantal keuzes te worden gemaakt ten aanzien van de te vervoeren waterstof. Dat zijn de volgende:

- de hoeveelheid te transporteren waterstof;
- de afstand waarover de waterstof moet worden vervoerd;
- de wijze van vervoer (gasvormig of vloeibaar, in tanks of in containers);
- de energiebron

De verschillende modaliteiten zijn onderzocht om inzicht te verkrijgen in de specifieke kenmerken van elke transportmodaliteit. Per vervoermiddel is in een causale analyse de factoren aangegeven die kansen of bedreigingen vormen.

Hieronder worden de bevindingen van de analyses kort uiteengezet:

- **Trein:** Het transport is relatief goedkoop door de grote hoeveelheden en afstanden die kunnen worden bereikt. Nadelen zijn de flexibiliteit en de beperkte infrastructuur. Hierdoor kan het waterstof meestal niet direct de eindbestemming bereiken maar is er natransport nodig. Een ander groot nadeel is de kans op vertragingen, omdat in Nederland de personentreinen voorrang krijgen t.o.v. de goederentreinen. Dit heeft enorme consequenties voor het goederenvervoer op zowel het gebied van kosten als emissies.
- **Vrachtwagen:** Snel en betrouwbaar. Vooral op korte afstanden is het vervoer, door het fijnmazige netwerk, flexibel en goedkoop. Overslag op andere transportmiddelen is bij derhalve niet nodig. Nadelen zijn de congestiegevoeligheid, de grote hoeveelheden emissies en de beperkte capaciteit van vrachtwagens. Door deze modaliteit te kiezen moet men veel vrachtwagens inschakelen om eenzelfde hoeveelheid waterstof te vervoeren als met de trein op bijvoorbeeld een binnenschip.
- **Schip:** Het voordeel van de binnenvaart is dat het goedkoop, veilig en milieuvriendelijk is. Een beperking van deze modaliteit is de eindbestemming vaak niet direct kan worden bereikt. Daarnaast is de vaarroute afhankelijk van het scheepstype dat men kiest voor het vervoer. Niet elk schip kan door zijn afmetingen (voornamelijk bepaald door de diepgang) door de verschillende vaarwegen. Een keuze die men moet maken bij het vervoer van waterstof per schip is het scheepstype waarmee men transporteert. Tevens is de lage transportsnelheid een nadeel van deze transportmodaliteit.

- Pijpleiding: Deze transportwijze is van geheel andere aard, doordat het een afgescheiden ondergrondse infrastructuur kent. Dit heeft het grote voordeel dat kans op schade klein is door de afwezigheid van invloeden van buitenaf. Daarnaast hoeft men geen rekening te houden met enige vormen van vertraging, omdat continu aan de vraag naar waterstof gehoor kan worden gegeven. Doordat er in Nederland niet veel goederen per leiding worden vervoerd is uitbreiding van het netwerk noodzakelijk. Dit vormt een nadeel van dit transportmiddel omdat het grote investeringskosten met zich mee brengt, wat tot uitdrukking komt in hoge transportkosten per eenheid waterstof.

Per modaliteit is aangegeven welke specifieke keuzes de gebruiker nog moet maken. Zo moet men bij het transport per trein een keuze maken ten aanzien van het natransport. Daarnaast moeten een aantal parameters worden ingesteld die worden gegeven door beperkingen of randvoorwaarden van de modaliteit. Hiervoor gelden parameters als de maximale beladingsgraad, druk, volume en temperatuur in de container.

De keuze voor transportmodaliteit legt een aantal specifieke factoren vast. De invloed van deze keuze is dus in grote mate bepalend voor de prestatie van het systeem.

De prestatie wordt via een algemeen model bepaald en gemeten aan de hand van vier indicatoren (per vervoerde hoeveelheid waterstof):

- kosten;
- emissies CO₂;
- emissies Nox;
- emissies SO₂

Uit de gedane analyse is kwalitatieve informatie verkregen over waterstoftransport. Om de verschillende transportmodaliteiten met elkaar te kunnen vergelijken aan de hand van meer kwantitatieve waarden is een besluitvormingsondersteunend model gewenst. Dit wordt in het vervolgonderzoek uitgevoerd, waarbij de onderzoeksvraag als volgt luidt: *Hoe kan men de prestaties van verschillende vervoersmogelijkheden van waterstof met elkaar vergelijken en welke aanbevelingen kunnen aan de Nederlandse overheid worden gedaan over deze vervoersmogelijkheden?*

Deze onderzoeksvraag zal worden beantwoord door een zestal deelvragen. Een deel daarvan heeft betrekking op het programmeren van het model. Hiervoor dienen vergelijkingen te worden opgesteld die een relatie aanduiden tussen de verschillende factoren.

Wanneer het model goed is ingesteld is het mogelijk het model te gebruiken en tot aanbevelingen te komen voor de beleidsmaker. Hiervoor zal bekend worden gemaakt welke beleidsinstrumenten kunnen worden doorgerekend aan de hand van het computerprogramma.

Inhoudsopgave

1 Inleiding	6
2 Conceptualisatie	7
2.1 Transport in de waterstofketen	7
2.2 Transportmodaliteiten	9
2.2.1 Trein	9
2.2.2 Vrachtwagen	10
2.2.3 Scheepvaart	11
2.2.4 Pijpleiding	12
2.3 Prestatie-indicatoren	13
3 Onderzoeksplan	14
Literatuur	16
Bijlagen	17
1. Causaal relatiediagram trein	17
2. Causaal relatiediagram wegtransport	19
3. Causaal relatiediagram schip	21
4. Causaal relatiediagram transport per pijpleiding	24

1 Inleiding

Dit onderzoek is een onderdeel van een project, uitgevoerd door de sectie Energie en Industrie binnen de faculteit Techniek, Bestuur en Management aan de Technische Universiteit Delft voor de Nederlandse overheid. Binnen dit project wordt onderzoek gedaan naar waterstofketens. Veel van die ketens bestaan nog nauwelijks of niet en de haalbaarheid, voor- en nadelen van verschillende mogelijkheden dienen te worden onderzocht.

Binnen dit project wordt gebruik gemaakt van een softwareprogramma dat de werking en prestatie van totale ketens inzichtelijk kan maken voor de eindgebruiker. Deze eindgebruiker kan beslissingen over hoe de keten kan worden ingericht (gedeeltelijk) baseren op de informatie die de mogelijkheden van het softwareprogramma biedt. Dit softwarepakket bestaat uit blokken die stappen in de keten representeren. Nog niet alle blokken zijn echter geoperationaliseerd tot een invulling van concrete gegevens over de verschillende mogelijkheden binnen waterstofketens. Binnen een blok dienen de relaties te worden gedefinieerd tussen de inputs en outputs, moeten prestatie-indicatoren worden gespecificeerd en berekend en worden parameters vastgesteld en geïmplementeerd, waarmee de eindgebruiker middels regelknoppen het blok binnen de keten kan variëren. Het model heeft een generiek karakter, het biedt de mogelijkheid om verschillende mogelijkheden door te rekenen.

Binnen dit onderzoek zal het transportgedeelte van de keten worden beschreven en zullen de bijbehorende blokken in het softwareprogramma worden gekwantificeerd. Transport van waterstof kan plaatsvinden via trein, vrachtwagen, schip en pijpleiding.

In dit onderzoek zal eerst een conceptualisatie plaatsvinden van het transport van waterstof, zodat de verschillende transportmogelijkheden uiteindelijk met elkaar kunnen worden vergeleken. Met behulp van de gegevens en bevindingen uit al eerder ingevulde blokken is het mogelijk om te komen tot concrete aanbevelingen voor de beslisser met betrekking tot keuzes binnen waterstofketens. Daartoe zullen twee rapporten worden afgeleverd. Dit rapport beschrijft een conceptueel model van de keten en specifieker het transportgedeelte, waar de stage zich op richt. Het tweede bevat de rapportage van de bevindingen en aanbevelingen van het hoofddeel van de stage.

De centrale onderzoeksvraag is: *hoe kan men de prestaties van verschillende vervoersmogelijkheden van waterstof met elkaar vergelijken en welke aanbevelingen kunnen over deze vervoersmogelijkheden worden gedaan aan de Nederlandse overheid?*

Er volgt eerst een conceptualisatie van de gehele waterstofketen. Daarna wordt specifiek gekeken naar het transportgedeelte binnen deze keten. Daarbinnen zullen de volgende deelvragen worden beantwoord:

- Hoe kan transport van waterstof worden vormgegeven?
- Welke factoren zijn per vervoermiddel van belang en vormen kansen en bedreigingen?
- Welke prestatie-indicatoren zijn van belang om de prestaties van de verschillende transportmogelijkheden adequaat te vergelijken?
- Welke parameters moeten worden gedefinieerd om te kunnen worden ingesteld door de eindgebruiker zodat de waterstofketen representatief gemodelleerd wordt?

Dit rapport mondt uit in een onderzoeksplan voor het kwantitatieve onderzoek dat hierop volgt.

2 Conceptualisatie

Dit hoofdstuk bevat een conceptuele beschrijving van de waterstofketen en specifieker de vervoersmodaliteiten die binnen deze keten een rol kunnen spelen.

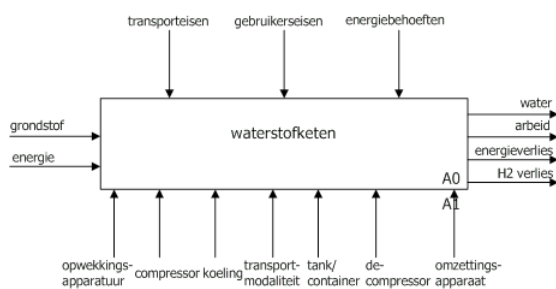
2.1 Transport in de waterstofketen

Voordat kan worden begonnen met het vormgeven van de transportblokken is het noodzakelijk zich een beeld te vormen van de gehele waterstofketen als systeem. Hiertoe kan gebruik worden gemaakt van de modelleermethode IDEF0 (integration definition for function modeling).

De IDEF0-techniek bevordert een gestructureerde analyse en faciliteert de communicatie tussen opdrachtgever en analist. Een dergelijke analyse maakt het mogelijk het systeem op een gestructureerde wijze te beschrijven, de samenhang tussen functionele delen van het systeem inzichtelijk te maken en niveaus aan te brengen tussen deze activiteiten. Dit laatste is mogelijk omdat in de modelleertechniek hiërarchie kan worden aanbracht tussen activiteiten: complexe activiteiten laten zich beschrijven door deelactiviteiten. Deze deelactiviteiten kunnen weer worden opgesplitst, totdat een werkbaar detailniveau wordt bereikt.

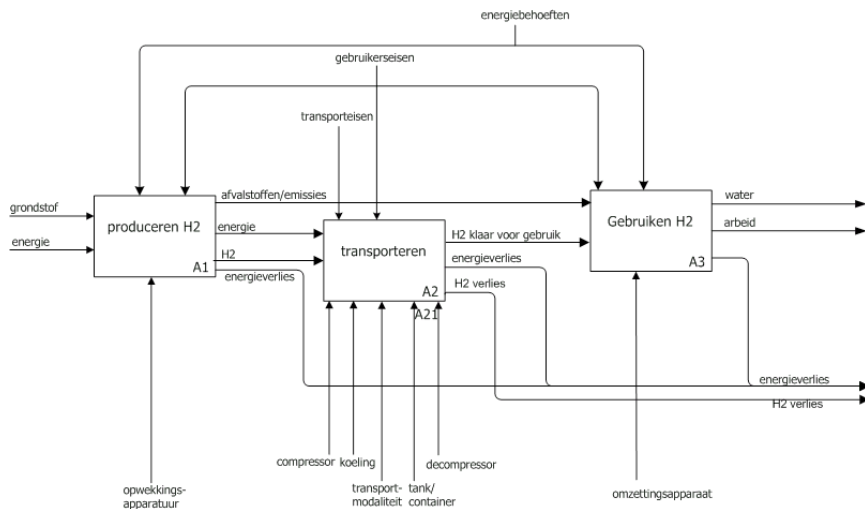
Op deze manier komt de analist tot deelprocessen, die overeenkomen met de blokjes van het software model. Ook is een IDEF0-model handig om aan te geven hoe prestaties van het systeem kunnen worden gemeten en wat bijdraagt aan die prestatie.

Allereerst volgt een heel globaal model van de gehele waterstofketen in een blok (zie Figuur 1). Het belangrijkste wat hierin is op te merken is dat de waterstofketen omzetting verzorgt van energie en grondstoffen naar water, arbeid en verloren energie en waterstof.



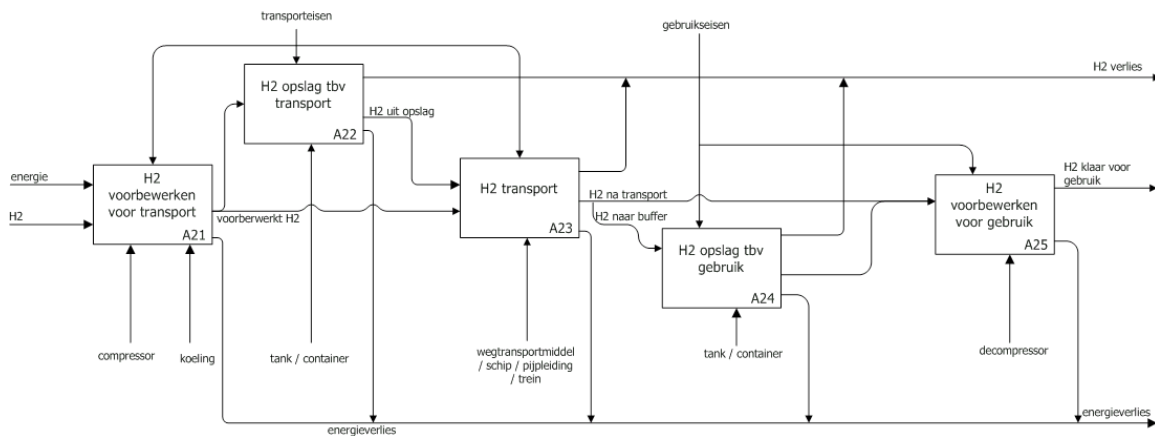
Figuur 1. SADT waterstofketen

De figuur wordt in een eerste stap uitgediept en wordt opgedeeld in drie hoofdstappen: productie, transport en gebruik (zie Figuur 2). Te zien is dat het transportgedeelte een centrale plek binnen de keten heeft en daardoor de prestatie van de keten als geheel in grote mate kan beïnvloeden.



Figuur 2. SADT decompositie waterstofketen

Na de eerste decompositie kan het transportgedeelte worden opgedeeld in vijf delen: voorbereiding voor het transport, opslag, transport, opnieuw opslag en voorbereiding voor het gebruik (zie Figuur 3).



Figuur 3. SADT decompositie transport

2.2 Transportmodaliteiten

In dit deelonderzoek is de aandacht gericht op de transport van waterstof, beschouwd per vervoersmodaliteit. Het uiteindelijke softwareprogramma heeft een generiek karakter. Omdat het doel van dit onderzoek is te komen tot aanbevelingen voor de Nederlandse overheid, zal bij de bespreking van bijvoorbeeld de sterktes en zwaktes van de vervoersmodaliteiten de Nederlandse situatie als uitgangspunt worden genomen.

Een aantal transportmodaliteiten komen in aanmerking voor het transport van waterstof, namelijk het vervoer per trein, per vrachtwagen, per schip en door pijpleidingen. Er is een analyse uitgevoerd naar deze verschillende modaliteiten, waarbij de verschillende relevante factoren en hun relaties zijn geïdentificeerd. Een dergelijke causale analyse is in de eerste plaats een hulpmiddel bij de conceptualisatie van het probleem. Bovendien dient de analyse in een volgende fase van het onderzoek als hulpmiddel bij het specificeren van vergelijkingen.

De resultaten van de analyse zijn per vervoersmodaliteit in een zogenaamd causaal relatiediagram weergegeven in bijlagen 2 tot en met 5. De belangrijkste conclusies van de analyse worden in deze paragraaf kort toegelicht.

Voor de keuze van een vervoersmodaliteit dienen er een aantal keuzes te worden gemaakt ten aanzien van de te vervoeren waterstof. Dat zijn de volgende:

- De hoeveelheid te transporteren waterstof;
- De afstand waarover de waterstof moet worden vervoerd;
- De wijze van vervoer (gasvormig of vloeibaar, in tanks of in containers);
- Energiebron.

Per modaliteit zijn er soms nog meer specifieke keuzes te maken. Deze worden indien van toepassing bij de beschrijving van de modaliteiten kenbaar gemaakt.

Naast het feit dat de gebruiker van het model een aantal keuzes kan maken ten aanzien van waterstoftransport, moeten er ook een aantal parameters kunnen worden ingesteld. Deze parameters worden ingegeven door (technische) beperkingen of randvoorwaarden. Welke parameters moeten worden ingesteld is per vervoersmodaliteit verschillend. Ze zullen bij de beschrijving van de modaliteiten worden genoemd.

2.2.1 Trein

Kenmerkend voor het vervoer per spoor is dat het relatief goedkoop is door de grote hoeveelheden en afstanden die kunnen worden bereikt. De infrastructuur en het benodigde materieel als locomotieven en wagons kennen een lange afschrijvingsperiode en er is weinig personeel nodig voor het vervoer. Dit leidt tot lage transportkosten per rit. De personeelskosten zijn daarentegen door de complexe verkeersgeleiding relatief hoog. Het kostenniveau op langere afstanden ligt tussen dat van het weg- en binnenvaartvervoer in. Het spoorvervoer is een milieuvriendelijke en veilige transportmodaliteit. Daar treinvervoer (veelal) gebruik maakt van elektriciteit is de milieuvriendelijkheid afhankelijk van de opwekkingsmethode van deze elektriciteit. Ook de mogelijkheid voor treinen op andere energiebronnen wordt meegenomen.

Er zijn een aantal nadelen verbonden aan het vervoer per trein. Zo is het weinig flexibel en heeft het een beperkte capaciteit aan infrastructuur. Dit heeft als gevolg dat het vervoer van waterstof per trein meestal niet direct naar de eindbestemming vervoerd kan worden, maar dat er natransport nodig is. Dit is niet wenselijk, omdat men zo meer tijd kwijt is en er meer kosten gemaakt worden door de overslag.

Een ander groot nadeel betreft de kans op vertragingen die men heeft als men het waterstof per trein transporteert. In Nederland zijn de dienstregelingen van de treinen en de wegen afgestemd op het personenvervoer en speelt het goederenvervoer een ondergeschikte rol. Goederentreinen moeten in het schema van het personenvervoer worden ingedeeld en dit zorgt voor veel problemen. Tijdens de ritten hebben personentreinen voorrang en moeten de goederentreinen regelmatig stoppen om de

personentreinen voor te laten gaan. Dit heeft enorme consequenties voor het goederenvervoer op zowel het gebied van kosten als emissies. Het stoppen en optrekken van de trein met een grote lading kost veel tijd en er gaan grote emissies mee gemoeid. Deze kans op vertraging is in grote mate afhankelijk van lokale en incidentele gebeurtenissen die niet eenvoudig kunnen worden gemodelleerd. Daarom zal dit met een vertragingkans worden gemodelleerd, welke wordt onderhevig aan een gevoeligheidsanalyse om een valide model te kunnen garanderen. Vooral deze vertragingkans maakt dat het spoorvervoer verliest aan betrouwbaarheid van levering.

Zoals zojuist is vermeld kan de trein grote hoeveelheden waterstof vervoeren. Deze hoeveelheid kent echter wel een aantal beperkingen. Bovy, Schoemaker en Van Binsbergen (2002) zeggen hierover het volgende: Het laadvermogen van goederentreinen, uitgedrukt in massa, wordt bepaald door de maximale aslast, en daarmee door de maximale belading van een wagon, en door de treinlengte. In Europa kan ongeveer 70 ton in een wagon geladen worden, waardoor een maximale treinlengte van 700 meter, 35 wagons en dus ongeveer 2450 ton vervoerd kan worden.

Voor het vervoer per trein moet, naast de eerder vermelde keuzes, een aanvullende keuze worden gemaakt: het benodigd natransport.

Daarnaast moeten de volgende parameters worden ingesteld:

- Maximale belading wagon;
- Maximale treinlengte;
- Vertragingfactor;
- Kosten verkeersgeleiding;
- Loon machinist;
- Afschrijvingskosten/km;
- Druk container;
- Volume container;
- Temperatuur in container.

2.2.2 Vrachtwagen

Het wegtransport staat voor snel en betrouwbaar transport. Vooral op korte afstanden is het vervoer flexibel en goedkoop. Dit is voornamelijk te danken aan een fijnmazig wegennet waarover Nederland beschikt. Overslag op andere transportmiddelen is bij transport per vrachtwagen derhalve niet nodig.

Maar ook dit transportmiddel kent een aantal nadelen. Allereerst is de uitstoot van emissies in vergelijking met andere modaliteiten groot. De brandstof wordt overal verbrand en emissies zijn daardoor lastig in te bannen. Bij opwekking van elektriciteit geldt dit niet, omdat emissies daar centraal worden veroorzaakt en daardoor makkelijker en goedkoper zijn te verwijderen. Ook de veiligheid is in vergelijking kleiner: de kans op een ongeluk is groter en de gevolgen bij een ongeluk zijn ernstiger. Daarnaast is het vervoer congestiegevoelig en hebben vrachtwagens een beperkte capaciteit. Een vrachtauto als trekker met oplegger heeft een maximale lengte van 15 meter, een motorwagen met aanhanger heeft een maximale lengte van 18 meter (overeenkomend met twee 20fts containers) (zie Bovy, Schoemaker en Van Binsbergen, 2002). De Nederlandse situatie laat zien dat de congestieproblematiek groot is, hierdoor krijgen de vervoerders steeds vaker te maken met vertragingen op de weg. Dit gaat ten koste van de betrouwbaarheid van deze transportmodaliteit. Ook hier zal congestieproblematiek middels een vertragingfactor worden gemodelleerd.

Wat betreft de snelheid zijn rail- en wegvervoer aan elkaar gewaagd, met name vanaf de middellange afstanden. Bij wegvervoer moet echter rekening worden gehouden met rusttijdregelingen voor chauffeurs.

Het wegvervoer heeft te maken met hoge kosten. De wegvoertuigen vergen relatief lage investeringen maar kennen ook een lage levensduur. Bovendien zijn de arbeids-, brandstof- en belastingkosten erg hoog. Per eenheid van vervoerde ton is de verwachting dat het wegvervoer de duurste modaliteit is.

Door deze modaliteit te kiezen moet men veel vrachtwagens inschakelen om eenzelfde hoeveelheid waterstof te vervoeren als met de trein op bijvoorbeeld een binnenschip.

Voor het vervoer per vrachtwagen hoeven, naast de eerder vermelde keuzes, geen aanvullende keuzes te worden gemaakt. Daarentegen moeten een aantal parameters worden ingesteld:

- Maximaal laadvermogen;
- Vertragingfactor;
- Loon chauffeur;
- Afschrijvingskosten/km;
- Druk container;
- Volume container;
- Temperatuur in container.

2.2.3 Scheepvaart

Het voordeel van de binnenvaart is dat het goedkoop, veilig en milieuvriendelijk is. Per rit kunnen enorme hoeveelheden waterstof naar de bestemming vervoerd worden, met relatief weinig uitstoot van schadelijke stoffen (Europese Commissie, 2002). Van de verschillende modaliteiten die er in dit onderzoek geanalyseerd worden zou de binnenvaart per vervoerde ton een van de meer voordelige modaliteiten kunnen zijn, onder andere omdat grote hoeveelheden waterstof die in één keer getransporteerd kunnen worden. Hoewel de investeringen in schepen bijzonder hoog zijn kunnen afschrijvingstermijnen oplopen tot meerdere decennia. Door het grote laadvermogen zijn deze afschrijvingskosten net zoals de arbeids- en brandstofkosten zeer laag. Een ander voordeel van deze modaliteit is dat men niet gebonden is aan tijden waarop men kan varen. Hierdoor spreiden de verkeersstromen zich en is het minder druk op de vaarwegen. Zo wordt de capaciteit van de vaarwegen beter benut.

Het vervoer per schip kent echter ook een aantal beperkingen. Het netwerk van vaarwegen is niet zo fijnmazig als het wegennet zodat de eindbestemming vaak niet direct kan worden bereikt. Daarnaast is de vaarroute afhankelijk van het scheepstype dat men kiest voor het vervoer. Niet elk schip kan door zijn afmetingen (voornamelijk bepaald door de diepgang) door de verschillende vaarwegen. Een keuze die men moet maken bij het vervoer van waterstof per schip is het scheepstype waarmee men transporteert. Het kan daarbij om de afweging gaan het vloeibaar of gasvormig te vervoeren, en de daarmee samenhangende keuze of men het met containers of in tankers wil vervoeren.

De binnenvaart kenmerkt zich als erg betrouwbaar, maar een nadeel is de lage transportsnelheid. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door een lage vaarsnelheid (12 km / uur) en het frequent moeten wachten bij sluisen en bruggen. Hierdoor is de operationele snelheid slechts 7 km / uur (zie Bovy, Schoemaker en Van Binsbergen, 2002).

Bij de scheepvaart dienen er keuzes gemaakt te worden ten aanzien van de volgende aspecten:

- Met welk scheepstype er wordt vervoerd, verschillende typen of slechts met één type;
- Kenmerken van vaarroutes en de daarmee samenhangende keuzes betreffende de havens die men aandoet;
- Benodigd natransport.

Daarnaast moeten de volgende parameters worden ingevuld:

- Afschrijvingskosten/km;
- Loon schipper;
- Capaciteit haven;
- Vertragingfactor;
- Druk container;
- Volume container;
- Temperatuur container.

2.2.4 Pijpleiding

Het vervoeren van waterstof door middel van pijpleidingen betreft een geheel ander soort van transport. De ondergrondse infrastructuur is geheel afgescheiden van andere soorten infrastructuur. Dit heeft het grote voordeel dat kans op schade klein is door de afwezigheid van invloeden van buitenaf (zoals weersomstandigheden). Een ander kenmerk dat transport per pijpleiding onderscheidt van de andere vervoermodaliteiten is dat hierbij geen sprake is van het vervoer met containers, het kan direct door de pijpleiding vervoerd worden. Voordelig is tevens dat men door de afgescheiden infrastructuur geen rekening hoeft te houden met enige vormen van vertraging. Aan de vraag naar waterstof kan continu gehoor worden gegeven.

Transport per pijpleiding kent ook een aantal nadelen. Allereerst wordt er in Nederland niet veel goederen per leiding vervoerd, dit betreft slechts 5% (Van Ham, 2004). Om waterstof te vervoeren kan men ervoor kiezen bestaande pijpleidingen (welke aardgas vervoeren) te gebruiken en het waterstof gemengd af te leveren. Maar om een volwaardig alternatief te vormen ten opzichten van het wegvervoer, spoorvervoer en het vervoer per binnenschip zal uitbreiding van het netwerk noodzakelijk zijn. Dit brengt grote investeringskosten met zich mee, wat tot uitdrukking komt in hoge transportkosten per eenheid waterstof.

Met betrekking tot het vervoer per pijpleiding dienen de volgende aanvullende keuzes worden gemaakt:

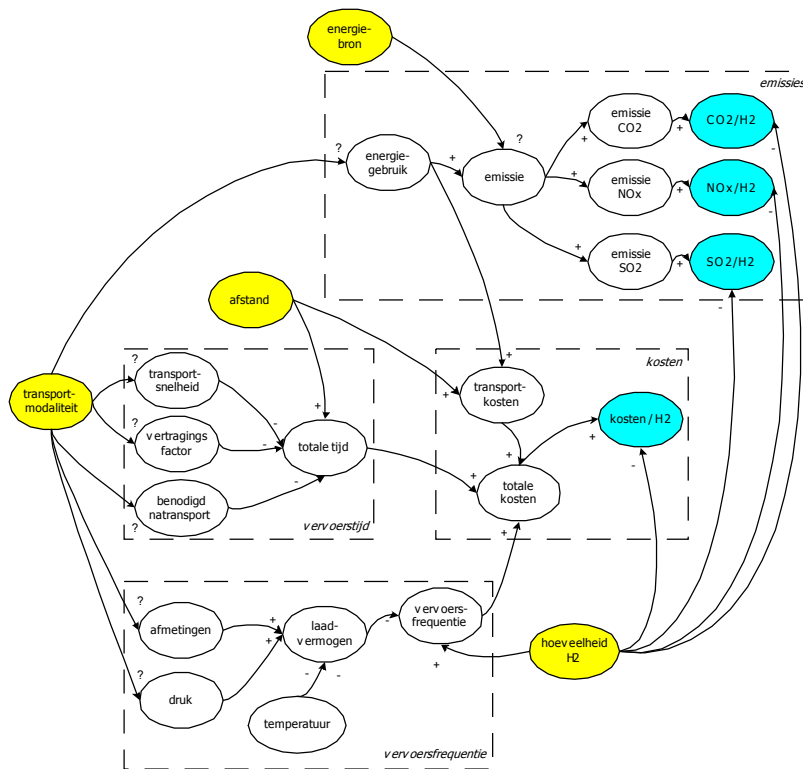
- percentage van de gewenste pijpleidingen waar bestaande pijpleidingen dienst kunnen doen;
- kenmerken van de pijpleiding, zoals de diameter en het materiaal;
- het traject van de pijpleiding.

Daarnaast zijn de volgende parameters van belang:

- Mate van bebouwing;
- Afschrijvingstermijn;
- Dichtheid H₂;
- Wrijvingscoëfficiënt;
- Absolute druk;
- Temperatuur in pijpleiding.

2.3 Prestatie-indicatoren

Het onderzoek naar de afzonderlijke transportmodaliteiten resulteert in een gedeeltelijk overlap van alle modaliteiten. Figuur 4 geeft deze overlap weer. Elk van de transportmodaliteiten voldoet aan deze figuur, zij het dat ze enigszins anders dienen te worden ingevuld. Het transportsysteem is te verdelen in vier vrij gescheiden subsystemen: het energie, de vervoerstijd, de kosten en de vervoersfrequentie.



Figuur 4. Causaal relatiediagram algemeen transport

Omdat wordt gestreefd naar een vergelijking tussen de verschillende transportmodaliteiten, wordt de keuze van de modaliteit als een parameter gezien. De keuze voor transportmodaliteit legt een aantal specifieke factoren vast. De invloed van deze keuze is dus in grote mate bepalend voor de prestatie van het systeem. Er zijn echter nog andere opties die een (mogelijke) grote invloed hebben. De afstand waarover de waterstof dient te worden vervoerd, de hoeveelheid waterstof die moet worden vervoerd en de energiebron die wordt gebruikt tijdens het transport. Dit zijn de keuzes die de eindgebruiker dient te maken. Ze zijn geel weergegeven in Figuur 4.

Via een algemeen model, zoals gepresenteerd, wordt de prestatie van het systeem bepaald. De prestatie wordt gemeten aan de hand van vier indicatoren: de kosten, emissies CO₂, emissies NO_x en emissies SO₂ per vervoerde hoeveelheid waterstof. Door de eigenlijke prestatie (bijvoorbeeld kosten) te delen door de vervoerde hoeveelheid waterstof, worden de vervoersmodaliteiten vergelijkbaar.

3 Onderzoeksplan

In hoofdstuk 2 is een conceptualisatie uitgevoerd, die heeft geleid tot een beter inzicht in de verschillende transportmogelijkheden en de specifieke kenmerken van elke transportmodaliteit. Hierbij zijn er prestatie-indicatoren geformuleerd aan de hand waarvan de modaliteiten met elkaar kunnen worden vergeleken. Daarnaast zijn er een aantal instrumentvariabelen geïdentificeerd, waar de gebruiker van het model zelf waarden aan kan toekennen, om zo verschillende situaties te kunnen doorrekenen. Tenslotte zijn er een aantal parameters van belang om effecten van beleid met het model te kunnen berekenen.

Nu de nodige kwalitatieve informatie is gegenereerd over waterstoftransport, is de volgende stap een kwantitatieve invulling van het model. De doelstelling van dit onderzoek is te komen tot een besluitvormingsondersteunend model, dat het mogelijk maakt verschillende transportmogelijkheden met elkaar te vergelijken, waarna aanbevelingen kunnen worden gedaan. De centrale onderzoeksvraag is dan ook:

Hoe kan men de prestaties van verschillende vervoersmogelijkheden van waterstof met elkaar vergelijken en welke aanbevelingen kunnen aan de Nederlandse overheid worden gedaan over deze vervoersmogelijkheden?

Hierbij kan worden gewerkt aan de hand van deelvragen:

1. Hoe kunnen de inputs en outputs van transportblokken met elkaar in verband worden gebracht (vergelijkingen, waarden van parameters)?
2. Hoe kunnen prestatie-indicatoren worden berekend?
3. Hoe kunnen de bevindingen uit voorgaande stappen worden ingevuld in het computermodel?
4. Is het computermodel juist (bevat het geen fouten)?
5. Is het model valide (is het representatief voor de werkelijkheid, is het niet te gevoelig)?
6. Welke aanbevelingen kunnen er worden gedaan aan de beleidsmakers?

De deelvragen verschillen nogal van aard. Daarom wordt hier een kort overzicht gegeven van de methodes die zullen worden gebruikt.

Voor de eerste en tweede deelvraag is het van belang om tot vergelijkingen te komen die het mogelijk maken om de inputs en outputs met elkaar in verband te brengen (zogenaamde balansvergelijkingen) en om prestatie-indicatoren te berekenen. Sommige vergelijkingen kunnen worden afgeleid van algemene principes. Voor andere zal literatuuronderzoek uitkomst bieden. Het is denkbaar dat in sommige gevallen geen gebruik kan worden gemaakt van vergelijkingen, bijvoorbeeld omdat een berekening te complex is om binnen dit onderzoek eenduidig te kunnen oplossen. Om de rekensnelheid van het besluitvormingsondersteunend model te niet te schaden kan in dergelijke gevallen gebruik worden gemaakt van heuristieken. Heuristieken zijn vuistregels waarmee snel een redelijk goede oplossing kan worden gevonden.

Aan de hand van de derde deelvraag kan het computermodel worden ingevuld. Vergelijkingen en waarden die in voorgaande stappen werden geïdentificeerd kunnen direct in het computermodel worden ingevuld.

De vierde deelvraag is gericht op een verificatie van het model. Hierbij zal bijvoorbeeld worden gecontroleerd of de inputs en outputs van de verschillende transportblokken met elkaar vergelijkbaar zijn. Indien het blok voor pijpleidingtransport uitgaat van waterstof met een andere druk dan

bijvoorbeeld het blok voor spoorwegtransport, zijn de prestaties van deze blokken niet direct vergelijkbaar. Daarnaast worden uitkomsten geverifieerd door middel van de invoer van extremen, zoals een waterstoftransport van 0 kg. Een andere controle die bij verificatie kan worden uitgevoerd is een controle van de modellogica (de juistheid van vergelijkingen en het verantwoord gebruik van heuristieken). Ook kan een beroep worden gedaan op expertbeoordeling.

De vijfde deelvraag houdt in dat het model moet worden gevalideerd. Verschillende methoden kunnen worden gebruikt om te beoordelen of het model de werkelijkheid adequaat representeert. Hier zal in ieder geval gebruik worden gemaakt van een gevoeligheidsanalyse en expertbeoordeling.

Middels de zesde deelvraag kan men tot aanbevelingen komen voor de beleidsmaker. Ten eerste zal worden aangegeven welke beleidsinstrumenten kunnen worden doorgerekend aan de hand van het computerprogramma. Aan de hand daarvan zal het model worden doorgerekend, opdat beleidsaanbevelingen kunnen worden gedaan. Ter indicatie worden hier een aantal voorbeelden gegeven van beleidsvragen die zullen kunnen worden beantwoord. Voor sommige vragen is informatie over de gehele waterstofketen nodig. Indien de middelen dit toelaten, zullen daartoe extra blokjes van het computermodel worden ingevuld.

Voorbeelden van beleidsvragen die door het model kunnen worden beantwoord:

- Waar liggen de omslagpunten (bij welke afstanden / hoeveelheid H₂ zal een andere vervoersmodaliteit de voorkeur genieten)?
- Stel dat de overheid een reductie van CO₂ uitstoot van 5% wil realiseren; hoeveel van het huidig energiegebruik van Nederland moet van waterstof komen om een dergelijke reductie mogelijk te maken? Om deze vraag te kunnen beantwoorden is echter informatie over de gehele keten nodig.

De duur van het totale onderzoek (inclusief inlezen en conceptualisatie) wordt geschat op 12 weken of 720 uur. Het kwantitatieve deel van de stage (vanaf de specificatiefase) zal daarvan naar schatting 8 weken in beslag nemen. Omdat er geen sprake is van een stagevergoeding zijn hier geen kosten aan verbonden.

Tabel 1. Onderzoeksplanning

fase	activiteit	tijdsduur (uur)	tijdsduur (week)	tijdstmoment (week)	bijbehorende data
conceptualisatie	inlezen	60	1 week	1	23 februari – 29 februari
	conceptualisatie	120	2 weken	2-3	1 maart – 14 maart
	rapportage	60	1 week	4	15 maart – 21 maart
specificatie	balansvergelijkingen opstellen	20	4 weken	5	29 maart – 11 april
	vergelijkingen opstellen t.b.v. prestatie-indicatoren	20		5	
	dataverzameling t.b.v. parameters	80		5-6	
	invullen computermodel	120		7-8	
verificatie en validatie	verificatie	30	1 week	9	26 april – 2 mei
	validatie	30		9	
aanbevelingen	doorrekenen model	40	1 week	10	10 mei – 16 mei
	formuleren aanbevelingen	20		10	
eindrapportage	eindrapportage	120	2 weken	11,12	17 mei – 30 mei
totaal		720 uur	12 weken		

Literatuur

Airliquide, Hydrogen, Physical properties, safety, MSDS, enthalpy, gas liquid equilibrium, density, viscosity, flammability, transport properties, <http://www.airliquide.com/en/business/products/gases/gasdata/index.asp?GasID=36>, geraadpleegd 22 februari 2004.

Bovy, P.H.L.; Schoemaker, Th.J.H.; Binsbergen, A.J. van (2002), *Transport, Infrastructuur en Logistiek: Vervoerssystemen en verkeersnetwerken*, Delft: Faculteit Techniek, Bestuur en Management

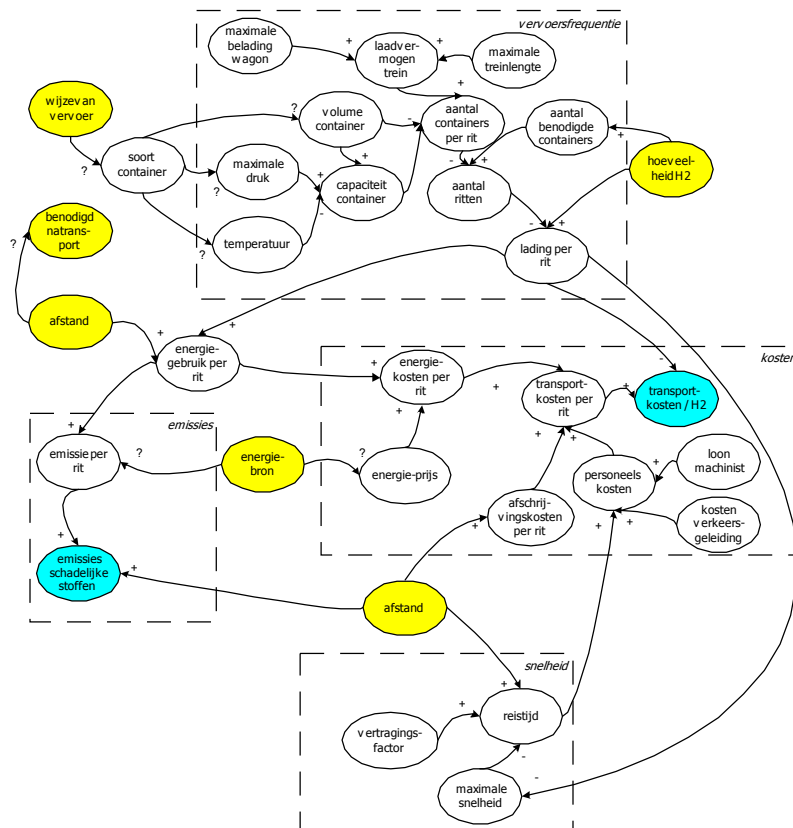
Europese Commissie (2002), *De binnenvaart, een vervoerswijze die werkt*, Brussel: Europese Commissie.

Ham, H. van (2003), *Transport, Infrastructuur en Logistiek: collegesheets*, Delft: Faculteit Techniek, Bestuur en Management, Sectie Transportbeleid en Logistieke organisatie.

Wolters, M., *Ontwerp van Gasnetten*, 2003.

Bijlagen

1. Causaal relatiediagram trein



Figuur 5. Causaal relatiediagram spoorvervoer

Tabel 2. Factoren en eenheden trein

factor	eenheid	factor	eenheid
soort container	-	energiegebruik	MJ / rit
wijze van vervoer	-	energiekosten	€ / rit
hoeveelheid H ₂	kg H ₂ / dag	energieprijs	€ / MJ
energiebron	-	transportkosten per rit	€ / rit
afstand	km / rit	afschrijvingskosten per rit	€ / rit
Benodigd natransport	Km / rit	personeelskosten per rit	€ / rit
		loon machinist	€ / uur
maximale druk	bar	kosten verkeersgeleiding	€ / uur
temperatuur	K	transportkosten H ₂	€ / kg H ₂
volume container	m ³		
capaciteit container	kg H ₂ / container	emissie per rit	kg / rit
aantal containers per rit	# / rit	emissies schadelijke stoffen	kg / kg H ₂
aantal ritten	# ritten / dag		
aantal benodigde containers	# / dag	vertragsfactor	-

lading per rit	kg H ₂ / rit	maximale snelheid	km / uur
maximale belasting per wagon	kg / wagon	reistijd	uur / rit
maximale treinlengte	aantal wagons		
laadvermogen trein	kg / rit		

Het model is opgebouwd uit vier onderdelen: vervoersfrequentie, emissies, kosten en snelheid. In deze onderdelen zijn de bijbehorende belangrijkste factoren weergegeven met hun onderlinge relaties. Positieve relaties worden weergegeven met een +-teken, negatieve relaties met een – -teken. Een voorbeeld van een positieve relatie: hoe groter het volume van de container, hoe groter de capaciteit van de container. Een negatieve relatie: hoe groter het aantal ritten, hoe kleiner de lading per rit. In het model zijn enkele relaties aangegeven met een ?-teken, dit betekent dat er wel degelijk een invloed bestaat tussen de factoren maar dat de richting ervan niet eenduidig kan worden vastgesteld.

De wijze van vervoer (gasvormig of vloeibaar) bepaalt uit welke soorten containers er kan worden gekozen. Het soort container bepaalt de maximale druk, de temperatuur en het volume van de container. Hierdoor kan de capaciteit van de container worden bepaald. De laadvermogen van de trein, samen met het volume en de capaciteit van de container bepalen hoeveel containers er per rit vervoerd kunnen worden. De hoeveelheid waterstof die men wil vervoeren is van invloed op het aantal benodigde containers en de lading per rit.

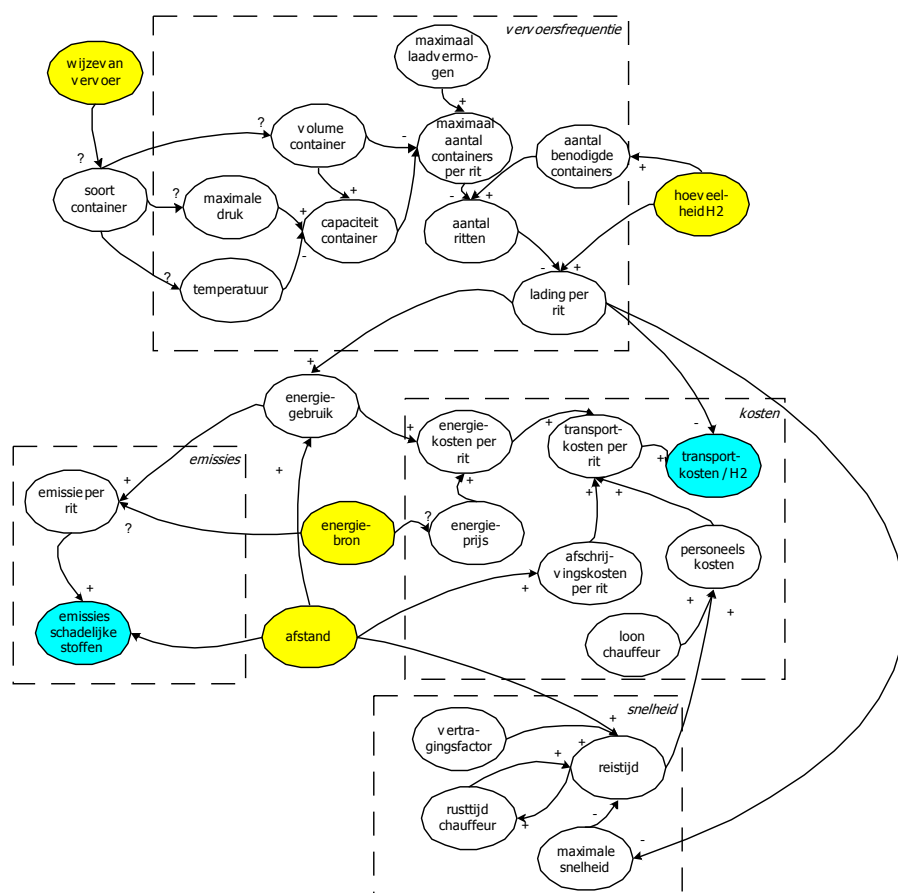
De lading per rit beïnvloedt het energiegebruik en heeft een directe relatie op de transportkosten per eenheid waterstof. Ook de afstand waarover de waterstof vervoerd moet worden speelt een rol bij het energiegebruik. De emissie van schadelijke stoffen is afhankelijk van de emissies per rit, welke bepaald worden door de energiebron en het energiegebruik.

Bij het deel over de kosten zijn drie vormen van kosten onderscheiden: energiekosten (bepaald door de energieprijis en het energiegebruik), de afschrijvingskosten per rit (bepaald door de afstand) en de personeelskosten (afhankelijk van de reistijd, het loon van de machinist en de kosten voor verkeersgeleiding).

De snelheid van het transportmiddel trein is al in de hoofdtekst uitvoerig besproken. De reistijd wordt bepaald door de snelheid en de afstand. Deze reistijd kan worden beïnvloed door vertraging op het traject. Hiertoe is een vertragingfactor opgenomen. Op een druk traject met veel personentreinen heeft de goederentrein bijvoorbeeld een grote kans dat hij moet stoppen om de personentrein voor te laten gaan.

Er is een extra factor opgenomen die aangeeft dat er bij het transport door middel van de trein natransport nodig is.

2. Causaal relatiediagram wegtransport



Figuur 6. Causaal relatiediagram vrachtwagen

Tabel 3. Factoren en eenheden vrachtwagen

factor	eenheid	factor	eenheid
soort container	-	energiekosten per rit	€ / rit
wijze van vervoer	-	energieprijs	€ / MJ
hoeveelheid H ₂	kg H ₂ / dag	energiegebruik	MJ / rit
energiebron	-	transportkosten per rit	€ / rit
afstand	km / rit	afschrijvingskosten per rit	€ / rit
		personeelskosten per rit	€ / rit
maximale druk	bar	loon chauffeur	€ / uur
temperatuur	K	transportkosten H ₂	€ / kg H ₂
volumen container	m ³		
capaciteit container	kg H ₂ / container	emissie per rit	kg / rit
aantal containers per rit	# / rit	emissies schadelijke stoffen	kg / kg H ₂
aantal ritten	# ritten / dag		
aantal benodigde containers	# / dag	vertragsfactor	-
lading per rit	kg H ₂ / rit	maximale snelheid	km / uur
maximale laadvermogen	kg / vrachtwagen	reistijd	uur / rit
		Rusttijd chauffeur	uur / rit

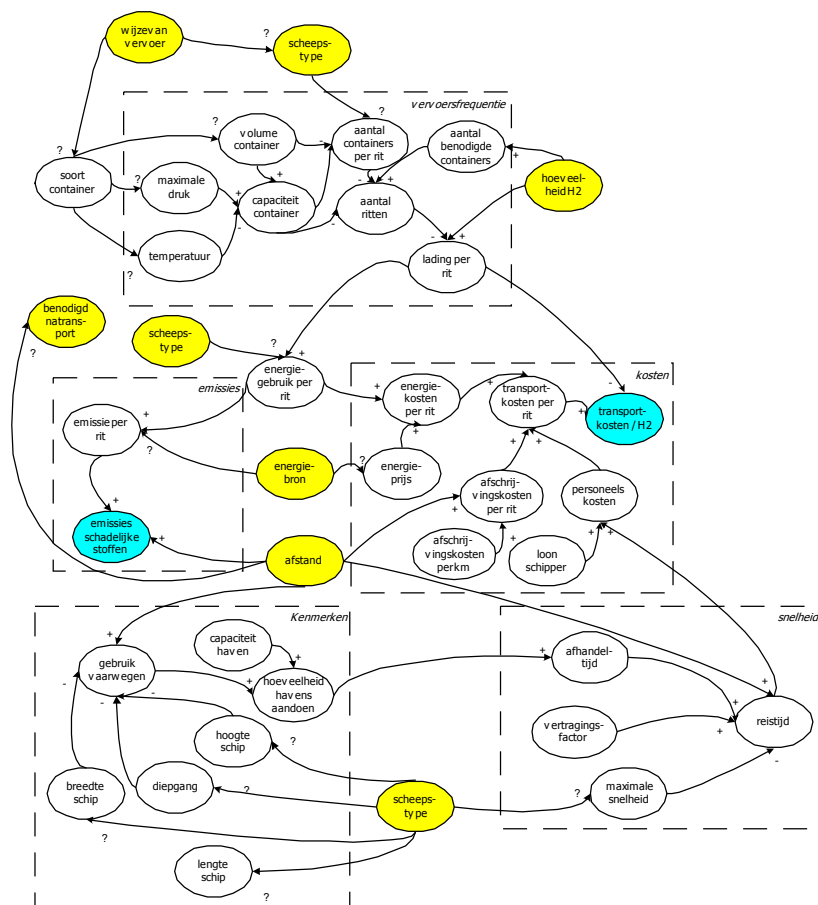
Het model toont veel gelijknissen met het model van het vervoer per trein. Ook dit model is opgebouwd uit vier onderdelen: vervoersfrequentie, emissies, kosten en snelheid. In deze onderdelen zijn de bijbehorende belangrijkste factoren weergegeven met hun onderlinge relaties. Positieve relaties worden weergegeven met een +-teken, negatieve relaties met een – -teken. Een voorbeeld van een positieve relatie: hoe groter het volume van de container, hoe groter de capaciteit van de container. Een negatieve relatie: hoe groter het aantal ritten, hoe kleiner de lading per rit. In het model zijn enkele relaties aangegeven met een ?-teken, dit betekent dat er wel degelijk een invloed bestaat tussen de factoren maar dat de richting ervan niet eenduidig kan worden vastgesteld.

De onderdelen vervoersfrequentie en emissies zijn nagenoeg gelijk aan dat van het spoorvervoer, het bestaat uit dezelfde factoren en relaties.

De kosten zijn opgebouwd uit de brandstofkosten per rit, de afschrijvingskosten en de personeelskosten. De afschrijvingskosten zijn hierbij van minder belang, gezien de korte levensduur van de voertuigen. De andere twee kostenaspecten zijn erg hoog, zoals ook al in de beschrijving in de hoofdtekst naar voren kwam.

Een ander belangrijk onderdeel bij het vervoer per vrachtwagen is de snelheid. Door de toenemende congestie op de wegen krijgen vervoerders steeds vaker te maken met vertragingen. De kans op de vertraging aangegeven met een vertragingfactor. Daarnaast moet men rekening houden met rusttijden van de chauffeur.

3. Causaal relatiediagram schip



Figuur 7. Causaal relatiediagram schip

Tabel 4. Factoren en eenheden schip

factor	eenheid	factor	eenheid
scheepstype	-	energiekosten per rit	€ / rit
soort container	-	energieprijs	€ / MJ
wijze van vervoer	-	energiegebruik	MJ / rit
hoeveelheid H ₂	kg H ₂ / dag	transportkosten per rit	€ / rit
energiebron	-	afschrijvingskosten per rit	€ / rit
afstand	km / rit	personeelskosten per rit	€ / rit
benodigd natransport	km / rit	loon schipper	€ / uur
		transportkosten H ₂	€ / kg H ₂
maximale druk	bar	gebruik vaarwegen	-
temperatuur	K	diepgang	m
volume container	m ³	hoogte	m
capaciteit container	kg H ₂ / container	breedte schip	m
aantal containers per rit	# / rit	lengte schip	m
aantal ritten	# ritten / dag		
aantal benodigde containers	# / dag		
lading per rit	kg H ₂ / rit	emissie per rit	kg / rit
		emissieschadelijke stoffen	kg / kg H ₂

vertragingfactor	-		
afhandeltijd	Uur / rit	aantal havens aandoen	Aantal / rit
maximale snelheid	km / uur	capaciteit haven	# containers / dag
reistijd	uur / rit		

Het causale model van de scheepvaart is opgebouwd uit vijf onderdelen: vervoersfrequentie, emissies, kosten, kenmerken en snelheid. In deze onderdelen zijn de bijbehorende belangrijke factoren weergegeven met hun onderlinge relaties. Positieve relaties worden weergegeven met een +-teken, negatieve relaties met een - -teken. Een voorbeeld van een positieve relatie: hoe groter het volume van de container, hoe groter de capaciteit van de container. Een negatieve relatie: hoe groter het aantal ritten, hoe kleiner de lading per rit. In het model zijn enkele relaties aangegeven met een ?-teken, dit betekent dat er wel degelijk een invloed bestaat tussen de factoren maar dat de richting ervan niet eenduidig kan worden vastgesteld. Het scheepstype bijvoorbeeld bepaald de maximale snelheid, maar deze factor is voor elk type verschillend.

Het onderdeel vervoersfrequentie is nagenoeg gelijk aan dat van de vorige twee modaliteiten, het bestaat uit dezelfde factoren en relaties met het enige verschil dat het scheepstype het aantal containers per rit bepaald. Met de wijze van vervoer wordt het vloeibaar of gasvormig vervoeren van de waterstof bedoeld. Ook het onderdeel emissies komt sterk overeen met het deel model van dat van de vrachtwagen.

De kosten bestaan uit drie onderdelen, te weten de energiekosten, de afschrijvingskosten en de personeelskosten. Deze drie factoren zijn alle drie erg belangrijk en bepalend voor de uiteindelijke transportkosten per vervoerde eenheid waterstof.

Bij de kenmerken van de scheepvaart zijn die factoren opgenomen die de vaarroute van het schip bepalen. Het gekozen scheepstype heeft vast afmetingen (lengte, breedte, diepgang en hoogte), deze bepalen op welke rivieren er gevaren kan worden. De rivieren leggen beperkingen op aan de breedte die een schip mag hebben en bijvoorbeeld de maximale diepgang. Wanneer de vaarroutes bekend zijn, is de mate waarin men havens kan aandoen ook vastgesteld. Langs welke havens men vaart en de capaciteit van de haven zelf zijn hierop van invloed.

Ten slotte bevat het model het onderdeel snelheid, dit heeft weer veel gelijkenissen met dat van de trein en de vrachtwagen. Ook in dit model is de factor benodigd natransport opgenomen, welke aangeeft dat het vervoeren van waterstof met een schip vaak niet direct de eindbestemming kan bereiken en daardoor een vorm van natransport noodzakelijk is.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de verschillende scheepstypen, onderverdeeld in een aantal klassen. Daarnaast zijn er nog een aantal nieuwe typen opgenomen. Het betreft hier schepen welke containers vervoeren.

Standaard Scheepstypen								
Vaarwegklassen	Type	Lengte (m)	Breedte (m)	Diepgang (m)	Hoogte (m)	Laadvermogen (tonnen)	Capaciteit (TEU)	Snelheid (knopen)
0	Kleinere vaartuigen	Vari'rend				<300		
1	Spits	38.50	5.00	2.20	3.55	300		
2	Kempenaar	50.00	6.60	2.50	4.20	600		
3	Dortmund- Eems kanaalschip	67.00	8.20	2.50	3.95	1000		
4	Rijn- Herne kanaalschip	80.00	9.50	2.50	4.40	1350		
5	Groot Rijnschip	95.00	11.50	2.70	4.40	2000		
6	vierbakduwstel	185.00	22.80	3.30	8.75	10000		
Panamax	Maren Maersk	294.10	32.20	13.50			4300	23= >40 km/uur
Post Panamax	Hamburg Express	320.38	42.88				7506	25
Nieuwe typen	MS Jowi	134.20	16.80	3.00		4600	398(4)-470(5)	
	Neokemp	63.00	7.00	2.80		867	32	
	Riverhopper (palletcarier)	63.00	7.20	2.75		750	32(2)-48(3)	

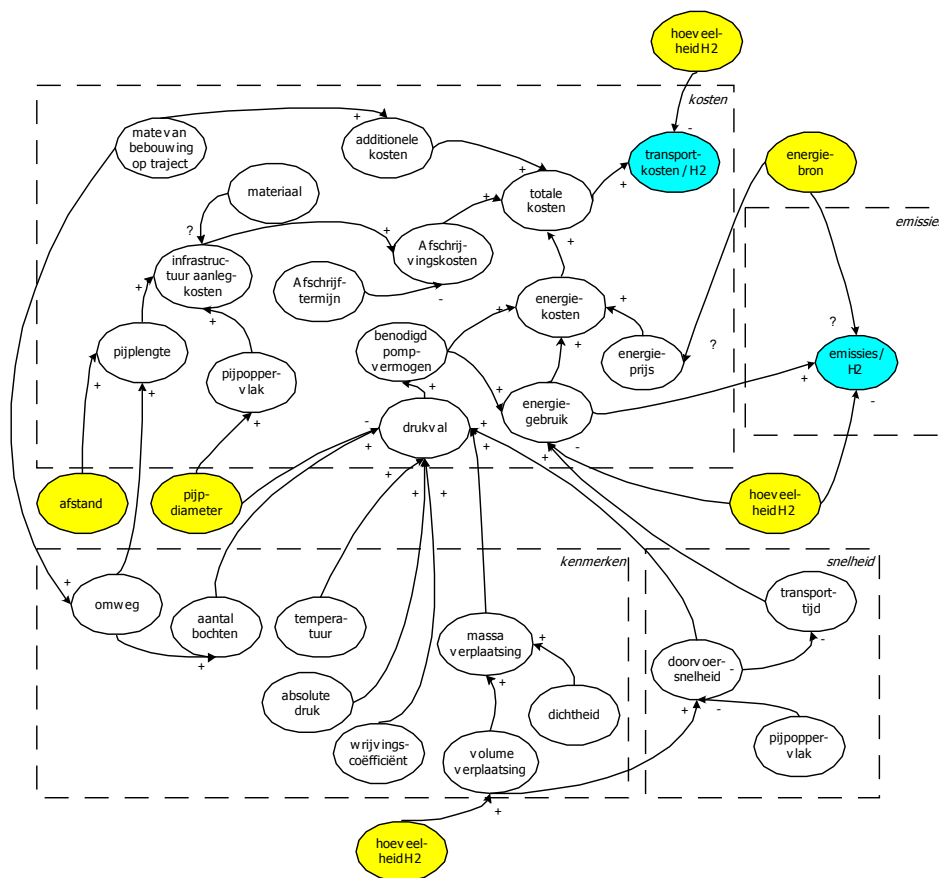
Voor het vervoer van vloeibaar waterstof kan ook gekozen worden voor en Liquid Bulk Carrier. Onderstaand overzicht geeft een aantal van deze schepen met de karakteristieken:

Scheepstype	Lengte (m)	Breedte (m)	Diepgang (m)	Tonnage (DWT)	Snelheid (knopen)	Bijzonderheden
Maeks Sealand	343.71	56.44	21.60	299.700	14=1.8km/uur	Niet alle havens, wel Rotterdam
Britisch Energy	183.00	27.40	-	35.700	-	14 ladingtanks
Stolt Aspiration	128.70	20.10	11.00	12.219		

Zoals uit de beschrijvingen is gebleken zijn de vaarwegen een bepalende factor voor het transport per binnenschip. Het is daarom van belang om de bestaande vaardiensten (deze lijndiensten zijn in de onderstaande tabel aangegeven) in beschouwing te nemen. In de tabel zijn ook enkele toekomstige lijndiensten opgenomen:

Lijndiensten	Rotterdam Amsterdam Antwerpen Moerdijk Nijmegen	Amsterdam Nijmegen-Du Den Bosch-Oss-Bern-Luik Moerdijk Antwerpen Harlingen Meppel Rotterdam Groningen-DU Rotterdam Rotterdam Rotterdam
Toekomstige lijndiensten	Rotterdam Amsterdam Nijmegen	Utrecht-Harlingen Geest-Zeebrugge Harlingen-Groningen-DU Almere

4. Causaal relatiediagram transport per pijpleiding



Figuur 8. Causaal relatiediagram pijpleiding

Tabel 5. Factoren en eenheden pijpleiding

factor	eenheid	factor	eenheid
energiebron	-	energieprijs	€ / MJ
pijpdiameter	m	energiegebruik	MJ/kg H ₂
materiaal	-	benodigd pompvermogen	W
mate van bebouwing	% bebouwde oppervlakte	drukv al	bar
additionele kosten	€ / m	omweg	m
pijplengte	m	aantal bochten	#
pijppoppervlak	m ²	temperatuur	K
infrastructuur aanlegkosten	€ / m	absolute druk	bar
afschrijftermijn	jaar	massaverplaatsing	kg / s
afschrijvingskosten	€ / jaar	volumeverplaatsing	m ³ / s
operationele kosten	€ / m / jaar	dichtheid	kg / m ³
totale kosten	€ / kg H ₂	doorvoersnelheid	m / s
transportkosten H ₂	€ / kg H ₂	transporttijd	uur / kg H ₂
energiekosten	€ / kg H ₂	emissies schadelijke stoffen	kg / kg H ₂

Het causale model van pijpleidingen is eveneens opgebouwd uit vier onderdelen: kosten, kenmerken, snelheid en emissies. In deze onderdelen zijn de bijbehorende belangrijkste factoren weergegeven met hun onderlinge relaties. Positieve relaties worden weergegeven met een +-teken, negatieve relaties met een -teken. In het model zijn enkele relaties aangegeven met een ?-teken, dit betekent dat er wel degelijk een invloed bestaat tussen de factoren maar dat de richting ervan niet eenduidig kan worden vastgesteld. Een voorbeeld van een positieve relatie: hoe groter de mate van bebouwing op het traject, hoe groter de additionele kosten zullen zijn. Een negatieve relatie: hoe groter de doorvoersnelheid, hoe kleiner de transporttijd.

Bij het pijpleidingentransport is er sprake van continu in plaats van batchgewijs transport omdat er geen sprake van vervoer per container. Daarom is het onderdeel vervoersfrequentie irrelevant en is dit niet in dit model opgenomen. Daarentegen spelen de kosten een erg belangrijke rol. Voornamelijk bij het nieuw aanleggen van de leidingen moeten aanzienlijke investeringen worden gedaan. Hierbij vormen de additionele kosten een onderdeel van het totaal. Het gaat daarbij om de kosten die men moet maken om obstakels te vermijden of te omzeilen. Daarbij is de omweg die men moet maken de bepalende factor. Deze omweg bepaald dan ook, tesamen met de afstand, de gewenste pijplengte.

Een andere belangrijke factor in dit diagram is de drukval, bepaald door de factoren aangegeven in het onderdeel kenmerken, te weten: aantal bochten, temperatuur in de pijpleiding, absolute druk, wrijvingscoëfficiënt, massaverplaatsing en de doorvoersnelheid (zie Wolters, 2003). Deze laatste factor is geplaatst bij het onderdeel snelheid omdat deze hierop het meeste invloed heeft. De doorvoersnelheid is afhankelijk van de volumeverplaatsing en het pijpoppervlak. Wanneer het waterstof met een hoge doorvoersnelheid door de pijpleiding vervoerd kan worden zal de transporttijd als geheel afnemen.

Onderzoek naar waterstoftransport

Kwantitatieve analyse

C.C. Cantarelli - 1116452
E.J.L. Chappin - 1101870
A.M. Klompenhouwer - 1109170

SPM3910 Extern vrij project
maart-mei 2004



Voorwoord

Dit rapport is geschreven voor het extern project SPM3910 van de opleiding Technische Bestuurskunde aan de Technische Universiteit Delft.

Opdrachtgever is de sectie Energie en Industrie van de faculteit Techniek, Bestuur en Management aan de Technische Universiteit Delft.

Het rapport is bevat een kwantitatieve analyse van waterstoftransport en is daarmee het vervolg van de conceptuele analyse.

Chantal Cantarelli
Emile Chappin
Marlene Klompenhouwer

Samenvatting

Dit rapport is de rapportage van een onderzoek, welk een onderdeel van een project is, uitgevoerd door de sectie Energie en Industrie binnen de faculteit Techniek, Bestuur en Management aan de Technische Universiteit Delft voor de Nederlandse overheid. Binnen dit project wordt onderzoek gedaan naar waterstofketens. Veel van die ketens bestaan nog nauwelijks of niet en de haalbaarheid, voor- en nadelen van verschillende mogelijkheden dienen te worden onderzocht.

Binnen dit onderzoek zal het transportgedeelte van de keten worden beschreven en zullen de bijbehorende blokken in het softwareprogramma worden gekwantificeerd. Transport van waterstof kan plaatsvinden via trein, vrachtwagen, schip en pijpleiding.

De centrale onderzoeksvraag is: *Hoe kan men de prestaties van verschillende vervoersmogelijkheden van waterstof met elkaar vergelijken en welke aanbevelingen kunnen aan de Nederlandse overheid worden gedaan over deze vervoersmogelijkheden?*

De prestaties van de verschillende vervoersmogelijkheden zijn vergeleken aan de hand van een aantal prestatie-indicatoren, te weten CO₂ emissies, SO₂ emissies, energie-efficiency en kosten. De belangrijkste aanbevelingen aan de Nederlandse overheid zijn om voor het hoofdtransport gebruik te maken van een schip en voor het natransport een pijpleiding te kiezen. Wanneer men over grote afstanden is een schip is goedkoop ten opzichte van de andere modaliteiten en kent het een hoge efficiency. Daarnaast is het een milieuvriendelijke modaliteit met relatief lage emissies. Ook is het gebruik van een schip flexibeler dan van een pijpleiding. Voor kleinere afstanden is echter een pijpleiding aan te bevelen.

Omdat elke onderzochte vervoerswijze relatief hoge CO₂ emissies veroorzaakt (minstens 1,25 ton CO₂ per ton waterstof), wordt daarnaast aanbevolen nader onderzoek te laten verrichten naar alternatieve opslagmethoden en vervoerswijzen van waterstof. Daarnaast is het aan te bevelen onderzoek te doen naar alternatieve opwekkingsmethoden, omdat het gebruik van conventioneel opgewekte elektriciteit voor de productie en het transport van waterstof een belangrijke veroorzaker is van CO₂ emissies.

Inhoudsopgave

1 Inleiding	5
2 Specificatie	6
2.1 Modelopbouw	6
2.2 Aannames	8
3 Verificatie en validatie	13
3.1 Modelcontrole	13
3.2 Gevoeligheidsanalyse	14
3.3 Beperkingen	15
4 Experimenten	17
4.1 CO ₂ emissies	17
4.2 SO ₂ emissies	18
4.3 Kosten exclusief emissies	18
4.4 Kosten inclusief emissies	20
4.5 Efficiency	21
5 Conclusies en aanbevelingen	22
5.1 Conclusies	22
5.2 Aanbevelingen	24
Literatuur	25
Bijlagen	27
1. Instelparameters	27
2. Constanten	28
3. Vergelijkingen	29
4. Scheepstypen	30
5. Resultaten gevoeligheidsanalyse	31

1 Inleiding

Dit onderzoek is een onderdeel van een project, uitgevoerd door de sectie Energie en Industrie binnen de faculteit Techniek, Bestuur en Management aan de Technische Universiteit Delft voor de Nederlandse overheid. Binnen dit project wordt onderzoek gedaan naar waterstofketens. Veel van die ketens bestaan nog nauwelijks of niet en de haalbaarheid, voor- en nadelen van verschillende mogelijkheden dienen te worden onderzocht.

Binnen dit project wordt gebruik gemaakt van een bestaand softwareprogramma dat de werking en prestatie van totale ketens inzichtelijk kan maken voor de eindgebruiker. Deze eindgebruiker kan beslissingen over hoe de keten kan worden ingericht (gedeeltelijk) baseren op de informatie die de mogelijkheden van het softwareprogramma biedt. Dit softwarepakket bestaat uit blokken die stappen in de keten representeren. Nog niet alle blokken zijn echter geoperationaliseerd tot een invulling van concrete gegevens over de verschillende mogelijkheden binnen waterstofketens. Binnen een blok dienen de relaties te worden gedefinieerd tussen de inputs en outputs, moeten prestatie-indicatoren worden gespecificeerd en berekend en worden parameters vastgesteld en geïmplementeerd, waarmee de eindgebruiker middels regelknoppen het blok binnen de keten kan variëren. Het model heeft een generiek karakter, het biedt de mogelijkheid om verschillende mogelijkheden door te rekenen.

Binnen dit onderzoek zal het transportgedeelte van de keten worden beschreven en zullen de bijbehorende blokken in het softwareprogramma worden gekwantificeerd. Transport van waterstof kan plaatsvinden via trein, vrachtwagen, schip en pijpleiding.

In dit onderzoek heeft een conceptualisatie plaatsgevonden van het transport van waterstof, zodat de verschillende transportmogelijkheden uiteindelijk met elkaar kunnen worden vergeleken. Met behulp van de gegevens en bevindingen uit deze blokken is het mogelijk om te komen tot concrete aanbevelingen voor de beslisser met betrekking tot keuzes binnen waterstofketens. Daartoe zal naast het rapport van de conceptuele analyse de kwantitatieve analyse in dit rapport worden beschreven. Dit rapport bevat de bevindingen en aanbevelingen van het hoofddeel van de stage.

De centrale onderzoeksvraag is: *Hoe kan men de prestaties van verschillende vervoersmogelijkheden van waterstof met elkaar vergelijken en welke aanbevelingen kunnen aan de Nederlandse overheid worden gedaan over deze vervoersmogelijkheden?*

Hierbij kan worden gewerkt aan de hand van deelvragen:

1. Hoe kunnen de inputs en outputs van transportblokken met elkaar in verband worden gebracht (vergelijkingen, waarden van parameters)?
2. Hoe kunnen prestatie-indicatoren worden berekend?
3. Hoe kunnen de bevindingen uit voorgaande stappen worden ingevuld in het computermodel?
4. Is het computermodel juist (bevat het geen fouten)?
5. Is het model valide (is het representatief voor de werkelijkheid, is het niet te gevoelig)?
6. Welke aanbevelingen kunnen er worden gedaan aan de beleidsmakers?

De opbouw van dit rapport is als volgt. Na deze inleiding volgt de specificatie van vergelijkingen en benodigde data voor het computermodel. In het daaropvolgende hoofdstuk zal het computermodel worden geverifieerd en gevalideerd. De uit het computermodel volgende aanbevelingen worden in het laatste hoofdstuk gepresenteerd, waarna wordt afgesloten met de literatuur en de bijlagen.

2 Specificatie

Dit hoofdstuk bevat een beschrijving van het computermodel van de waterstofketen. De waarden van de factoren die in de conceptuele analyse zijn geïdentificeerd worden daarin gespecificeerd. Dan is het mogelijk de constanten en de variabelen te bepalen die in het computermodel zijn geprogrammeerd en kunnen vergelijkingen worden opgesteld die de prestatie-indicatoren berekenen. Bij het modelleren zijn er enkele vereenvoudigingen gemaakt omdat het niet mogelijk is de gehele werkelijkheid te modelleren. De gemaakte aannames daarbij worden in de tweede paragraaf van dit hoofdstuk genoemd.

2.1 Modelopbouw

De waterstofketen is opgebouwd uit een aantal verschillende blokken die tezamen een keten vormen van de productie van waterstof tot de plaats van bestemming. Omdat dit onderzoek vooral is gericht op het transport van waterstof is hierbij echter maar één productiewijze onderzocht.

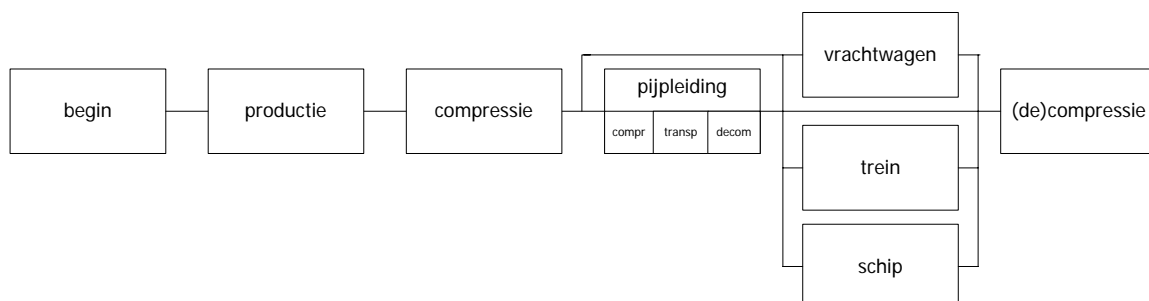
Het eerste blok is het begin blok. Hiermee start de keten en kan de gebruiker aangeven welke prijs voor CO₂- en SO₂-emissies in het model worden meegenomen. Het volgende blok is de productie van waterstof. Er is gekozen voor een elektrolyseproces dat water en elektrische energie omzet in waterstof en zuurstof.

Hierna volgt een compressor blok, dat de waterstof tot de containerdruk comprimeert. Aangenomen wordt dat waterstof altijd wordt afgeleverd met minimaal de containerdruk. Dat betekent dat er tot minimaal deze containerdruk moet worden gecomprimeerd.

Na het compressorblok volgt het pijpleiding blok. In een pijpleiding kan waterstof onder een hogere druk worden getransporteerd dan in de containers. Indien van de pijpleiding gebruik wordt gemaakt moet de waterstof naar pijpleidingdruk worden gecomprimeerd. Na gebruik van de pijpleiding wordt de druk weer verlaagd tot 4,5 bar voor natransport en aflevering.

Hierop volgen de drie overige transportblokken en tenslotte een compressor/decompressor blok, waarna de keten wordt afgesloten. De gewenste einddruk van waterstof is afhankelijk van de toepassing en kan door de gebruiker worden gekozen in het compressor/decompressor blok.

Er is geen extra optie opgenomen voor het natransport omdat dit impliciet in het model is opgenomen. De gebruiker kan namelijk meerdere vervoersmodaliteiten tegelijk aangeven, indien natransport benodigd is. Voor elk van de transportmodaliteiten kan vervolgens afzonderlijk worden aangegeven over welke afstand men het gekozen transportmiddel gaat gebruiken.



Figuur 1. Blokken

Een blok is opgebouwd uit de volgende elementen:

- main stream: in dit onderdeel staan de inputwaarden en outputwaarden van de parameters. Doordat de output van het eerste blok de input vormt van het volgende blok wordt het mogelijk de verschillende blokken aan elkaar te koppelen.
- incrementele prestatie-indicatoren: factoren die de prestatie van de afzonderlijke blokken aangeven.
- variabelen: deze parameters kan de gebruiker zelf instellen
- constanten: vaste gegevens zoals de emissies per kilowattuur opgewekte elektriciteit.
- vergelijkingen: dit zijn die formules die door middel van de constanten en de variabelen de belangrijkste factoren en prestatie-indicatoren bepalen.
- basis data

Uiteindelijk is het mogelijk de prestatie van de gehele keten te bepalen door de prestatie-indicatoren van de afzonderlijke blokken op te tellen of te vermenigvuldigen. De incrementele kosten en emissies worden bij elkaar opgeteld. De incrementele efficiency's worden vermenigvuldigd.

2.1.1 Instelparameters

De gebruiker heeft een aantal mogelijkheden om de keten naar eigen inzicht in te richten. Dit is in het computermodel weergegeven doordat men per blok een aantal variabelen kan kiezen. De gebruiker is bij het instellen van de variabelen beperkt in zijn keuze doordat er minimum en maximum waarden van de variabelen in het model moeten worden opgenomen. Deze waarden zijn zo ruim gekozen dat elk haalbaar systeem erbinnen zal vallen.

In het opstartblokje kan worden aangegeven of en hoeveel kosten er gerekend moeten worden voor CO₂ en SO₂ emissies. Het startblokje kon echter niet door ons worden aangepast. Daarom staat er bij de kosten voor CO₂ en SO₂ emissies een dollarteken. Wij hebben in ons model Euro gebruikt. Bovendien kunnen in het blokje een aantal variabelen worden ingesteld die voor dit onderzoek niet van belang zijn. Dit is echter voor de berekening geen bezwaar: de betreffende variabelen komen niet voor in de vergelijkingen.

In alle volgende blokjes kan worden aangegeven of en hoeveel 'overige kosten' meegerekend moeten worden en welk loon per manuur er geldt. Verder kunnen per blokje nog een aantal specifieke keuzes worden gemaakt.

In het elektrolyse blokje kan de gewenste hoeveelheid waterstof worden gekozen (met bijbehorende investeringskosten voor de elektrolyse-installatie). Aan de hand van deze waarde rekent het model de benodigde hoeveelheid elektriciteit voor de opwekking.

Bij de trein, de vrachtwagen en het schip kunnen de afstand en het vertragingspercentage worden ingesteld. Bij de trein kan bovendien de energiebron worden gekozen: men kan een trein op elektriciteit of op diesel laten rijden.

Voor het transport per pijpleiding is afstand ook een instelparameter. Daarnaast kan de gebruiker ervoor kiezen gebruik te maken van het bestaande (aardgas)net of van een nieuwe pijpleiding. In het eerste geval kunnen kosten voor een eventuele scheiding van waterstof en aardgas worden aangegeven. Indien gekozen wordt voor een nieuwe pijpleiding kan de capaciteit ervan worden ingesteld. De gebruiker kan ook kiezen voor een combinatie van oude en nieuwe pijpleiding: er kan dan gebruik gemaakt worden van bestaande pijpleidingen en voor de rest van het traject, waar nog geen pijpleiding ligt, wordt dan een nieuwe pijpleiding aangelegd.

2.1.2 Constanten

De constanten zijn door de modelleers vastgesteld om zodoende de vergelijkingen te kunnen opstellen. Het betreffen factoren als de maximale belading van een voertuig, de capaciteit van de container, het aandeel emissies dat vrijkomt bij het transportmiddel, de afschrijvingstermijn en kosten zoals investeringskosten en personeelskosten. Voor een overzicht van alle opgenomen constanten wordt verwezen naar de bijlage. Daarnaast is in het computermodel voor elke constante aangegeven of het een aanname is of uit welke bronnen hij afkomstig is.

Voor concrete waarden van bepaalde constanten, zoals brandstofverbruik, zijn waar mogelijk gemiddelde waarden genomen. Dit is gedaan omdat er in dit model wordt uitgegaan van één type vervoermiddel (dus één type schip, trein en vrachtwagen).

2.1.3 Vergelijkingen

De belangrijkste vergelijkingen zullen de prestatie-indicatoren vaststellen. Het zijn berekeningen van de kosten en de efficiëntie.

$$\begin{aligned} \text{Kosten: } K_{\text{tot}} &= K_{\text{emissies}} + K_{\text{energie}} + K_{\text{personeel}} + K_{\text{overig}} + K_{\text{afschrijving}} + K_{\text{scheiden}} \\ &= (EM_{\text{CO}_2} * P_{\text{CO}_2} + EM_{\text{SO}_2} * P_{\text{SO}_2}) + K_{\text{elektr}} + K_{\text{diesel}} + K_{\text{personeel}} + K_{\text{overig}} + K_{\text{afschrijving}} + K_{\text{scheiden}}. \end{aligned}$$

K: kosten (Euro / jaar), EM: emissies (ton / jaar), P_{CO_2} : prijs per ton emissie.

K_{scheiden} : scheidingskosten H_2 en gas.

$$\text{Energie efficiency: } \text{Eff}_e = 100\% * E_{\text{uit}} / E_{\text{in}}$$

De vergelijking voor de energie efficiency krijgt in de meeste blokjes de volgende vorm:

$$\begin{aligned} \text{Eff}_e &= 100\% * E_{\text{uit}} / E_{\text{in}} = 100\% * (Q_{\text{out, hydrogen}} * C_{\text{hydrogen}}) / (Q_{\text{in, hydrogen}} * C_{\text{hydrogen}} + E_{\text{diesel}} + E_{\text{elektr}}^*) = \\ &= 100\% * (Q_{\text{out, hydrogen}} * C_{\text{hydrogen}}) / (Q_{\text{in, hydrogen}} * C_{\text{hydrogen}} + E_{\text{diesel}} + (E_{\text{elektr}} / \text{Eff}_{\text{EO}} / 100)). \end{aligned}$$

Eff_{EO} : Efficiency elektriciteitsopwekking (%); C_{hydrogen} : verbrandingswarmte H_2 .

De overige (hulp)vergelijkingen zijn weergegeven in de bijlage.

2.2 Aannames

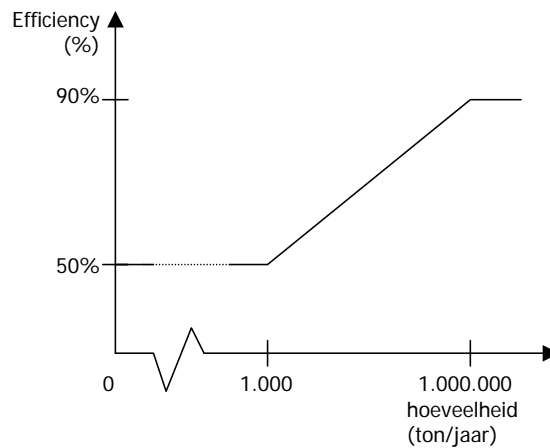
Bij het programmeren van de waterstofketen zijn een aantal aannames gemaakt. Dit is noodzakelijk gebleken om de benodigde vergelijkingen te kunnen opstellen en om de incrementele prestatie-indicatoren te berekenen. Daar dit belangrijke consequenties kan hebben voor de resultaten is het van belang deze expliciet te maken. Per onderdeel van de transportketen zullen de verschillende aannames hieronder kenbaar gemaakt worden. Aangenomen wordt dat gebruik wordt gemaakt van grijze (conventionele) energie. Voor groene energie gelden bij de betrokken constanten andere waarden. Alle kosten zijn in Euro.

2.2.1 Elektrolyse

Er is in het model uitgegaan van de situatie waarin de gebruiker de gewenste hoeveelheid waterstof bepaalt (met bijbehorende investeringskosten) en vervolgens de benodigde hoeveelheid elektriciteit wordt vastgesteld. Dit kan ook andersom, maar omdat het hier om het transporteren van waterstof gaat is er gekozen om te redeneren vanuit het perspectief van de gewenste hoeveelheid waterstof.

Bij gebrek gedetailleerde informatie wordt aangenomen dat één fulltime medewerker nodig is om het proces te monitoren.

De relatie tussen de efficiency van de conversie en de capaciteit van de installatie kan worden gemodelleerd door een exponentiële relatie. Omdat de precieze relatie niet bekend is, is deze vereenvoudigd tot een lineaire relatie: de efficiency neemt dan lineair toe met de omvang van de installatie. Omdat een efficiency van minder dan 50% of meer dan 90% niet aannemelijk wordt geacht, wordt aangenomen dat de efficiency minimaal 50% en maximaal 90% bedraagt. Deze waarden zijn niet empirisch onderbouwd en kennen daarom een bepaalde mate van onzekerheid. Het is echter de beste benadering die binnen dit onderzoek kon worden gegeven.



Figuur 2. Relatie efficiency versus hoeveelheid

2.2.2 Compressor

Er wordt uitgegaan van adiabatische (de)compressie, dat wil zeggen dat compressie plaatsvindt zonder warmte-uitwisseling met de omgeving. De door de compressor te leveren arbeid is gelijk aan de verandering in inwendige energie. Omdat de berekening niet voor de hand ligt, is hieronder weergegeven hoe de vergelijking is opgesteld.

Te leveren arbeid per kg = $-dW = dU = c_v \cdot dT \rightarrow$ Te leveren arbeid = $Q_{\text{hydrogen,kg}} \cdot c_v \cdot (T_{\text{eind}} - T_{\text{begin}})$.

Hierbij geldt dat c_v de soortelijke warmte bedraagt bij gelijk volume. De eindtemperatuur (T_{eind}) kan worden berekend doordat pV/T constant is:

$$p_{\text{begin}} \cdot V_{\text{begin}} / T_{\text{begin}} = p_{\text{eind}} \cdot V_{\text{eind}} / T_{\text{eind}} \rightarrow T_{\text{eind}} = T_{\text{begin}} \cdot p_{\text{eind}} \cdot V_{\text{eind}} / (p_{\text{begin}} \cdot V_{\text{begin}})$$

Omdat bij adiabatische compressie ook pV^k constant is (k : ratio van soortelijke warmtes. $k = c_p/c_v$; c_p : soortelijke warmte bij gelijke druk) kan het eindvolume worden berekend op basis van het beginvolume, de begindruk en de gewenste einddruk: $V_{\text{eind}} = V_{\text{begin}} \cdot (p_{\text{begin}}/p_{\text{eind}})^{1/k}$.

De waarde van c_p voor waterstof bij atmosferische druk en kamertemperatuur is: $c_p = 143000 \text{ J/kgK}$ (Janssen en Warmoeskerken, 1987). Aangenomen wordt dat de waarde van c_p niet significant verandert bij andere druk of temperatuur. De ratio van soortelijke warmtes bedraagt $k = 1,40$ (Concoa, 2004). c_v kan nu worden berekend: $c_v = c_p/k = 10210 \text{ J/kgK}$.

Bij gebrek aan gedetailleerde informatie wordt uitgegaan van een compressor met een efficiency van 80%. De kosten voor compressoren zijn afgeleid uit de gegevens van de Gasunie.

De druk in de ISO containers wordt geacht circa 4,5 bar te bedragen (de minimale testdruk volgens Hoyer Odfjell). Ook de tanks van Cronos opereren onder een druk van 4 à 6 bar (zie Cronos, 2004).

Bij gebrek gedetailleerde informatie wordt aangenomen dat twee fulltime medewerker nodig is om de (de)compressor te monitoren.

2.2.3 Aannames geldend voor alle transportmodaliteiten

Aangenomen wordt dat de waterstof in de transportketen gasvormig wordt getransporteerd. Voor vloeibaar waterstof is namelijk een zeer lage temperatuur en hoge druk nodig (de kritieke temperatuur is -240°C , zie Airliquide). Omdat gasvormig waterstof een lage massadichtheid kent, kan worden aangenomen dat de afmetingen van een container beperkend zijn en niet het gewicht van de lading. Bij het schip is gegeven hoeveel containers erop passen.

Voor het transporteren met behulp van containers (bij de trein, vrachtwagen en het schip) wordt er slecht één type container gebruikt, te weten de standaard 20ft container. Er is gekozen voor deze maat container omdat deze voor alle drie de genoemde transportmodaliteiten bruikbaar is. Dit maakt eventuele overslag, en dus natransport, mogelijk.

In het model lijkt het alsof een onafgerond aantal voertuigen kan worden aangeschaft. De redenering hierachter is als volgt. Stel dat het model berekent dat er voor de ingestelde hoeveelheid waterstof 4,5 vrachtwagens nodig zijn, dan wordt aangenomen dat er vier vrachtwagens worden aangeschaft en dat er

voor de resterende benodigde vervoerscapaciteit een vrachtwagen wordt gehuurd of geleasd. Aangenomen wordt dat de huur- of leasekosten gelijk zijn aan 120 procent van de afschrijvingskosten voor een voertuig, maal de fractie gebruik.

Vertragingen worden in het model uitgedrukt met een vertragingpercentage dat de gebruiker kan instellen. Er is bewust gekozen dat de gebruiker deze kan vaststellen, afhankelijk van zijn gewenste servicegraad. Zodoende kan men inzicht verkrijgen in de verhouding van een hoger percentage en kosten. Dit met het oog op de congestieproblematiek die in grote mate afhangt van de transportlocatie. Er wordt aangenomen dat er met een maximale snelheid wordt gereden en dat alle afwijkingen hiervan worden meegenomen in de vertragingfactor. Als de vertragingfactor bekend is kan de reistijd als volgt worden berekend: $t_{\text{reis}} = L / v_{\text{max}} * (1 + a/100) * (1 + p)$, waarbij L: afstand, v_{max} : maximale snelheid, a: vertragingpercentage en p: pauzetijd. De pauzetijd voor chauffeurs is van belang bij het vervoer per truck. Daarvoor geldt een rusttijdregeling. Meer hierover vindt u bij de aannames behorende bij die transportmodaliteit.

Een vereenvoudiging betreffende de kosten is opgenomen in het model: alle indirecte kosten zijn gevat in de kostenpost overige kosten. Deze vereenvoudiging is mogelijk doordat het naar verwachting geen grote consequenties zal hebben op de totale kosten. Dit zal worden nagegaan bij de gevoeligheidsanalyse.

De gebruiker kan de afstand variëren tussen 0 en 2000 km. Er wordt aangenomen dat waterstoftransport boven deze afstand niet plaatsvindt. Ten eerste is waterstof een energiedrager en geen energiebron. Daarom kan de productielocatie in principe vrij worden gekozen, afhankelijk van de beschikbare energiebronnen. Ten tweede is het transport van waterstof energie intensief en is het niet aantrekkelijk dit over zeer grote afstanden te doen. Daarom zal de productielocatie naar verwachting niet verder dan 2000 km van de gebruikslocatie worden gekozen.

2.2.4 Transportmodaliteit vrachtwagen

Bij het vervoeren van waterstof met vrachtwagens wordt er uitgegaan van diesel als brandstof.

De rusttijdregelingen van vrachtwagenchauffeurs wordt in dit model meegenomen als een fractie van de reistijd (één maal per vier uur een rusttijd van een half uur betekent een fractie 0.125). Doordat wordt verwacht dat de vrachtwagen alleen bij relatief korte afstanden rendabel is, wordt ervan uitgegaan dat er één chauffeur wordt ingezet op een route. Maar bij ritten van langer dan 4 uur is het wettelijk verplicht een pauze te nemen. Dit wordt tot uitdrukking gebracht door de gegeven rusttijdfactie van de reistijd.

Doordat een vrachtwagen niet continu, dat wil zeggen 24 uur per dag en zeven dagen per week kan rijden, is er uitgegaan van een maximaal aantal uur per vrachtwagen per dag van 8 uur gedurende 365 dagen per jaar. Deze beperking wordt voornamelijk veroorzaakt door het feit dat het afleveren niet 24 uur per dag kan gebeuren waardoor het voor de vrachtwagenchauffeur niet rendabel is om op bepaalde tijden te rijden, aangezien hij binnen bepaalde tijden op de plaats van bestemming moet zijn.

Het energiegebruik van het vervoer per vrachtwagen worden berekend aan de hand van het gemiddeld dieselverbruik per tonkilometer (dat wil zeggen het gemiddeld gebruik voor het vervoeren van een ton lading over een afstand van één kilometer): $E_{\text{diesel}} = L * Q_{\text{hydrogen}} * U * C_{\text{diesel}}$, waarbij L: afstand, Q_{hydrogen} : hoeveelheid waterstof, U: verbruik per tonkilometer (kg/tonkilometer); C_{diesel} : verbrandingswarmte diesel. Het verbruik per tonkilometer is berekend aan de hand van data van het CBS (zie bijlage). Naar verwachting zal het verbruik in het geval van waterstof hoger liggen dan het gemiddelde, omdat voor het vervoeren van een ton waterstof meerdere voertuigen tegelijk nodig zijn (vanwege de geringe massadichtheid van waterstof bij containerdruk kunnen per rit slechts enkele kilo's waterstof worden vervoerd). Aangenomen wordt dat het verbruik per tonkilometer twee keer zo groot is als het gemiddelde. Tijdens de validatie zal worden bepaald of deze schatting een significant effect heeft op de berekende kosten en emissies.

Een truck heeft een aanschafwaarde van ca. 40.000 euro (zie Truck Trader Online, 2004). Aangenomen wordt dat de afschrijvingstermijn 7,5 jaar bedraagt.

2.2.5 Transportmodaliteit trein

Men heeft de keuze tussen elektriciteit of diesel als energiebron. In Nederland wordt over het algemeen op elektriciteit gereden maar om het model ook te kunnen gebruiken buiten Nederland is de energiebron diesel opgenomen.

Een trein kan niet constant rijden en daarom is een aanname betreffende het aantal beschikbare treinen van belang. Het model gaat uit dat een trein in een jaar met 365 dagen 8 uur per dag rijdt.

Er wordt aangenomen dat er op een trein altijd twee personeelsleden aanwezig zijn.

Goederentreinen kunnen in praktijk een gemiddelde snelheid van 140 km/uur bereiken (zie Nedrail1435, 2004). Hier wordt echter uitgegaan van een maximale snelheid van 100 km/uur omdat het bij het transport van waterstof om 'gevaarlijk vervoer' gaat.

Bij gebrek aan exacte gegevens wordt aangenomen dat het dieselverbruik van een trein per tonkilometer ligt tussen het verbruik van een vrachtwagen en dat van een schip.

Het vermogen van een elektrisch aangedreven locomotief in Nederland is 4540 kW continu (zie Nedrail1435, 2004).

2.2.6 Transportmodaliteit schip

Voor het transporteren van waterstof per schip zijn vele verschillende typen schepen beschikbaar (zie bijlage 5). Het voert te ver voor dit onderzoek alle typen mee te nemen. In het model is één type als referentie gebruikt, te weten de MS Jowi, het grootste Nederlandse schip dat speciaal is ontworpen voor het vervoer van containers. Dit schip is door zijn grote laadvermogen ook geschikt voor Europees vervoer. De keuze voor dit type schip bepaalt dan ook het laadvermogen en de transportsnelheid (ongeveer 20 km/uur).

Het maximale aantal containers wordt bepaald door de keuze van het scheepstype. De capaciteit van de MS Jowi kan verschillen, afhankelijk van het aantal containers dat men stapelt. Het schip is namelijk geschikt voor hoogte van 4 of 5 containers, waardoor de capaciteit 398 respectievelijk 470 containers per rit kan vervoeren. In dit model is uitgegaan van 4 lagen omdat 5 lagen problemen kunnen opleveren met de begaanbaarheid van vaarwegen. Omdat een container met waterstof zeer licht is (enkele kilo's per container, afhankelijk van de gekozen druk) wordt de hoeveelheid waterstof die vervoerd kan worden per schip bepaald door het aantal containers dat erop past en niet door het laadvermogen.

Een schip kan in principe dag en nacht varen, hierdoor kan het maximale aantal uur per jaar oplopen tot 365 dagen maal 24 uur. De vaartijden zijn echter aan bepaalde beperkingen onderhevig. Zo gelden er, krachtens de vaartijdenwet, regels betreffende het aantal uren dat men mag varen. Afhankelijk van o.a. het scheepstype zijn er drie exploitatiewijzen: dagvaart, semi-continuvaart en continuvaart. Aangenomen wordt dat bij het gekozen scheepstype sprake is van semi-continuvaart. Daarvoor geldt dat Per dag 18 uur kan worden gevaren (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2004).

Er wordt uitgegaan dat er scheepsdiesel voor vervoer gebruikt wordt.

Het vertragspercentage kent een maximum van 10%. Dit is gedaan omdat scheepvaart zich juist gekenmerkt door betrouwbaar transport (met weinig vertragingen). De vertraging die men oploopt is dan ook minimaal ten opzichte van de totale reistijd. Hierdoor is het niet realistisch dat men een extra vertraging van meer dan 10 % kan instellen.

Het gemiddelde verbruik per tonkilometer is afgeleid uit data van het CBS. Zoals bij het wegtransport is het echter aannemelijk dat het verbruik in het geval van waterstof hoger zal liggen dan het gemiddelde.

De investering van een binnenvaartschip als de MS Jowi bedraagt 5 miljoen euro (zie Weekblad Schuttlevaer, 2004).

2.2.7 Transportmodaliteit pijpleiding

De gebruiker wordt de keuze gelaten van bestaande netten gebruik te gaan maken zoals het aardgasnet. Hiervoor dient hij zelf na te gaan welke mogelijkheden het gewenste traject bieden.

Voor pijpleidingtransport zijn alleen hoofdtransportleidingen gemodelleerd. De reden hiervoor is dat regionale transportleidingen andere kenmerken hebben dan hoofdtransportleidingen. Zo is er een kleinere diameter, een kleinere druk en zijn er meerdere afnemers op uiteenlopende plaatsen. Het bleek niet mogelijk dit met de gewenste nauwkeurigheid in het model op te nemen. Daarom wordt alleen het

hoofdtransportnet gemodelleerd (net als in het methanol model) en kan distributie naar de gebruikslocatie eventueel plaatsvinden door middel van natransport.

De kosten, efficiency en dergelijke van een nieuwe pijpleiding zijn benaderd door het huidige aardgasnet als referentie te nemen. Een meer fundamentele benadering (op basis van natuurkundige wetten berekenen van drukval, benodigde diameter, benodigd pompvermogen, etc.) bleek met het gekozen softwarepakket niet uitvoerbaar.

Er wordt aangenomen dat een nieuw aan te leggen pijpleiding een single-user pijpleiding wordt. Dat betekent dat de kosten volledig worden toegerekend aan het waterstoftransport van de gebruiker. De variabele 'capaciteit van de pijpleiding' is daarom van belang voor de aanleg van een nieuw net. Als een nieuw netwerk wordt aangelegd moet de gebruiker een capaciteit instellen (groter of gelijk aan de hoeveelheid waterstof).

Gebruiken van het bestaande net houdt in dat dit net gedeeld zal worden met de huidige gebruiker (aardgas). De afschrijvingskosten zijn bij het gebruik van bestaande pijpleidingen afhankelijk van de hoeveelheid waterstof die men transporteert (percentage van de totale capaciteit) en het deel van de pijpleiding dat men gebruikt (afstand).

Indien gebruik wordt gemaakt van een bestaande pijpleiding waarin ook aardgas wordt vervoerd, is het noodzakelijk de waterstof en aardgas te scheiden. Omdat nascheiding nog niet op grote schaal wordt toegepast, ontbreekt de kennis om deze in detail te modelleren. Daarom is de nascheiding enkel gemodelleerd door de investeringskosten voor de infrastructuur, die door de gebruiker van het model kunnen worden ingesteld.

De investeringskosten voor een nieuwe pijpleiding kunnen worden benaderd door middel van een lineaire relatie tussen investeringskosten enerzijds en de lengte en diameter van de pijpleiding anderzijds (Mintz). Materiaalkosten zijn kwadratisch afhankelijk van de diameter, maar materiaalkosten maken slechts deel uit van de totale investeringskosten. Per saldo kan worden aangenomen dat de relatie tussen totale investeringskosten en de diameter benaderd kan worden door een lineaire relatie.

Normaal gezien is er bij transport door een pijpleiding sprake van een drukval. Daarom wordt om de 100 km een compressorstation geplaatst, opdat de druk weer kan worden opgevoerd (Gasunie). Vanwege de compressorstations wordt er vanuit gegaan dat de einddruk van dit blokje gelijk is aan de begindruk.

Het aantal compressorstations bepaalt de benodigde hoeveelheid elektriciteit.

Bij gebrek aan betere gegevens wordt aangenomen dat twee fulltime medewerkers nodig zijn om een compressor en transportsegment te monitoren. Omdat om de 100 km een compressor staat wil dit zeggen dat 0.02 fulltime medewerkers per km pijpleiding nodig zijn.

2.2.8 (De)compressor

Voor het compressie/decompressie blokje gelden dezelfde aannames en vergelijkingen als voor het eerder genoemde compressor blok.

3 Verificatie en validatie

In deze paragraaf worden de bevindingen van de verificatie en validatie gerapporteerd.

3.1 Modelcontrole

Voordat er uitspraken gedaan kunnen worden over de resultaten is het van belang te controleren of de invoervariabelen correct zijn ingevoerd en of de uitvoervariabelen juist worden berekend. Hiervoor worden alle constanten en vergelijkingen nagelopen en de juistheid vastgesteld. Tevens worden de waarden van de uitvoervariabelen gecontroleerd door de instelparameters te veranderen en de gegenereerde tabellen te vergelijken. Een voorbeeld van een verificatietest die is uitgevoerd is de hoeveelheid waterstof te vergroten en vervolgens te controleren of dan de kosten toenemen en de efficiëntie verandert.

Tijdens het modelleren zijn al verschillende verificatietests uitgevoerd. Dit heeft geleid tot het uiteindelijke model aan de hand waarvan de validatie wordt uitgevoerd. Hierbij wordt gekeken of het model overeenkomt met de werkelijkheid. Omdat er momenteel nog geen waterstof wordt getransporteerd op grote schaal is een vergelijking niet goed mogelijk. Maar het model kan wel gevalideerd worden door te kijken of het goed reageert op veranderingen door impulsen van invoerparameters. Dit is gedaan door het model in een extreme situatie te plaatsen, bijvoorbeeld door een enorme hoeveelheid waterstof als invoer te geven. Om te controleren of het model goed reageert op deze extreme waarden dienen de minima en maxima die aan de door de gebruiker in te stellen waarden waren gegeven, tijdelijk te worden verruimd.

Allereerst is van elk blok bekeken of het blok goed reageert op extreme waarden.

Zo is bij de pijpleiding de afstand op 0 km gezet. Daaruit bleek dat de kosten en emissies verdwenen. Dit was allemaal zoals werd verwacht. De efficiëntie bleek 100% te zijn. Daarnaast zijn hoge waarden ingevuld voor de afstand en de overige instelparameters. Opvallend was dat de efficiëntie bij grotere afstanden daalde. Dit wordt veroorzaakt doordat meer compressorkracht benodigd is.

Bij het blok trein viel op dat de keuze tussen elektriciteit en diesel als energiebron een groot verschil maakte in kosten en efficiëntie: het gebruik van diesel blijkt veel efficiënter, omdat elektriciteit moet worden opgewekt (bijvoorbeeld uit een fossiele grondstof, met 45%, zie *Energiened*, 2002). Daarentegen is het gebruik van elektriciteit veel goedkoper.

Bij de vrachtwagen zorgden de enorme emissies van CO₂ en SO₂ voor extreem hoge kosten, veel ordes van grootte meer dan bij de andere modaliteiten. Indien CO₂ en SO₂ emissies geen extra kosten met zich meebrengen liggen de kosten van het blok wel in dezelfde orde van grootte als de andere modaliteiten.

Bij de decompressor viel op dat de loonkosten grote invloed kunnen hebben op de uiteindelijke kostenpost van dit blok. Indien de door de eindgebruiker gewenste druk niet veel verschilt met de uitgangsdruk van het vorige blok zijn de opbrengsten van de gewonnen energie in dezelfde orde grootte als de loonkosten. Indien de gewenste druk lager is kan er een positief resultaat uit dit blok komen, afhankelijk van de hoogte van de loonkosten.

Daarna is over de gehele keten gekeken of de basisinstelwaarden (hoeveelheid waterstof en kosten voor CO₂- en SO₂-emissie) de verwachte invloed hebben op de prestatie-indicatoren van de overige blokken. Bij variatie van de basisinstelwaarden bleek het model naar verwachting te reageren. Opmerkelijk was de lage overall efficiëntie. Deze wordt veroorzaakt doordat de elektriciteit die wordt gebruikt voor de productie van waterstof slechts kan worden opgewekt met 45% rendement (zie *Energiened*, 2002).

3.2 Gevoeligheidsanalyse

Tijdens een gevoeligheidsanalyse worden alle parameters van het model afzonderlijk gevarieerd met $\pm 10\%$. Het model is gevoelig voor de waarde van een parameter indien een afwijking van $\pm 10\%$ een verandering van meer dan 10% teweeg brengt bij één van de uitvoervariabelen (de prestatie-indicatoren).

Er is enkel gekeken naar de incrementele prestatie-indicatoren omdat de blokjes onafhankelijk van elkaar kunnen worden gebruikt en de incrementele prestatie-indicatoren onafhankelijk van elkaar worden berekend. Het voordeel hiervan is dat minder handelingen nodig zijn om de gevoeligheidsanalyse uit te voeren. In de bijlage is een tabel opgenomen waarin de resultaten van de gevoeligheidsanalyse zijn weergegeven. Voor elke parameter is voor beide veranderingsrichtingen aangegeven met hoeveel procent de incrementele prestatie-indicatoren veranderen.

Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat het model voor de meeste parameters niet gevoelig is. Een klein aantal parameters brengen net meer dan 10% verandering teweeg bij de prestatie indicatoren. Deze zullen hier kort worden besproken:

Bij het blok pijpleiding heeft de energie-efficiency van elektriciteitsopwekking een groot effect op de emissies. De waarde die is gekozen voor deze parameter wordt algemeen beschouwd als een geschikte waarde om de Nederlandse situatie te beschrijven. Indien dit model op andere landen moet worden toegepast, moet worden overwogen of elektriciteit daar met dezelfde energie-efficiency wordt opgewekt.

Voor alle transportmodaliteiten behalve de pijpleiding, blijken de kosten en emissies gevoelig voor de gekozen afstand. De afstand is door de gebruiker in te stellen, afhankelijk van de route die hij of zij wil modelleren. Bij het instellen van de afstand is het dus van belang dat de gebruiker zich realiseert dat het model gevoelig is voor de ingestelde waarde: een variatie van 10% in de afstand veroorzaakt eveneens een variatie van 10% in de kosten en emissies.

Bij de modellering van de trein blijkt de maximale aantal containers per wagon, de maximale snelheid en het volume van een container effect te hebben op de kosten. Het maximale aantal containers per wagon en het volume van een container staan vast. Deze waarden zijn gevoelig omdat zij het maximale aantal containers per trein bepalen. De waarde van deze parameters is echter niet onzeker. Het is dus geen probleem dat het model er gevoelig voor is.

Het model is gevoelig voor de maximale snelheid. Het elektriciteitsverbruik wordt berekend door het vermogen van de wagon te vermenigvuldigen met de reistijd. In werkelijkheid vergt een hogere snelheid een groter vermogen. Hier is een gemiddeld vermogen genomen. De gekozen maximumsnelheid heeft nu enkel effect op de reistijd, waardoor een hogere snelheid een lager energiegebruik zou veroorzaken. Dit is een beperking van het model.

Ook bij het schip hebben de maximale snelheid, het volume van de container en het maximale aantal containers effect op de kosten (zie de uitleg bij de treinmodellering eerder in deze paragraaf).

Bij de truck hebben de maximale snelheid en het volume van de container effect op de kosten (zie uitleg bij de trein, eerder in deze paragraaf). De dichtheid van de diesel blijkt bepalend te zijn voor de uitstoot van CO₂ en SO₂ emissies. Dat komt doordat het brandstofverbruik per ton vervoerde waterstof (in L) vrij groot is. De dichtheid van de diesel werd gebruikt om het brandstofverbruik in L om te rekenen naar brandstofverbruik in kg. Deze was nodig om de emissies te berekenen.

Dit heeft betekenis voor de vertaalbaarheid van de emissiegegevens naar het buitenland. Zowel de emissiefactoren (hoeveelheid emissies per kg brandstof) als het brandstofverbruik per tonkilometer zijn gebaseerd op Nederlandse gegevens. De dichtheid is dan weer de maximale dichtheid van diesel die in de EU mag worden gebruikt en verkocht. Omdat het model gevoelig is voor de dichtheid moet voor modellering van andere landen worden opgelet of het verbruik vergelijkbaar is, met name als deze landen zich buiten de EU bevinden.

Het blok elektrolyse blijkt gevoelig te zijn voor de conversie-efficiency en de efficiency van elektriciteitsopwekking. De conversie-efficiency is gebaseerd op een aanname. Nader onderzoek zou moeten uitwijzen of die aanname correct is.

Bij de (de)compressor is de efficiency van de (de)compressor onzeker en gevoelig.

Een algemene opmerking betreft het feit dat een verandering van 10% in de emissiefactoren ook een verandering van 10% tot gevolg heeft bij de emissies. Het model is dus niet bijzonder gevoelig voor deze variabelen maar de waarde ervan is wel belangrijk. Helaas is het niet zeker dat het brandstofverbruik inderdaad 2 keer het Nederlandse gemiddelde bedraagt. Voor de betekenis van de modeluitkomsten is dit niet zo erg want de emissies kunnen alleen hoger uitvallen. Tijdens de experimenten blijkt al dat de betreffende vervoermiddelen veel meer emissies hebben. Daarnaast is de gekozen waarde voor efficiency gevoelig (zowel van elektriciteits-opwekking als van de compressor en de elektrolyse installatie).

3.3 Beperkingen

Nadat het model goed is bevonden door verificatie en validatie kan het gebruikt worden voor het uitvoeren van een aantal experimenten. Deze maken het mogelijk uitspraken te doen over de effecten van bepaalde beleidsmaatregelen.

Zoals al eerder is opgemerkt is het model een vereenvoudigde weergave van (een deel van) de werkelijkheid. Dit heeft consequenties voor het gebruik en de mate waarin men uitspraken kan doen over ontwikkelingen in de toekomst. Het model kent een aantal beperkingen waarmee men rekening moet houden.

Allereerst dient er opgemerkt te worden dat het model gericht is op de Nederlandse situatie. Dit komt met name tot uitdrukking in sommige constanten. Wanneer men het model wenst te gebruiken voor het transport van waterstof elders in de wereld is het mogelijk dat sommige van deze constanten aangepast moeten worden.

Daarnaast worden in het model voor het transport de hoofdroutes in beschouwing genomen. Dat wil zeggen het hoofdwegennet bij het wegvervoer, de hoofdtransportassen bij het spoorvervoer en de hoofdvaarwegen bij de binnenvaart. Zo wordt er uitgegaan van het vervoeren van waterstof met gebruikmaking van een grofmazig netwerk.

Bij de pijpleiding wordt de gebruiker de keuze gelaten van bestaande netten gebruik te gaan maken zoals het aardgasnet. Het kan kostenbesparingen met zich mee brengen, maar de vraag is in hoeverre de eigenaren van de huidige aardgasleidingen deze openstellen voor het gebruik door anderen.

De overige beperkingen volgend direct uit de aannames die zijn gedaan in het vorige hoofdstuk. De belangrijkste onzekerheden die voortvloeien uit deze aannames worden hieronder samengevat.

Het aantal fte's is vrij gekozen bij de (de)compressor, de pijpleiding en de productie van waterstof. De variatie bedraagt +/- 100% (0 medewerkers is het minimum en meer dan twee medewerkers voor monitoring is niet waarschijnlijk). Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de kosten van de (de)compressor en de pijpleiding niet gevoelig zijn voor deze aanname. De kosten van de productie van waterstof zijn daarentegen wel gevoelig.

De relatie tussen hoeveelheid waterstof die wordt geproduceerd en de efficiency van de productie is onzeker. Het model is hier gevoelig voor. De efficiency bedraagt altijd tussen de 50% en 90%. De spreiding wordt verwacht binnen dit gebied te liggen. Deze onzekerheid levert geen grote problemen op bij het vergelijken van transportmodaliteiten omdat deze telkens worden vergeleken bij dezelfde hoeveelheid.

De efficiency van de (de)compressor werd aangenomen 80% te bedragen. De variatie wordt verwacht rond +/- 10% te liggen. Het model is hier gevoelig voor. Dit levert echter geen problemen op bij de vergelijking van modaliteiten omdat hierbij altijd dezelfde efficiency wordt aangehouden.

Van elke transportmodaliteit is slechts één type als referentie gemodelleerd. De specifieke waarden, zoals de maximale snelheid, de investeringskosten en het laadvermogen (het aantal containers) kennen een zekere spreiding. Het is niet mogelijk binnen het bestek van dit onderzoek alle types mee te nemen. Voor de verschillende scheepstypes gelden verschillen in het laadvermogen en de investeringskosten; de snelheid varieert daarentegen nauwelijks (zie bijlage 4). Een ander verschil dat zich voordoet tussen scheepstypen is het aantal uur dat per dag kan worden gevaren. In het model is uitgegaan van semi-continuvaart (18 uur/dag). Andere scheepstypes vallen onder continuvaart (24 uur/dag) of dagvaart (12 uur/dag) (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2004). De variatie in het aantal uur per dag bedraagt +/- 30%. Het model is niet gevoelig voor deze parameter. Deze onzekerheid heeft daarom beperkte invloed op de modelresultaten. De onzekerheid in het laadvermogen kan leiden tot onzekere modelresultaten omdat het model gevoelig is voor deze parameter.

Voor de trein geldt dat de snelheid en laadvermogen niet veel verschillen omdat deze beperkt worden door regelgeving (Bovy e.a., 2002). De investeringskosten en het vermogen van treinen kunnen variëren binnen beperkte marges (Treineninfo, 2004 en Nedrail1435, 2004).

Voor de vrachtwagen geldt dat de snelheid en de rusttijdregeling voor alle types gelijk zijn vanwege de geldende regelgeving. Ook de kosten variëren niet veel (Truck Traider Online, 2004). Laadvermogen is fysiek beperkt doordat vrachtwagens maximaal 2 opleggers mogen hebben. De parameters verbonden aan specifieke typen vrachtwagens zijn dus niet onzeker.

Tenslotte is het exacte verbruik per tonkilometer onzeker. Deze aanname geldt voor de trein, de truck en het schip. Er is aangenomen dat het gebruik per tonkilometer vervoerde waterstof twee keer het Nederlands gemiddelde bedraagt. De verwachte spreiding is daarom +/- 50%. Het model is gevoelig de gekozen waarde. Men moet zich hiervan bewust zijn indien men de emissies vergelijkt tussen deze modaliteiten en de pijpleiding.

4 Experimenten

Om uitspraken te kunnen doen over de prestaties van de verschillende vervoersmodaliteiten, worden experimenten uitgevoerd. Deze experimenten zijn erop gericht voor elke prestatie indicator de omslagpunten te vinden waarbij het ene vervoermiddel beter presteert dan het andere.

Deze omslagpunten worden bepaald voor de twee belangrijkste variabelen: de hoeveelheid H₂ die per jaar wordt vervoerd en de afstand waarover dit vervoer plaatsvindt.

Voor elke transportmodaliteit (pijpleiding oud, pijpleiding nieuw, trein elektriciteit, trein op diesel, truck en schip) worden de experimenten gedaan met verschillende combinaties van afstand en hoeveelheid. Hieronder is een voorbeeld gegeven voor transport per bestaande pijpleiding:

Tabel 1. Kosten van de keten

kosten van de keten (euro/ton H ₂)					
hoeveelheid (ton H ₂ /jaar)	afstand (km)				
500	50	100	500	1000	2000
1.000	1656	1665	1741	1837	2032
5.000	900	907	964	1035	1181
10.000	295	300	342	394	501
200.000	220	224	264	314	416
500.000	148	152	190	238	335
1.000.000	145	150	188	236	333

De waarden van andere instelparameters zijn constant gehouden op de waarden die als standaard zijn meegegeven aan de verschillende blokken. Deze staan vermeld in de bijlage.

De experimenten zijn uitgevoerd zonder natransport omdat ze er vooral op gericht zijn uitspraken te doen over de omslagpunten, waarbij de verschillende modaliteiten worden vergeleken. We kijken naar de prestatie per ton H₂.

Aan de hand van de hierboven beschreven experimenten kunnen nu conclusies worden geformuleerd ten aanzien van de omslagpunten. De omslagpunten voor afstand en hoeveelheid (en de geprefereerde modaliteit) verschillen per prestatie indicator. Daarom wordt hier op elke PI afzonderlijk ingegaan.

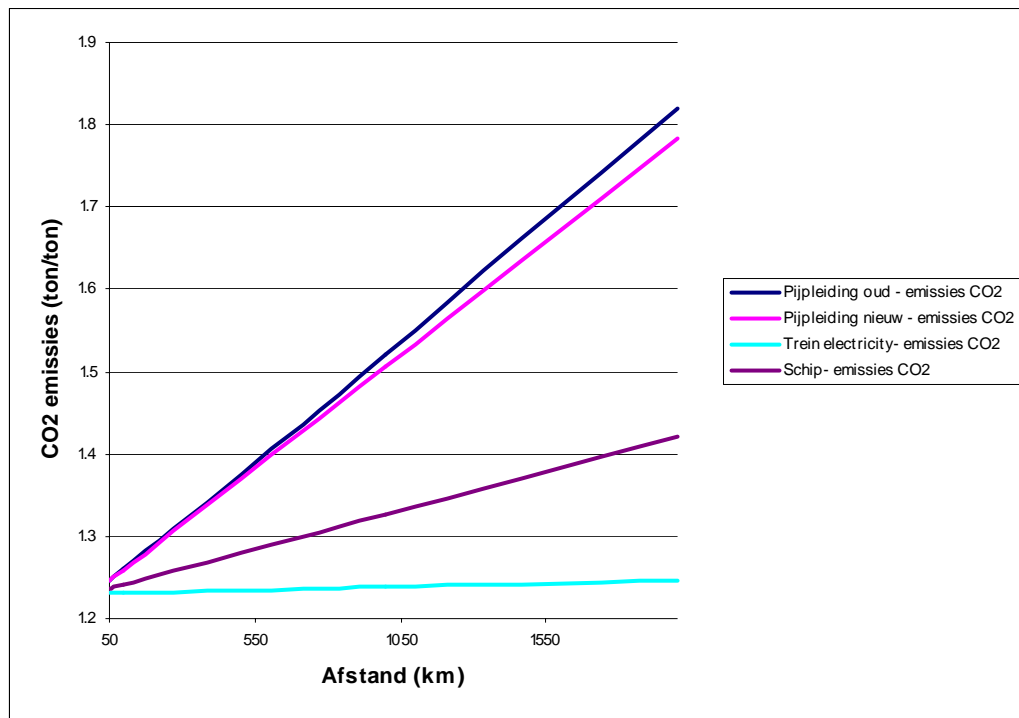
Om de resultaten in grafieken te kunnen weergeven is eerst is de hoeveelheid H₂ gevarieerd waarbij de afstand constant werd gehouden op 500 km of 2000 km. Het gedrag dat optreedt is tamelijk onafhankelijk van de afstand waarover waterstof wordt vervoerd. Omslagpunten, rangordes en verhoudingen zijn gelijk bij een afstand van 500 en 2000 km. Daarom wordt in het vervolg alleen ingegaan op de afstand van 500km en wordt aangenomen dat de bevindingen voor iedere afstand gelden. Tevens is gekeken of een kleine afstand (50 km) tot andere resultaten leidt. Dit leverde op sommige punten relevante verschillen op.

Vervolgens is de afstand gevarieerd waarbij de hoeveelheid H₂ constant werd gehouden op 10.000 ton/jaar en 500 ton/jaar. Opnieuw bleek dit geen noemenswaardige verschillen op te leveren. In het vervolg zijn de resultaten genoemd bij 10.000 ton/jaar.

4.1 CO₂ emissies

Bij het variëren van de hoeveelheid te vervoeren H₂ zijn de CO₂ emissies constant. Daardoor is er geen sprake van een omslagpunt.

Bij het variëren van de afstand zijn de emissies van de truck constant erg hoog. Tevens veroorzaakt de dieseltrein grote emissies, zij het een aantal ordes van grootte minder dan de truck. De overige modaliteiten staan vermeld in Figuur 3. Daarin is te zien dat emissies van een oude en nieuwe pijpleiding niet ver uiteen liggen, maar wel een stuk groter zijn dan die van het schip en de trein op elektriciteit. De trein op elektriciteit stijgt het minst en heeft boven de 50 km altijd de minste CO₂ emissies. De emissies bedragen dan ca. 1,25 ton CO₂ per ton vervoerde waterstof.



Figuur 3. CO₂ emissies uitgezet tegen de afstand

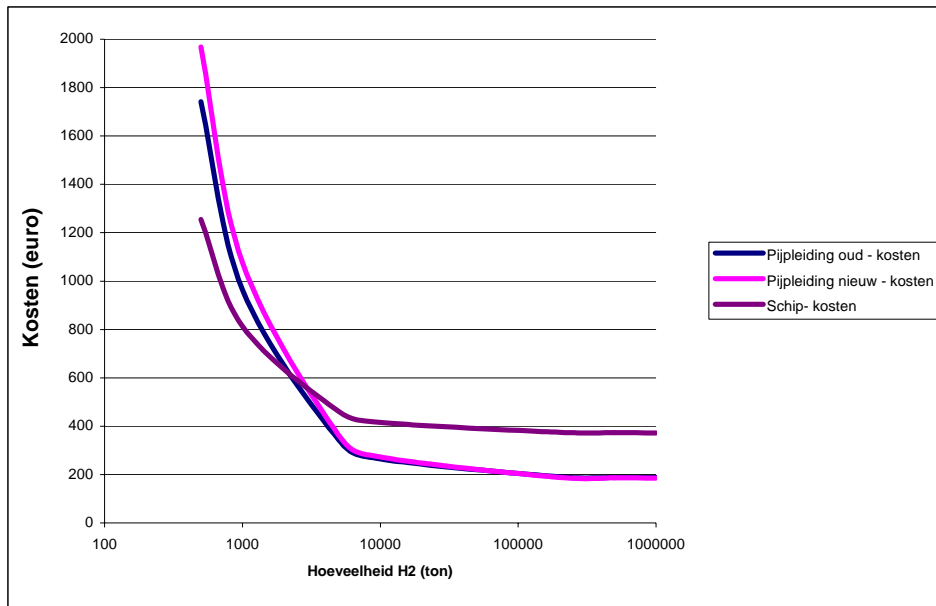
4.2 SO₂ emissies

Bij het variëren van de hoeveelheid te vervoeren H₂ zijn de SO₂ emissies constant. Daardoor is er geen sprake van een omslagpunt.

Bij het variëren van de afstand zijn alleen bij de truck en de dieseltrein de SO₂-emissies niet verwaarloosbaar. Voor de dieseltrein geldt een ordegrrootte van 10-400 ton/jaar per H₂. Voor de truck geldt een emissie tussen 80 Mton en 3 Gton per jaar voor elke ton vervoerde H₂.

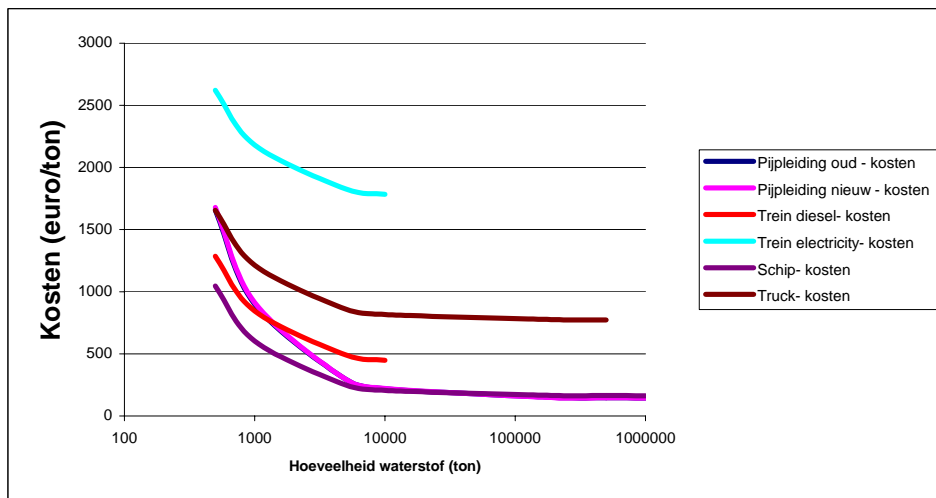
4.3 Kosten exclusief emissies

Een trein op elektriciteit is, voor elke beschouwde hoeveelheid, veruit de duurste transportmodaliteit. Ook de truck en de dieseltrein zijn erg duur. De goedkoopste modaliteit hangt af van de hoeveelheid te vervoeren H₂: onder een hoeveelheid van 2600 ton/jaar lijkt een binnenvaartschip de goedkoopste modaliteit, daarboven een pijpleiding (de kosten van een oude of nieuwe pijpleiding verschillen niet veel). Onder de 2600 ton per jaar zijn de verschillen echter te klein om met zekerheid te kunnen stellen dat het schip onder die hoeveelheid goedkoper is. Het transporteren van waterstof door een pijpleiding kost, boven een hoeveelheid van 10.000 ton/jaar, tussen 200 en 300 Euro per ton waterstof. Dit is zichtbaar gemaakt in Figuur 4.



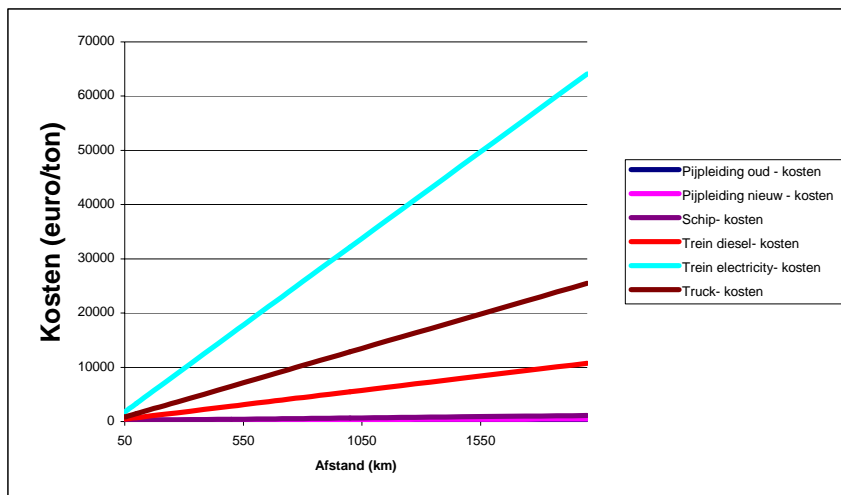
Figuur 4. Kosten uitgezet tegen de hoeveelheid waterstof

Ook bij een afstand van 50 km blijkt de elektrische trein verreweg het duurste te zijn voor alle hoeveelheden. Tevens is het schip altijd de goedkoopste modaliteit (van 200 euro/ton bij hoeveelheden boven de 10.000 ton/jaar tot 1000 euro/ton bij hoeveelheden rond de 1000 ton/jaar). De dieseltrein is tot 1500 ton / jaar de op één na goedkoopste modaliteit, daarboven is dit de pijpleiding. Rond de 10.000 ton/jaar naderen de pijpleiding-kosten die van het schip (zie Figuur 5).



Figuur 5. Kosten uitgezet tegen de hoeveelheid waterstof bij een afstand van 50 km

Bij het variëren van de afstand blijkt dat de trein op elektriciteit, de truck en de dieseltrein veel duurder zijn dan de drie andere modaliteiten. Dit is te zien in Figuur 6. Tussen de pijpleiding en het schip is niet veel verschil, hoewel de pijpleiding, zowel oud als nieuw, voor elke afstand goedkoper blijkt.



Figuur 6. Kosten uitgezet tegen de afstand

4.4 Kosten inclusief emissies

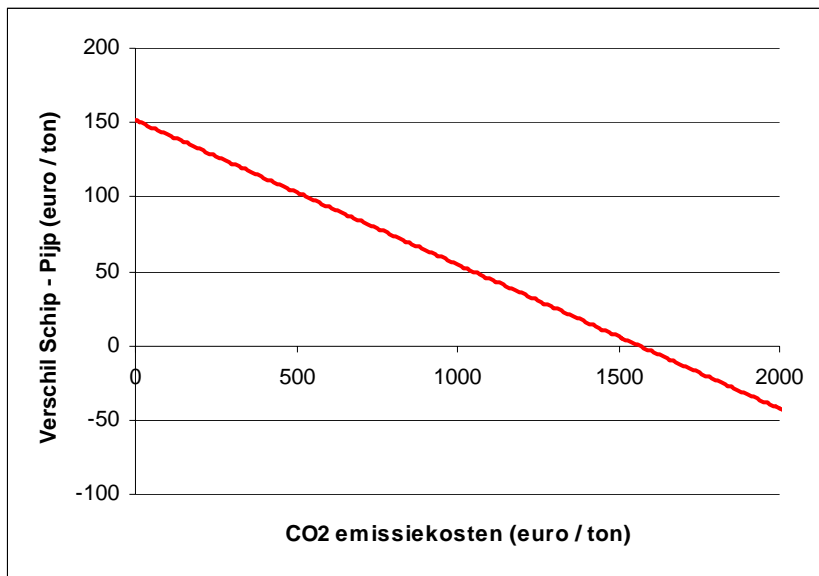
In de voorgaande kostenberekeningen werden aanvullende kosten voor emissies niet meegenomen. Indien deze wel worden meegenomen vormen ze een extra omslagpunt, dat wil zeggen dat de prijs voor emissies een andere rangorde laat zien in kosten van de modaliteiten.

Omdat SO₂ alleen belangrijk is voor dieseltrein en vrachtwagen en deze toch al de duurdere transportmodaliteiten zijn, zullen SO₂ kosten geen nieuwe of andere omslagpunten opleveren en verder buiten beschouwing worden gelaten.

Indien de hoeveelheid te vervoeren waterstof wordt gevarieerd ligt bij ongeveer 2600 ton/jaar een omslagpunt tussen het schip en pijpleiding (zie boven). Dit omslagpunt zou verdwijnen bij emissiekosten vanaf 3000 euro/ton CO₂-emissie. Dergelijke kosten zijn echter niet te verwachten.

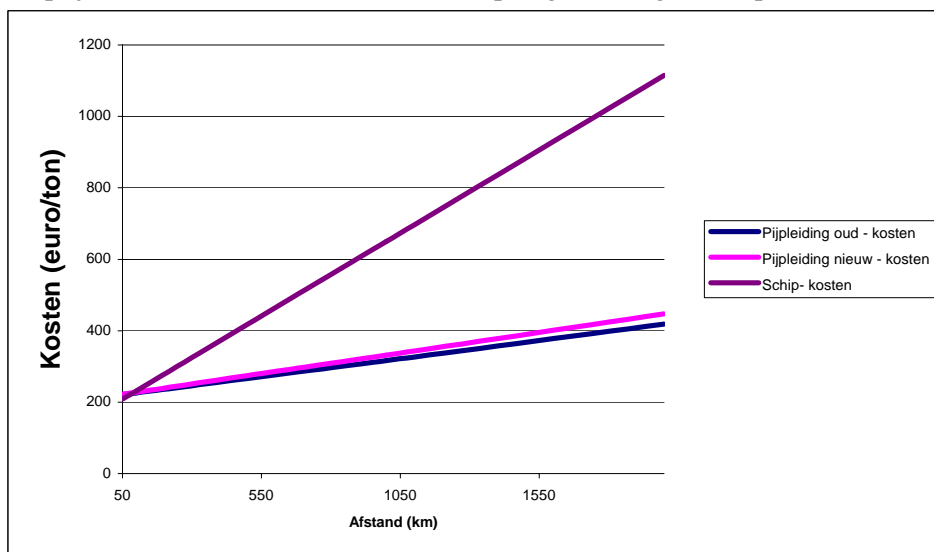
Indien wordt gevarieerd bij een afstand van 50 km en de emissiekosten 1 euro / ton CO₂-emissie bedraagt is de truck extreem duur, de elektrische trein in mindere mate. De kosten van de overige transportmiddelen lopen niet ver uiteen. Het schip is het goedkoopst, maar de pijpleiding nadert de kosten van het schip bij hoeveelheden boven de 10.000 ton/jaar.

Indien de afstand 500 km bedraagt en de hoeveelheid 10.000 ton/jaar, dan ligt het omslagpunt voor de prijs van CO₂ emissies net voorbij 1500 Euro/ton CO₂ (zie Figuur 7).



Figuur 7. Verschil in kosten schip – pijp uitgezet tegen de CO₂ emissiekosten

Indien de afstand wordt gevarieerd blijkt dat de invloed van emissiekosten enorm is op de kosten van een truck en in mindere mate ook op de kosten van een dieseltrein. Bij 1750 euro / ton CO₂-emissie wordt het schip de goedkoopste modaliteit (goedkoper dan de pijpleiding). In de figuur hieronder geldt een prijs van 100 euro / ton, zodat het schip nog niet de goedkoopste modaliteit is.



Figuur 8. Kosten bij 100 euro/ton CO₂ emissiekosten uitgezet tegen de afstand

4.5 Efficiency

Bij het variëren van de hoeveelheid waterstof kent de elektrische trein het laagste rendement (rondom 5%). Tot 10.000 ton/jaar zitten de overige transportmodaliteiten rond de 21 á 22%. De pijpleiding wordt efficiënter naarmate de hoeveelheid H₂ toeneemt: tot 40% bij 1 Mton/jaar.

Bij het variëren van de afstand blijft de efficiëntie van alle transportmodaliteiten behalve de trein op elektriciteit nagenoeg gelijk (21-22%). De elektrisch aangedreven trein is wederom het minst efficiënt: van 16% bij 50 km tot 1% bij 2000 km.

5 Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk zal de onderzoeksvraag worden beantwoord:

Hoe kan men de prestaties van verschillende vervoersmogelijkheden van waterstof met elkaar vergelijken en welke aanbevelingen kunnen aan de Nederlandse overheid worden gedaan over deze vervoersmogelijkheden?

5.1 Conclusies

De verschillende vervoersmodaliteiten worden vergeleken aan de hand van kosten, emissies en energie-efficiency. Hieronder wordt per modaliteit besproken hoe deze presteert op de genoemde prestatie-indicatoren. Hierna zullen, om de lezer een goed overzicht te bieden, de prestaties worden samengevat in een scorecard, waarin per prestatie-indicator kwalitatief wordt aangegeven hoe goed de verschillende modaliteiten erop scoren (zie Figuur 9).

5.1.1 Pijp

Emissies: Transport per pijpleiding veroorzaakt vele CO₂ emissies. De emissies blijven constant bij een variërende hoeveelheid H₂ maar de afstand zorgt voor een toename in de hoeveelheid emissies. Hierbij is er nauwelijks verschil tussen het gebruik van een nieuwe pijpleiding of het gebruik van een reeds bestaande pijpleiding. De SO₂ emissies zijn verwaarloosbaar.

Kosten: De pijpleiding is ten opzichte van de andere beschouwde modaliteiten de goedkoopste modaliteit wanneer men ervoor kiest om grote hoeveelheden H₂ te vervoeren. Bij een hoeveelheid van 2600 ton/jaar H₂ wordt de pijpleiding goedkoper dan het vervoer per binnenvaartschip. De kosten van een oude of nieuwe pijpleiding verschillen niet veel (enkele Euro's per ton). Wanneer echter ook de emissiekosten worden meegenomen, gesteld op 3000 euro/ton CO₂ emissie, ontstaat er een ander omslagpunt waar de pijpleiding niet als voordeligst uit komt. Bijvoorbeeld bij een vaste afstand en hoeveelheid H₂ van 10.000 ton/jaar is het omslagpunt van tussen het schip en de pijpleiding op een prijs van CO₂ emissies van 1500 Euro/ton CO₂. Dit betekent dat vanaf de prijs van 1500 Euro/ton CO₂ het schip goedkoper wordt dan de pijpleiding. Het is echter niet aannemelijk dat de prijs van CO₂ emissies dergelijke hoogtes bereikt.

Efficiency: Er is gebleken dat de efficiency daalde naarmate de afstand verder toenam. Dit wordt veroorzaakt door de toenemende benodigde compressorkracht, dat wil zeggen dat er bij langere afstanden meer compressorstations zijn ingesteld. Bij een toenemende hoeveelheid getransporteerd waterstof is de pijpleiding echter de meest efficiënte transportmodaliteit, met een efficiëntie tot 40% bij 1 Mton/jaar.

5.1.2 Schip

Emissies: Het transport per schip heeft vergeleken met de andere modaliteiten weinig uitstoot van emissies, waarbij de SO₂ emissies zelfs te verwaarlozen zijn.

Kosten: Voor kleine afstanden, bijvoorbeeld 50 kilometer, is het schip altijd het voordeligst. Hierbij dient te worden opgemerkt dat is uitgegaan van een speciaal containerschip. Andere scheepstypes, met een kleiner laadvermogen, kunnen hogere kosten veroorzaken per ton vervoerde waterstof.

Zoals al uit de beschrijving van de pijpleiding is gebleken, is de hoeveelheid te vervoeren H₂ doorslaggevend voor de keuze van de goedkoopste modaliteit. Tot een hoeveelheid van 2600 ton/jaar is het vervoer per schip het goedkoopst, daarna door middel van een pijpleiding.

De kosten inclusief de emissiekosten laten een ander beeld zien. Bij emissiekosten van 3000 euro/ton CO₂ is het schip voor elke hoeveelheid goedkoper.

Efficiency: Met toenemende hoeveelheid waterstof tot 10.000 ton/jaar is de efficiency nagenoeg constant (tussen 21 en 22%). Ook het variëren van de afstand heeft geen verandering in de efficiëntie van de transportmodaliteit tot gevolg.

5.1.3 Trein

In het onderzoek zijn twee typen treinen meegenomen, te weten een elektrische en een dieseltrein.

Emissies: de uitstoot van CO₂ emissies is bij een dieseltrein veel hoger dan die van een elektrische trein. Met toenemende afstand neemt de uitstoot van een elektrische trein bovendien minder snel toe dan andere modaliteiten. Boven de 50 kilometer heeft de elektrische trein dan ook de minste CO₂ emissies. De dieseltrein veroorzaakt veel SO₂ emissies, terwijl deze emissies bij de elektrische trein te verwaarlozen zijn. Hieruit kan men concluderen dat de elektrische trein wat betreft de emissies beter is.

Kosten: Hoewel de elektrische trein de meest milieuvriendelijke modaliteit is (uit het oogpunt van CO₂ en SO₂ uitstoot), is het ook veruit de duurste transportmodaliteit. Dit is onafhankelijk van de beschouwde hoeveelheid te transporteren H₂. Wanneer men daarnaast ook de emissiekosten meeneemt, heeft dit vooral voor de dieseltrein als gevolg dat de kosten stijgen.

Efficiency: Met een toenemende hoeveelheid te vervoeren H₂ heeft de elektrische trein het laagste rendement, de efficiency bedraagt over een afstand van 500 km slechts 5%. Bij een toenemende afstand daalt de efficiency van dit transportmiddel van 16% bij 50 kilometer tot 1% bij 2000 kilometer.

5.1.4 Vrachtwagen

Emissies: De vrachtwagen heeft van alle beschouwde modaliteiten de meeste emissies. De CO₂ emissies van een vrachtwagen zijn al bij een korte afstand zeer hoog en nemen steeds verder toe met grotere afstanden (80 Mton – 3 Gton / ton H₂). Ook voor SO₂ gelden hoge emissies.

Kosten: Na de elektrische trein is de vrachtwagen de duurste modaliteit. Als ook de emissiekosten worden meegenomen in de kostenberekening valt de vrachtwagen het duurste uit, wat niet verwonderlijk is, gezien de hoge uitstoot. Al bij een afstand van 50 kilometer en een CO₂ emissie prijs van 1 euro/ton CO₂ emissie is de vrachtwagen extreem duur ten opzichte van andere modaliteiten.

Efficiency: deze is voor de vrachtwagen vrijwel constant over de afstand en de hoeveelheid H₂ en bedraagt zo'n 21 tot 22%.

Hieruit kan men concluderen dat gezien de emissies de elektrische trein de minste uitstoot en de vrachtwagen de meeste uitstoot heeft. Daarnaast veroorzaakt het transport per pijpleiding ook veel CO₂ emissies. Het vervoer per schip is relatief milieuvriendelijk, waardoor dit een goed alternatief vormt voor de elektrische trein. Een voordeel van het binnenschip is dat het veel goedkoper is dan een elektrische trein en tevens een hogere efficiency kent. De pijpleiding is echter het meest efficiënt wanneer men grote hoeveelheden waterstof wil vervoeren over kleine afstanden. Dan kan er een rendement van 40% behaald worden. Ten opzichte van de vrachtwagen is dat een verschil van 10%. Tevens is de pijpleiding bij grote hoeveelheden de goedkoopste modaliteit.

Tenslotte kan worden opgemerkt dat, vanwege de lage massadichtheid van gasvormig waterstof, elke beschouwde vervoerswijze een relatief grote hoeveelheid CO₂ emissies veroorzaakt. Zelfs indien vervoer plaatsvindt middels een elektrische trein (het vervoermiddel dat de minste emissies veroorzaakt), bedragen de emissies nog 1,25 ton CO₂ per ton waterstof.

	kosten	efficiency	emissies
pijpleiding	lange afstanden	grote hoeveelheid	
schip	korte afstanden		
vrachtwagen	afhankelijk van emissiekosten		
trein			elektrisch voordeliger dan diesel

Figuur 9. Vergelijkend overzicht van de prestatie van de transportmodaliteiten op de prestatie-indicatoren

Uit Figuur 9 kan per prestatie-indicator worden afgelezen hoe goed elke vervoersmodaliteit erop scoort. Logischerwijs representeert een groene kleur een goede prestatie en een rode kleur een slechte.

De volgende paragraaf geeft concrete aanbevelingen die gemaakt zijn aan de hand van de getrokken conclusies.

5.2 Aanbevelingen

Wanneer men over grote afstanden wil vervoeren wordt aangeraden gebruik te maken van een schip. Het is goedkoop ten opzichte van de andere modaliteiten en kent een hoge efficiency. Daarnaast is het een milieuvriendelijke modaliteit met relatief lage emissies. Dit betekent dat de daarmee samengaande emissiekosten beperkt zullen blijven. Ook is het gebruik van een schip flexibeler dan van een pijpleiding. Hierbij dient echter te worden opgemerkt dat het model is gebaseerd op een speciaal containerschip (de MS Jowi). Het gebruik van andere scheepstypen kan tot andere resultaten leiden.

Wanneer een grote hoeveelheid waterstof over een korte afstand dient te worden vervoerd, is echter een pijpleiding aan te bevelen. Grotere afstanden maken de pijpleiding minder geschikt door de hoge emissies.

Een mogelijkheid is daarom voor het hoofdtransport gebruik te maken van een schip en voor het natransport een pijpleiding te kiezen. Daarbij is er nauwelijks verschil tussen een nieuwe of een oude pijpleiding.

Omdat elke vervoerswijze relatief hoge CO₂ emissies veroorzaakt (minstens 1,25 ton CO₂ per ton waterstof), wordt aanbevolen nader onderzoek te laten verrichten naar alternatieve opslagmethoden (zoals in hoge drukcontainers) en vervoerswijzen van waterstof (vervoer in metaalhydriden, zie bijvoorbeeld U.S. Department of Energy, 2004). Daarnaast is het aan te bevelen onderzoek te doen naar alternatieve opwekkingsmethoden, omdat het gebruik van conventioneel opgewekte elektriciteit voor de productie en het transport van waterstof een belangrijke veroorzaker is van CO₂ emissies.

Ten slotte wordt er aangeraden vervolgonderzoek uit te voeren naar enkele parameters. Zo zijn er in dit onderzoek een aantal onzekere aannames gedaan waarvoor het model gevoelig is.

Sommige parameters zijn op de Nederlandse gemiddelden geënt en moeten mogelijk worden aangepast wanneer men het model voor een andere schaal wil gebruiken. Dit geldt bijvoorbeeld voor de energie-efficiency van elektriciteitsopwekking. Ook de emissiefactoren en het brandstofverbruik per tonkilometer zijn onzeker en hun schatting is bovendien gebaseerd op Nederlandse gegevens. Het zou interessant zijn berekeningen hiervan uit te voeren op een hoger detailniveau, omdat deze heel bepalend zijn voor de uitkomsten van het model.

De energie-efficiency van de productie van waterstof en van compressoren zijn onzeker. Door middel van vervolgonderzoek kan hier meer informatie over worden verkregen. Ook kan onderzoek worden gedaan naar andere productiemethoden van waterstof.

Uit dit onderzoek is gebleken dat de pijpleiding een goede optie is, met name voor korte afstanden. Nu is het gemodelleerd door het huidige gasnet als referentie te nemen. Het vergelijken van de uitkomsten met die van een meer fundamentele benadering zou kunnen dienen als validatie van de gebruikte benadering.

Literatuur

Airliquide, *Hydrogen, Physical properties, safety, MSDS, enthalpy, gas liquid equilibrium, density, viscosity, flammability, transport properties*, <http://www.airliquide.com/en/business/products/gases/gasdata/index.asp?GasID=36>, bezocht 22 februari 2004.

Binas (1986), Informatieboek VWO-HAVO voor het onderwijs in de natuurwetenschappen, Groningen: Wolters-Noordhoff.

Bovy, P.H.L.; Schoemaker, Th.J.H.; Binsbergen, A.J. van (2002), *Transport, Infrastructuur en Logistiek: Vervoerssystemen en verkeersnetwerken*, Delft: Faculteit Techniek, Bestuur en Management

Centraal bureau voor de statistiek (2004), *Statline*, <http://www.statline.cbs.nl>, bezocht op 25 maart 2004.

Concoa (2004), *Hydrogen*, www.concoa.com/frames/technical/gases/hydrogen.htm, bezocht op 13 mei 2004.

Cronos, *Tanks information sheet*, <http://www.cronos.com/pdf-sheets/Tanks.pdf>, bezocht op 22 april 2004.

Energiened (2002), *Elektriciteitsproductie en milieu*, http://www.energiened.nl/_upload/publicaties/00000050.pdf, bezocht op 25 maart 2004.

Europese Commissie (2002), *De binnenvaart, een vervoerswijze die werkt*, Brussel: Europese Commissie.

Gasunie (2004), *Feiten gasunie*, <http://www.nvnederlandsegasunie.nl/JV/2003/docs/Feiten%202004%20NL.pdf>, bezocht op 16 april 2004.

Gasunie (2004), *Jaarverslag 2003*, <http://www.nvnederlandsegasunie.nl/JV/2003/docs/Jaarverslag%202003%20NL.pdf>, bezocht op 15 april 2004.

Ham, H. van (2003), *Transport, Infrastructuur en Logistiek: collegesheets*, Delft: TU Delft, Faculteit Techniek, Bestuur en Management, Sectie Transportbeleid en Logistieke organisatie.

Hoyer Odfjell (2003), *Tank Container Guide – Handbook for Hoyer Odfjell employees and agents*.

Janssen, L.P.B.M. en Warmoeskerken, M.M.C.G. (1987), *Transport Phenomena Data Companion*, delft: Delft University Press.

Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu (2003), *Kwaliteit van benzine en diesel*, <http://www.eu-milieubeleid.nl/ch06s22.html>, bezocht op 26 maart 2004.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Goederenvervoer (2004), *Versterking Netwerken*, http://www.minvenw.nl/dgg/dgg/nl/b_versterking.shtml, bezocht op 13 april 2004.

Mintz, M., Folga, S. Molburg, J. en Gillette, J. (2002), *Hydrogen distribution infrastructure*, <http://www.jlab.org/hydrogen/talks/Mintz.pdf>, bezocht op 13 april 2004.

Nedrail1435, <http://www.nedrail1435.nl/>, bezocht 27 april 2004.

Treineninfo, *Treineninfo*, <http://www.treineninfo.nl>, bezocht 27 april 2004.

Truck Traider Online, <http://www.trucktraideronline.com>, bezocht 27 april 2004.

U.S. Department of Energy (2004), *Current Approaches to Hydrogen Storage*,
<http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/hydrogen/storage.html>, bezocht op 7 juni 2004.

Weekblad Schuttlevaer, <http://www.schuttlevaer.nl>, bezocht 13 april 2004.

Wolters, M. (2003), *Ontwerp van Gasnetten*, Enschede: Universiteit Twente.

Bijlagen

1. Instelparameters

Tabel 2. Instelparameters

Blok	Beschrijving	Unit	Value	Minimum	Maximum
Start	Kosten CO2	euro / ton	0	0	100
	Kosten SO2	euro / ton	0	0	100
Productie	Hoeveelheid waterstof	ton/ jaar	1000	0	1000000
	Investeringsen	euro	100000	0	2000000
	Loon per manuur	euro / uur	50	10.01	300.01
	overige kosten	euro / jaar	0	0	1000000
Compressor	Loon per manuur	euro/uur	50	10.01	300.01
	overige kosten	euro / jaar	0	0	1000000
Pijpleiding	Afstand oude pijp	km	100	0.01	2000.01
	Capaciteit nieuwe pijp	ton / jaar	400000	100000	10000000
	Afschrijving	jaar	20	5	20
	Afstand nieuwe pijp	km	100	0.01	2000.01
	Loon per manuur	euro / uur	50	10.01	300.01
	scheidingskosten	euro / jaar	0	0	1000000
	Enable	ja / nee	1	0	1
overige kosten	euro / jaar	0	0	1000000	
Schip	Afstand	km	100	0.01	2000.01
	Vertragingspercentage	%	5	0	10
	Loon per manuur	euro / uur	50	10.01	300.01
	Enable	ja / nee	1	0	1
	overige kosten	euro / jaar	0	0	1000000
Trein	Afstand	km	100	0.01	2000.01
	Energy source electricit	diesel / electriciteit	0	0	1
	Vertragingspercentage	%	10	0	100
	Loon per manuur	euro / uur	50	10.01	300.01
	Enable	ja / nee	1	0	1
	overige kosten	euro / jaar	0	0	1000000
Vrachtwagen	Afstand	km	100	0.01	2000.01
	Vertragingspercentage	%	10	0	100
	Loon per manuur	euro / uur	50	10.01	300.01
	Enable	ja / nee	1	0	1
	Overige kosten	euro / jaar	0	0	1000000
(De)compressor	Einddruk	km	100	0.01	2000.01
	Loon per manuur	euro / uur	50	10.01	300.01
	Overige kosten	euro / jaar	0	0	1000000

2. Constanten

Tabel 3. Constanten

Factor	Productie	Pijpleiding	Schip	Trein	Vrachtwagen	Compressor
Verbrandingswaarde (kJ/ton)	141.8		141.8	141.8	141.8	
Omzettingsefficiëntie punt 1 (%)	50					
Omzettingsefficiëntie punt 2 (%)	90					
Hoeveelheid punt 1 (ton)	1000					
Hoeveelheid punt 2 (ton)	1000000					
Afschrijvingsperiode (jaar)	20	50	20	15	7.5	10
Overige kosten (euro/jaar)	10000		2000	100 per rit	10 per rit	10
Investerings (euro)	-		5000000	41500000	40000	100000
Prijs electriciteit (euro/kWh)		0.2		0.2		0.2
Emissies CO2 (g/kWh)		630		0.05		630
Emissies SO2 (g/kWh)		0.2		0.00001		0.2
Energie-efficiëntie elektriciteitsopwekking(%)		45		45		45
Prijs diesel (euro/liter)			0.42	0.42	0.75	
Emissies CO2 (g/kg)			3130	3130	3130	
Emissies SO2 (g/kg)			3.4	3.4	0.5	
Dichtheid diesel (kg/m3)			850	850	850	
Verbrandingswaarde diesel (J/L)			3.6E+07	36000000	36000000	
Gasconstante (J/(mol*K))			8.3145	8.3145	8.3145	8.3145
Mol h2/ton (mol/ton)			496032	2016000	496032	2016000
k		1.4				1.4
Cv (J/kgK)		10210				10210
Volume container (m3)			26	26	26	26
Rusttijd (uur/uur)			0	-	0.125	
Aantal werknemers per modaliteit (#/mod.)			2	2	1	
Maximum snelheid (km/uur)			20	100	80	
Maximum aantal containers per rit (#)			398	50	2	
Lengte container (m)			6.1	6.1	6.1	
Maximum aantal uur per mod. (uur/jaar)			6570	2920	2920	
Verbruik (kg/tonkm)			0.015	0.03	0.04	
Maximale belading wagon (ton)				70		70
Maximale lengte (aantal wagons)				25		25
Vermogen trein (kW)				4540		
Maximum lengte (m)				300	18	
Temperatuur (K)		293				
Druk (Pa)		4049400				
Efficiëntie						0.8

In het computermodel wordt bij elke gebruikte constante of parameter een bronvermelding gegeven.

3. Vergelijkingen

Tabel 4. Vergelijkingen

Productie	Energetic Value (EV) Electricity equivalent (EEq) Energiegebruik elektriciteit (E _{elektr}) Kosten elektriciteit (K _{elektr})	KJ/jaar kWh/jaar kWh/jaar Euro/jaar	Q _{hydrogen} *C _{hydrogen} EV/3600 EEq/(omzettingsefficiëntie/100) E _{elektr} *PkWh
-----------	--	--	---

Q_{hydrogen}: hoeveelheid waterstof; C_{hydrogen}: verbrandingswaarde waterstof; PkWh: l

Algemeen	Aantal load tonkm Capaciteit container (mol) (CAP _{mol}) Capaciteit container (ton) (CAP) Aantal benodigde containers (N _{container,ben}) Aantal ritten (N _{rit}) Aantal voertuigen (N _{voertuig}) Afschrijvingskosten (K _{afschrijving}) Brandstofverbruik diesel (B _{diesel}) Energie kosten diesel (K _{diesel}) Totale energie gebruik diesel (J) (E _{diesel}) Energie kosten elektriciteit (K _{elektr}) Kosten CO2 emissies (K _{CO2}) Kosten SO2 emissies (K _{SO2}) Energie-efficiency (Effe)	tonkm mol / container ton / container # / jaar # / jaar # euro/jaar L / jaar euro / jaar J / jaar euro/jaar Euro/jaar Euro/jaar %	Q _{hydrogen} *L p*V/(R*T) CAP _{mol} / mol waterstof per ton Q _{hydrogen} /CAP N _{containers,ben} /N _{containers,max} N _{rit} *treis / aantal uur per dag I/tafschrijving L*Q _{hydrogen} *U/(Rho/1000) B _{diesel} *P _{diesel} B _{diesel} *C _{diesel} E _{elektr} *PkWh EMCO2*PCO2 EMSO2*PSO3 100*Q _{uit,hydrogen} *C _{hydrogen} /(Q _{in,hydrogen} *C _{hydrogen} +E _{diesel} +E _{elektr} /Effopwekking)
----------	--	--	---

L: afstand; p: druk; V: volume; R: gasconstante; treis: reistijd; I: investering; t_{afschrijving}: afschrijvingstermijn; U: verbruik; Rho: dichtheid; P_{diesel}: prijs per L diesel
C_{diesel}: verbrandingswaarde diesel; EMCO2: emissies CO2; PCO2: prijs per ton CO2; Effopwekking: efficiency elektriciteitsopwekking

(De)compressor	Aantal mol (N _{mol}) Eind temperatuur (T _{eind}) Start volume (V _{start}) Eind volume V _{eind}) Benodigde power (Eben) Energiegebruik electriciteit (E _{elektr}) K _{personeel}	mol/jaar K m3 m3 J kWh euro / jaar	Q _{hydrogen} * mol waterstof/ton T _{begin} *p _{eind} *V _{eind} /(p _{begin} *V _{begin}) N _{mol} *R*T _{start} /p _{start} V _{begin} *(p _{begin} /p _{eind})^1/k Q _{hydrogen,k} *cv*(T _{eind} - T _{begin}) Eben / (eff _{compressor} *3600000) aantal werknemers * loon per manuur * aantal uur per jaar
----------------	---	--	---

T_{start}: temperatuur bij start (de)compressie; T_{eind}: temperatuur bij einde decompressie; k: ratio van soortelijke warmtes; cv: soortelijke warmte bij gelijk volume

Pijpleiding	Investeringskosten pijpleiding per m Energieverbruik compressoren Personeelskosten (K _{personeel}) Gebruikspercentage Kosten nieuwe pijpleiding (K _{nieuw}) Kosten nieuwe pijpleiding (K _{nieuw})	euro / m J / jaar euro / jaar % euro / jaar euro / jaar	1500 * d + 13.225 Gebruikspercentage *L*P _{compressor} aantal werknemers * loon per manuur * aantal uur per jaar 100*Q _{hydrogen} / CAP _{pijpleiding} gebruikspercentage/100 * I/tafschrijving gebruikspercentage/100 * I/tafschrijving
-------------	--	--	---

d: diameter; P_{compressor}: vermogen compressor; CAP_{pijpleiding}: capaciteit van de pijpleiding

Trein	Energie gebruik electriciteit (EgE) Reistijd (treis) Maximum aantal containers (N _{containers,max}) Personeelskosten (K _{personeel})	kWh / jaar uur aantal euro / jaar	P _{locomotief} *treis*N _{rit} (L/v _{max})*(1+a/100) N _{wagon,max} * L _{wagon} / L _{container} treis*N _{rit} *aantal werknemers per trein * loon per manuur
-------	---	--	---

P_{locomotief}: vermogen locomotief; v_{max}: maximale snelheid; a: vertragingfactor; N_{wagon,max}: maximale treinlengte, L_{wagon}: lengte wagon; L_{container}: lengte container

Schip	Reistijd (treis) Personeelskosten (K _{personeel})	uur euro / jaar	(L/v _{max})*(1+a/100) treis*N _{rit} *aantal werknemers per schip * loon per manuur
-------	--	--------------------	--

Vrachtwagen	Reistijd (treis) Personeelskosten (K _{personeel})	uur euro / jaar	(L/v _{max})*(1+a/100)*(1+p) treis*N _{rit} *aantal werknemers per truck * loon per manuur
-------------	--	--------------------	--

p: rusttijd per uur

(De)compressor	N _{mol} Start volume (V _{start}) Eind volume V _{eind}) Benodigde power (Eben) Energiegebruik electriciteit (E _{elektr}) K _{personeel}	mol/jaar m3 m3 J kWh euro / jaar	Q _{hydrogen} * mol waterstof/ton N _{mol} *R*T _{start} /p _{start} N _{mol} *R*T _{eind} /p _{eind} - N _{mol} *R*T _{eind} *Ln(V _{eind} /V _{start}) Eben / (eff _{compressor} *3600000) aantal werknemers * loon per manuur * aantal uur per jaar
----------------	--	---	--

4. Scheepstypen

Tabel 4. Scheepstypen

Standaard Scheepstypen						
Vaarwegklassen	Type	Afmetingen	Laadvermogen (tonnen)	Capaciteit (TEU)	Snelheid	Investeringskosten
0	Kleinere vaartuigen	variërend	<300			
1	Spits	(38.5; 5;3.55)	300		23 km/uur	
2	Kempenaar	(50;6.6;4.2)	600			
3	Dortmund- Eems kanaalschip	(67;8.2;3.95)	1000			
4	Rijn- Herne kanaalschip	(80;9.5;4.4)	1350			
5	Groot Rijnschip	(95;11.5;4.4)	2000		24 km/uur	
6	vierbaksduwstel	(185;22.8;8.75)	10000			
Panamax	Maren Maersk	(294.1;32.2;-)		4300	40 km/uur	
Post Panamax	Hamburg Express	(320.38;42.88;-)		7506	25 km/uur	
Nieuwe typen	MS Jowi	(134.2;16.8;-)	4600	398(4)-470(5)	20 km/uur	11 mln gulden
	Neokemp	(63;7;-)	900	32-48	21km/uur	2.5 mln gulden
	Knikverband			368		
	Europaschip		1500			

Bronnen: Weekblad Schuttlevaer, 2004, Bovy et.al., 2002, Van Ham 2003

Het klassieke binnenvaartschip is het zogenaamde knikverband. Slechts een aantal binnenvaartschepen zijn speciaal gebouwd voor het vervoeren van containers. De dedicated containerbinnenvaartschepen zoals de Jowi en de Neokemp geven aan dat de containerbinnenvaart niet alleen gericht is op schaalvergroting maar ook op diensten in de regio's met kleinere vaarwegen.

Voor de keuze van een schip is het van belang welke vaarwegen men gebruikt. Er zijn drie typen vaarwegen te onderscheiden (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2004):

- de hoofdtransportassen: internationale vaarwegen, die de belangrijkste zeehavens met het achterland verbinden. Deze vaarwegen moeten tenminste geschikt zijn voor klasse VIb-schepen en vierlaags containervaart.
- de hoofdvaarwegen: de grote nationale vaarwegen, die verschillende landsdelen met elkaar verbinden. Deze vaarwegen moeten tenminste geschikt zijn voor klasse V schepen en drielaags containervaart.
- de overige vaarwegen: binnenwateren met een regionaal ontsluitende functie via het water. De vaarwegen zijn bevaarbaar voor de kleinere schepen, variërend van klasse I tot IV.

Voor het model is een schip van ten minste type vier noodzakelijk, daar het niet alleen geschikt moet zijn voor de Nederlandse situatie maar ook internationaal (bijvoorbeeld intra-Europees) vervoer. De eerste categorieën hebben een te klein laadvermogen, waardoor het waarschijnlijk niet rendabel is deze te gebruiken voor Europees transport.

De Rijn is belangrijk voor de Nederlandse vaart en kan daarom als referentie gekozen worden voor het type schip dat het aankan. Op de Rijn is thans een lengte van maximaal 135 meter toegestaan, waardoor de grote schepen als Maren Maersk, Hamburg Express en een vierbaks duwstel afvallen.

Daar de MS Jowi speciaal voor containervaart is gebouwd en zowel nationaal als Europees kan vervoeren door het grote laadvermogen wordt gekozen voor dit type schip.

5. Resultaten gevoeligheidsanalyse

Electricity	Costs	Efficiency	CO2 emissions	SO2 emissions
	%	%	%	%
Conversion efficiency point 1	0,00	-10,00	11,11	11,11
	0,00	10,00	-9,09	-9,09
Conversion efficiency point 2	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
Amount point 1	0,00	0,01	-0,01	-0,01
	0,00	0,00	0,00	0,00
Amount point 2	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
Depreciation period	-0,42	0,00	0,00	0,00
	0,51	0,00	0,00	0,00
# of employees	9,54	0,00	0,00	0,00
	-9,54	0,00	0,00	0,00
Price	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
Emission CO2	0,00	0,00	10,00	0,00
	0,00	0,00	-10,00	0,00
Emission SO2	0,00	0,00	0,00	10,00
	0,00	0,00	0,00	-10,00
Energy efficiency	0,00	10,00	-9,09	-9,09
	0,00	-10,00	11,11	11,11
Amount of hydrogen	0,00	0,01	9,99	9,99
	0,00	0,00	-10,00	-10,00
Investment	0,46	0,00	0,00	0,00
	-0,46	0,00	0,00	0,00
Wages per manhour	9,54	0,00	0,00	0,00
	-9,54	0,00	0,00	0,00
(De)compressor	Costs	Efficiency	CO2 emissions	SO2 emissions
	%	%	%	%
Depreciation period	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
Volume container	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
Investment	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
Price	9,96	0,00	0,00	0,00
	-9,96	0,00	0,00	0,00
Emission CO2	0,00	0,00	10,00	0,00
	0,00	0,00	-10,00	0,00
Emission SO2	0,00	0,00	0,00	10,00
	0,00	0,00	0,00	-10,00
Energy efficiency	0,00	0,91	0,00	0,00
	0,00	-1,08	0,00	0,00
Combustion value	0,00	0,91	0,00	0,00
	0,00	0,91	0,00	0,00
Efficiency	-9,05	0,00	-9,09	-9,09
	11,06	0,00	11,11	11,11
Depreciation costs	-0,03	0,00	0,00	0,00
	0,03	0,00	0,00	0,00
Wages per manhour	0,01	0,00	0,00	0,00
	-0,07	0,00	0,00	0,00

Pipe	Costs	Efficiency	CO2 emissions	SO2 emissions
	%	%	%	%
begincondities	0,10	0,00	0,00	0,00
large reference cap	-0,10	0,00	0,00	0,00
large reference max pressure	4,46	-0,11	5,67	5,67
large reference max gasvelocity	-4,79	0,11	-6,10	-6,10
on capacity max pressure	4,24	-0,10	0,87	0,87
on capacity max gasvelocity	-3,82	0,09	-0,79	-0,79
energy ref dutch gas J/a	0,00	0,00	0,00	0,00
energy ref splits	0,00	0,00	0,00	0,00
energy ref length	0,00	0,00	0,00	0,00
energy ref avg length	0,00	0,00	0,00	0,00
energy ref compr	-1,86	0,04	-0,38	-0,38
depreciation period	2,27	-0,05	0,46	0,46
Price electricity	0,00	0,00	0,00	0,00
Emission CO2	0,00	0,00	0,00	0,00
Emission SO2	0,00	0,00	0,00	0,00
Energy-efficiency	2,04	-0,05	0,42	0,42
Distance old	-2,04	0,05	-0,42	-0,42
Capacity new pipeline	-0,09	0,00	0,00	0,00
Depreciation	0,11	0,00	0,00	0,00
Distance new	2,04	0,00	0,00	0,00
Wages per manhour	-2,04	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	10,00	0,00
	0,00	0,00	-10,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	10,00
	0,00	0,00	0,00	-10,00
	0,00	0,16	-8,71	-8,71
	0,00	-0,20	10,65	10,65
	1,05	-0,03	0,21	0,21
	-1,05	0,03	-0,21	-0,21
	0,07	0,00	0,00	0,00
	-0,07	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,01	0,00	0,00	0,00
	1,10	-0,02	0,21	0,21
	-1,10	0,02	-0,21	-0,21
	0,25	0,00	0,00	0,00
	-0,25	0,00	0,00	0,00

Ship	Costs %	Efficiency %	CO2 emissions %	SO2 emissions %
number of employer per ship	6,81	0,00	0,00	0,00
	-6,81	0,00	0,00	0,00
Maximum velocity	-9,02	0,00	0,00	0,00
	11,03	0,00	0,00	0,00
depreciation period	-2,83	0,00	0,00	0,00
	3,46	0,00	0,00	0,00
Volume container	-9,02	0,00	0,00	0,00
	11,03	0,00	0,00	0,00
Maximum number containers per ri	-9,02	0,00	0,00	0,00
	11,03	0,00	0,00	0,00
Length container	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
Maximum hours per ship	-2,83	0,00	0,00	0,00
	3,46	0,00	0,00	0,00
investment costs	4,94	0,00	0,00	0,00
	4,94	0,00	0,00	0,00
lease costs	8,54	0,00	0,00	0,00
	1,33	0,00	0,00	0,00
price	5,01	0,00	0,00	0,00
	4,86	0,00	0,00	0,00
Emission CO2	4,94	0,00	10,00	0,00
	4,94	0,00	-10,00	0,00
Emission SO2	4,94	0,00	0,00	10,00
	0,00	0,00	0,00	-10,00
density gasoil	-0,07	0,01	0,00	0,00
	0,08	-0,01	0,00	0,00
Energetic value gasoil	0,00	-0,01	0,00	0,00
	0,00	0,01	0,00	0,00
energetic value H2	0,00	0,01	0,00	0,00
	0,00	-0,01	0,00	0,00
Real usage ship	0,08	-0,01	10,00	10,00
	-0,08	0,01	-10,00	-10,00
Average usage ship	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
Distance	10,00	-0,01	10,00	10,00
	-10,00	0,01	-10,00	-10,00
Fraction delay	0,47	0,00	0,00	0,00
	-0,47	0,00	0,00	0,00
Wages per manhour	6,81	0,00	0,00	0,00
	-6,81	0,00	0,00	0,00

Train	Costs	Efficiency	CO2 emissions	SO2 emissions
	%	%	%	%
Maximum load wagon	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
Maximum trainlength	-6,48	0,00	0,00	0,00
	7,92	0,00	0,00	0,00
number of trainhours/year	-4,00	0,00	0,00	0,00
	4,89	0,00	0,00	0,00
maximum container per wagon	-9,09	0,00	0,00	0,00
	11,11	0,00	0,00	0,00
Maximum veloticy snelheid	-9,09	0,00	0,00	0,00
	11,11	0,00	0,00	0,00
depreciation period	-4,00	0,00	0,00	0,00
	4,89	0,00	0,00	0,00
Volume container	-9,09	0,00	0,00	0,00
	11,11	0,00	0,00	0,00
price	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
Emission CO2	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
Emission SO2	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
Energy-efficiency	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
number of employers per train	5,59	0,00	0,00	0,00
	-5,59	0,00	0,00	0,00
lease costs	4,40	0,00	0,00	0,00
	-4,40	0,00	0,00	0,00
price	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
Emission CO2	0,00	0,00	10,00	0,00
	0,00	0,00	-10,00	0,00
Emission SO2	0,00	0,00	0,00	10,00
	0,00	0,00	0,00	-10,00
Density gasoil	0,00	0,02	0,00	0,00
	0,00	-0,02	0,00	0,00
Energetic value Gasoil	0,00	-0,02	0,00	0,00
	0,00	0,02	0,00	0,00
energetic value H2	0,00	0,02	0,00	0,00
	0,00	-0,02	0,00	0,00
Price	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
Vermogen trein	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
Real fuel Consumption train	0,00	-0,02	10,00	10,00
	0,00	0,02	-10,00	-10,00
Distance	10,00	-0,02	10,00	10,00
	-10,00	0,02	-10,00	-10,00
Fraction delay	0,91	0,00	0,00	0,00
	-0,91	0,00	0,00	0,00
Wages per manhour	5,59	0,00	0,00	0,00
	-5,59	0,00	0,00	0,00

Truck	Costs	Efficiency	CO2 emissions	SO2 emissions
	%	%	%	%
begincondities	1,11	0,00	0,00	0,00
pause driver	-1,11	0,00	0,00	0,00
maximum velocity	-9,08	0,00	0,00	0,00
	11,09	0,00	0,00	0,00
depreciation period	-0,32	0,00	0,00	0,00
	0,39	0,00	0,00	0,00
Volume container	-9,08	0,00	0,00	0,00
	11,09	0,00	0,00	0,00
maximum length truck	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
Volume container	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
maximum nummer of driving hours	-0,32	0,00	0,00	0,00
	0,39	0,00	0,00	0,00
investmentcosts	0,35	0,00	0,00	0,00
	-0,35	0,00	0,00	0,00
Price	0,02	0,00	0,00	0,00
	-0,02	0,00	0,00	0,00
Emissions CO2	0,00	0,00	10,00	0,00
	0,00	0,00	-10,00	0,00
Emissions SO2	0,00	0,00	0,00	10,00
	0,00	0,00	0,00	-10,00
Density gasoil	-0,02	0,02	-9,09	-9,09
	0,02	-0,03	11,11	11,11
Energetic value gasoil	0,00	-0,02	10,00	10,00
	0,00	0,02	-10,00	-10,00
Real fuel consumprion	0,02	-0,02	10,00	10,00
	-0,02	0,02	-10,00	-10,00
Combustion value	0,00	0,02	0,00	0,00
	0,00	-0,03	0,00	0,00
Distance	10,00	-0,02	10,00	10,00
	-10,00	0,02	-10,00	-10,00
Fraction delay	0,91	0,00	0,00	0,00
	-0,91	0,00	0,00	0,00
Wages per manhour	9,63	0,00	0,00	0,00
	-9,63	0,00	0,00	0,00