

RIVM rapport 773002020/2001

**Milieu-effecten van ondergronds
goederentransport**

Huidige situatie en toekomstige ontwikkelingen

J. Willigers

Dit onderzoek werd verricht in opdracht en ten laste van MAP-Milieu, in het kader van project 773002, verkeer en vervoer, mijlpaal 773002/01/CC (zeescheepvaart/luchtvaart/overige mobiele bronnen).

Abstract

Various forms of automated underground freight transport in the Netherlands were investigated in a desk study to sketch both the current and possible future environmental effects. The transport methods examined were traditional and extra-traditional pipelines, pneumatic and hydraulic capsule pipelines, and systems using rail-guided vehicles, automatic guided vehicles or dual mode vehicles. Most of the focus was on the traditional pipelines and the underground logistic systems that make use of automatic guided vehicles. Environmental effects were caused by emissions of CO₂, NO_x, SO₂, VOC and PM₁₀, along with noise and visual nuisance and the pressure on space.

The state-of-the-art was determined for the diverse forms of underground freight transport and for the methods for building infrastructure underground. Thereafter the extent of the existing Dutch pipeline network was determined and an overview given of possible future applications of the different forms of underground freight transport. Both direct and indirect energy use and the environmental effects of underground freight transport were studied on the basis of the literature and supplementary calculations. A case study was performed to determine the total effect on the energy use and emissions of the underground logistic system (ULS) Utrecht, an existing network concept for underground freight transport.

Most types of underground freight transport appeared to have low direct energy intensities. For traditional, extra-traditional and capsule pipelines, the indirect energy use was also low. In contrast, ULSs have a very high level of indirect energy use, which increases for larger tube diameters. The use of the ULS Utrecht is expected to lead to an increase in total energy use and emissions for all the alternatives under discussion.

Voorwoord

Dit rapport beschrijft de resultaten van 37 weken onderzoek in het kader van een gecombineerde stage en afstudeeropdracht voor de studie Natuurwetenschappen en Bedrijf & Bestuur aan de Universiteit Utrecht. De universitaire begeleiding is verzorgd door prof. dr. G.P. van Wee, die ik hiervoor wil bedanken.

Het onderzoek is in de periode januari 2001 tot en met september 2001 uitgevoerd aan het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM). De dagelijkse begeleiding was in handen van ir. R.M.M. van den Brink. Hem wil ik bedanken voor het telkens weer geven van opbouwende kritiek.

Verder wil ik iedereen bedanken die mij voor dit onderzoek van informatie heeft voorzien, het zij in interviews of door telefonisch of emailcontact. Deze informatie is van wezenlijk belang geweest voor de totstandkoming van dit rapport.

Jasper Willigers

Bilthoven, 28 september 2001

Inhoud

Samenvatting	9
Summary	13
1. Inleiding	17
1.1 Introductie	17
1.2 Algemene werkzaamheden van het RIVM en het belang van dit onderzoek.....	17
1.3 Formulering onderzoeksvraag en deelvragen	18
2. Methodologie	21
2.1 Inleiding	21
2.2 Conceptueel model voor de invloed van transport op het milieu en de transportkosten.....	21
2.3 Onderzoeksmethode.....	24
2.4 Hoofdstukindeling van dit rapport	25
3. Stand van de techniek voor ondergronds transport	27
3.1 Inleiding	27
3.2 Traditioneel en extra-traditioneel ondergronds transport.....	27
3.3 Capsule-pijpleidingtransport	29
3.4 Overige niet-traditionele transportsystemen	33
3.5 Tunnelbouwtechnieken	38
4. Logistieke netwerken met ondergronds transport	45
4.1 Inleiding	45
4.2 Traditioneel en extra-traditioneel ondergronds transport.....	45
4.3 Capsule-pijpleidingtransport.....	52
4.4 Overige niet-traditionele transportsystemen	54
5. Directe milieueffecten en financiële kosten	61
5.1 Inleiding	61
5.2 Toelichting op milieueffecten en financiële kosten	61
5.3 Traditioneel en extra-traditioneel ondergronds transport.....	65
5.4 PCP- en HCP-transport	70
5.5 Overige niet-traditionele ondergrondse transportsystemen.....	72
5.6 Bovengrondse transportmethoden.....	74
6. Indirecte milieueffecten en financiële kosten	79
6.1 Inleiding	79
6.2 Traditioneel en extra-traditioneel ondergronds transport.....	79
6.3 PCP- en HCP-transport	81

6.4	Overige niet-traditionele ondergrondse transportsystemen.....	83
6.5	Bovengrondse transportmethoden.....	85
7.	Case-studie voor een integrale beschouwing van energiegebruik, emissies en kosten.....	87
7.1	Inleiding.....	87
7.2	Beschrijving van het OLS Utrecht.....	87
7.3	Direct energiegebruik en emissies.....	88
7.4	Indirect energiegebruik en emissies.....	97
7.5	Kostenberekening.....	101
7.6	Evaluatie van het energiegebruik en de kosten.....	103
8.	Discussie.....	111
8.1	Inleiding.....	111
8.2	Traditioneel en extra-traditioneel pijpleidingtransport.....	111
8.3	Capsule-pijpleidingtransport.....	113
8.4	Overige ondergrondse transportsystemen.....	114
8.5	Overzicht van energie-intensiteiten.....	116
9.	Conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek.....	119
9.1	Conclusies.....	119
9.2	Aanbevelingen voor verder onderzoek.....	120
	Literatuur.....	123
	Bijlage 1: Verzendlijst.....	129
	Bijlage 2: De werking van lineaire motoren.....	131
	Bijlage 3: Schematische weergaven van tunnelbouwtechnieken.....	137
	Bijlage 4: Direct energiegebruik, emissies en kosten van ondergrondse transportmethoden .	141
	Bijlage 5: Indirect energiegebruik en emissies van de aanleg van buisleidingen.....	171

Samenvatting

In dit rapport worden de resultaten beschreven van een onderzoek naar de huidige en mogelijke toekomstige milieueffecten van verschillende vormen van ondergronds goederentransport in vergelijking tot de bestaande bovengrondse goederentransportsystemen. Hierbij is 'ondergronds goederentransport' gedefinieerd als: "alle vormen van ongehinderd goederentransport voor zover die op zijn minst ten dele ondergronds worden aangelegd."

In het begin van het onderzoek is een literatuuronderzoek uitgevoerd naar de state-of-the-art van de verschillende vormen van ondergronds goederentransport en van de methoden om infrastructuur ondergronds aan te leggen. Vervolgens is voor elk van de ondergrondse transportmethoden gekeken naar de omvang van het eventueel bestaande transportnetwerk en naar concepten voor mogelijke toekomstige toepassingen van ondergronds goederentransport. Aan de hand van literatuur en aanvullende berekeningen zijn daarna het directe en het indirecte energiegebruik van ondergronds goederentransport onderzocht. Tenslotte is een case-studie uitgevoerd naar het totale effect op het energiegebruik en de emissies van een concreet netwerkconcept voor ondergronds goederenvervoer.

Ondergronds goederentransport kan worden onderverdeeld in drie categorieën. De eerste categorie is het traditionele en extra-traditionele pijpleidingtransport. Het traditionele pijpleidingtransport is het transport per pijpleiding van vloeistoffen en gassen die nu reeds op grote schaal door pijpleidingen vervoerd worden. Dit is bijvoorbeeld het vervoer van aardgas, aardolie en petrochemische producten. Ook het transport van drinkwater door waterleidingen kan hiertoe gerekend worden. Extra-traditioneel pijpleidingtransport is het vervoer door pijpleidingen van stoffen die nu niet of nauwelijks per pijpleiding vervoerd worden maar wel vloeibaar of anderszins pompbaar gemaakt kunnen worden. Voorbeelden hiervan zijn het pijpleidingtransport van melk tussen Ameland en Friesland en het pijpleidingtransport van suspensies van steenkool in water.

Traditionele pijpleidingen blijken een lage energie-intensiteit (dat is het energiegebruik per tonkilometer geleverde vervoersprestatie) te hebben. Dit geldt voornamelijk voor pijpleidingen die vloeistoffen vervoeren. De energie-intensiteit van pijpleidingen die gassen vervoeren is duidelijk hoger. In tabel 1 zijn de energie-intensiteiten van het pijpleidingtransport van enkele stoffen weergegeven. Het energiegebruik van het pijpleidingtransport is voornamelijk direct energiegebruik; het indirecte energiegebruik is zeer klein. Voor de emissies van SO₂, VOS en PM₁₀ ten gevolge van het energiegebruik is het indirecte deel van groter belang.

Extra-traditionele pijpleidingen komen technisch overeen met traditionele pijpleidingen en hebben daarom ook een vergelijkbare energie-intensiteit en emissiefactoren. Een uitzondering hierop is het pijpleidingtransport van suspensies (dat zijn vloeistoffen waarin zeer kleine deeltjes van een vaste stof zweven), omdat hierbij extra bewerkingen vooraf en achteraf nodig zijn.

De tweede categorie ondergronds goederentransport is het capsule-pijpleidingtransport. Hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen voortstuwing door luchtdruk en voortstuwing door vloeistofdruk. Pneumatische capsule-pijpleidingen met grote diameters worden momenteel toegepast in Japan en de voormalige Sovjet-Unie voor het transport van steenkool en erts. Nieuwe concepten maken gebruik van lineaire motoren, wat het energiegebruik van systemen met grote diameters (in de orde van 1 meter) kan beperken. Hydraulische capsule-pijpleidingen worden ondanks jarenlang onderzoek momenteel nog niet toegepast. Het meest kansrijke concept is de 'coal log pipeline' waarbij steenkool of een ander bulkgoed direct tot capsules wordt geperst en door de pijpleiding kan worden getransporteerd.

De directe energie-intensiteit van conventionele pneumatische capsule-pijpleidingen is laag voor kleine diameter pijpleidingen maar neemt sterk toe naarmate een grotere diameter gebruikt wordt. Door lineaire motoren aangedreven systemen hebben een uiteenlopende energie-intensiteit (zie tabel 1). Dit komt doordat er meerdere typen lineaire motoren bestaan, die een verschillend energiegebruik hebben. Hydraulische capsule-pijpleidingen hebben een laag energiegebruik, ongeveer 10% tot 30%

hoger dan het pijpleidingtransport van alleen water. Grotere buisdiameters leiden tot een lagere directe energie-intensiteit. Voor de coal log pipeline is het energiegebruik hoger, omdat veel energie nodig is voor de fabricage van de capsules. Het indirecte energiegebruik van capsule-pijpleidingen is zeer laag ten opzichte van het directe energiegebruik, met uitzondering van de conventionele pneumatische capsule-pijpleidingen.

Als derde categorie ondergrondse transportmethoden zijn er de systemen die gebruik maken van voertuigen zonder dat daarbij pneumatische aandrijving plaatsvindt. Het transport kan verzorgd worden door railgeleide voertuigen, automatisch geleide voertuigen of door dual-mode voertuigen die met een chauffeur ook op conventionele infrastructuur kunnen rijden. Railgeleide voertuigen zijn een beproefde techniek die al worden gebruikt in een ondergronds transportnetwerk van de Royal Mail in Londen. In Nederland zijn verschillende mogelijke ondergrondse transportnetwerken onderzocht die gebruik maken van automatisch geleide voertuigen. Automatisch geleide voertuigen zijn bij uitstek geschikt om te worden toegepast in uitgebreide en fijnvertakte netwerken met veel wisselende herkomsten en bestemmingen van goederen. Systemen met automatisch geleide voertuigen worden vaak aangeduid als ondergrondse of ongehinderde logistieke systemen (OLS).

Van de verschillende systemen zijn in technisch opzicht veel varianten mogelijk. Hierdoor is het moeilijk om eenduidige waarden voor het energiegebruik te geven. Voor automatisch geleide voertuigen is op basis van technische specificaties van de voertuigen voor verschillende netwerkconcepten het directe energiegebruik berekend. Hieruit blijkt het energiegebruik in de meeste gevallen lager te liggen dan voor het wegtransport. Deze energiebesparing ten opzichte van het wegtransport wordt veroorzaakt door het gelijkmatigere snelheidsverloop van de voertuigen en door de specifieke technische kenmerken van de voertuigen. Over het algemeen heeft rijden door een tunnel een nadelige invloed op het directe energiegebruik vanwege de hogere luchtweerstand die de voertuigen daar ondervinden.

Het indirecte energiegebruik van een OLS is zeer hoog en neemt toe voor grotere buisdiameters. Bij kleine goederenstromen kan dit leiden tot een zeer hoge indirecte energie-intensiteit (zie tabel 1). Er is nog veel onzekerheid omtrent het indirecte energiegebruik van het OLS, vooral met betrekking tot het energiegebruik van de constructie van de terminals en het onderhoud van het systeem. De emissies per Joule energiegebruik is voor het indirecte energiegebruik hoger dan voor het directe energiegebruik, vooral voor de emissies van SO₂, VOS en PM₁₀.

Van het OLS Utrecht is het totale effect op het energiegebruik en de emissies van het transport bepaald. Hierbij is gebleken dat de routing van het transport zeer belangrijk is. Een eventuele energiebesparing door het lage directe energiegebruik van het OLS kan teniet gedaan worden door een toename van de benodigde vervoersprestatie vanwege het omrijden via een overslagterminal. Vanwege het hoge indirecte energiegebruik en het lage door het OLS vervoerde gewicht, is het totale effect van het OLS Utrecht op nationale en mondiale schaal negatief. Op lokale schaal treden wel positieve effecten op, door verschuiving van de emissies van stedelijke wegen naar snelwegen en elektriciteitscentrales en door afname van geluidhinder, ruimtegebruik en visuele hinder binnen de stad.

Tabel 1 geeft een overzicht van de directe en indirecte energie-intensiteiten van de verschillende ondergrondse transportmiddelen en, ter vergelijking, van de conventionele bovengrondse vervoersmethoden. De emissiefactoren vloeien uit deze energie-intensiteiten voort, maar zijn ook afhankelijk van de gebruikte energiedragers. Ten opzichte van het directe energiegebruik leidt het indirecte energiegebruik in de veel gevallen tot hogere emissies.

Tabel 1: Overzicht van de energie-intensiteiten per goederensoort en vervoermiddel.

Energie-intensiteit (MJ/tonkm)	Direct	Indirect	Totaal
Gassen			
Traditionele pijpleidingen:			
• Aardgas	0,56 – 0,84	?	?
Bulkgoederen			
Traditionele pijpleidingen:			
• Ruwe aardolie	0,10	0,00	0,10
• Aardolieproducten	0,11 – 0,18	?	?
• Drinkwater	0,38	?	?
Pneumatische capsule-pijpleidingen:			
• Conventioneel	0,12 – 1,6 ^{a)}	0,20	0,3 – 1,8
• Met lineaire motoren	0,67 – 6,4 ^{b)}	≤ 0,01	0,7 – 6,4
Hydraulische capsule-pijpleidingen (Ø 0,5 – 2 m)	0,12 – 0,63 ^{c)}	≤ 0,01	0,12 – 0,64
Wegvervoer (zware vrachtauto's / trekkers)	0,9 – 1,1	0,47	1,4 – 1,6
Railvervoer	0,61	0,30	0,91
Binnenvaart	0,60	0,27	0,87
Stukgoederen			
OLS Utrecht (stedelijk OLS)	1,0 – 4,8 ^{d)}	23 – 50 ^{e)}	25 – 53
OLS Schiphol (industrieel OLS)	1,56 – 3,81	> 1,52	> 3,1
Wegvervoer (stedelijke distributie naar Utrecht)	11,4 – 15,9	0,47	11,8 – 16,3

- Het directe energiegebruik van conventionele pneumatische capsule-pijpleidingen varieert sterk met de diameter van de buisleiding.
- Het directe energiegebruik van door lineaire motoren aangedreven pneumatische capsule-pijpleidingen vertoont een grote variatie door technische verschillen tussen de gebruikte typen lineaire motoren en/of het nog niet uitontwikkeld zijn van de lineaire aandrijftechnieken.
- Het directe energiegebruik van hydraulische capsule-pijpleidingen varieert sterk met de diameter van de buisleiding.
- Het directe energiegebruik van een OLS varieert met de omvang van de voertuigen en met de geleidingsmethode (rails of betonbaan).
- De indirecte energie-intensiteit is sterk afhankelijk van de geleverde vervoersprestatie.

Summary

This report describes the results of a research project on the current and possible future environmental effects of several forms of underground freight transport. Thereby 'underground freight transport' is defined as: "all the forms of undisturbed freight transport that are build at least partly underground."

In the beginning of the research a literature survey is executed on the state-of-the-art of the diverse forms of underground freight transport and of the methods to build infrastructure underground. After that for every method of underground transport the extent of the existing transportation network and of possible future applications are examined. Then on the basis of literature and of supplementary calculations the direct and indirect energy use and the environmental effects of underground freight transport is being studied. Finally a case study is performed to determine the total effect on the energy use and the emissions of an existing network concept for underground freight transport.

Underground freight transport can be divided into three categories. The first category consists of the traditional and extra-traditional pipelines. Traditional pipelines are pipelines carrying fluids and gasses that are already commonly transported by pipelines. These are for example natural gas, crude oil and petrochemical products. Also the transportation of drinking water by water pipes can be regarded as a form of traditional pipeline transportation. Extra-traditional pipelines are pipelines carrying substances that are not yet or scarcely transported by pipeline but that are suitable or can be made suitable for pipeline transportation. Examples of this kind of pipeline transportation are the transportation of milk by pipeline from Ameland to Friesland and the pipeline transportation of coal slurries.

Traditional pipelines come out to have a low energy intensity (i.e. the energy consumption per ton kilometre transport performance). This mainly accounts for pipelines carrying fluids. The energy intensity of pipelines carrying gasses is distinctly higher. Table 1 shows the energy intensities of pipeline transportation for a few substances. The energy use of pipeline transportation is for the main part direct energy use. The indirect energy use of pipelines is very small. For the emissions of SO₂, VOC and PM₁₀ caused by the energy use the importance of the indirect part is much larger.

Extra-traditional pipelines are technically similar to traditional pipelines and have consequently comparable energy intensities. An exception to this are the pipelines carrying slurries (these are fluids in which solids are suspended), as they require additional processing before and after the actual transport process.

The second category of underground freight transport is the capsule pipeline transportation. Hereby distinction can be made between capsule pipelines with pneumatic and with hydraulic propulsion. Large diameter pneumatic capsule pipelines (about 1 meter in diameter) are currently operational in Japan and in the former Soviet Union for the transportation of carbon and ores. New concepts use propulsion by linear motors, what can reduce the energy consumption of large diameter pipelines. In spite of many years of research no hydraulic capsule pipelines are operational yet. The most favourable concept is the coal log pipeline whereby coal or other bulk solids are compacted to capsules that can be transported through the pipelines without container.

The energy consumption of conventional pneumatic capsule pipelines is low for small diameter pipelines but rises strongly as the diameter increases. Pneumatic pipeline systems with linear propulsion have diverse energy intensities (see table 1). This is caused by the existence of several types of linear motors, which have different levels of energy consumption. Hydraulic capsule pipelines have a low energy use of about 10% to 30% higher than the pipeline transport of just water. Larger pipeline diameters result in a lower direct energy intensity. Coal log pipelines have a higher energy consumption, because of the energy that is required for the production of the capsules. The indirect energy use of capsule pipelines is very low compared to the direct energy use. An exception to this are the conventional pneumatic capsule pipelines.

The third category of underground freight transportation methods are the systems that use vehicles without pneumatic propulsion. The transport can be executed by rail-guided vehicles, automatic guided vehicles or by dual mode vehicles that can also be driven by a lorry driver on conventional infrastructure. Rail-guided vehicles are a proven technique that is already in use in an underground transport network by the Royal Mail beneath London. In the Netherlands several possible underground transportation networks have been surveyed that make use of automatic guided vehicles. Automatic guided vehicles are pre-eminently suitable for application in extensive distribution networks for goods having many varying origins and destinations. Transportation networks using automatic guided vehicles are often being referred to as underground or undisturbed logistic systems (ULS).

Within the different systems many technical variations are possible. This makes it difficult to give unambiguous values for the energy use of these systems. The energy consumption of automatic guided vehicles has been calculated on the basis of the technical specifications of vehicles for different conceptual underground transportation networks. From these calculations the energy consumption of automatic guided vehicles appears to be lower than that of road transportation in most cases. The reduced energy consumption compared to road transport is caused by the steadier speed course and by the vehicles' technical specifications. In general driving through tunnels has a negative influence on energy consumption because of the higher air resistance that is experienced by the vehicles.

The indirect energy use of an ULS is very large and rises as the tube diameter increases. In combination with a small amount of transported weight this may lead to a very high indirect energy intensity (see table 1). There is a large uncertainty about the indirect energy use of the ULS, especially with regard to the energy use of the construction of terminals and the maintenance of the system. The emissions per Joule energy use is higher for the indirect energy use than for the direct energy use, in particular for the emissions of SO₂, VOC and PM₁₀.

For the ULS Utrecht the total effect on the energy consumption and the emissions of the transport is determined. As it appeared the routing of the transport is very important. A possible saving of energy resulting from the low direct energy use of the ULS can be counterbalanced by means of a rise in the distance over which the freight needs to be transported as the goods are transported via an out of town terminal. As a result of the high indirect energy use and the low weight of the cargo that is transported by the ULS, the total effect of the ULS Utrecht on a national and global scale is negative. On a local scale however, there are positive environmental effects resulting from a shift of emissions from city roads to the motorways and electricity plants and from the reduction of noise, the saving of space and the decrease in visual nuisance inside the city.

Table 1 gives an overview of the direct and indirect energy intensities of the different underground freight transportation methods and, for comparison, of the conventional aboveground transportation methods. The emission factors result from these energy intensities but also depend on the energy carriers that are used. Compared with the direct energy use the indirect energy use can lead to high emissions.

Table 1: Overview of energy intensities per freight category and transportation method.

Energy intensity (MJ/tonkm)	Direct	Indirect	Total
Gasses			
Traditional pipelines:			
• Natural gas	0,56 – 0,84	?	?
Bulk goods			
Traditional pipelines:			
• Crude oil	0,10	0,00	0,10
• Oil products	0,11 – 0,18	?	?
• Drinking water	0,38	?	?
Pneumatic capsule pipelines:			
• Conventional	0,12 – 1,6 ^{a)}	0,20	0,3 – 1,8
• With linear propulsion	0,67 – 6,4 ^{b)}	≤ 0,01	0,7 – 6,4
Hydraulic capsule pipelines (∅ 0,5 – 2 m)			
Road transport (heavy trucks)	0,9 – 1,1	0,47	1,4 – 1,6
Rail transport	0,61	0,30	0,91
Inland shipping	0,60	0,27	0,87
Packed goods			
ULS Utrecht (urban ULS)	1,0 – 4,8 ^{d)}	23 – 50 ^{e)}	25 – 53
ULS Schiphol (industrial ULS)	1,56 – 3,81	> 1,52	> 3,1
Road transport (urban distribution towards Utrecht)	11,4 – 15,9	0,47	11,8 – 16,3

- The direct energy use of conventional pneumatic capsule pipelines varies strongly with the pipeline diameter.
- The direct energy use of pneumatic capsule pipelines with linear propulsion shows a large variation caused by technical differences between the different types of linear motors that have been used and/or the immaturity of the linear propulsion techniques.
- The direct energy use of hydraulic capsule pipelines varies strongly with the pipeline diameter.
- The direct energy use of an ULS varies with the dimensions of the vehicles and with the guidance method (rails or concrete track).
- The indirect energy intensity depends strongly on the amount of goods that is transported.

1. Inleiding

1.1 Introductie

Ondergronds transport staat de laatste jaren volop in de belangstelling. In 1996 werd in het kader van het interdepartementaal onderzoekprogramma Duurzame Technologische Ontwikkeling (DTO) het goederentransport door buisleidingen aangemerkt als een kansrijke optie om de gevolgen van goederenvervoer voor het milieu te verbeteren (Haccoû et al., 1996). De motie Van Heemst (TK, 1996-1997, 25003, nr. 8) speelde hier op in en verzocht de regering 'aan te geven onder welke condities pijp- en buisleidingen als een publieke voorziening zijn aan te merken.' Ter beantwoording van deze vraag is door de ministeries van V&W, EZ en VROM de Interdepartementale Projectorganisatie Ondergronds Transport (IPOT) gevormd (IPOT, 1998). In dit project, waarvan in augustus 2000 het eindrapport is verschenen, is veel onderzoek gedaan naar de technische en financiële haalbaarheid van ontwikkeling en uitbreiding van verschillende vormen van ondergronds transport.

Ondanks dat de verschillende vormen van ondergronds goederentransport in het programma DTO en de IPOT als milieuvriendelijke transportmiddelen worden beschouwd, is weinig onderzoek gedaan naar de daadwerkelijke milieueffecten van ondergronds transport. Daarom is het in dit rapport gerapporteerde onderzoek er op gericht om het energiegebruik, de daaruit voortkomende emissies van CO₂, NO_x, SO₂, VOS en PM₁₀, en de effecten voor ruimtegebruik, geluidhinder en visuele hinder door ondergronds transport nader te bestuderen.

In de nu volgende paragraaf wordt beschreven wat de werkzaamheden zijn van het RIVM in het algemeen en de doelgroep Verkeer in het bijzonder. Bovendien wordt aangegeven hoe dit onderzoek binnen de genoemde werkzaamheden past. Daarna wordt in paragraaf 1.3 de onderzoeksvraag geformuleerd en worden een aantal deelvragen opgesteld.

1.2 Algemene werkzaamheden van het RIVM en het belang van dit onderzoek

Het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) is een instituut dat onderzoek uitvoert op het gebied van volksgezondheid, milieu en natuur. Haar taken zijn vastgelegd in de Wet op het RIVM (Wet van 21 oktober 1996) en worden als volgt geformuleerd:

- a. onderzoek te verrichten dat is gericht op ondersteuning van de beleidsontwikkeling en de uitoefening van toezicht op het terrein van de volksgezondheid en het terrein van het milieu en natuur,
- b. periodiek te rapporteren over de toestand en de toekomstige ontwikkeling van de volksgezondheid, het milieu en de natuur,
- c. andere door de ministers op te dragen onderzoeken,
- d. onderzoek in opdracht van derden dat aansluit op het onder a t/m c bedoeld onderzoek en dat nuttig is uit oogpunt van algemeen belang.

Voor dit onderzoek is vooral de functie van het RIVM als milieuplanbureau van belang. Het RIVM vervult deze functie in opdracht van de Minister van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer krachtens een wettelijke regeling in de Wet Milieubeheer. Een onderdeel van deze functie is de uitgave van een jaarlijkse Milieubalans, met een beschrijving van de kwaliteit van het milieu in relatie tot het gevoerde milieubeleid. Daarnaast brengt het RIVM (tenminste) eens in de vier jaar een Milieuverkenning uit, waarin voor tenminste de eerstvolgende tien jaar beschreven wordt hoe de kwaliteit van het milieu zich zal ontwikkelen op basis van het beoogde milieubeleid.

De doelgroep Verkeer houdt zich bezig met de bepaling van de huidige en toekomstige milieueffecten van personen- en goederenvervoer in Nederland. Hierbij wordt het onderzoek in de regel beperkt tot landelijke trends in verkeer en vervoer en tot grote infrastructuurprojecten met een landelijke impact. De gebruikelijke werkwijze is het evalueren, samenbrengen en interpreteren van de resultaten van door andere instituten verricht onderzoek en bovendien het verwerken van de zo verkregen kennis door middel van modellering. De kennis en modellen worden vervolgens toegepast voor ex ante (beleids)evaluaties.

Binnen het RIVM is de doelgroep Verkeer verantwoordelijk voor de prognoses van de milieueffecten ten gevolge van de alle verschillende vervoersmodi met uitzondering van het pijpleidingtransport. In de publicaties van het RIVM worden milieueffecten ten gevolge van het transport per pijpleiding daarom ook niet toegerekend aan de sector 'Verkeer en vervoer'. Aangezien pijpleidingtransport een substituuut kan zijn voor de andere vervoersmodaliteiten zou het verdedigbaar zijn om het transport per pijpleiding wel aan 'Verkeer en vervoer' toe te rekenen. In dit onderzoek zal daarom berekend worden hoe groot het huidige energiegebruik en de daaruit voortkomende emissies van vluchtige stoffen zijn.

In het kader van de bepaling van de toekomstige milieueffecten voor de Milieuverkenning, moet het RIVM ook rekening houden met de ontwikkeling van nieuwe infrastructuur en de implementatie van nieuwe en verbeterde transporttechnieken. Daarom is het van belang om de mogelijke milieueffecten van ondergronds goederenvervoer te bestuderen en in te schatten in welke mate toekomstige toepassing van de verschillende vormen van ondergronds transport invloed heeft op het milieu. Hierbij moet dan wel rekening worden gehouden met de verschillende scenario's voor de toekomstige ontwikkeling van economie en techniek, die in de Milieuverkenning gebruikt worden.

Tenslotte is ondergronds transport voor het RIVM ook van belang in het kader van haar functie als ondersteuning van de beleidsontwikkeling. Indien ondergronds goederenvervoer gunstige gevolgen heeft voor het milieu, kan het stimuleren van ondergronds transport een beleidsinstrument zijn van de overheid om de kwaliteit van het milieu te verbeteren. Daarbij zal het dan mogelijk moeten zijn om een vergelijking te maken tussen de bevordering van ondergronds transport en andere beleidsmogelijkheden.

1.3 Formulering onderzoeksvraag en deelvragen

De centrale vraagstelling van dit onderzoek luidt als volgt:

Wat zijn de huidige en te verwachten toekomstige milieu- en financiële kenmerken van de verschillende technieken voor ondergronds goederentransport, wat zijn de huidige omvang, de vervoersprestatie en de effecten daarvan op het milieu van het Nederlandse pijpleidingennetwerk, en hoe zullen de omvang, de vervoersprestaties en de milieueffecten van de verschillende ondergrondse transportsystemen zich in Nederland tussen 2001 en 2030 waarschijnlijk ontwikkelen?

Hierbij wordt onder *milieueffecten* verstaan: het energiegebruik, de emissies van CO₂, NO_x, SO₂, PM₁₀ en VOS, ruimtegebruik, geluidhinder en visuele hinder. Er wordt niet gekeken naar het effect van ondergronds goederentransport op de veiligheid van het transport.

De onderzoeksvraag bestaat uit een drietal onderdelen. Het eerste onderdeel betreft de huidige en de te verwachten toekomstige milieuprestaties en financiële prestaties van verschillende technieken voor ondergronds transport. De term 'ondergronds transport' wordt in dit onderzoek gedefinieerd als alle soorten van ongehinderd goederenvervoer voor zover die op zijn minst ten dele ondergronds worden aangelegd. De milieueffecten die in dit onderzoek bekeken worden, zijn energiegebruik, de emissies van CO₂, NO_x, SO₂, fijn stof (PM₁₀) en vluchtige organische stoffen (VOS), ruimtegebruik, geluidhinder en visuele hinder. Deze effecten zijn beleidsrelevant en daarbij heeft verkeer en vervoer op deze gebieden een significant aandeel in het nationale totaal (RIVM, 2000). Door de karakteristieken van de ondergrondse transportsystemen uit te drukken in een waarde per

tonkilometer, kunnen de verschillende vormen van ondergronds transport vergeleken worden met elkaar en met bovengrondse transportmodi.

Het tweede onderdeel behandelt de toerekening aan de sector ‘Verkeer & vervoer’ van de milieueffecten die veroorzaakt worden door het huidige transport via pijpleidingen. Daarbij moet rekening worden gehouden met de omvang van het netwerk, de vervoersprestatie van het netwerk en de milieu- en financiële kenmerken zoals die bij het eerste onderdeel van de onderzoeksvraag behandeld zijn. In dit onderzoek blijft de analyse van de verschillende netwerken en de milieueffecten beperkt tot het ondergronds transport binnen de Nederlandse landsgrenzen.

Het laatste onderdeel van de onderzoeksvraag betreft de te verwachten toekomstige ontwikkeling van de verschillende ondergrondse transportsystemen en de gevolgen die dit heeft voor het milieu. De toekomstprognoses zullen in dit onderzoek beperkt worden tot de periode tot 2030, omdat voor de ontwikkeling na 2030 geen betrouwbare prognoses beschikbaar zijn. Voor de milieueffecten moet rekening worden gehouden met de omvang en de vervoersprestatie van het transportnetwerk en de emissiekenmerken van de energieopwekking. Bovendien zal er bij de ontwikkeling of uitbreiding van een ondergronds transportnetwerk sprake kunnen zijn van een substitutie tussen verschillende transportmodi, zodat voor de bepaling van de milieueffecten ook de vervoersprestaties en emissiekenmerken van de conventionele transportmiddelen meegenomen moeten worden. Een specifiek punt van dit onderdeel van de onderzoeksvraag betreft de vraag in hoeverre het stimuleren van ondergronds goederenvervoer een geschikt beleidsinstrument is voor het verbeteren van het milieu. Door de vaak hoge investeringskosten en de onzekerheid over bedrijfseconomische risico's is realisatie van projecten voor ondergronds transport door zuiver private investeringen onwaarschijnlijk (IPOT, 2000). Ondergrondse transportsystemen zullen daarom door publiek-private samenwerking tot stand moeten komen. Dit is van invloed op de snelheid waarmee ondergrondse transportsystemen tot stand kunnen komen.

Om de centrale vraagstelling te kunnen beantwoorden zullen de volgende negen deelvragen beantwoord moeten worden:

1. Wat is de state-of-the-art van de verschillende vormen van ondergronds transport?
2. Hoe zal de technologie van ondergronds transport zich de komende dertig jaar kunnen ontwikkelen?
3. Wat zijn de huidige omvang en vervoersprestatie van het Nederlandse pijpleidingennetwerk?
4. Hoe zullen de netwerken van de verschillende ondergrondse transportmiddelen zich in de toekomst ontwikkelen?
5. Wat zijn de huidige prestaties op het gebied van milieueffecten en financiële kosten voor transport via een pijpleiding?
6. Wat zijn de te verwachten prestaties met betrekking tot milieueffecten en financiële kosten voor eventuele toekomstige toepassing dan wel uitbreiding van ondergronds transport?
7. Wat zijn de huidige en toekomstige prestaties ten aanzien van milieueffecten en financiële kosten van de conventionele bovengrondse transportmiddelen?
8. Hoe zullen de vervoersprestaties van de verschillende soorten ondergronds goederentransport zich tussen 2000 en 2030 ontwikkelen?
9. Wat zijn de te verwachten milieueffecten tussen 2000 en 2030?

De onderzoeksmethode waarmee deze deelvragen beantwoord worden, is uiteengezet in hoofdstuk 2.

2. Methodologie

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk behandelt de methode waarmee het onderzoek is uitgevoerd. In paragraaf 2.2 wordt daarvoor een conceptueel model beschreven van de wijze waarop transport invloed uitoefent op het milieu en van de totstandkoming van de kosten van het transport. Paragraaf 2.3 geeft vervolgens een globale beschrijving van de onderzoeksmethode waarmee de deelvragen, en daarmee de centrale vraagstelling, beantwoord worden. Meer gedetailleerde beschrijvingen worden in de hoofdstukken zelf gegeven. In paragraaf 2.4 wordt tenslotte de hoofdstukindeling van dit rapport beschreven.

2.2 Conceptueel model voor de invloed van transport op het milieu en de transportkosten

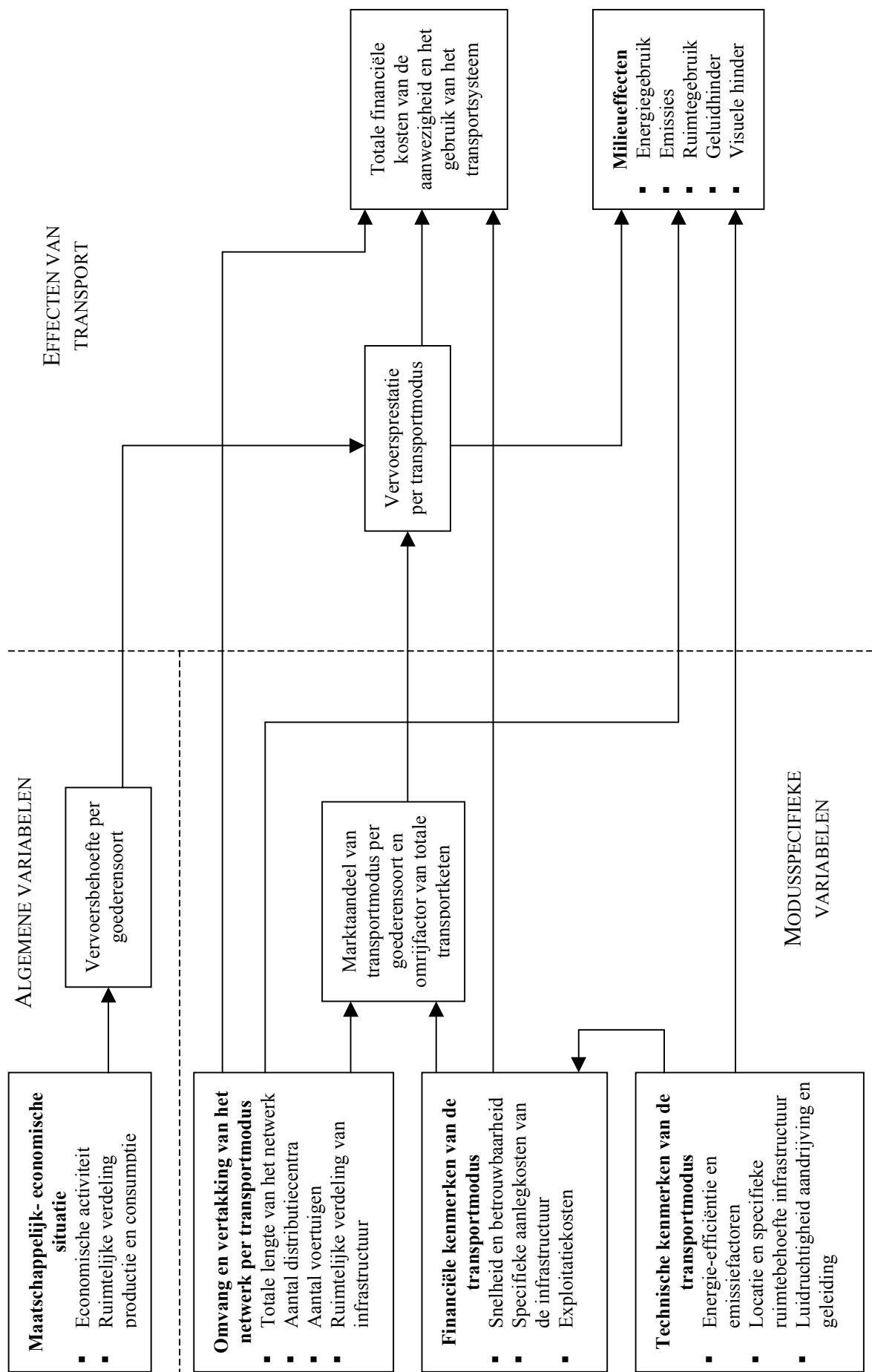
2.2.1 Algemene opzet van het model

De verschillende in dit rapport beschouwde ondergrondse transportsystemen zijn afzonderlijke transportmodi die voor het uitvoeren van transportactiviteiten moeten concurreren met andere transportmiddelen. Om de uiteindelijke milieueffecten en financiële kosten van het ondergrondse goederentransport te bepalen is het daarom noodzakelijk om het volledige transportsysteem te beschouwen, uiteraard binnen bepaalde geografische en tijdsgrenzen.

In figuur 2.1 is schematisch weergegeven hoe een transportsysteem invloed uitoefent op het milieu en tevens hoe de financiële kosten van het transportsysteem tot stand komen. Dit schema heeft uitsluitend betrekking op de korte termijn; op langere termijn bestaan er meer relaties tussen de verschillende grootheden dan die in het schema zijn weergegeven. Op korte termijn worden de macro-economische activiteit en de geografische verdeling van productie en consumptie constant verondersteld. Ook de ontwikkeling van infrastructuur is een proces dat zich afspeelt op de middellange en lange termijn. Dit rapport beschouwt de ontwikkeling van ondergronds goederentransport op een middellange termijn. Hierbij wordt de ontwikkeling van de infrastructuur beschouwd volgens een 'what if'-benadering. De economische en geografische ontwikkeling wordt voor de middellange termijn als gegeven verondersteld.

De grootheden uit het schema kunnen in drie categorieën onderverdeeld worden, namelijk:

1. *Algemene variabelen* die voor het gehele vervoerssysteem van toepassing zijn. Dit zijn met name de economische en geografische factoren die leiden tot een behoefte aan transport.
2. *Modusspecifieke variabelen* die voor elk van de transportmodi in het transportsysteem verschillen. Dit zijn de specifieke financiële en technische kenmerken van de transportmiddelen en de omvang van hun netwerken en vervoersprestaties.
3. *Effecten van transport* waarvan de waarde voor de afzonderlijke transportmodi opgeteld kunnen worden tot een totaaleffect van het transportsysteem. Dit zijn de effecten die resulteren uit de algemene en modusspecifieke variabelen.



Figuur 2.1: Schematische weergave van de wijze waarop transport op korte termijn invloed uitoefent op het milieu en van de totstandkoming van de financiële kosten van het transportsysteem.

De verschillende grootheden uit het schema zullen in de komende sub-paragrafen per categorie nader toegelicht worden.

2.2.2 Algemene variabelen

De vervoersbehoefte van een transportsysteem komt tot stand doordat vraag naar en aanbod van fysieke producten geografisch van elkaar gescheiden zijn. De grootte van de vervoersbehoefte kan onderverdeeld worden in twee componenten: een afstandscomponent en een volumecomponent. De afstand waarover vervoerd wordt hangt af van de ruimtelijke verdeling van productie en consumptie in combinatie met de kosten van productie en transport. Op lange termijn wordt dit beïnvloed door het overheidsbeleid op het gebied van ruimtelijke ordening. Dit geldt zowel op een landelijke of regionale schaal als op een lokale schaal. De hoeveelheid goederen die vervoerd wordt, is afhankelijk van de omvang van vraag en aanbod. Deze worden beïnvloed door het niveau van economische activiteiten.

De vervoersbehoefte is het product van de hemelsbrede afstand en de te vervoeren hoeveelheid. Doordat het transport van goederen vrijwel nooit in een rechte lijn plaatsvindt, wordt er door de goederen een grotere afstand afgelegd dan theoretisch noodzakelijk is. De vervoersprestatie volgt dus uit de vervoersbehoefte in combinatie met een omrijfactor en wordt uitgedrukt in de eenheid tonkm. Deze vervoersbehoefte is niet gelijk aan de vervoersprestatie omdat het werkelijke transport over het algemeen niet in een rechte lijn plaatsvindt.

2.2.3 Modusspecifieke variabelen

De modusspecifieke variabelen zijn de kenmerkende eigenschappen voor de verschillende transportmodi. Hierbij kunnen drie groepen kenmerken onderscheiden worden:

1. *Kenmerken van het netwerk*, zoals de lengte van het netwerk, het aantal distributiecentra die toegang geven tot het netwerk, het aantal voertuigen¹ dat beschikbaar is en de ruimtelijke verdeling van de infrastructuur.
2. *Financiële kenmerken*, zoals snelheid en betrouwbaarheid van het transport², de aanlegkosten van de infrastructuur en de exploitatiekosten.
3. *Technische kenmerken*, zoals energie-efficiëntie, emissiefactoren, ruimtebehoefte van de infrastructuur en geluidhinder van het transport.

De verschillende kenmerken kunnen op twee manieren invloed hebben op de uiteindelijke effecten van transport, namelijk direct en via de invloed die het heeft op het marktaandeel van de transportmodus in combinatie met de omrijfactor van de totale transportroute. Distributeurs zullen bij het kiezen van de routing van een transport rekening houden met bedrijfseconomische factoren, zoals de marginale transportkosten en de overkomstduur. De marginale transportkosten en overkomstduur zijn afhankelijk van de afstand die de goederen over het netwerk van de verschillende transportmodi afleggen en van de kosten per kilometer respectievelijk snelheid van het transport per transportmodus. De over een netwerk afgelegde afstand is afhankelijk van de omvang en vertakking van het netwerk, terwijl de kosten per kilometer en de snelheid tot de financiële kenmerken van de transport modus behoren.

¹ Uiteraard op voorwaarde dat het transportsysteem van voertuigen gebruik maakt.

² Snelheid en betrouwbaarheid worden gezien als financiële kenmerken, omdat een lange of onbetrouwbare overkomstduur financiële gevolgen kan hebben voor de distributeur. Dit is bijvoorbeeld het geval bij:

a) het transport van bederfelijke goederen en post, omdat een lange of onbetrouwbare overkomstduur de waarde van het te vervoeren product laat dalen.

b) Just-In-Time logistiek, waarbij een onbetrouwbare overkomstduur de noodzaak tot het aanhouden van een grotere voorraad tot gevolg heeft.

De financiële kenmerken zijn voor een belangrijk deel afhankelijk van de technische kenmerken. Dit geldt zowel voor de aanlegkosten, onder andere vanwege de specifieke ruimtebehoefte en de noodzaak tot het zetten van geluidschermen, als voor de exploitatiekosten, bijvoorbeeld door het energiegebruik van de transportmiddelen. De overheid kan met subsidies en heffingen de koppeling tussen technische en financiële kenmerken beïnvloeden.

2.2.4 Effecten van transport

De uiteindelijke milieueffecten kunnen elk onderverdeeld worden in een direct en een indirect deel. Het directe deel betreft het milieueffect dat direct afhankelijk is van de geleverde vervoersprestatie. Het indirecte deel is het milieueffect van andere processen, zoals de constructie en het onderhoud van infrastructuur en voertuigen. De verhouding tussen directe en indirecte milieueffecten varieert sterk tussen verschillende transportmodi. Ter illustratie: voor goederenvervoer over de weg bestaat het totale energiegebruik gemiddeld voor 82% uit direct en voor 18% uit indirect energiegebruik, terwijl voor railvervoer deze verhouding 40% tegen 60% bedraagt (Bos, 1998).

De directe milieueffecten van een transportmodus worden bepaald door een combinatie van de vervoersprestatie met de technische kenmerken. Hierbij is de vervoersprestatie van een transportmodus het product van de totale vervoersbehoefte, de omrijfactor van de totale vervoersroute en het marktaandeel van de vervoersmodus. De technische kenmerken worden vaak uitgedrukt in een factor per tonkm. De indirecte milieueffecten van een transportmodus zijn afhankelijk van de omvang van de infrastructuur, van het aantal voertuigen en van de technische kenmerken van de infrastructuur.

Als laatste effecten zijn er de financiële kosten van het transportsysteem. Deze zijn eveneens opgebouwd uit een deel dat afhankelijk is van de vervoersprestatie en een deel dat afhankelijk is van de omvang van de infrastructuur en van het aantal voertuigen. Verder zijn de financiële kosten afhankelijk van de financiële kenmerken van de verschillende transportmodi.

2.3 Onderzoeksmethode

Voor de verschillende technieken die voor ondergronds transport gebruikt kunnen worden is al veel onderzoek verricht, vooral met betrekking tot de technische en financiële haalbaarheid. De eerste twee deelvragen uit hoofdstuk 1, die betrekking hebben op de state-of-the-art en de toekomstige technologische ontwikkelingen van ondergronds transport, kunnen daarom door middel van een literatuuronderzoek beantwoord worden. Dit wordt mede gedaan door een beschrijving van de historische ontwikkeling van ondergronds goederenvervoer. Aan de hand van de literatuur kan ook al een en ander gezegd worden over de prestaties van ondergronds transport op het gebied van milieueffecten en financiële kosten³. Met het beantwoorden van de deelvragen 1 en 2 wordt een inleidende beschrijving gegeven van de drie categorieën modusspecifieke kenmerken en de ontwikkeling hiervan over de tijd.

De modusspecifieke kenmerken die betrekking hebben op de omvang en vertakking van het netwerk zijn het onderwerp van de deelvragen 3 en 4. Deze vragen kunnen eveneens door middel van literatuuronderzoek beantwoord worden. De huidige omvang en vervoersprestatie van het Nederlandse pijpleidingnetwerk worden afgeleid van in de literatuur beschikbare statistieken. Ook zijn in het verleden al suggesties gedaan over mogelijkheden om het pijpleidingennetwerk uit te breiden, wat van pas zal komen om de te verwachten toekomstige ontwikkeling van het pijpleidingtransport te kunnen bepalen. Voor het vervoer van stukgoederen is al veel onderzoek gedaan naar de opzet van een ongehinderd logistiek systeem (OLS) en naar het inpassen van een dergelijk systeem in bestaande logistieke verbindingen. Bovendien zijn al concrete projecten voor toepassing van ondergronds transport uitgewerkt, zoals een ondergronds transportsysteem tussen de bloemenveiling in Aalsmeer en de luchthaven Schiphol.

³ Financiële kosten worden verder in dit rapport kortweg met 'kosten' aangeduid.

De financiële en technische kenmerken van de transportmodi zijn het onderwerp van de deelvragen 5, 6 en 7. Het gaat hierbij om de huidige kenmerken en de toekomstige ontwikkeling hiervan voor zowel het ondergrondse als het bovengrondse goederentransport. De numerieke waarden voor energiegebruik, emissies en kosten kunnen voor de verschillende transportmodi op uiteenlopende wijze verkregen worden. Met name voor de directe milieueffecten zijn waarden in de literatuur beschikbaar. Als aanvulling hierop en ter vergelijking worden ook berekeningen gemaakt aan de hand van theorieën en statistische data.

Deelvraag 8 heeft betrekking op de waarde en ontwikkeling van de algemene variabelen en de uiteindelijke effecten van transport. De huidige milieueffecten en kosten van het Nederlandse pijpleidingnetwerk kunnen berekend worden uit statistieken en behoeven daarom geen aanvullende bepaling van totale vervoersbehoefte en marktaandeel. De toekomstige milieueffecten en kosten van de verschillende vormen van ondergronds goederenvervoer zullen bepaald worden uit de combinatie van de algemene en de modusspecifieke variabelen.

Deelvraag 9 tenslotte gaat over de uiteindelijke milieueffecten van het ondergrondse goederentransport en de ontwikkeling hiervan in de toekomst. Hiervoor worden de resultaten van de voorgaande deelvragen met elkaar gecombineerd. Bovendien wordt een case-studie uitgevoerd naar een concreet concept voor een ondergronds logistiek systeem, om het totale effect van een dergelijk netwerk op het totale energiegebruik van zowel het ondergrondse als het bovengrondse transport te bepalen.

2.4 Hoofdstukindeling van dit rapport

In de hoofdstukken 3 en 4 zullen de resultaten van de literatuurstudie beschreven worden. Hierbij handelt hoofdstuk 3 over de technische kennis, mogelijkheden en ervaring met betrekking tot de verschillende vormen van ondergronds goederentransport. Hoofdstuk 4 gaat vervolgens over de omvang en vervoersprestatie van het huidige pijpleidingennetwerk en over de logistieke concepten van eventuele toekomstige netwerken voor ondergronds transport.

Voor de berekening van de milieueffecten en kosten wordt een onderscheid gemaakt tussen de effecten die direct afhankelijk zijn van de vervoersprestatie (de directe effecten) en de effecten die veroorzaakt worden door andere processen, zoals de constructie en het onderhoud van infrastructuur en voertuigen (de indirecte effecten). De directe effecten zullen behandeld worden in hoofdstuk 5; de indirecte effecten in hoofdstuk 6. In hoofdstuk 7 wordt een case-studie uitgevoerd om de totale effecten van de realisatie van een stedelijk OLS te bepalen voor het energiegebruik en de emissies van zowel het ondergrondse systeem als het bovengrondse transport.

In hoofdstuk 8 worden de resultaten uit de verschillende hoofdstukken geïntegreerd en bediscussieerd. De conclusies die hieruit zijn getrokken, zijn verwoord in hoofdstuk 9. Hierbij zijn tevens aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek.

3. Stand van de techniek voor ondergronds transport

3.1 Inleiding

Voor het energiegebruik en de emissies van ondergronds transport is het van belang welke technieken gebruikt worden, zowel voor de aanleg als voor de exploitatie van het transportsysteem. Daarnaast is de stand van de techniek van belang voor de technische haalbaarheid, de te maken kosten en het financiële risico bij de toepassing van het ondergronds transport in concrete projecten. In dit hoofdstuk wordt daarom aan de hand van de beschikbare literatuur een inleidende beschrijving gegeven van verschillende methoden voor ondergronds goederenvervoer en van methoden waarmee infrastructuur ondergronds aangelegd kan worden. Om de ontwikkeling over de tijd van de ondergrondse transporttechnieken duidelijk te maken wordt de beschrijving in een historische context geplaatst.

De verschillende technieken en toepassingen van ondergrondse goederentransportmiddelen zijn moeilijk te categoriseren. Er bestaat een grote diversiteit aan technieken, waarbij de verschillende varianten vaak overeenkomstige kenmerken hebben met verschillende andere technieken. In de literatuur die verschenen is in het kader van het IPOT project wordt onderscheid gemaakt tussen traditioneel, extra-traditioneel en niet-traditioneel ondergronds transport (NEA/DHV, 1998). Het traditionele transport omvat al het pijpleidingtransport dat nu al op grote schaal wordt toegepast, zoals water, aardgas, aardolie en enkele petrochemische producten. Extra-traditioneel transport is pijpleidingvervoer van goederen die nu nog niet of nauwelijks door pijpleidingen getransporteerd worden. Dit kunnen niet alleen vloeibare goederen zijn, maar ook vaste bulkgoederen waarvan eerst een suspensie⁴ gevormd wordt. Het niet-traditionele goederenvervoer is het transport door buisleidingen van alle overige goederen op voorwaarde dat hierbij gebruik gemaakt kan worden van gestandaardiseerde laadeenheden.

De hierboven beschreven indeling heeft echter het nadeel dat het niet-traditionele ondergronds transport een grote diversiteit aan technieken omvat, terwijl het onderscheid tussen traditioneel en extra-traditioneel ondergronds transport veel kleiner is. In dit onderzoek zal daarom het traditionele en het extra-traditionele transport gezamenlijk behandeld worden, terwijl voor het niet-traditionele ondergrondse transport onderscheid gemaakt wordt tussen capsule-pijpleidingsystemen en overige niet-traditionele ondergrondse transportsystemen. Deze categorieën onderscheiden zich van elkaar door de gebruikte voortstuwingstechniek en de geschiktheid voor verschillende logistieke concepten. In dit hoofdstuk worden eerst de drie categorieën ondergrondse transportmiddelen afzonderlijk behandeld en daarna worden de tunnelbouw- en leidinglegtechnieken beschouwd.

3.2 Traditioneel en extra-traditioneel ondergronds transport

3.2.1 Traditioneel pijpleidingtransport

Het gebruik van pijpleidingen voor transport van drinkwater en aardgas voor huishoudelijk gebruik is tegenwoordig zo wijd verspreid dat het vaak niet meer als ‘transport’ wordt beschouwd. De geschiedenis van de pijpleiding gaat dan ook ver terug. In China werden holle bamboestengels gebruikt voor het transport van water en werd Peking zelfs al rond 400 v. Chr. verlicht door aardgas dat via bamboepijpen werd getransporteerd (Encyclopædia Britannica, 2001, pipeline). In Europa vond het eerste grootschalige gebruik van pijpleidingen plaats door de Romeinen. In 312 v. Chr. begonnen zij met de aanleg van een stelsel van aquaducten om hun steden van vers drinkwater te voorzien (Encyclopædia Britannica, 2001, environmental works, municipal water supply).

⁴ Een suspensie is een vloeistof waarin zeer kleine deeltjes van een vaste stof zweven.

Pijpleidingen werden hierbij gebruikt voor de stedelijke distributie van dit water. Meestal waren deze leidingen gemaakt van geboorde stenen of holle boomstammen, hoewel ook pijpen van klei of lood werden gebruikt.

Technische verbeteringen aan de pijpleidingen waren er sindsdien pas weer in de 18e eeuw, toen er gietijzeren leidingen in gebruik kwamen die een hogere druk konden weerstaan. Dit maakte de inzet van stoommachines mogelijk om de vloeistof of gas door de leidingen te pompen. In de 19e eeuw ontstonden stalen pijpleidingen, die sterker waren en daardoor aardgas en olie over grotere afstanden konden vervoeren. (Encyclopædia Britannica, 2001, pipeline) In 1851 werd de Duinwater-Maatschappij in Amsterdam opgericht als eerste waterleidingsbedrijf in Nederland. De eerste waterleiding werd in 1853 in gebruik genomen. (GWA, 2001) In de tweede helft van de 19e eeuw werden nog enkele tientallen steden in Nederland van een waterleiding voorzien (Vogel, 1895).

In de 20e eeuw werd het waterleidingnetwerk uitgebreid tot een landelijk dekkend netwerk. Tevens werden na de vondst van grote hoeveelheden aardgas in Groningen de lokale stadsgasnetwerken uitgebreid en verbonden tot een landelijk aardgasnetwerk (Gasunie, 2001a). In veel kleinere netwerken worden ook ruwe aardolie, aardolieproducten en industriële gassen per pijpleiding getransporteerd. Het wereldwijd sterk toegenomen pijpleidingtransport in de 20e eeuw leidde tot veel nieuwe technische ontwikkelingen. Er kwamen nieuwe materialen in gebruik voor de vervaardiging van leidingen, zoals modulair gietijzer, gewapend beton en staal. Ook werden nieuwe methodes ontwikkeld voor aanleg, onderhoud en bescherming van pijpleidingen. (Encyclopædia Britannica, 2001, environmental works, municipal water supply)

Recente ontwikkelingen tonen een zeer sterke stijging van het pijpleidingtransport sinds 1990. Dit komt voornamelijk door een toename van het pijpleidingtransport van ruwe aardolie en aardolieproducten (IPOT, 2000). In de toekomst zal het pijpleidingtransport nog wel blijven groeien, maar minder sterk. De IPOT verwacht voor het traditionele pijpleidingtransport exclusief aardgas en water, een autonome groei van 6,8 mld. tonkm⁵ in 1995 tot 9,6 mld. tonkm in 2020 (IPOT, 1998). Deze toename komt vooral voor rekening van de (petrochemische) industrie. Voor de netwerken van water- en aardgasleidingen vallen geen grote uitbreidingen meer te verwachten.

De voornaamste vernieuwingen voor het pijpleidingtransport vinden plaats op het gebied van bundeling van pijpleidingen en het gezamenlijk gebruik van pijpleidingen. Door bundeling wordt gebruik gemaakt van schaalvoordelen in planning, aanleg en onderhoud. Pijpleidingen kunnen dan sneller en goedkoper worden aangelegd (IPOT, 2000). Een bestaand voorbeeld van bundeling is de Buisleidingenstraat Zuidwest Nederland, die een verbinding vormt tussen de havens van Rotterdam en Antwerpen (Stichting Buisleidingenstraat Zuidwest Nederland, 2001). Een nieuw concept is het Multi-Core ® Pipeline System in het Rijnmondgebied (IPOT, 2000), dat pijpleidingtransport van tientallen deelstromen van chemische producten haalbaar kan maken.

Door gezamenlijk gebruik van pijpleidingen kan eveneens gebruik worden gemaakt van schaalvoordelen. Bovendien kan zo een uitgebreider netwerk ontstaan met een groter vervoerspotentieel. Voor het gezamenlijk gebruik van pijpleidingen moeten de verschillende afnemers en leveranciers echter wel afspraken maken over een common carrier. Dit is een standaard voor de kwaliteit van het door de pijpleiding vervoerde product. In hoofdstuk 4 wordt dieper ingegaan op het common carrier principe en het gezamenlijk gebruik van pijpleidingen.

3.2.2 Extra-traditioneel pijpleidingtransport

Bij extra-traditioneel pijpleidingtransport worden bulkgoederen vervoerd die nu niet of nauwelijks door pijpleidingen worden getransporteerd. Het kan hierbij zowel gaan om vloeibare goederen als om goederen die vloeibaar of op een andere wijze pompbaar gemaakt kunnen worden. Enkele

⁵ Ter vergelijking: in 1995 was de totale vervoersprestatie in Nederland 74,9 tonkm (IPOT, 1998); voor 2010 verwacht de IPOT een totale vervoersprestatie in Nederland van 137,3 tonkm.

voorbeelden van goederen die door middel van extra-traditioneel pijpleidingtransport vervoerd kunnen worden zijn granen, suikerbieten, veevoeder, cement en meststoffen. (NEA/DHV, 1998)

Een speciale vorm van extra-traditioneel pijpleidingtransport is het slurripijpleidingtransport. Hierbij wordt van vaste bulkgoederen een suspensie gevormd door het fijn te malen en met water te mengen. Deze suspensie wordt vervolgens via een pijpleiding vervoerd. Tenslotte wordt de bulkstof teruggewonnen door de suspensie te ontwateren. De laatste vijftig jaar zijn er een aantal slurripijpleidingen operationeel, veel daarvan in de Verenigde Staten (ASCE, 1998). Het gaat hierbij om transport over meestal grote afstanden van onder andere steenkool, erts en vliegias.

Uit technisch oogpunt komt extra-traditioneel pijpleidingtransport grotendeels overeen met het traditionele pijpleidingtransport. Het voornaamste verschil zit in de noodzaak om sommige goederen voor en na het transport te bewerken. Over het algemeen kan gebruik gemaakt worden van beproefde technieken, zodat over de technische haalbaarheid geen twijfel bestaat. Om het extra-traditioneel pijpleidingtransport tot ontwikkeling te laten komen is wel een stimulerend overheidsbeleid nodig. Volgens prognoses van de IPOT heeft extra-traditioneel pijpleidingtransport de potentie om in 2010 ca. 9 mld. tonkm en in 2020 ca. 12 mld. tonkm te vervoeren. De goederencategorieën steenkool, chemische basisproducten en veevoeder nemen hiervan het grootste deel voor hun rekening. De ontwikkeling van extra-traditioneel pijpleidingtransport gaat vooral ten koste van het vervoer door de binnenvaart. (NEA/DHV, 1998)

3.3 Capsule-pijpleidingtransport

3.3.1 Inleiding

De verschillende capsule-pijpleidingsystemen kunnen in twee categorieën verdeeld worden. De eerste categorie zijn de pneumatische capsule-pijpleidingsystemen. Deze maken gebruik van luchtdruk voor de voortstuwing van de capsules. De andere categorie zijn de hydraulische capsule-pijpleidingsystemen, die voor de voortstuwing gebruik maken van vloeistofdruk. In deze paragraaf worden de twee categorieën afzonderlijk behandeld.

3.3.2 Pneumatisch capsule-pijpleidingtransport

Het idee van goederenvervoer per pijpleiding wordt toegeschreven aan de Deen George Medhurst, die in 1810 een systeem bedacht waarbij brieven in capsules met behulp van luchtdruk door pijpleidingen werden getransporteerd (Howgego en Roe, 1998). Dit pneumatische capsule-pijpleidingsysteem (PCP, maar ook wel buizenpost genoemd) werd voor het eerste toegepast in Londen in 1853, waar uiteindelijk een netwerk ontstond met een totale lengte van 120 km. In veel andere Europese en Noord-Amerikaanse steden ontstonden soortgelijke buizenpostnetwerken. Grotere en langere systemen met pneumatische capsules zijn de laatste decennia in Japan en de voormalige Sovjet-Unie gebruikt voor het transport van bulkgoederen, zoals delfstoffen en vuilnis (ASCE, 1998). Voor dergelijke grote PCP-systemen worden capsules gebruikt die voorzien zijn van wielen langs de zijkanten om wrijving en slijtage te voorkomen (zie figuur 3.1). Om de capaciteit te vergroten kunnen bovendien meerdere capsules tot een treintje gekoppeld worden. In dit onderzoek zullen slechts grotere PCP-systemen voor stuk- en bulkgoederenvervoer behandeld worden.



Figuur 3.1: Een modern capsule-pijpleidingsysteem. Bron: Tubexpress

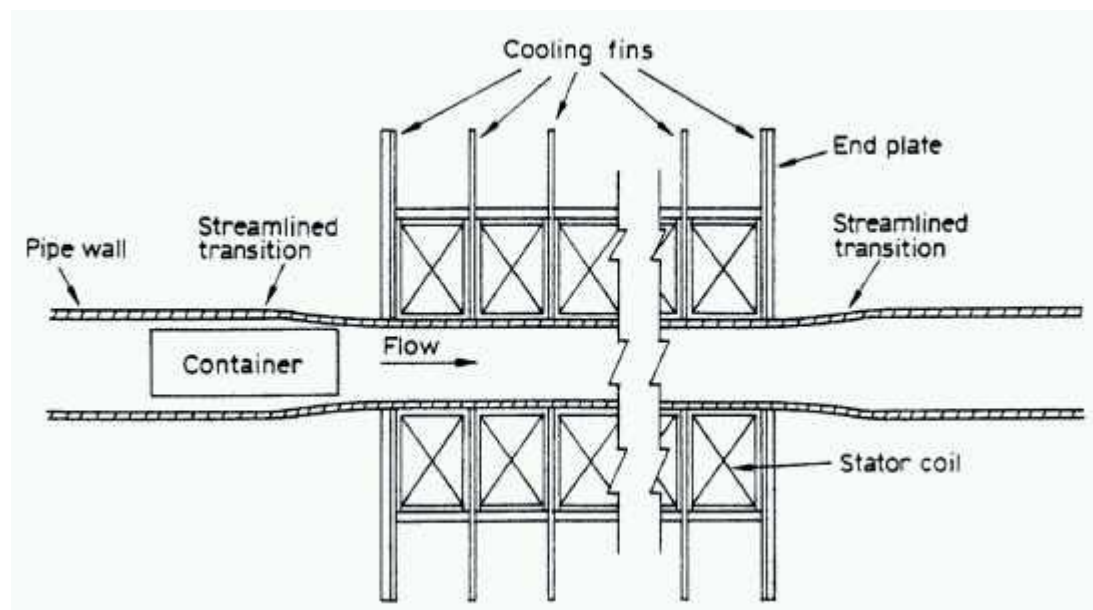
Er is tot nu toe weinig gebruik gemaakt van PCP-systemen voor het vervoeren van bulkgoederen en al helemaal niet voor het vervoeren van stukgoederen. Een belangrijke reden hiervoor is dat PCP-systemen vaak hogere kosten per tonkm hebben dan conventionele transportsystemen. De beperkte capaciteit van de huidige PCP-systemen speelt hierin een grote rol. In de eerste plaats wordt deze beperkte capaciteit veroorzaakt door het gebruik van conventionele luchtpompen. Door het benodigde drukverschil tussen weerszijden van een capsule is het noodzakelijk dat tussen twee capsules zich minimaal één luchtpomp bevindt. De tweede oorzaak van de beperkte capaciteit is de wijze van laden en lossen. Doordat dit in de doorgaande buis plaatsvindt, wordt het aantal capsules dat tegelijkertijd geladen en gelost kunnen worden sterk beperkt. (Liu, 2000b)

Een nieuwe aandrijftechniek voor PCP waarbij meer capsules gelijktijdig getransporteerd kunnen worden is het gebruik van een lineaire inductiemotor (LIM). Bij een LIM vindt aandrijving plaats zonder dat daarvoor een roterende beweging in de motor nodig is. Daardoor wordt de wrijvingsweerstand gereduceerd. Er zijn twee soorten LIM, namelijk de interne en de externe LIM. De werking van deze systemen wordt beschreven in bijlage 2. De LIM wordt onder andere gebruikt in het PCP-systeem van Tubexpress (TubeFreight, 2001). Voordat LIM-aandrijving in PCP-systemen kan worden toegepast zal het concept nog op een proeftraject getest moeten worden en is onderzoek nodig naar de financiële aspecten van een dergelijk systeem (Liu, 2000a).

In plaats van een LIM kan voor de aandrijving ook een lineaire synchronomotor (LSM) gebruikt worden. De werking van een LSM is beschreven in bijlage 2. In Lakeland (Florida, Verenigde Staten) is een PCP-systeem met LSM-aandrijving in een proefopstelling getest. Uit deze test bleek dat het systeem technisch haalbaar is. Voordat de techniek commercieel toegepast kan worden, is echter nog een tweede test nodig om met name de levensduur van de componenten van het systeem te testen. Ook is een economische studie gedaan naar de toepassing van PCP-systemen met LSM-aandrijving in de fosfaatindustrie. Hieruit bleek dat het systeem kan concurreren met weg-, rail- en slurypijpleidingtransport. (Montgomery et al., 2000)

De keuze van het type motor hangt af van het specifieke systeemontwerp. Over het algemeen kan met een LSM een efficiëntere energieconversie bereikt worden dan met een LIM. Daar staat tegenover dat de constructie van een LSM duurder is dan dat van een LIM. (Zhao en Lundgren, 1996, TubeFreight, 2001) Als een LIM gebruikt gaat worden, dan moet nog gekozen worden tussen een interne en een externe LIM. De externe LIM brengt hogere aanlegkosten voor de buisleiding met zich mee, maar de interne LIM leidt tot hogere operationele kosten vanwege het hogere gewicht van het voertuig. Een

ander nadeel van de interne LIM is dat er overdracht van elektrische energie naar de capsule nodig is, zodat de capsule net als bij een metro contact moet maken met een geleiderail. (Katgerman et al., 1998)



*Figuur 3.2: Schematische afbeelding van een capsule-pijpleiding met een lineaire inductiemotor.
Bron: Liu, 2000a.*

Aandrijving van de pneumatische capsules door een lineaire motor vindt op slechts een klein deel van het traject plaats, zoals is weergegeven in figuur 3.2. Tijdens deze aandrijfperiode worden niet alleen de capsule zelf versneld, maar wordt door de beweging van de capsule ook een luchtstroming opgewekt. Deze luchtstroming vermindert de luchtweerstand van de capsule gedurende de rest van het traject. Lineair aangedreven PCP-systemen hebben te maken met geheel andere aërodynamische eigenschappen dan conventionele PCP-systemen. Indien de snelheid van de capsules hoger is dan de snelheid van de lucht dan zuigen dicht achter elkaar rijdende capsules elkaar mee. Dit verbetert de energetische efficiëntie van het systeem. Als op een bepaald moment slechts weinig capsules door een systeem getransporteerd worden, kan van dit meezuig-effect gebruik gemaakt worden door de capsules in colonnes door de pijpleiding te sturen. Bij deze methode blijkt de weerstand minder te zijn indien ventilatiegaten of dwarsverbindingen tussen een dubbele buisleiding aanwezig zijn. Als weinig capsules in de buisleiding aanwezig zijn, zouden de colonnes zonder ventilatiegaten en dwarsverbindingen een veel grotere hoeveelheid lucht vooruit moeten duwen dan nodig is om van het meezuigeffect van de capsules te profiteren. Het principe van dwarsverbindingen tussen een dubbele buisleiding is in het verleden onder andere toegepast bij de kanaaltunnel. (Lundgren en Zhao, 2000)

De efficiëntie van het laden en lossen van capsules kan verbeterd worden door het gebruik van terminals met meerdere parallelle banen. Inkomende capsules worden met behulp van wissels over de verschillende parallelle banen verdeeld. Daar worden de capsules gelost en geladen, waarna zij versneld worden en in de uitgaande buisleiding bijeen komen. Zo kunnen meer capsules tegelijkertijd geladen en gelost worden. In combinatie met een lineaire aandrijving kan een PCP-systeem ontstaan met een grotere bezettingsgraad en daardoor lagere kosten per vervoerde tonkm. Veel onderzoek is echter nog nodig naar zowel een optimale aandrijving als een optimaal laad- en lossysteem. (Liu, 2000b)

Belangstelling voor PCP is er vooral in de Verenigde Staten en in Japan. Daar houden enkele commerciële ondernemingen zich bezig met de ontwikkeling van PCP-systemen. In het verleden is PCP alleen toegepast voor bulkgoederentransport. In de Verenigde Staten wordt verwacht dat PCP daar met de komst van de nieuwe aandrijftechnieken op het gebied van stukgoederentransport zal kunnen concurreren met het wegtransport (Liu, 2000a). Er is daarom onderzoek gedaan naar de

haalbaarheid van PCP-netwerken voor intercity- en interregionaal transport van stukgoederen (Vance en Mills, 1994; Roop en Bierling, 2000). In Japan en de Verenigde Staten zijn tevens voorstellen gedaan voor PCP-netwerken voor stedelijke goederendistributie (Vance en Mills, 1994; Sinfield en Einstein, 1998).

3.3.3 Hydraulisch capsule-pijpleidingtransport

Hydraulische capsule pijpleiding of HCP is een relatief nieuw soort pijpleiding, waar met name in de jaren '70 en '80 van de vorige eeuw in verschillende landen uitgebreid onderzoek naar is gedaan (ASCE, 1998). Bij een HCP worden capsules door middel van vloeistofstroming door de pijpleiding getransporteerd. Op basis van verschillende concepten die voor de te transporteren capsules zijn ontwikkeld, kan er onderscheid gemaakt worden tussen drie soorten HCP.

Bij het eerste en tevens oudste concept wordt gebruik gemaakt van containers die gemaakt zijn van een hard materiaal, zoals staal, aluminium of hard plastic. Net als bij PCP-systemen kan de aandrijving bij dit type HCP plaatsvinden door zowel conventionele pompen als door een lineaire motor. Het gebruik van lineaire motoren bij HCP is op dit moment echter nog onvoldoende uitgewerkt. Het gebruik van duurzame containers voor HCP heeft twee nadelen. Dit zijn ten eerste de hoge kosten die gemaakt worden voor de constructie van de containers en ten tweede de noodzaak tot de aanleg van een dubbele pijpleiding omdat de containers weer terug getransporteerd moeten worden. (Liu, 2000a)

Het tweede concept biedt een oplossing voor de nadelen van duurzame containers, door het toepassen van eenmalig te gebruiken lichte containers of zakken, gemaakt van een goedkoop materiaal zoals plastic. Hierdoor worden kosten bespaard van zowel de constructie van de containers als van de constructie en exploitatie van een tweede pijpleiding. Het nadeel van dit soort capsules is dat zij slecht bestand zijn tegen hoge de druk en wrijving tijdens het transport. Omdat hier weinig praktisch onderzoek naar is gedaan, bestaat er twijfel over de technische haalbaarheid van dit concept. (Liu, 2000a) Bovendien ontstaat bij dit systeem een grote hoeveelheid afval van de eenmalig te gebruiken capsules.

Het laatste concept, waar recent veel onderzoek naar is gedaan, is de vorming van capsules uit het te vervoeren materiaal, zonder dat daar een container of ander omhulsel voor nodig is. Een voorbeeld hiervan is de zogenaamde 'coal log pipeline' (CLP), die aan de University of Missouri-Columbia in de Verenigde Staten is ontwikkeld. Hierbij wordt steenkool tot capsules geperst, die dan direct door een HCP vervoerd kunnen worden. Na het transport kunnen de capsules tot kleinere delen vermalen worden. Doordat geen dure containers nodig zijn en kan worden volstaan met een enkele pijpleiding, is dit containerloze HCP-systeem veel goedkoper dan wanneer wel duurzame containers gebruikt worden (Liu, 2000a). Ook is CLP goedkoper dan steenkooltransport via een slurripijpleiding, met trucks of met de trein (Liu et al., 1996). Andere voordelen van CLP ten opzichte van de slurripijpleiding zijn een kleinere behoefte aan water en een grotere capaciteit (ASCE, 1998). De CLP-techniek kan ook toegepast worden op enkele andere bulkgoederen, zoals cokes en vliegias (Liu, 2000a).

Voordelen van HCP-systemen zijn lage kosten en de mogelijkheid tot verticaal transport. Daar staat tegenover dat HCP-systemen langzaam zijn vanwege het lift-off effect. Bij dit ongewenste effect wordt de capsule weggeduwd van de pijpleidingwand. De capsule gaat hierdoor vibreren en ondervindt een grotere wrijvingskracht. Het lift-off effect vindt plaats boven een kritieke vloeistofsnelheid, die afhankelijk is van het gewicht van de capsule en van de afmetingen van capsule en pijpleiding. Dit beperkt de maximumsnelheid van een HCP. (Liu, 2000a)

Er zijn momenteel nog geen HCP-systemen operationeel. Wel zijn er proefopstellingen gebouwd, waarmee HCP-systemen getest worden. Toekomstige ontwikkelingen voor HCP kunnen betrekking hebben op de toepassing van lineaire motoren bij HCP met duurzame containers. Voor CLP en HCP met eenmalige containers is het niet mogelijk om lineaire motoren te gebruiken. Daarbij zullen dus conventionele pompen gebruikt moeten worden. Voor HCP met eenmalige containers zijn geen

recente onderzoeken bekend. De kans lijkt klein dat het concept op korte of middellange termijn voor toepassing geschikt is. De CLP-techniek wordt momenteel uitgebreid onderzocht en zal in de nabije toekomst in de praktijk geïmplementeerd kunnen worden.

3.4 Overige niet-traditionele transportsystemen

3.4.1 Inleiding

Voor de overige niet-traditionele ondergrondse transportsystemen zijn veel combinaties van technieken mogelijk (Katgerman et al., 1998). De verschillende concepten die voor ondergronds stukgoedertransport denkbaar zijn, verschillen onder andere in aandrijving, energievoorziening, draagvormen en besturing. De meeste uitgewerkte concepten maken gebruik van conventionele of lineaire elektrische motoren en hebben stalen wielen op rails of rubberbanden op een betonnen baan als draagvorm.

3.4.2 Mail Rail

Het oudste ondergrondse transportsysteem is de Mail Rail van het Britse Royal Mail. Met de bouw van deze automatische vrachtspoorweg werd in 1914 begonnen en in 1927 is de Mail Rail in gebruik genomen. De Mail Rail loopt van oost naar west onder het centrum van Londen door, over een lengte van 10 ½ km. Oorspronkelijk vormde de Mail Rail een verbinding tussen acht sorteerkantoren en twee overslagstations naar het landelijke spoorwegnetwerk. Structurele veranderingen in het Britse nationale postdistributienetwerk en toegenomen automatisering van de postsortering hebben het belang van de Mail Rail voor de postdistributie inmiddels verminderd. De acht sorteerkantoren zijn vervangen door vier grotere sorteercentra en de overslagstations zijn opgeheven vanwege de bouw van een nieuw regionaal distributiecentrum dat niet op de Mail Rail aansluit. Het systeem is in 1993 gemoderniseerd en kan voor de normale dienstregeling volledig automatisch opereren. De 50 treinen hebben een capaciteit van 1 ton en kunnen een snelheid van 60 km/h bereiken. (Bliss, 2000)

De Mail Rail vervult nu slechts een rol voor de lokale postdistributie, zodat de hoeveelheid te vervoeren post afgenomen is. Er is onderzoek gedaan naar verlenging van het traject tot aan het nieuwe distributiecentrum. Indien alleen poststromen op het netwerk worden toegelaten voldoet dat project echter niet aan de financiële criteria die de Royal Mail voor investeringen stelt. Daarom is de haalbaarheid onderzocht van gecombineerd gebruik van de tunnel door de Royal Mail en de langs de route van de Mail Rail gevestigde detailhandel. Om een grotere capaciteit en lagere variabele kosten te bereiken zou de Mail Rail omgebouwd moeten worden tot een Metro Freight systeem, dat gebruik maakt van automatisch geleide voertuigen (AGV's). Deze AGV's zijn vergelijkbaar met de voertuigen van het Nederlands OLS, dat later in deze paragraaf behandeld wordt. Ondanks gunstige resultaten van het onderzoek werd het project niet gerealiseerd, omdat het moeilijk bleek om de benodigde investering bij elkaar te krijgen. (Bliss, 2000)

3.4.3 Hoge Snelheids Tunneltransport

Een ander systeem dat gebruik maakt van geleiding door rails is het Hoge Snelheids Tunneltransport (HSTT). Dit concept is in de jaren '70 van de vorige eeuw bedacht door Prof.ir. R. van der Hoorn (Van der Hoorn, 2001). Bij HSTT wordt een netwerk van tunnels vacuüm gezogen, waarna speciaal ontworpen luchtdichte treinen er met snelheden tot 540 km/h door kunnen rijden (Perrels en Schippers, 1991). Doordat de tunnels vacuüm zijn gezogen, hoeven de treinen alleen bij hun vertrek aangedreven te worden, waarna zij voldoende snelheid behouden tot aan hun eindbestemming. Het gebruik van stalen wielen op rails beperkt de rolweerstand van het voertuig, zodat de afstand waarover zonder aandrijving een hoge snelheid behaald kan worden verlengt wordt. Uiteraard zal de snelheid van het voertuig gedurende dit aandrijvingloze deel van het transport wel langzaam maar zeker afnemen.

Voor het HSTT-concept werd een internationaal netwerk ontworpen, dat op financiële haalbaarheid werd onderzocht. Uit dit onderzoek bleek dat HSTT een sterke marktpositie kon verkrijgen voor zowel personen- als goederenvervoer op afstanden boven de 250 à 300 km (Perrels en Schippers, 1991). HSTT was vooral geschikt voor het transport van waardevolle goederen, zoals voedingsmiddelen, vers fruit, chemicaliën en werktuigen. Hoewel bleek dat het project economisch haalbaar was, werd het concept niet uitgevoerd onder andere vanwege de hoge investeringen die de realisatie van een internationaal tunnelnetwerk nodig heeft, twijfel over de technische haalbaarheid van de te gebruiken tunnelboormethode en de grote hoeveelheid energie die nodig is om de tunnel vacuüm te zuigen. Bij dergelijke internationale projecten treden vaak ook barrières op, vanwege moeilijkheden met de afstemming van technieken en trajecten tussen verschillende landen.

Voor veel distributienetwerken wordt het vacuüm zuigen van tunnels tegenwoordig niet meer als een reële optie gezien. Hiervoor is namelijk veel energie nodig en het leidt tevens tot hogere kosten voor de constructie van de tunnel en de voertuigen. De verminderde luchtweerstand van de voertuigen levert slechts bij het aanhouden van een hoge snelheid over een lange afstand voldoende voordelen op om netto een gunstig effect te verkrijgen. De meeste concepten voor ondergronds transport hebben echter betrekking op lokale of regionale distributienetwerken, waarbij de snelheden te laag en de afstanden te kort zijn om van vacuüm gezogen tunnels een haalbare optie te maken. (Haccoû et al., 1996)

3.4.4 Ondergrondse goederentransportsystemen in Japan

In Japan heeft men veel problemen met het goederenvervoer. De steeds hoger wordende eisen die afnemers stellen vanwege hun just-in-time transportsystemen kunnen door de toenemen congestie steeds moeilijker gehaald worden (Taniguchi et al., 2000). Ook factoren als verkeersongevallen, een tekort aan chauffeurs, energiegebruik en emissies van CO₂ en NO_x leidden ertoe dat er in Japan de laatste twintig jaar veel onderzoek is gedaan naar ondergronds goederentransport. In deze periode zijn verschillende concepten van transportsystemen uitgewerkt en onderzocht.

Tokyo L-net

Het Tokyo L-net is in 1988 voorgesteld voor de distributie van post in het centrum van Tokyo lengte (Ebihara et al., 1993). Het netwerk heeft een totale lengte van 45,2 km en vormt een verbinding tussen twee hoofdterminals voor briefpost, één hoofdterminal voor pakketpost en zeven kleinere terminals (Sanders et al., 1998). De hoofdterminals dienen als verbinding tussen het L-net en de bovengrondse postdistributie buiten Tokyo. Bij het ontwerp van het systeem is er rekening mee gehouden dat naast post ook andere goederen zoals kranten, tijdschriften en voedingsmiddelen vervoerd kunnen worden (Taniguchi et al., 2000). Voor het transport wordt gebruik gemaakt van door een lineaire motor aangedreven onbemande treinen, die een snelheid kunnen halen van 70 km/h (Wada et al., 1992).

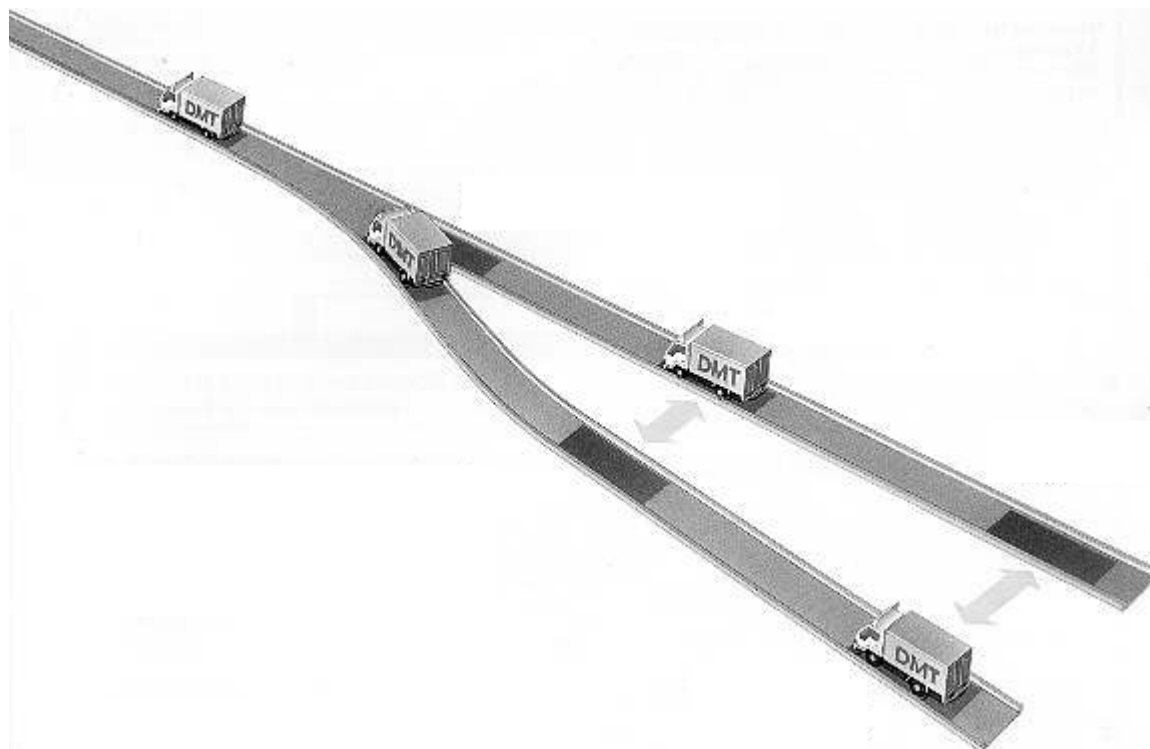
Underground Freight Transport System

Een ander systeem voor de stedelijke distributie van goederen is het Underground Freight Transport System (UFTS). Volgens het eerste ontwerp werkte het systeem met ondergrondse goederentreinen die door een 300 km lange tunnel 150 depots in Tokyo met elkaar verbinden (Taniguchi et al., 2000). Uit een haalbaarheidsonderzoek bleek dat het systeem ca. 40 procent van het aantal voertuigkilometers door vrachtverkeer zal vervangen. Bij het grote aandeel dat vrachtverkeer in Tokyo heeft in het totale verkeer komt dit neer op ongeveer 20 procent van het totaal aantal voertuigkilometers. De gemiddelde snelheid van het bovengrondse transport zal daardoor met 38 procent stijgen. Daarnaast levert implementatie van het systeem een energiebesparing op van 20 procent en een reductie van NO_x-emissies van 24 procent. (Koshi, 1992)

Dual Mode Truck

De ontwikkeling van een systeem met ondergrondse goederentreinen werd gestaakt ten gunste van een nieuw transportsysteem dat gebruik maakt van dual-mode trucks (DMT). Dit zijn elektrisch aangedreven vrachtwagens die automatisch over een ondergronds netwerk rijden, maar die met een chauffeur ook bovengronds over bestaande wegen kunnen rijden. De vrachtwagens beschikken over een accu die zorgt voor de stroomvoorziening op bovengrondse wegen. Wanneer de vrachtwagens ondergronds rijden dan ontvangen zij stroom via een geleiderail, waarbij zij tevens hun accu opladen. De maximumsnelheid van de vrachtwagens binnen het ondergrondse systeem bedraagt 45 km/h. Om het systeem ook voor kleine zendingen geschikt te maken is gekozen voor vrachtwagens met een capaciteit van 2 ton. (Taniguchi et al., 2000)

Van de vrachtwagens zijn prototypes ontwikkeld die op een proeftraject getest zijn (University of Washington, 2001). Bij deze tests werd onder andere aandacht besteed aan computergestuurde operatie, het communicatiesysteem, automatisch invoegen en geautomatiseerde afstandsbewaking. Voor in- en uitvoegen is gebruik gemaakt van de "Moving Target" theorie (Sanders et al., 1998). Hierbij volgen de DMT denkbeeldige punten die zich gelijkmatig over de rijbaan verplaatsen. Voor het invoegen vormt elk punt op de invoegende rijbaan een paar met een punt op de doorgaande rijbaan, waarna deze punten bij het invoegen samenkomen (zie figuur 3.3). Indien beide punten 'bezet' zijn door een DMT, dan zal één van beide DMT afremmen en wachten op het volgende punt.



Figuur 3.3: Het moving target concept van de Dual Mode Trucks. Bron: University of Washington, 2001.

Voor Tokyo is een ondergronds DMT-netwerk ontworpen van 201 km lengte (Taniguchi et al., 2000). Via enkele tientallen ondergrondse depots kunnen de DMT het netwerk verlaten, waarna zij bovengronds door een chauffeur naar leveranciers en afnemers van goederen kunnen worden gereden. Met het DMT-concept is het binnen Tokyo dus mogelijk om zonder overslag van deur tot deur te transporteren. Daarnaast bestaat er de mogelijkheid om ondergrondse netwerken van verschillende steden met elkaar te verbinden door bovengrondse toegewijde rijbanen in de middenberm van bestaande snelwegen. Op deze interstedelijke trajecten moet een snelheid van 100 km/h gehaald kunnen worden. Uit onderzoek is gebleken dat implementatie van DMT in Tokyo gunstige effecten heeft voor onder andere de congestie, de luchtkwaliteit en het aantal verkeersongevallen (Taniguchi et

al., 2000). Dat het DMT-concept nog niet wordt gebruikt, is het gevolg van de hoge investeringskosten van het project en van onzekerheden over het toekomstig marktaandeel van DMT, de gevolgen van DMT voor de distributeurs en de winstgevendheid van het systeem.

3.4.5 Ondergrondse Logistieke Systemen in Nederland

Voor de distributie van stukgoederen is in Nederland recent veel onderzoek gedaan naar zogenaamde Ongehinderde Logistieke Systemen (OLS). Bij deze systemen wordt veel aandacht besteed aan de logistieke eigenschappen. Oorspronkelijk zijn deze systemen als volledig ondergronds bedacht, zodat zij in het verleden ook wel Ondergrondse Logistieke Systemen werden genoemd. Bij recente ontwerpen worden de systemen meestal deels of zelfs geheel bovengronds gepland. Over het algemeen kan er onderscheid gemaakt worden tussen OLS voor industriële distributie en OLS voor stedelijke distributie. De systemen verschillen in de omvang van de te vervoeren ladingeenheden en daarmee in de benodigde diameter van de buisleiding. Daardoor is ondergrondse industriële distributie moeilijk te combineren met stedelijke distributie.

OLS Schiphol

Het eerste plan voor een OLS komt uit 1994 en betreft een verbinding tussen de luchthaven Schiphol, de bloemenveiling in Aalsmeer en een nieuw te bouwen railterminal. Dit OLS Schiphol is een OLS voor industriële goederendistributie. Het traject en de logistieke eigenschappen van het systeem zullen in hoofdstuk 4 uitvoeriger beschreven worden. Hier blijft de beschrijving beperkt tot de gebruikte transporttechniek.

Het systeem maakt gebruik van meer dan 200 automatisch geleide voertuigen (AGV) (Kusters, 2000). In de terminals rijden deze voertuigen op rubberbanden en zonder een externe energievoorziening, zoals weergegeven in figuur 3.4 (Pielage, 2000). Zij worden daar gecoördineerd door een centraal controlesysteem. Verschillende concepten voor de inrichting en indeling van deze terminals zijn inmiddels onderzocht (Verbraeck et al., 2000). Voor geleiding in de buisleiding moet nog de keuze gemaakt worden tussen rubberbanden op een betonnen baan of stalen wielen op rails (Kusters, 2000). Daarnaast zijn er verschillende mogelijkheden voor de energievoorziening van de voertuigen in de buisleiding. Enerzijds kan hiervoor gebruik gemaakt worden van een externe energievoorziening, waarbij tegelijkertijd de accu van de AGV wordt opgeladen. Een andere mogelijkheid is dat de accu van de AGV ook in de buisleiding zorgt voor de energievoorziening. In dat geval moet door de AGV echter regelmatig een aparte stop worden gemaakt om de accu op te laden. Inmiddels zijn verschillende componenten van het OLS getest op de TestSite van het Kenniscentrum Verkeer en Vervoer Connekt (Connekt, 2001). Het OLS Schiphol zal in 2004 operationeel kunnen zijn (Pielage, 2000).



Figuur 3.4: Artist impression van een terminal voor het OLS Schiphol. Bron: TRAIL Research School

Unit Transport per Pijpleiding

In 1995 is in opdracht van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat de studie Unit Transport per Pijpleiding (UTP) uitgevoerd. In deze studie werd een systeem geschetst waarbij railvoertuigen zich met een maximumsnelheid van 50 km/h door een buisleidingsysteem verplaatsen. Hierbij kunnen verschillende typen gestandaardiseerde laadeenheden vervoerd worden. Aandrijving van de UTP-voertuigen vindt eerst plaats door conventionele elektromotoren, maar op langere termijn zullen lineaire motoren gebruikt worden. De werking van lineaire motoren is beschreven in bijlage 2. Bij lineaire motoren is voor de voortstuwing geen roterende beweging nodig, zodat de voertuigen minder onderhoud nodig hebben. Lineaire motoren zijn daardoor bij uitstek geschikt voor de aandrijving van onbemande ondergrondse transportsystemen. (Van der Veen, 1996)

De nadruk bij de UTP-studie ligt op industriële goederendistributie. Er zijn een aantal mogelijke toepassingen van het systeem nader bestudeerd. Eén van deze toepassingen is het vervoer van door DSM geproduceerde kunststoffen van de productiefaciliteit in Geleen naar een distributiecentrum in Sittard. Omdat de continu geproduceerde kunststoffen discontinu door vrachtwagens worden afgevoerd, worden kosten gemaakt voor tussentijdse handling en opslag. Als het discontinue transport wordt vervangen door een constante goederenstroom via een buisleidingsysteem dan kan op deze kosten bespaard worden. Voor het transport wordt gebruik gemaakt van gestandaardiseerde containers, die worden overgeslagen via een zijdelings meelopende transportband. (Sanders et al., 1998) Andere bestudeerde UTP-toepassingen zijn een verbinding tussen een fruitterminal en een railterminal in de haven van Rotterdam, een verbinding tussen de Rotterdamse haven en de haven van Antwerpen, en het al besproken OLS Schiphol (Van der Veen, 1996).

Duurzame Technologische Ontwikkeling

In het deelprogramma Verplaatsen van het interdepartementaal onderzoekprogramma Duurzame Technologische Ontwikkeling (DTO) is gekeken naar de opzet van een buisleidingsysteem voor stedelijk stukgoederendistributie (Haccoû et al., 1996). In dit onderzoek werden verschillende technische mogelijkheden voor ondergrondse transportsystemen met elkaar vergeleken. Voor stedelijk goederenvervoer werd een systeem aanbevolen van niet-vacuümgezogen ondergrondse buisleidingen en terminals. De meest geschikte voertuigen zijn waarschijnlijk elektrisch aangedreven AGV's met een maximumsnelheid van 20 à 40 km/h (Haccoû et al., 1996; Brouwer et al., 1997b). In het DTO-onderzoek is vooral veel aandacht geschonken aan het logistieke systeem waarin ondergronds transport zou moeten plaatsvinden (Brouwer et al., 1997a; Brouwer et al., 1997b). Dit zal in hoofdstuk 4 besproken worden.

Interdepartementale Projectorganisatie Ondergronds Transport

Door de IPOT is voortgebouwd op de resultaten van het DTO-onderzoek. Hierbij zijn de toekomstige mogelijkheden van OLS voor stedelijke stukgoederendistributie geëvalueerd. Om inzicht te krijgen in de verschillende aspecten van ondergronds goederenvervoer zijn haalbaarheidsstudies uitgevoerd voor enkele specifieke trajecten en kleinschalige netwerken die op korte of middellange termijn geïmplementeerd kunnen worden (IPOT, 1999). In hoofdstuk 4 worden de verschillende onderzochte trajecten beschreven. Door het IPOT is uitgegaan van een systeem met AGV's, vergelijkbaar met het OLS Schiphol. Het voornaamste technische verschil is, zoals eerder vermeld, de buisdiameter. Voor de stedelijke distributie van stukgoederen wordt een kleinere buisdiameter gebruikt om aanlegkosten te besparen. Er zijn hierbij twee varianten mogelijk, namelijk een diameter van een meter, zodat pakketjes en eventueel liggende kleding vervoerd kunnen worden, en een diameter van twee meter, waarbij ook rolcontainers en kledingrekken vervoerd kunnen worden (IPOT, 1999). Bij het gebruik van buisleidingen met een diameter van een meter is het vaak nodig om zendingen in meerdere kleinere eenheden te verdelen, wat hogere operationele kosten met zich meebrengt (Boerkamps, 2000).

In de nabije toekomst zal een beslissing gemaakt worden omtrent de exacte technische configuratie van het OLS-concept. Om koppeling van verschillende OLS in de toekomst mogelijk te maken, zal

elk OLS van dezelfde techniek gebruik moeten maken. Het eerste OLS heeft dus een sjabloon-functie voor alle latere systemen. Omdat het moeilijk en kostbaar zal zijn om in een later stadium de configuratie aan te passen, is bij de keuze grote zorgvuldigheid geboden. Voor de toekomstige ontwikkeling van stedelijk OLS met interstedelijke verbindingen heeft de IPOT prognoses gemaakt van het vervoerspotentieel van enkele netwerken. Hieruit bleek dat een landelijk OLS een totale vervoersprestatie van 15,5 mld. tonkm in 2010 en 19,7 mld. tonkm in 2020 kan behalen. Voor een netwerk dat alleen de Randstad bedient, is de potentiële vervoersprestatie 7,7 mld. tonkm in 2010 en 10,2 mld. tonkm in 2020 (NEA/DHV, 1998).

3.5 Tunnelbouwtechnieken

3.5.1 Inleiding

De eerste tunnels werden waarschijnlijk al in de prehistorie gemaakt. Alle belangrijke beschavingen uit de oudheid ontwikkelden constructiemethoden voor tunnels. Eén van de eerste tunnels is een 900 meter lange bakstenen voetgangerstunnel onder de rivier de Eufraat, die circa 4200 jaar geleden in Babylonië werd gebouwd. De constructie hiervan was mogelijk door in het droge seizoen de rivier om te leiden. In de vroege oudheid werden tunnels in zachte rotsen gemaakt met eenvoudige mechanische werktuigen. Later werden rotsen verhit en met koud water plotseling afgekoeld, zodat tunnels ook in harde rotsen konden worden aangelegd. Sinds de 17de eeuw werden op grote schaal tunnels aangelegd om tegemoet te kunnen komen aan de groeiende behoefte aan transport. Voor de constructie van tunnels in rotsen kwamen nieuwe technieken in gebruik, zoals springstoffen en krachtige boren. (Encyclopædia Britannica, 2001, tunnels and underground excavations) Het graven van tunnels in zachte grond gebeurde met spaden en pikhouwelen (Kass en Norton, 1997).

In de 20ste eeuw zijn veel verschillende methoden ontwikkeld waarmee buisleidingen en pijpleidingen ondergronds kunnen worden aangelegd. In het kader van het IPOT-project is een inventarisatie gemaakt van de verschillende technieken (Kuiper en Ottevanger, 1998). De methoden werden hierbij in zes categorieën verdeeld. In deze paragraaf zal dezelfde indeling gebruikt worden. De verschillende methoden zijn vaak voor buisleidingen van uiteenlopende formaten en vormen toepasbaar. Bij de beschrijvingen van de verschillende technieken zal in deze paragraaf voor de eenvoud telkens de term 'tunnel' worden gebruikt.

Een belangrijke factor bij het aanleggen van tunnels is de invloed die uitgeoefend wordt op de omgeving. Dit kan zowel tijdens de bouw als tijdens de exploitatie plaatsvinden. De hinder tijdens de bouw vindt vooral plaats door de aanwezigheid van open bouwputten, de eventueel daarvoor benodigde bemaling van het grondwater en mogelijke verschuivingen of verzakkingen van de bodem. Tijdens de exploitatie wordt de omgeving met name beïnvloed door eventuele bemaling van het grondwater. De aanwezigheid van bouwputten brengt vooral veel hinder met zich mee indien bovengronds wegen of andere infrastructuur afgebroken moet worden. Dit levert ongemak voor verkeer en omwonenden. Door bemaling van het grondwater bestaat de kans op verdroging van het omliggende gebied. Dit is vooral ernstig bij natuurgebieden, waar een verarming van de soortenrijkdom kan optreden. De duur van de bouw van infrastructuur is vaak al lang genoeg om een onomkeerbare verdroging te veroorzaken. (Van der Schee en Garritsen, 1997) Deformatie van de bodem door ondergrondse graafwerkzaamheden kan schade veroorzaken aan omliggende gebouwen en infrastructuur (Kuiper en Ottevanger, 1998).

3.5.2 Open bouwput methode

De eerste categorie tunnelbouwmethoden is de open bouwput methode. Hierbij wordt over de gehele lengte van de tunnel een sleuf gegraven. In deze sleuf worden de vloer, de wanden en het dak van de tunnel gebouwd, waarna de sleuf weer met grond gevuld wordt. In bijlage 3 is de werking van deze en de andere categorieën tunnelbouwmethoden schematisch weergegeven. Bij deze methode is er gedurende lange tijd een open bouwput aanwezig, wat zorgt voor veel hinder tijdens de bouw. De open bouwput methode heeft als voordelen dat het een bewezen techniek is en dat voor de buisleiding

in principe alle vormen en grootten mogelijk zijn. (Kuiper en Ottevanger, 1998) Tijdens de bouw van de tunnel moet voorkomen worden dat de sleuf vol loopt met grondwater. Dit kan met vijf verschillende methoden. Deze methoden hebben elk een ander energiegebruik en een andere impact op de directe omgeving van de bouwput.

Open bouwputmethode met bronbemaling

De eerste methode maakt gebruik van bronbemaling, waarbij het grondwaterpeil onder de bouwput laag wordt gehouden door het water weg te pompen. Bij grote diepten kan met behulp van damwanden langs de bouwput het pompen vergemakkelijkt worden. In vergelijking met andere ontwateringsmethoden heeft bronbemaling een grote invloed op de omgeving. Bovendien is voor het pompen veel energie nodig. De open bouwput methode met bronbemaling wordt vaak gebruikt voor het leggen van leidingen en rioleringen op plaatsen met weinig werkruimte en op grote diepte. Daarnaast wordt de methode ook gebruikt voor de aanleg van tunnels met een grote diameter, zoals autotunnels. (Kuiper en Ottevanger, 1998)

Open bouwputmethode met afsluitlaag

De tweede methode kan worden toegepast indien in de bodem een waterafsluitende laag aanwezig is. Langs de bouwput worden damwanden geplaatst tot aan de waterafsluitende laag. De bouwput staat dan niet meer in contact met het grondwater, zodat het water in de bouwput eenvoudig kan worden weggepompt. In het geval dat van nature geen waterafsluitende laag aanwezig is, kan deze gecreëerd worden door middel van chemische injectie. Dit is echter een veel duurdere methode. Voor de open bouwput methode met afsluitlaag is bewezen dat het toepasbaar is voor grote buisdiameters. (Kuiper en Ottevanger, 1998)

Open bouwputmethode met onderwaterbeton

Bij de derde methode wordt een bouwput gegraven zonder dat deze bouwput door bemaling wordt droog gehouden. Vervolgens wordt onder water een betonnen vloer gestort over de gehele breedte van de bouwput tussen twee hulpdamwanden. De bouwput kan dan eenvoudig worden leeggepompt, waarna de tunnel gebouwd kan worden. De open bouwput methode met onderwaterbeton is een bewezen techniek; een nieuw bedachte methode met prefab beton⁶ is echter nog niet toegepast. (Kuiper en Ottevanger, 1998)

Open bouwputmethode met een vliesconstructie

Een andere methode is dat zonder bemaling een bouwput gegraven wordt, waarna een waterafsluitende vliesconstructie aan de binnenkant van de bouwput wordt aangebracht. Daarna kan de bouwput worden leeggepompt en wordt de tunnel gebouwd. De bouwput moet bij deze methode over het algemeen breder en dieper worden dan bij andere methoden. Boven het vlies moet een voldoende dikke laag aarde aanwezig zijn om de opwaartse krachten van de waterdruk op het vlies te kunnen weerstaan. Ook is extra ruimte nodig om het vlies te kunnen aanbrengen. Van de open bouwput methode met een vliesconstructie zijn veel varianten bedacht, waarvan de meeste nog niet in de praktijk zijn toegepast. (Kuiper en Ottevanger, 1998)

Open bouwputmethode volgens het polderprincipe

De laatste methode is het zogenaamde polderprincipe. Hierbij moet er wederom een minder waterdoorlatende laag onder de bouwput aanwezig zijn. De wanden van de tunnel worden tot in de waterafsluitende laag aangebracht. Nadat door bemaling het waterpeil omlaag is gebracht, kan de

⁶ Prefab beton zijn voorgefabriceerde, kant-en-klare betonnen elementen.

bouwput worden afgegraven en een tunneldak worden aangebracht. De voor de voertuigen benodigde infrastructuur wordt direct op de ondergrond aangelegd, er is dus geen tunnelbodem aanwezig. Om het grondwater uit de tunnel te houden is daarom een constante bemaling nodig. De open bouwput methode volgens het polderprincipe is een bewezen techniek en technisch toepasbaar voor alle tunneldiameters. (Kuiper en Ottevanger, 1998)

3.5.3 Wanden-dak methode

De tweede categorie tunnelbouwmethoden is de wanden-dak methode. Bij deze methode worden eerst de tunnelwanden in de grond geplaatst en wordt hier het tunneldak op gebouwd. Vervolgens wordt onder het dak de grond wordt afgegraven (zie bijlage 3). Het grote voordeel van deze methode is dat slechts gedurende korte tijd een bouwput aan het oppervlak aanwezig is, zodat de overlast voor de omgeving wordt beperkt. De wanden-dak methode komt verder qua eigenschappen overeen met de open-bouwput methode. Voor het ontwateren van de tunnel kunnen in principe dezelfde vijf methoden gebruikt worden als bij de open-bouwput methode. Het toepassen van het onderwaterbeton of de vliesconstructie is echter in de praktijk minder waarschijnlijk. De wanden-dak methode is in Nederland onder andere gebruikt bij de Haagse tramtunnel. (Kuiper en Ottevanger, 1998)

3.5.4 Caissonmethode

Bij de caissonmethode worden eerst bovengronds tunnelementen (caissons) gebouwd. De tunnelementen worden vervolgens ingegraven door de grond onder de tunnelementen hydraulisch weg te graven. Het grondwater wordt hierbij door overdruk tegengehouden. De caissonmethode is in Nederland onder andere toegepast bij de bouw van een deel van de Amsterdamse metro in de jaren '60 van de vorige eeuw. Ook wordt deze methode toegepast bij de constructie van kelders. Een voordeel van de caissonmethode is de korte tijdsduur dat een bouwput aanwezig is. (Kuiper en Ottevanger, 1998)

3.5.5 Afzinkmethode

De afzinkmethode wordt meestal toegepast bij het leggen van tunnels op de bodem van een rivier of kanaal. Hierbij worden prefab tunnelementen in een van tevoren gebaggerde zinksleuf op de bodem van een waterweg afgezonken. Ook is het mogelijk om speciaal voor de tunnel een aparte tunnelsleuf te graven. De afzinkmethode is in Nederland al vaak gebruikt voor kruisingen van wegen en spoorwegen met waterwegen. Daarnaast zijn er nog enkele nieuwe varianten bedacht die nog niet in de praktijk zijn toegepast. (Kuiper en Ottevanger, 1998)

3.5.6 Boormethoden

De vijfde categorie tunnelbouwmethoden omvat enkele methoden om tunnels te boren met behulp van een tunnelboormachine. Een tunnelboormachine bestaat in het algemeen uit een snijkop waarmee de grond aan de voorkant van de tunnelboormachine wordt afgegraven, een mechanisme om de afgegraven grond door de geboorde tunnel af te voeren, en een techniek om de buis of buiselementen achter de boorkop in de tunnel te plaatsen. Het grote voordeel van het boren van tunnels is dat op het grootste deel van de tunnel geen bouwput aanwezig is. Er zijn alleen start- en ontvangstputten nodig voor het in- en uitlaten van de tunnelboormachine, de buis(elementen) en de afgegraven grond. De invloed op de omgeving is daarom minimaal (Kuiper en Ottevanger, 1998). Daar staat tegenover dat geboorde tunnels relatief duur zijn in de aanleg, dat zij ter voorkoming van opdrijven door grondwater diep moeten worden aangelegd, en dat geen scherpe bochten gemaakt kunnen worden.

Open-fronttechniek

Er kan onderscheid gemaakt worden tussen vier verschillende boormethoden. De eerste methode is de open-fronttechniek, waarbij achter de snijkop geen wand aanwezig is om grondwater uit de tunnel te weren. Vanwege het gebruik van een open snijkop is het vaak nodig om bronbemaling toe te passen.

De boorkop wordt vooruit geduwd doordat prefab tunnelementen vanuit een vertrekschacht de tunnel in worden geperst (zie bijlage 3). De afgegraven grond wordt uit de tunnel afgevoerd door middel van een achter de snijkop bevestigde transportschroef. De open-front boormethode is in Nederland toegepast voor buizen met een diameter tussen de 30 en 150 cm. De minimumdiameter waarbij deze techniek toegepast kan worden is 20 cm; over de maximumdiameter bestaat nog twijfel. De maximale tunnellengete is voor de open fronttechniek is 70 meter voor mens-ontoegankelijke tunnels. Dit heeft tot gevolg dat om de 70 meter een bouwput gegraven moet worden, die als vertrek- en ontvangtschacht dienstdoet. Deze bouwputten zijn echter slechts een korte tijd aanwezig. Ten opzicht van andere boormethoden heeft de open-fronttechniek met name bij mens-ontoegankelijke tunnels als nadeel dat er geen mogelijkheden zijn om de boormachine te sturen. Bovendien is slechts de bouw van cirkelvormige tunnels mogelijk. (Kuiper en Ottevanger, 1998)

Gesloten-fronttechniek voor micro-tunneling

De tweede methode is de gesloten-fronttechniek voor micro-tunneling. Hierbij is achter de snijkop een waterdichte wand aanwezig die voorkomt dat grondwater de tunnel instroomt. De afgegraven grond wordt via een pijp door deze wand afgevoerd. Net als bij de open-fronttechniek wordt de boormachine voortgeduwd doordat prefab buiselementen vanuit de vertrekschacht de tunnel in worden geperst. Het voorste deel van de boormachine, het boorschild, bestaat uit twee delen die flexibel met elkaar verbonden zijn. Dit maakt het mogelijk om de boormachine tijdens het boren te sturen, waarbij bochten gemaakt kunnen worden met boogstralen van minimaal 300 meter. (Kuiper en Ottevanger, 1998) Door het gebruik van prefab buiselementen is het echter niet mogelijk om vloeiende bochten te maken (Stein en Schoesser, 2000). Ook op 'rechte' stukken buis kunnen tijdens de bouw oneffenheden ontstaan (Arends en Grote, 2000). In zachte bodem kan door deformatie van de bodem ook vervorming van de buisleiding en verschuiving van buiselementen plaatsvinden (Broere, 2000). Het is daarom onzeker in hoeverre deze micro-tunneling geschikt is voor stukgoederenvervoer.

Van de gesloten-fronttechniek zijn verschillende varianten mogelijk, zoals het gronddrukbalansschild waarbij de grond met een transportschroef wordt afgevoerd, en het vloeistofschild waarbij de grond door een vloeistofstroming wordt afgevoerd. Daarnaast is het mogelijk om niet-cirkelvormige tunnels te boren. Een voorbeeld hiervan is de Double-O-Tube (DOT) die een dubbele cirkelvorm heeft (Sanders et al., 1998). Met een DOT kunnen meerdere vervoersbanen naast elkaar worden aangelegd, terwijl het afgegraven volume beperkt blijft. In Nederland is de gesloten-fronttechniek voor micro-tunneling toegepast voor diameters van maximaal 3 meter. De maximaal haalbare diameter bedraagt op dit moment 3,5 à 4 meter; de maximale tunnellengete is 1000 à 1500 meter. (Kuiper en Ottevanger, 1998)

Gesloten-fronttechniek voor macro-tunneling

Naast de gesloten-fronttechniek voor micro-tunneling is er ook de gesloten-fronttechniek voor macro-tunneling. Het verschil tussen deze technieken is dat bij macro-tunneling geen tunnelementen de tunnel in worden geperst, maar dat de tunnelwand vlak achter het boorschild wordt opgebouwd door het vormen van een stalen mantel waarbinnen prefab betonnen segmenten worden geplaatst. De boormachine beweegt zich voort door zich tegen de achterliggende segmenten af te zetten. Bij nieuwere varianten wordt beton van de tunnelwand ter plaatse gestort. Met de gesloten fronttechniek voor macro-tunneling kunnen tunnels met een minimale diameter van 3 meter worden gebouwd. De maximale diameter is onbekend, maar de grootste in de praktijk uitgevoerde diameter bedraagt 14 meter. In principe is de lengte van de tunnel niet gelimiteerd. Een nadeel van deze methode is dat door de grote omvang van de boormachine grote bouwputten nodig zijn als vertrek- en ontvangtschacht. (Kuiper en Ottevanger, 1998)

Het boren van tunnels met een gesloten-fronttechniek kwam in het verleden in Nederland ter sprake als onderdeel van het in paragraaf 3.3 beschreven HSTT-concept. Destijds bestond er echter twijfel over de haalbaarheid van het boren van tunnels in een zachte bodem. Naar aanleiding van ervaringen met boren in een zachte bodem in Japan is deze twijfel weggenomen. (Van der Hoorn, 2001) In 1993

zijn daarom de Tweede Heinenoordtunnel en de Botlek-spoortunnel aangewezen als proefprojecten. Inmiddels wordt ook de Westerscheldetunnel geboord en de HSL-tunnel onder het Groene Hart zal eveneens een geboorde tunnel worden. (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2001)

Horizontaal gestuurd boren

De laatste boormethode is het zogenaamde horizontaal gestuurd boren. Hierbij wordt de grond losgemaakt door een hydraulisch aangedreven boorkop die zich aan het eind van een boorstang bevindt. Via de boorstang wordt ook boorvloeistof aangevoerd die de losgemaakte grond langs de buitenkant van de boorstang de tunnel uit laat stromen. Het boorproces vindt in meerdere etappes plaats, waarbij de diameter van de tunnel steeds vergroot wordt. Bij de laatste etappe wordt de uiteindelijke pijpleiding of mantelbuis op zijn plaats gebracht. (Kuiper en Ottevanger, 1998; Arends en Grote, 2000) Met horizontaal gestuurd boren zijn buisleidingen aangelegd met een maximale diameter van 1,5 meter. In de toekomst kunnen diameters van 2 à 2,5 meter mogelijk worden. (Kuiper en Ottevanger, 1998) De maximale lengte van de tunnel is 2000 meter. (Arends en Grote, 2000) Een voordeel van deze techniek is dat slechts zeer kleine bouwputten nodig zijn als start- en ontvangstput. In Nederland is horizontaal gestuurd boren een bewezen techniek. Het is onder andere toegepast voor pijpleidingen en mantelbuizen. (Kuiper en Ottevanger, 1998)

3.5.7 Methoden met grondverdringing

Bij de laatste categorie tunnelbouwmethoden, de methoden met grondverdringing, is net als bij de boormethoden slechts een vertrek- en een ontvangtschacht nodig. Bij deze categorie wordt geen boormachine gebruikt om de tunnel uit te graven, maar wordt door het uitoefenen van een hoge druk de aarde verdrongen. Dit heeft als nadeel dat er een grotere kans is dat gebouwen en infrastructuur in de omgeving van de tunnel beschadigd worden door bewegingen van de grond. Evenals bij geboorde tunnels moeten tunnels bij grondverdringing diep in de grond worden aangelegd om opdrijving door grondwater te voorkomen. (Kuiper en Ottevanger, 1998)

Impact ramming

Er zijn drie methoden die gebruik maken van grondverdringing. De eerste hiervan is impact ramming, waarbij door een persraket periodiek een hoge druk wordt uitgeoefend op het uiteinde van een pijpleiding. Op deze manier wordt de pijpleiding als het ware horizontaal de grond in geheid. Bij impact ramming moet een keuze gemaakt worden tussen het afdichten van de voorkant van de leiding zodat de grond verdrongen moet worden, of het open laten van de leiding waarbij de grond in de leiding achteraf moet worden verwijderd. De methode kan toegepast worden voor buisdiameters van maximaal 1,4 meter en voor een maximale lengte van 40 meter. In Nederland is impact ramming een bewezen techniek. Het is echter nog onzeker in hoeverre de drukgolven van de persraket schade kunnen veroorzaken aan naburige gebouwen of infrastructuur. (Kuiper en Ottevanger, 1998)

Worm-techniek

De tweede methode met grondverdringing is de worm-techniek. Hierbij wordt met behulp van vijzels⁷ in de vertrekschacht een buisleiding met aan de voorkant een conus de grond in geperst. Met deze methode kunnen buisleidingen met een maximale diameter van 2 meter gemaakt worden. De techniek is bewezen voor leidingen van maximaal 20 cm. Een voorwaarde voor het gebruik van de worm-techniek is dat de buisleiding in slappe grondlagen moet worden aangelegd. Het is nog onzeker of de grondverdringing schade aan nabijgelegen gebouwen en infrastructuur kan veroorzaken. (Kuiper en Ottevanger, 1998)

⁷ Vijzel: een toestel om zware voorwerpen op te heffen of om een andere reden druk uit te oefenen.

Pers- en trektunnels

Tenslotte is er de techniek van pers- en trektunnels. Hierbij worden prefab tunnelementen door de grond getrokken of geperst. Daarna moet nog de grond uit de tunnelementen verwijderd worden. De methode is toepasbaar voor tunnels met een diameter van meer dan 2 meter en een lengte van maximaal enkele tientallen meters. In Nederland is de techniek veel toegepast, vooral voor de aanleg van fietstunnels onder bestaande wegen en spoorwegen. De techniek vereist een droge grond, dus eventueel is bemaling noodzakelijk.

In tabel 3.1 is een overzicht gegeven van de technische eigenschappen van de hierboven beschreven varianten op de verschillende tunnelbouwmethoden. Daarnaast zijn kwalitatieve scores toegekend aan de eigenschappen van de varianten met betrekking tot de overlast voor de omgeving. De scores zijn weergegeven in vergelijking tot de wanden-dak methode met natuurlijke afsluitlaag, omdat deze op de verschillende eigenschappen het meest gemiddeld scoort. De technische eigenschappen en de overlast voor de omgeving zijn naast de kosten de voornaamste factoren die de keuze voor de tunnelbouwmethoden beïnvloeden.

Tabel 3.1: Overzicht van de technische karakteristieken van verschillende tunnelbouwtechnieken

Categorie	Subcategorie	Mogelijke tunnel-diameter	Maximale lengte zonder bouwput	Minimale boog-straal	Overlast voor de omgeving		Ervaring met de techniek
					Bouwput	Bemaling tijdens bouw	
Open bouwput	Bronbemaling	Zeër klein tot zeer groot ^{a)}	N.v.t.	0 m.	-	0	+
	Natuurlijke afsluitlaag	Idem	N.v.t.	0 m.	-	0	0
	Onderwaterbeton	Idem	N.v.t.	0 m.	-	0	-
	Vliesconstructie	Idem	N.v.t.	0 m.	--	0	--
	Polderprincipe	Idem	N.v.t.	0 m.	-	-	+
Wanden-dak	Bronbemaling	Idem	N.v.t.	0 m.	0	0	+
	Natuurlijke afsluitlaag	Idem	N.v.t.	0 m.	0	0	0
	Onderwaterbeton	Idem	N.v.t.	0 m.	0	0	-
	Vliesconstructie	Idem	N.v.t.	0 m.	-	0	--
	Polderprincipe	Idem	N.v.t.	0 m.	0	-	+
Caisson Afzink Boor	Open front	0,2 tot >1,5 m.	70 m.	N.v.t.	+	0	+
	Gesloten front – micro	< 4 m.	1500 m.	300 m.	+	0 ^{b)}	0
	Gesloten front – macro	> 3 m.	Onbeperkt	300 tot 500 m.	++	+	0
	Horizontaal gestuurd	< 2 m.	2000 m.	1200 m.	++	+	+
	Impact ramming	< 1,4 m.	40 m.	N.v.t.	+	0 ^{b)}	0
Grond-verdringing	Worm	< 2 m.	Enkele km.	N.v.t.	+	0	0
	Pers- en trektunnels	2 tot 5 m.	Enkele tientallen m.	N.v.t.	+	0	+

Opmerking kwantitatieve waarden: niet elke combinatie van diameter, lengte en boogstraal die binnen het bereik van de afzonderlijke variabelen vallen, is mogelijk. De verschillende parameters zijn namelijk onderling afhankelijk.

Kwalitatieve scores voor eigenschappen in vergelijking tot de wanden-dak methode met natuurlijke afsluitlaag: ++ veel gunstiger, + gunstiger, 0 gelijkwaardig, – ongunstiger, -- veel ongunstiger.

a) De open-bouwput-, wanden-dak-, caisson- en afzinkmethoden zijn technisch mogelijk voor vrijwel alle diameters die voor verkeerstunnels gebruikt worden.

b) Vanwege bemaling van de vertrek- en ontvangtschachten.

4. Logistieke netwerken met ondergronds transport

4.1 Inleiding

De logistieke eigenschappen van ondergrondse transportnetwerken zijn van belang voor de milieueffecten en de bedrijfseconomische effecten van het gebruik van transportmiddelen. Dit komt doordat zij invloed hebben op zowel de af te leggen afstand van de voertuigen als op de per voertuigkilometer benodigde energie. De af te leggen afstand van de voertuigen wordt beïnvloed door de uitgebreidheid en fijnmazigheid van het netwerk en door de effectiviteit van het verdelen van de te vervoeren goederen over de voertuigen. De voor de voertuigverplaatsing benodigde energie is afhankelijk van effectiviteit waarop de vervoersstromen over het transportnetwerk gecoördineerd worden.

Bovendien zijn de logistieke kenmerken bepalend voor de geschiktheid van ondergronds transport voor het vervoer van specifieke goederen en voor het gebruik in bepaalde logistieke verbindingen. In dit hoofdstuk worden de logistieke concepten van huidige en mogelijke toekomstige netwerken met ondergronds transport behandeld. Daarnaast wordt voor de verschillende ondergrondse transportmethoden een overzicht gegeven van de huidige netwerken en enkele mogelijkheden voor toekomstige trajecten. Tenslotte wordt een conceptueel transportmodel beschreven wat gebruikt wordt om de vervoersprestaties van ondergrondse transportsystemen te berekenen.

Een aaneengesloten en geïntegreerde verzameling van logistieke punt-punt relaties vormt een logistiek netwerk. Over een logistiek netwerk kunnen goederen van verschillende herkomst naar meerdere bestemmingen vervoerd worden. De vervoersprestatie van logistieke netwerken wordt uitgedrukt in de eenheid tonkilometers; dit is het vervoerde gewicht (in metrische tonnen) vermenigvuldigd met de bij het vervoer afgelegde afstand (in kilometers). Op de vervoersprestatie van transportmodi wordt dieper ingegaan in hoofdstuk 7 waar een model voor scenarioanalyses wordt beschreven.

De in dit rapport behandelde ondergrondse transportsystemen hebben enkele algemene logistieke kenmerken waarmee zij zich onderscheiden van andere transportsystemen. In de eerste plaats is dit de geslotenheid van de systemen; er mogen geen 'vreemde' voertuigen gebruik maken van de ondergrondse infrastructuur. De systemen zijn daarnaast geautomatiseerd en worden centraal gecoördineerd om de doorstroom van de goederen te optimaliseren. De continuïteit van de transportsystemen wordt daarbij verbeterd doordat de systemen ongehinderd zijn en dus geen last hebben van kruisingen met andere vervoerssystemen. Vanwege de continuïteit en de centrale optimalisatie van de vervoersstromen kunnen de ondergrondse transportsystemen ten opzichte van bovengrondse transportsystemen voordelen opleveren voor energiegebruik, variabele kosten, snelheid en betrouwbaarheid van het transport. Deze voordelen komen het meest tot uiting bij omvangrijke goederenstromen.

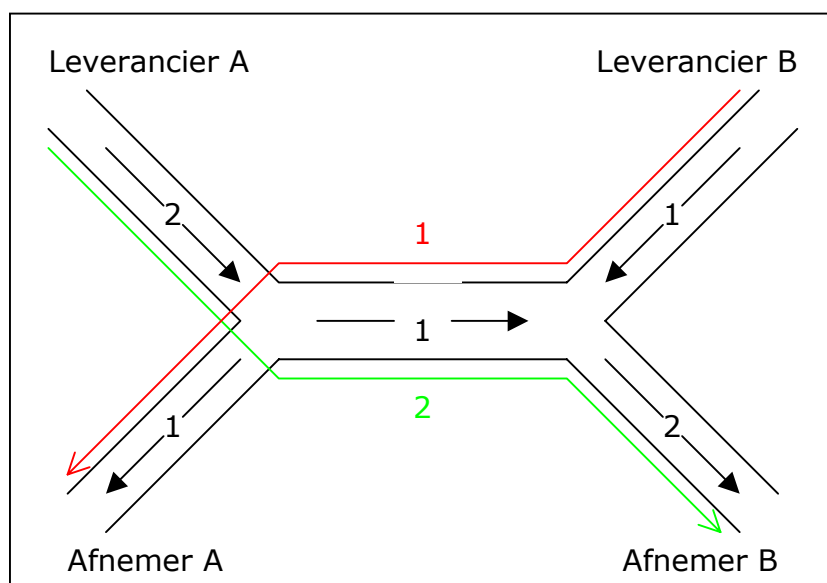
4.2 Traditioneel en extra-traditioneel ondergronds transport

4.2.1 Logistieke kenmerken van vloeistofpijpleidingen

Vloeistofpijpleidingen hebben als belangrijk logistiek kenmerk dat zij voor slechts één type bulkgoed tegelijkertijd gebruikt kunnen worden. Hierdoor moeten voor verschillende goederen aparte pijpleidingnetwerken worden aangelegd, wat de ontwikkeling van het pijpleidingtransport sterk belemmert. De omvang van pijpleidingsystemen kan voor verschillende producten enorm variëren. Voor drinkwater en aardgas liggen landelijk dekkende netwerken, terwijl in de industrie vaak gebruik gemaakt wordt van point-to-point pijpleidingen voor het transport van halfabrikaten. In dit onderzoek zullen industriële point-to-point leidingen over korte afstand buiten beschouwing gelaten worden. Een andere logistieke eigenschap is de continuïteit waarmee pijpleidingtransport plaatsvindt. Door de

leverancier geleverde producten kunnen vrijwel gelijktijdig door de afnemer uit de pijpleiding worden gehaald. Het gebruik van reservoirs kan de flexibiliteit van de levering en ontvangst nog verder vergroten.

Als er meerdere leveranciers en afnemers op een pijpleidingnetwerk zijn aangesloten, ontstaat een 'common carrier' netwerk. Hierbij stellen de op het netwerk aangesloten partijen onderling strenge eisen aan de samenstelling van het te transporteren goed. De kwaliteitseisen van het te transporteren product worden zodanig hoog gezet dat het product voor een optimaal aantal toepassingen geschikt is. Doordat het product uitgebreid gecontroleerd wordt, zijn de afnemers er zeker van dat het van een voldoende hoge kwaliteit is. Een nadeel van het common carrier principe is dat de kwaliteit in de regel hoger is dan voor de meeste toepassingen noodzakelijk is. Het product kan daardoor onnodig duur zijn.



Figuur 4.1: Hypothetisch pijpleidingstelsel met twee leveranciers en twee afnemers. De getallen zijn hypothetisch en in willekeurige volume-eenheden. Het vloeistoftransport van Leverancier A naar Afnemer B van 2 volume-eenheden (groene pijl) wordt voor een deel gecompenseerd door het vloeistoftransport van Leverancier B naar Afnemer A van 1 volume-eenheid. De fysieke vloeistofstromen (zwarte pijlen) wijken daardoor af van de financiële transactie.

Common carrier pijpleidingnetwerken hebben als extra logistiek kenmerk dat bij een transactie de afnemer vaak niet fysiek hetzelfde product ontvangt als dat de aanbieder de pijpleiding inpompt. De fysieke vloeistofstromen in een pijpleidingnetwerk volgen de netto stromen van alle transacties die gelijktijdig via het pijpleidingnetwerk afgehandeld worden. Door dit principe heffen tegengestelde vervoersstromen elkaar op. Dit is geïllustreerd in figuur 4.1. De werkelijke afgelegde afstand kan bij common carrier netwerken kleiner zijn dan indien de vervoersstromen over afzonderlijke verbindingen plaatsvinden. Door het gebruik van centrale reservoirs kan de logistiek nog verder verbeterd worden, omdat dan ook niet-gelijktijdige transacties (weliswaar in beperkte mate) met elkaar gecompenseerd kunnen worden. Bij common carrier netwerken verschilt de fysieke transactie dus van de financiële transactie. De uniformiteit van het product zorgt ervoor dat aanbieders en afnemers hier geen nadelen van ondervinden. Er is hier sprake van schaalvoordelen: naarmate meer aanbieders en afnemers op een netwerk zijn aangesloten zullen de fysieke goederenstromen over het algemeen efficiënter geordend worden.

4.2.2 Traditioneel pijpleidingtransport

Water is in Nederland het meest getransporteerde goed. Per jaar wordt rond de 1,2 miljard m³ drinkwater en circa 70 miljoen m³ ander water via pijpleidingnetwerken gedistribueerd. Hiervoor ligt in Nederland een transport- en hoofdleidingnet van ongeveer 100.000 km. Dit is qua lengte

vergelijkbaar met het Nederlandse wegennet, dat in 1997 een lengte had van ca. 116.000 km. De lengte van transport- en hoofdleidingnet neemt langzaam toe, met ca. 8000 km in de periode van 1988 tot 1997. Tevens moeten de leidingen soms vervangen worden; in 1997 was dit 608 km leiding. Het transport- en hoofdleidingnet betreft leidingen met een uitwendige diameter van meer dan 63 mm voor PVC-leidingen en meer dan 50 mm voor andere leidingen. (VEWIN, 1998)

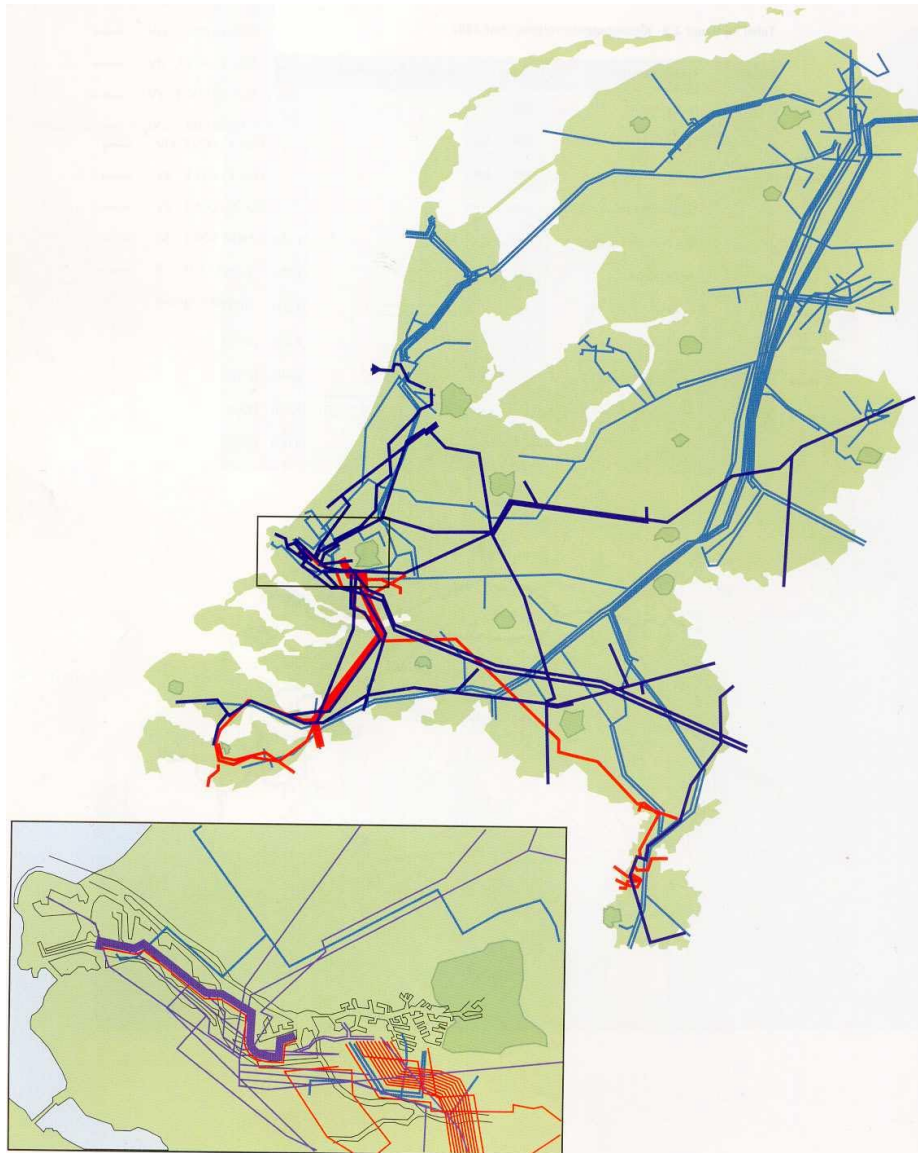
Een karakteristiek kenmerk van de drinkwaterdistributie is dat het water op veel verschillende plaatsen verspreid over het hele land wordt opgepompt en in het netwerk gebracht. Het water legt daarom gemiddeld een kleine afstand over het netwerk af vergeleken met andere goederen die per pijpleiding vervoerd worden, zoals aardgas. Grensoverschrijdende drinkwaterstromen zijn eveneens zeer klein (VEWIN, 1998). Gegevens over de vervoersprestatie in tonkilometers van het waterleidingnet in Nederland ontbreken. Volgens een eigen schatting zal de vervoersprestatie circa 13 mld. tonkm bedragen (zie bijlage 4).

Ook riolering is een vorm van pijpleidingtransport. Per jaar wordt bij de rioolzuiveringsinstallaties 2 miljard m³ afvalwater aangevoerd. Met betrekking tot de rioolzuiveringsinstallaties is er een trend gaande naar minder installaties met een grotere capaciteit. Het aantal installaties is daardoor gedaald van 449 in 1992 tot 409 in 1998. (CBS Statline) Deze ontwikkeling leidt tot grotere afstanden waarover het afvalwater getransporteerd wordt.

Voor aardgas ligt er net als voor water een landelijk distributienetwerk. Het verschil met de distributie van drinkwater is echter dat aardgas slechts op een klein aantal plaatsen aan het netwerk wordt toegevoegd, zodat de afgelegde afstand van aardgas gemiddeld hoger ligt dan voor water. De Nederlandse Gasunie beschikt over een 11.630 km⁸ lang hoofdtransportnet waarmee aardgas onder een druk van 67 bar over lange afstanden door Nederland getransporteerd wordt. In figuur 4.2 is de ligging van dit netwerk in Nederland weergegeven. Voor regionale distributie ligt in Nederland een netwerk van 40 bar en 6 bar gasleidingen met een gezamenlijke lengte van 31.000 km. Lokale distributie naar huishoudens vindt plaats via een 84.500 km lang lagedruknet met een gasdruk van maximaal 0,1 bar. Hierdoor wordt 97% van alle huishoudens in Nederland van aardgas voorzien. (EnergieNed, 2000) De hoeveelheid gedistribueerd aardgas wordt sterk beïnvloed door het weer. Daardoor varieert de vervoerde hoeveelheid aardgas over het jaar. Van de 80,9 miljard m³ aardgas die in 1999 getransporteerd werd, is 10,5 miljard m³ in de maand december vervoerd tegen slechts 4,0 miljard m³ in augustus (CBS Statline)⁹.

⁸ Lengtes van aardgasleidingen voor 1999.

⁹ De getransporteerde hoeveelheid aardgas wordt gelijk gesteld aan het binnenlands verbruik plus de geëxporteerde hoeveelheid. Volgens de aardgasbalans is dit gelijk aan de levering aan aardgashandelaren plus de ingevoerde hoeveelheid minus de mutatie van de voorraad.



Figuur 4.2: Het Nederlandse hoofdtransportnet van aardgas en het buisleidingnet voor industriële grondstoffen en producten per 1 januari 1996. Weergegeven zijn het hoofdtransportnet voor aardgas (lichtblauw), buisleidingen voor ruwe aardolie en aardolieproducten (donkerblauw), en buisleidingen voor chemische en overige producten (rood). Bron: AVV, 1997b

Pijpleidingen worden ook gebruikt voor de distributie van warm water via warmtenetten. Van de Nederlandse huishoudens is 3% voor de warmtevoorziening aangesloten op een warmtenet. Ook kastingen maken voor de verwarming in toenemende mate gebruik van warmte dat door warmtenetten wordt geleverd. Door de warmtenetten wordt water onder een druk van 10 bar en met een temperatuur van 100 °C getransporteerd. De omvang van het warmtenet is al geruime tijd aan het groeien. In 1999 bestond het warmtenet uit een transportnet van 475 km en een distributienet van 2600 km. (EnergieNed, 2000) De distributie van warmte gebeurt voornamelijk voor het beter benutten van de restwarmte van industrie en elektriciteitscentrales. Warmtenetten zijn daarom meestal lokale netwerken, waarbij het warme water slechts een kleine afstand hoeft af te leggen. Op de distributie van warmte door warmtenetten zal in dit rapport niet verder worden ingegaan. Het gaat hier immers om het transport van een vorm van energie en betreft dus geen goederentransport.

De pijpleidingnetwerken voor niet-huishoudelijke bulkgoederen zijn in Nederland geconcentreerd rond de haven van Rotterdam. Het interne pijpleidingnetwerk van de Rotterdamse haven heeft een totale lengte van meer dan 1200 km. Het jaarlijkse totaal per pijpleiding vervoerde gewicht ligt rond de 60 miljoen ton. Een ongeveer gelijke hoeveelheid wordt per jaar via pijpleidingen naar het

achterland getransporteerd. (Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam, 2001) In figuur 4.2 is een overzicht weergegeven van het pijpleidingennetwerk in Nederland.

Ruwe aardolie is het meest per pijpleiding getransporteerde niet-huishoudelijke bulkgoed. In 1996 bedroeg het aandeel van ruwe aardolie in de totale hoeveelheid per pijpleiding vervoerde industriële grondstoffen en producten 75 massa-% (AVV, 1997c). De vervoersprestatie in 1999 van pijpleidingen voor ruwe aardolie was 4,54 mld. tonkilometer. In 1998 nam het ruwe-aardolietransport per pijpleiding 2,4% van de totale Nederlandse vervoersprestatie voor zijn rekening. (CBS, 2000b) Het centrum van het pijpleidingennetwerk wordt gevormd door de Europoort terminal van waaruit pijpleidingen naar andere terminals en raffinaderijen in het Rijnmondgebied lopen. Naast het interne pijpleidingennetwerk in het Rotterdamse havengebied, zijn er drie belangrijke aardoliepijpleidingen in Nederland: een leiding van de Europoort terminal naar de Total raffinaderij in Vlissingen met een diameter van 24 inch, een 34 inch pijpleiding van Europoort naar Antwerpen en een 36 inch pijpleiding van Europoort naar het Ruhrgebied (Lyons, 1992). Het Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam verwacht voor de periode van 1995 tot 2020 een toename van de per pijpleiding getransporteerde hoeveelheid ruwe aardolie van 2% à 11% (Deelen et al., 1999).

Na water, aardgas en ruwe aardolie worden vloeibare brandstoffen het meest per pijpleiding vervoerd. In de jaren '50 werd door de NAVO om militair strategische redenen een begin gemaakt met de aanleg van pijpleidingstelsels voor de distributie van kerosine. In Nederland werd een deel van het Central European Pipeline System (CEPS) aangelegd. Het CEPS is een 6000 km lang pijpleidingennetwerk dat naast Nederland ook door Frankrijk, België, Luxemburg en Duitsland loopt. Het Nederlandse deel van het netwerk staat onder beheer van de Defensie Pijpleiding Organisatie van de Koninklijke luchtmacht. Het pijpleidingstelsel wordt gevoed door raffinaderijen en tankopslagbedrijven. De kerosine wordt via het netwerk zowel aan militaire als aan civiele gebruikers geleverd. (Ministerie van Defensie, 2001) Zo wordt Schiphol sinds 1995 van kerosine voorzien via een speciale aftakking van het NAVO-netwerk. Omdat deze pijpleiding een te kleine capaciteit bleek te hebben, werd in 1999 een tweede pijpleiding in gebruik genomen tussen Schiphol en de Amsterdamse Amerika-haven. (Tops, 1999)

Een ander product van de petrochemische industrie dat veel per pijpleiding wordt getransporteerd is ethyleen. Het bestaande common carrier netwerk verbindt enkele chemische fabrieken in Nederland, België en Duitsland. Het netwerk heeft dus een sterk internationaal karakter. De pijpleidingen worden beheert door het Aethylen Rohrleitungs Gesellschaft (ARG), een dochteronderneming van enkele grote chemieconcerns. In Nederland is het pijpleidingennetwerk beperkt tot de verbinding Rijnmond-Moerdijk-Antwerpen. Moerdijk is een belangrijk productiecentrum van ethyleen (NEA en Haskoning, 1993).

Voor ethyleen is uitgebreid onderzoek gedaan naar de realisatie van een nieuwe pijpleiding van Rotterdam naar Delfzijl. In Noord-Groningen kan het ethyleen gebruikt worden bij de nog op te zetten productie van magnesium. Magnesium wordt geproduceerd uit magnesiumchloride, wat bij Veendam uit de grond wordt gehaald. Bij de productie van magnesium ontstaat chloor als een bijproduct. Dit chloor kan met ethyleen worden omgevormd tot ethyleen-dichloride (EDC), een grondstof voor kunststof. Het ethyleentransport wordt van groot belang geacht voor de industriële ontwikkeling van de provincie Groningen. Bovendien zal door de verwerking in Groningen van het bij de magnesiumproductie vrijgekomen chloorgas tot EDC, het huidige betwiste chloortransport van Delfzijl naar het Botlek-gebied beëindigd worden. (Van den Houten, 1999)

Er zijn echter een aantal onzekerheden met betrekking tot de behoefte van ethyleen in Groningen. De voor de productie van EDC benodigde hoeveelheid ethyleen is te klein om een ethyleenleiding op milieu- en economisch gebied te laten concurreren met andere transportmiddelen (Chem systems, 1999). Er zullen dus meer ethyleenverbruikende industriële activiteiten nodig zijn. Bovendien is de vestiging van de EDC-fabriek zelf ook twijfelachtig omdat er in Europa al voldoende capaciteit voor EDC-productie aanwezig is. De IPOT (IPOT, 2000) concludeert dan ook dat dit project voorlopig niet kansrijk is.

Een ander petrochemisch product dat per pijpleiding getransporteerd wordt, is propyleen. De huidige propyleenpijpleidingen in Nederland vormen verbindingen tussen Rotterdam, Terneuzen en Antwerpen. In het kader van de IPOT is onderzoek gedaan naar de haalbaarheid van een propyleenleiding die het propyleennetwerk in Nederland en België verbindt met dat van het Ruhrgebied. Hierbij ontstaat dan een groot common carrier netwerk. Uit het onderzoek bleek dat een dergelijke verbinding in principe haalbaar is (ARG, 1999). Realisatie van de propyleenleiding heeft weinig directe gevolgen voor de vervoersprestatie van pijpleidingen in Nederland, omdat het gekozen traject voornamelijk in België en Duitsland ligt en slechts in Limburg over een kleine afstand het Nederlandse grondgebied doorkruist. Wel moet er rekening mee worden gehouden dat deze internationale verbinding een positief effect heeft op de ontwikkeling van het binnenlandse propyleennetwerk. Zo heeft de gasterminal in Vlissingen bekend gemaakt dat het een aansluiting op het netwerk overweegt om zijn marktpotenties te vergroten (IPOT, 2000).

Andere pijpleidingen voor industrieel gebruik vervoeren onder andere nafta, butaan en industriële gassen. Van deze laatste categorie liggen in Nederland, België en Noord Frankrijk pijpleidingnetwerken voor het transport van waterstof, zuurstof en stikstof. Hierbij is vooral de verbinding Rijnmond-Moerdijk-Antwerpen van belang. Daarnaast zijn Zuid Limburg (waterstof en zuurstof) en Terneuzen (waterstof) op het netwerk aangesloten. Een nafta-leiding is aanwezig tussen Rotterdam en Geleen. (NEA en Haskoning, 1993; Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam, 2001)

In tabel 4.1 is een overzicht gegeven van de verschillende pijpleidingnetwerken en de hoeveelheden die daarover vervoerd worden. Over het algemeen is weinig bekend over de vervoersprestatie van de verschillende pijpleidingen. Alleen voor ruwe aardolie en aardolieproducten zijn de vervoersprestaties in transportstatistieken opgenomen, zij het alleen voor het grensoverschrijdende pijpleidingtransport. Voor drink- en industriewater is de vervoersprestatie berekend in bijlage 4. De vervoerde hoeveelheden van de verschillende producten zijn beter bekend, evenals de omvang van de pijpleidingnetwerken.

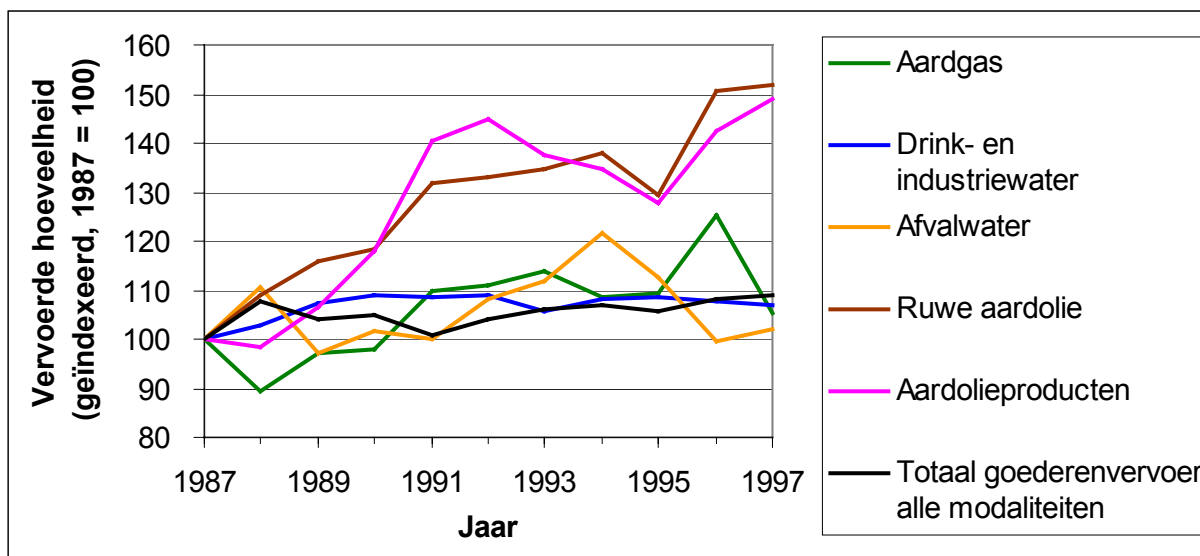
Tabel 4.1: Netwerklengte, vervoerde hoeveelheid en vervoersprestatie voor traditioneel pijpleidingtransport van verschillende producten en productgroepen.

Product	Jaar	Netwerklengte (km)	Vervoerde hoeveelheid (ton)	Vervoersprestatie (tonkm)	Bron
Drink- en industriewater ¹⁰	1995	100.000	1,29 mld.	13 mld.	1
Afvalwater	1998	n.b.	2,0 mld.	n.b.	2
Aardgas	1999	115.500	69,6 mln.	n.b.	3
Ruwe aardolie ¹¹	1999	530*	43,0 mln.	4,54 mld.	4
Aardolieproducten ¹¹	1999	Gezamenlijk ca.	9,6 mln.	1,47 mld.	4
Energiegassen ¹¹	1996	1480*	3,2 mln.	n.b.	5
Chemische basisproducten ¹¹	1996		1,4 mln.	n.b.	5

Bronnen: 1 = op basis van VEWIN, 1998 en Van Gaalen en Mülschlegel, 2000; 2 = Stichting RIONED, 2001; 3 = EnergieNed, 2000; CBS Statline; 4 = CBS, 2000b; 5 = AVV, 1997c.
* = (jaar = 1990, bron = NEA/Haskoning, 1993)

¹⁰ De in de tabel weergegeven netwerklengte voor drink- en industriewater omvat alleen het transport- en hoofdleidingnet.

¹¹ Uitsluitend grensoverschrijdend transport.



Figuur 4.3: Historische ontwikkeling van het pijpleidingtransport van enkele goederen in vergelijking tot het totale binnenlandse goederentransport. Bronnen: CBS Statline; VEWIN waterleidingstatistiek, verschillende jaargangen; CBS waterkwaliteitsbeheer, verschillende jaargangen; CBS maandstatistiek verkeer en vervoer, verschillende maandgangen; AVV, 1997a.

In figuur 4.3 is de ontwikkeling van het pijpleidingtransport en van het totale goederentransport over de tijd weergegeven. Hieruit blijkt dat vooral voor ruwe aardolie en aardolieproducten het pijpleidingtransport sterk is gestegen. Voor het pijpleidingtransport van aardgas, drink- en industriewater en afvalwater ligt de algemene trend van de ontwikkeling in de buurt van de ontwikkeling van het totale goederenvervoer.

Een prognose voor de toekomstige ontwikkeling van pijpleidingtransport wordt voor industriële producten gegeven door het Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam (Deelen et al., 1999). Deze prognose betreft de ontwikkeling van de per pijpleiding vervoerde hoeveelheid voor het 'Global Competition'-scenario en het door het RIVM minder plausibel geachte (RIVM, 2000) 'Divided Europe'-scenario in de periode tot 2020. In tabel 4.2 is deze prognose weergegeven. Hieruit blijkt vooral voor chemische producten de vervoerde hoeveelheid sterk te stijgen.

Tabel 4.2: Prognose per pijpleiding vervoerde hoeveelheid (mln. ton). Bron: Deelen et al., 1999.

	1995	Global Competition		Divided Europe	
		2010	2020	2010	2020
Ruwe aardolie	46,3	46,8	47,0	49,6	51,6
Aardolieproducten	11,0	13,8	14,5	13,7	15,1
Chemische producten	0,3	2,1	4,5	0,9	1,3
Totaal	57,6	62,6	65,9	64,2	68,0

4.2.3 Extra-traditioneel pijpleidingtransport

Traditioneel pijpleidingtransport wordt vooral voor huishoudelijke en chemisch industriële doeleinden gebruikt. Voor extra-traditioneel pijpleidingtransport wordt daarentegen vooral gekeken naar het vervoer van agrarische bulkgoederen. Als geschikte agrarische goederencategorieën worden in het IPOT-onderzoek onder andere suikerbieten, veevoeder, meststoffen, oliën en vetten aangewezen (NEA/DHV, 1998). In de door NEA en DHV uitgevoerde studie wordt de beperkte geografische flexibiliteit als een belangrijk nadeel voor pijpleidingtransport van landbouwproducten aangewezen. Gewassen groeien over het algemeen op verspreid liggende en jaarlijks wisselende percelen. Het gebruik van pijpleidingen in de landbouwsector is daarom alleen geschikt voor interregionaal vervoer. (NEA/DHV, 1998)

Pijpleidingen worden momenteel op beperkte schaal voor agrarische toepassingen gebruikt. Zo ligt er voor het transport van melk een pijpleiding tussen Ameland en Friesland. Op de Veluwe wordt kalvermest per buisleiding vervoerd. (NEA en Haskoning, 1993) Om de CO₂-emissie te reduceren kunnen buisleidingen gebruikt worden om door de industrie geproduceerde CO₂ naar kastuinders te transporteren. Om de groei van de gewassen te stimuleren wordt in de glastuinbouw CO₂ geproduceerd door gas te stoken. In de zomermaanden hoeft de hierbij ontstane warmte niet worden gebruikt voor de verwarming van de kassen. Als CO₂ van de industrie door kastuinders gebruikt kan worden, dan vervalt voor hen daarmee de noodzaak om in de zomermaanden gas te stoken. Voor de aanleg van CO₂-buisleidingen zijn enkele plannen uitgewerkt, waarvoor door de overheid subsidies zijn toegezegd. (IPOT, 1999)

Vaste bulkgoederen die met extra-traditionele pijpleidingen vervoerd kunnen worden, zijn onder andere steenkool, cokes, cement en kalk. Deze bulkgoederen moeten eerst vermalen worden alvorens zij per slurripijpleiding vervoerd kunnen worden. Bovendien moet de suspensie na het transport ontwaterd worden. Vanwege deze processen neemt de efficiëntie van het slurripijpleidingstransport toe naarmate de afstand waarover getransporteerd wordt groter is. Het transport per slurripijpleiding is daarom alleen geschikt voor het vervoer over grote afstanden. Gezien de aard van de voor slurripijpleiding geschikte bulkgoederen zal eventuele toepassing van deze transportmethode voornamelijk de vorm van point-to-point pijpleidingen hebben. Het transport zal dan plaatsvinden ten dienste van een continuproces, zoals voor de bevoorrading van een elektriciteitscentrale. Een aantal van de voor slurripijpleidingstransport geschikte goederen komen ook in aanmerking voor andere vormen van ondergronds transport, zoals CLP.

4.3 Capsule-pijpleidingstransport

4.3.1 Pneumatisch capsule-pijpleidingstransport

De grotere pneumatische capsule-pijpleidingen (PCP) zijn in het verleden voornamelijk gebruikt voor het transport van bulkgoederen, zoals delfstoffen en vuilnis. Het gaat hierbij om point-to-point systemen waarbij grote hoeveelheden met een grote regelmaat vervoerd worden. De snelheid van deze systemen ligt rond de 25 km/h (Brouwer et al., 1997b). De bestaande systemen hebben als nadelen dat zij een beperkt bereik en een kleine capaciteit hebben. PCP-systemen lopen altijd rond, omdat de capsules weer terug moeten worden getransporteerd naar het beginpunt.

Nieuw ontwikkelde PCP-systemen, die worden aangedreven door lineaire motoren, zijn ontworpen voor het behalen van hogere snelheden. Bij hoge snelheden levert het meezuigefect van de capsules energetische voordelen op ten opzichte van niet-pneumatische systemen. Onderzoek hiernaar vindt vooral plaats in de Verenigde Staten, waar PCP-transport gezien wordt als een alternatief op lange termijn voor intercontinentaal goederentransport (Brouwer et al., 1997b). Daar zijn systemen met zeer hoge snelheden en grote buisdiameters voor nodig. Voor minder lange termijn wordt gekeken naar kortere afstanden, zoals stedelijke distributienetwerken (Sinfield en Einstein, 1998), intercity-transport (Liu, 2000a) en interregionaal transport (Roop en Bierling, 2000). Het voornaamste voordeel van PCP ten opzichte van andere ondergrondse transportsystemen is de hogere snelheid waarmee het transport plaatsvindt (Vance en Mills, 1994). Een ander, maar voor Nederland minder belangrijk voordeel van PCP is de mogelijkheid om grotere hoogteverschillen te overwinnen (Kosugi et al., 2000).

Voor toepassing van ondergronds transport in Nederland wordt voor de korte en middellange termijn slechts gekeken naar lokaal en regionaal transport. Daar zijn geen hoge snelheden voor nodig. De reistijd wordt dan voor een groot deel bepaald door de benodigde tijd van het laden en lossen, zodat de invloed van de transportsnelheid op de reistijd klein is. Lage snelheden genieten over het algemeen de voorkeur uit het oogpunt van energiebesparing. PCP-systemen ondervinden bij lagere snelheden echter weinig energetische voordelen door het meezuigefect van de capsules, omdat bij lage snelheden de aërodynamica van het systeem veel minder van belang is voor het energiegebruik. Verder is het de vraag in hoeverre PCP-systemen geschikt zijn voor uitgebreide netwerken. Rangeren

van capsules vindt plaats door middel van elektromagnetische wisseltechnieken die centraal gecoördineerd worden (Vance en Mills, 1994). Dit beperkt de mogelijkheden om het systeem uit te breiden. PCP is bovendien ongeschikt voor fijnvertakte netwerken. Omdat tijdens de aandrijftijd van de capsule extra energie wordt gebruikt voor het in beweging zetten van de lucht in de buisleiding, is een lange uitrijdperiode nodig om een netto gunstig energieeffect te bereiken. Hiervoor zijn lange ononderbroken stukken buisleiding vereist.

Geconcludeerd kan worden dat PCP-systemen vooral geschikt zijn voor point-to-point verbindingen of weinig vertakte netwerken, waarbij hoge snelheden vereist zijn. Dit kan bijvoorbeeld het transport van bederfelijke goederen, zoals vlees, groente en fruit, maar ook van andere spoedeisende goederen, zoals post en pakketjes (ASCE, 1998). Momenteel lijken er in Nederland geen verbindingen aanwezig te zijn met voldoende grote vervoersstromen om de aanleg van een PCP-systeem te rechtvaardigen. Het ligt daarom niet in de lijn der verwachting dat de komende dertig jaar PCP-systemen in Nederland tot stand zullen komen.

4.3.2 Hydraulisch capsule-pijpleidingtransport

Hydraulische capsule-pijpleidingen (HCP) worden nog niet in de praktijk toegepast. De concepten die tot nu toe voor HCP ontwikkeld zijn, hebben allen betrekking op het transport van bulkgoederen. In tegenstelling tot PCP-systemen zijn HCP-systemen langzame transportsystemen. Hierdoor is HCP niet geschikt voor goederen waarbij de snelheid van het transport de belangrijkste factor is (zogenaamde tijdkritische goederen), maar voornamelijk voor goederen waarbij de kosten van het transport het meest van belang is (kostenkritische goederen).

Naast deze algemene eigenschap van HCP-systemen hebben de drie categorieën HCP alle hun eigen logistieke kenmerken. Het HCP met een duurzame container (dat is een meerdere malen bruikbare container) heeft altijd een rondlopende pijpleiding nodig, omdat de containers terug moeten worden gevoerd naar het beginpunt. Bij voorkeur zullen daarom trajecten worden aangelegd waarover in beide richtingen goederen vervoerd worden, zoals grondstoffen heen en eindproducten terug. CLP en HCP met eenmalige containers hebben slechts een enkele buisleiding nodig. Deze systemen zijn dus ook geschikt voor goederenstromen in één richting.

CLP en HCP met eenmalige containers zijn vooral geschikt voor langere afstanden. Bij CLP moeten voor het transport capsules uit de bulkgoederen worden geperst, waarvoor energie verbruikt wordt en kosten worden gemaakt. Bij transport over korte afstand kunnen deze kosten en energiegebruik niet terugverdiend worden met de voordelen die CLP heeft. HCP met eenmalige containers heeft als nadeel dat voor elk transport een nieuwe container gefabriceerd moet worden. Voor korte transporten kunnen kosten en energiegebruik daardoor hoog uitvallen. Voor lange transporten kan bij HCP met eenmalige containers het probleem ontstaan dat de containers verslijten voordat de bestemming bereikt wordt.

Voor het gebruik van CLP wordt een aantal eisen gesteld aan de te vervoeren goederen. Deze moeten tot waterbestendige en slijtvaste capsules geperst kunnen worden. Daarom is CLP uitsluitend geschikt voor het vervoer van een beperkt aantal bulkgoederen, zoals steenkool, cokes en vlieggas. Het gebruik van HCP met eenmalige containers stelt ook eisen aan de goederen. De reden hiervan is de druk die door de goederen op de containerwand moet worden uitgeoefend om vervorming van de capsule te voorkomen. Voor een constante en gelijkmatig verdeelde druk zijn bulkgoederen het meest geschikt.

HCP met een duurzame container is tot nu toe nog niet toegepast, met name vanwege de hoge investeringskosten. Het is nog onbekend of het gebruik van lineaire motoren hier verbetering in kan brengen. Op korte termijn is het daarom onwaarschijnlijk dat HCP met duurzame containers in Nederland zal worden toegepast. Op langere termijn kan HCP met duurzame containers gebruikt worden voor het vervoer van bulkgoederen zoals graan, poedervormige chemicaliën, huisvuil en zand. Voor HCP met eenmalige containers bestaan er onzekerheden over de technische mogelijkheden. Indien dit systeem op termijn toch technisch haalbaar blijkt, dan zal het geschikt zijn voor point-to-point bulkgoederenvervoer over middellange afstand. CLP kan worden gebruikt voor point-to-point

transport over langere afstand van bulkgoederen zoals steenkool, cokes en vliegass. Hierbij valt bijvoorbeeld te denken aan de bevoorrading van een steenkoolgestookte elektriciteitscentrale.

4.4 Overige niet-traditionele transportsystemen

4.4.1 Inleiding

Bij de overige niet-traditionele ondergrondse transportsystemen kan voor de logistieke eigenschappen onderscheid worden gemaakt tussen railtransport, dual-mode transport en transport door automatisch geleide voertuigen (AGV). De logistieke eigenschappen van deze transportsystemen zullen in deze paragraaf afzonderlijk behandeld worden.

4.4.2 Railgebonden ondergrondse transportsystemen

Railtransport wordt al veel toegepast, zowel bovengronds in een uitgebreid en internationaal gekoppeld transportnetwerk als ondergronds in metrolijnen voor personenvervoer. De Londense Mail Rail is de enige actieve toepassing van ondergronds automatisch railtransport. De aard van de in het algemeen door bestaande bovengrondse railsystemen vervoerde goederen varieert zeer sterk: zowel bulk- als stukgoederen worden vervoerd. Daarom mag verwacht worden dat ondergrondse railsystemen eveneens voor veel type goederen gebruikt kunnen worden.

De railgebonden ondergrondse transportsystemen hebben als kenmerkende eigenschap dat zij op een mechanische wijze geleid worden. Voordelen hiervan zijn een lagere rolweerstand van de wielen en de relatief eenvoudige besturing, zodat de kosten per voertuig beperkt blijven. Daar staat tegenover dat de capaciteit van het transportsysteem gemeten in aantal voertuigen laag is in vergelijking tot niet-railgebonden transportsystemen. Dit komt door de lange remweg van railvoertuigen. Een manier om met het systeem toch meer goederen te kunnen transporteren, is het vervoeren van meer lading per voertuig. Dit heeft echter alleen een gunstig effect bij grote en constante goederenstromen tussen stations.

Railgebonden transport is minder geschikt voor fijnvertakte distributienetwerken. Hierbij zijn vaak kleine goederenstromen tussen veel distributiecentra, wat vraagt om een kleine capaciteit per voertuig. De capaciteit van het systeem als geheel neemt hierdoor af. Om de investeringen van de aanleg van het ondergrondse transportsysteem te rechtvaardigen, is echter een grote omzet nodig. Railgebonden ondergrondse transportsystemen zijn dus vooral geschikt voor kleine netwerken met grote goederenstromen tussen een beperkt aantal stations. De verschillende concepten die gebruik maken van railgebonden ondergronds goederenvervoer, zoals de Mail Rail, HSTT, Tokyo L-net en het eerst ontworpen UFTS, zijn allen relatief oude concepten. Van deze concepten is alleen de Mail Rail daadwerkelijk geïmplementeerd, maar voor dit systeem waren recent plannen om het om te bouwen tot een systeem met AGV's. Voor UFTS is het concept van een railgebonden transportsysteem verlaten ten gunste van de meer flexibelere Dual Mode Trucks. Het railgebonden ondergronds transport lijkt dan ook weinig kansen te hebben voor toekomstige implementatie.

4.4.3 Dual Mode Trucks

Dual Mode Trucks (DMT) zijn vrachtvoertuigen die zelfstandig over speciaal daarvoor bestemde ('dedicated') infrastructuur kunnen rijden en daarnaast ook met een chauffeur van de openbare weg gebruik kunnen maken. Voor ondergronds goederenvervoer wordt alleen in het Japanse UFTS-concept gebruik gemaakt van DMT's. Dit concept is inmiddels voor toepassing gereed. In Nederland is het Combi-Road concept een bovengronds voorbeeld van DMT. Bij Combi-Road worden DMT's gebruikt voor het transport van containers.

Het grote logistieke voordeel van DMT's ten opzichte van andere ondergrondse transportsystemen is de mogelijkheid om gebruik te maken van bestaande infrastructuur. Hierdoor hebben DMT-systemen een groter bereik en kunnen zij zonder overslag deur-tot-deur transport uitvoeren in een wijde marge

rondom het ondergrondse netwerk. Doordat DMT's over bestaande infrastructuur kunnen rijden, hoeft het ondergrondse netwerk minder fijn vertakt te zijn. Omdat DMT's het formaat hebben van een (weliswaar kleine) vrachtauto is een ondergronds buisleidingstelsel met een relatief grote buisdiameter vereist. Hierdoor is DMT vooral geschikt voor het transport van grote laadeenheden. Indien vooral kleine laadeenheden vervoerd moeten worden dan zal het financieel voordeliger zijn om een andere vervoersmethode te kiezen en daarvoor een fijner vertakt netwerk met een kleinere buisdiameter aan te leggen. Het blijkt namelijk dat de kosten van een tunnel over het algemeen kwadratisch toenemen met de diameter (Sinfield en Einstein, 1998).

Transport ten behoeve van stedelijke distributie van stukgoederen kan meestal plaatsvinden in kleine laadeenheden (Sanders et al., 1998; Boerkamp, 2000), zodat DMT hier niet geschikt voor is. Voor industrieel transport worden wel vaak grote ladingdragers gebruikt, maar hierbij is vaak sprake van regelmatige en continue goederenstromen waarbij de flexibiliteit van DMT geen voordeel oplevert. Voor industrieel transport is meestal een directe aansluiting op de toegewijde infrastructuur mogelijk. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de toepassing van DMT voor ondergronds goederentransport in Nederland onwaarschijnlijk is.

4.4.4 Automatisch geleide voertuigen

Voor ondergronds transport met automatisch geleide voertuigen zijn twee concepten bekend, namelijk het Nederlandse OLS en het Britse Metro Freight. Hieronder worden eerst de algemene logistieke kenmerken van AGV's beschreven. Daarna wordt voor het industriële OLS en voor het stedelijke OLS afzonderlijk een beschrijving gegeven van de algemene opbouw van het systeem en van enkele specifieke trajecten.

Zoals in hoofdstuk 3 al is beschreven, zijn AGV's voertuigen met enige mate van autonomie over hun routing. Hiervoor bezitten zij een intern navigatiesysteem, die met behulp van sensoren de positie en oriëntatie van het voertuig bepaalt en obstakels op de baan detecteert. De AGV's worden in de terminals centraal gecoördineerd door een overkoepelend besturingssysteem. De besturingssystemen van de verschillende terminals kunnen onafhankelijk van elkaar werken. Dit maakt het eenvoudiger om een bestaand OLS uit te breiden. Deze lange-termijnflexibiliteit is een groot voordeel van een OLS met AGV's. Het systeem is daarnaast ook op korte termijn heel flexibel: doordat de AGV's zich zelf besturen, kunnen zij gemakkelijk naar het juiste laadperron gerangeerd worden en kan snel geanticipeerd worden op onverwachte gebeurtenissen in de terminal. (Verbraeck et al., 2000)

De flexibiliteit maakt systemen met AGV's geschikt voor transporten met steeds wisselende herkomsten en bestemmingen. Over het algemeen is dit het geval bij stukgoederenvervoer. Vanwege de ongehinderdheid van het vervoer kan voor het transport met AGV's de overkomstduur van de goederen nauwkeurig worden bepaald. Dit maakt AGV-transport geschikt voor het transport bij just-in-time leveranties. Bij just-in-time leveranties worden goederen net voordat zij nodig zijn afgeleverd, waardoor opslagkosten bespaard worden. Dit vereist een goede planning van het transportproces. Just-in-time leveranties komen steeds vaker voor, met name doordat ontwikkelingen in de informatietechnologie producenten in staat stellen hun value chain¹² beter te integreren met de value chains van leveranciers en afnemers (Porter en Millar, 1985).

De AGV's die voor het OLS ontwikkeld zijn, kunnen een snelheid van maximaal 36 km/h halen (Pielage, 2000). Vanwege deze lage snelheid zijn zij vooral geschikt voor niet-tijdkritische goederen of voor transport over korte afstanden, waarbij de reistijd slechts een klein deel van de totale overkomstduur in beslag neemt. De voertuigen van het Metro Freight concept kunnen een snelheid van 100 km/h bereiken (Sanders et al., 2000). Bij deze snelheid is wel transport van tijdkritische goederen over grotere afstand mogelijk. Zoals eerder vermeld kunnen de verschillende trajecten waarin OLS wordt toegepast, worden onderverdeeld in industriële verbindingen en stedelijke

¹² Value chain: het geheel aan technische en economische activiteiten die samen de werkzaamheden van een onderneming vormen.

distributienetwerken. Deze twee categorieën zullen nu achtereenvolgens behandeld worden, waarbij ook potentiële netwerken omschreven worden.

Industriële OLS

De industriële verbindingen zijn over het algemeen point-to-point verbindingen voor grote vervoersstromen over een korte afstand. Het initiatief voor het OLS ligt bij de direct belanghebbende private partijen. Omdat de trajecten van dit type OLS een relatief kleine omvang hebben en er weinig partijen bij betrokken zijn, is een industriële OLS meestal sneller en gemakkelijker te realiseren dan een stedelijk OLS. Voor de mogelijke realisatie van een industriële OLS spelen de financiële aspecten een grote rol. De beperkte maatschappelijke effecten van het systeem leiden ertoe dat de overheid bij de totstandkoming van het OLS slechts een kleine rol zal spelen. Grote subsidies liggen dan ook niet voor de hand. Voor industriële toepassing van OLS zijn enkele trajecten bestudeerd. Hiervan is alleen de ontwikkeling van het OLS Schiphol in een vergevorderd stadium.

Het idee voor het OLS Schiphol stamt uit 1994 en is daarmee het eerste plan voor een OLS. Het betreft de realisatie van een verbinding tussen de luchthaven Schiphol en de bloemenveiling in Aalsmeer voor het transport van bloemen (OLS, 2001). Dit transport verloopt nu nog met vrachtwagens, maar deze lopen steeds vaker vertraging op door congestie op de openbare wegen. Later is aan het trajectontwerp een aansluiting op een nieuw te bouwen railterminal (waarschijnlijk bij Hoofddorp) toegevoegd. Hiermee worden de bloemenveiling en Schiphol aangesloten op een internationaal netwerk van hoge-snelheidsgoederentreinen. Een haalbaarheidsonderzoek heeft aangetoond dat het OLS Schiphol een kansrijke optie is (IPOT, 2000). Er is echter wel een bijdrage nodig van de rijksoverheid voor de totstandkoming van de infrastructuur. Deze subsidie zal ongeveer f 300 mln. (€ 136 mln.) moeten bedragen tegen circa f 600 mln. (€ 272 mln.) investeringskosten. Argumenten voor deze bijdrage zijn vermindering van de (lokale) congestie, stimulering van het railtransport vanwege de aansluiting van Schiphol op een railterminal en de mogelijkheid om als pilot-project voor OLS te dienen.

Voor het project zijn inmiddels al ontwerpen opgesteld voor de infrastructuur, de wijze van exploitatie en de financiering. Het oorspronkelijke traject loopt van de bloemenveiling in Aalsmeer via Schiphol naar een railterminal in Hoofddorp (IPOT, 1999). Van dit 13 km lange tracé bestaat de helft uit een dubbele buisleiding. Een andere mogelijkheid is de bouw van een ondergrondse railterminal onder Schiphol. Hiervoor is een traject ontworpen waarmee ook intern transport binnen Schiphol mogelijk is. (COB, 2000) Om het vervoer van bij de bloemenveiling en op Schiphol gebruikte transporteenheden mogelijk te maken zal de diameter van de buisleiding circa 5 meter bedragen (OLS, 2001). Het grootste te vervoeren transporteenheid is het vliegtuigpallet, waarvan er per AGV één vervoerd kan worden. Andere te vervoeren transporteenheden zijn Euro/industrie pallets, Deense karren¹³ en veilingkarren van de bloemenveiling; hiervan kunnen er meerdere in een AGV vervoerd worden. (Pielage, 2000)

Om het ruimtegebruik in het Rotterdamse havengebied te intensiveren is de mogelijkheid voor een OLS Rijnmond onderzocht. Hierbij wordt een zoveel mogelijk ondergronds OLS gebruikt voor de verbinding van bedrijven aan de Merwehaven met een centraal overslagpunt naar rail- en wegvervoer. De Merwehaven wordt vooral gebruikt voor de overslag van fruit. Vanaf het overslagpunt zal dit fruit door hoogwaardige internationale distributie worden afgevoerd. Door het traject zoveel mogelijk ondergronds aan te leggen, kan de vrijgekomen ruimte gebruikt worden voor opslagfaciliteiten. (Koet et al, 2000)

Vanwege de grote nadruk op bedrijfseconomische aspecten wordt voor industriële toepassing van OLS vaak een zoveel mogelijk bovengronds traject gekozen. In de gevallen van het OLS Zuid Limburg bij Geleen en het OLS Twente tussen Hengelo en Enschede is zelfs sprake van een vrijwel

¹³ Deense karren zijn verrijdbare ladingdragers met afmetingen 135 x 57 x 240 cm (lengte x breedte x hoogte) die voorzien is van horizontale schappen waarop kleine stukgoederen vervoerd kunnen worden.

volledig bovengronds traject. Voor het OLS Zuid Limburg zijn eerdere plannen voor ondergrondse transportsystemen bij DSM bedrijfseconomisch niet haalbaar gebleken. Daarom is een OLS bedacht waarbij een bovengrondse verbinding tussen Nedcar, DSM en twee distributiecentra voorgesteld wordt. (IPOT, 2000) Op deze bovengrondse systemen wordt in dit rapport niet dieper ingegaan. Zij zijn slechts illustratief voor de financiële moeilijkheden waarmee het ondergronds aanleggen van infrastructuur vaak te maken heeft.

Stedelijk OLS

Een stedelijk OLS zorgt voor de distributie van stukgoederen naar bestemmingen in de stad. Om de kosten van het transport te verlagen wordt gebruik gemaakt van het principe van bundeling van goederenstromen. Bij bundeling worden de goederen voor een bestemming eerst zoveel mogelijk verzameld in één ladingdrager, waarna deze ladingdragers in zo weinig mogelijk voertuigritten zoveel mogelijk over dezelfde infrastructuur vervoerd worden. Hierdoor worden de beladinggraden van zowel de ladingdragers, de voertuigen als de infrastructuur zo hoog mogelijk gehouden, waardoor zowel de investeringskosten als de operationele kosten geminimaliseerd worden.

Om de goederenstromen te bundelen heeft een stedelijk OLS een meestal aan de stadsgrens liggend logistiek stadspark (LSP). Een LSP is een knooppunt waarbij overslag van wegvervoer en spoorvervoer naar het OLS (en omgekeerd) mogelijk is. Voor een LSP wordt een locatie gekozen die meestal net buiten de stad ligt en waar infrastructuur van verschillende modaliteiten (zoals snelwegen, spoorwegen en vaarwegen) bij elkaar komen. In een LSP worden de goederen gesorteerd op bestemming waarna zij door AGV's via het buisleidingstelsel naar een wijkdistributiewinkel (WDW) worden afgevoerd. Een WDW is een kleine terminal waar de goederen uit de AGV worden geladen en deze vervolgens eventueel via natransport hun bestemming bereiken. De WDW's liggen met een onderlinge afstand van maximaal 500 meter langs de buisleiding. Bij de locatiekeuze wordt de benodigde natransport geminimaliseerd. (Brouwer et al., 1997b)

Voor de logistiek van een OLS is ook de netwerkstructuur van groot belang. De ringvorm blijkt het meest geschikt te zijn om te dienen als basisvorm voor de netwerkstructuur. Ten opzichte van andere mogelijke basisstructuren, zoals een sterstructuur en een webstructuur, heeft de ringstructuur als voordeel dat een enkele buisleiding tussen de WDW's voldoende is. Dit maakt de totale buislengte kleiner en bespaart daardoor investeringskosten. Bovendien zijn er bij een ringstructuur geen wisselpunten in het netwerk aanwezig waardoor de besturing van het systeem eenvoudiger wordt en minder snel opstoppingen ontstaan. Een nadeel van een ringvormig netwerk is dat ten opzichte van andere structuren de verbinding tussen het LSP en de WDW's gemiddeld langer is, wat een grotere overkomstduur van de goederen tot gevolg heeft. Dit nadeel werd als minder belangrijk geacht dan de voordelen van de ringstructuur, mede omdat de overkomstduur vooraf wel al nauwkeurig kan worden ingeschat. (Brouwer et al., 1997a)

Uit de haalbaarheidsstudies van enkele concrete trajecten voor stedelijke OLS bleek dat de afzonderlijke ondergrondse stedelijke distributienetwerken niet kansrijk zijn zonder een interlokaal netwerk dat de verschillende stedelijke netwerken met elkaar verbindt. Dit interlokaal netwerk kan bestaan uit een bovengronds OLS, maar er kan ook een verbeterd netwerk van bestaande modaliteiten voor gebruikt worden. Voor de potentiële vervoersprestatie van de afzonderlijke OLS is het van groot belang hoeveel steden op het netwerk zijn aangesloten. Doordat nieuw aan het netwerk toegevoegde stedelijke OLS met steeds meer andere steden via het OLS goederen kunnen uitwisselen, zal er in de beginfase van het OLS sprake zijn van een toenemende marginale netwerkpotentie¹⁴. De rendabiliteit van het OLS neemt daardoor toe naarmate de omvang van het netwerk groter is. Bij de eventuele invoering van stedelijk OLS zullen dus zoveel mogelijk steden aan het netwerk moeten worden toegevoegd. (Van der Heijden et al., 1999)

¹⁴ De netwerkpotentie van een OLS-netwerk is de gezamenlijke potentiële vervoersprestatie van de afzonderlijke lokale OLS.

Voor grootschalige distributienetwerken zoals een landelijk OLS, is ook de internationale afstemming van belang. Naast het Nederlandse OLS zijn in Europa nog andere ondergrondse transportsystemen ontwikkeld, namelijk het Britse Metrofreight (Bliss, 2000) en een capsule-pijpleiding voor containertransport in het Ruhrgebied (Stein en Schoesser, 2000). Om in de toekomst een koppeling tussen ondergrondse distributienetwerken in verschillende landen mogelijk te maken, moeten bij voorkeur al voor de implementatie van de transportsystemen internationale afspraken worden gemaakt over de compatibiliteit van de verschillende systemen.

Voor verschillende steden in Nederland zijn netwerken voor stedelijke OLS ontworpen en op financiële haalbaarheid onderzocht. Het gaat daarbij om de steden Den Haag, Utrecht, Leiden en Tilburg. Daarnaast is er voor de agglomeratie Arnhem/Nijmegen een regionaal OLS bestudeerd. De vijf OLS en hun haalbaarheidsonderzoek zullen in het resterende deel van deze paragraaf worden beschreven.

Het eerste onderzochte stedelijk OLS is het Ondergronds Logistiek Transportsysteem (OLT) Den Haag. Hier werd in 1998 een haalbaarheidsonderzoek voor gedaan. Het OLT Den Haag heeft een circa 40 lange dubbele buisleiding in een ringvormig traject. Deze verbindt 12 distributiecentra in Den Haag en enkele randgemeenten met een LSP. Per etmaal wordt 100.000 m³ aan goederen getransporteerd. Voor het transport worden europallets gebruikt, waarvan er vijf in een ladingdrager vervoerd kunnen worden. In totaal zal het systeem over 625 ladingdragers beschikken. Omdat er vanuit gegaan wordt dat de goederen binnen een uur bezorgd moeten worden, is de maximumsnelheid van de voertuigen op 50 km/h gesteld. (Sanders et al., 1998)

In Utrecht is een haalbaarheidsstudie uitgevoerd naar een OLS dat de goederenstromen van en naar het stadscentrum en de nieuwbouwwijk Leidsche Rijn kan verzorgen. Voor het OLS Utrecht zijn drie trajecten mogelijk. Daarbij worden enkele WDW's in het centrale winkelgebied van Utrecht en een WDW in Leidsche Rijn verbonden met een LSP in het westelijke industriegebied van Utrecht. Voor het OLS Utrecht is uitgebreid onderzoek gedaan naar de omvang en de samenstelling van de goederenstromen in Utrecht. De totstandkoming van het OLS is nauw verweven met de realisatie van het Utrecht Centrum Project, waarbij grootschalige vernieuwing van het Utrechtse centrale winkelgebied gepland is. Dit project zal leiden tot een grote toename van de goederenstromen. Voor de totstandkoming van het OLS Utrecht is een overheidssubsidie nodig van circa 50% van de investeringskosten. Na een aanloopverlies zullen de goederenstromen groot genoeg zijn voor een winstgevende exploitatie. (IPOT, 1999)

Voor Leiden is er eveneens een haalbaarheidsstudie naar een stedelijk OLS gedaan. Het meest waarschijnlijke tracé voor dit OLS is een enkele ringleiding in de binnenstad die met dubbele buisleidingen zijn verbonden met twee LSP's aan de rand van de stad. Voor het OLS Leiden zijn twee LSP's nodig omdat er geen locatie beschikbaar is waar met een LSP op zowel een rail- als op een wegverbinding kan worden aangesloten. (Buck et al, 1999) De buisleidingen hebben een diameter van 2 meter, zodat rolcontainers en pallets vervoerd kunnen worden. De voor dit OLS geschikte goederenstroom van en naar de binnenstad bedraagt ca. 7000 m³ per week. Hiermee heeft het systeem een belasting van 25% van de capaciteit. (IPOT, 1999) Voor een rendabele exploitatie is het noodzakelijk dat de overheid de investeringskosten voor haar rekening neemt. Als argumenten voor deze overheidsbijdrage worden besparingen op bovengrondse infrastructuur, de gunstige invloed op het stedelijke leefklimaat en een versterking van de economische structuur van de stad genoemd. (Buck et al., 1999)

In Tilburg is een OLS onderzocht in de vorm van een lijnverbinding tussen een overslagcentrum bij het aan de rand van de binnenstad gelegen centraal station en een overslagstation in het centrum. Vanuit dit overslagstation worden de goederen bovengronds naar bestemmingen in het stadscentrum vervoerd. Het OLS maakt deel uit van een project om een winkelcomplex te vernieuwen en uit te breiden. (Rauwerdink, 2001)

Het OLS Knooppunt Arnhem/Nijmegen is een transportsysteem voor zowel industriële als stedelijke distributie. Voor dit OLS zijn twee netwerkvarianten ontworpen. De eerste variant heeft één centraal

gelegen LSP waarmee zowel Arnhem als Nijmegen worden ontsloten. Hierbij ontstaat dus een regionaal distributienetwerk dat Arnhem en Nijmegen met elkaar verbindt. De tweede variant heeft twee LSP's die elk met één van de twee steden verbonden is. Hierbij is dus in feite spraken van twee afzonderlijke OLS. Voor beide varianten zijn in elk van de stadscentra vier WDW's gepland. Met betrekking tot de haalbaarheid bleek het OLS slechts rendabel indien het aansluiting heeft op een landelijk netwerk. (IPOT, 1999)

In het algemeen blijkt het stedelijk OLS zeer hoge investeringskosten te hebben, zodat financiële hulp van de overheid noodzakelijk is voor de totstandkoming van een netwerk. De levensvatbaarheid van de afzonderlijke OLS wordt sterk vergroot door de verschillende netwerken onderling te verbinden. Voor het verbindende netwerk kunnen verschillende transportmodi gekozen worden. In de nabije toekomst is een uitgebreid netwerk niet erg waarschijnlijk, vanwege de hoge investeringskosten die een OLS met zich mee brengt. (IPOT, 1999) Op korte termijn zal stedelijke OLS vooral gebruikt kunnen worden in kleinschalige op maat gesneden netwerken. (DGG, 2001)

5. Directe milieueffecten en financiële kosten

5.1 Inleiding

In dit en het volgende hoofdstuk zullen de karakteristieke milieueffecten en kosten van verschillende ondergrondse transportmethoden behandeld worden. Hiervoor worden de milieueffecten en kosten onderverdeeld in enerzijds de effecten die veroorzaakt worden door de daadwerkelijk leveren van een vervoersprestatie (directe effecten) en anderzijds de effecten die veroorzaakt worden door andere activiteiten die nodig zijn voor het operationeel maken en houden van het transportsysteem (indirecte effecten). In dit hoofdstuk komen de directe effecten aan bod, de indirecte effecten worden in hoofdstuk 6 besproken.

In voorgaande onderzoeken, zoals de studies in het kader van het IPOT, is vooral aandacht besteed aan de directe effecten van ondergronds transport, zoals de voor de vervoersbewegingen benodigde brandstof. Aan de indirecte effecten, zoals effecten door constructie en onderhoud, is tot nu toe weinig aandacht besteed. Directe en indirecte effecten verschillen van elkaar voor het tijdstip waarop de effecten plaatsvinden. Een groot deel van de indirecte effecten vindt eenmalig plaats aan het begin van de levensduur van de infrastructuur. Deze eenmalige effecten kunnen wel aan de gehele levensduur van de infrastructuur worden toegerekend. De directe effecten daarentegen, vinden verspreid over de levensduur plaats en zijn bovendien afhankelijk van de getransporteerde hoeveelheid en de afstand waarover getransporteerd wordt. Daarom worden de directe effecten aan het jaar toegerekend waarin de vervoersprestatie plaatsvindt.

In de komende paragraaf wordt een toelichting gegeven op de invloed van het energiegebruik en de emissies op het milieu en op het aandeel dat verkeer en vervoer heeft in het totaal van het Nederlandse energiegebruik en de emissies. Daarna worden de directe effecten van elk van de verschillende ondergrondse transportmethoden en van de bovengrondse transportmethoden behandeld. De bovengrondse transportmethoden worden behandeld om te kunnen vergelijken met de ondergrondse transportmethoden en voor de scenario-analyse van hoofdstuk 7.

5.2 Toelichting op milieueffecten en financiële kosten

5.2.1 Inleiding

In de centrale vraagstelling van dit onderzoek zijn de milieueffecten afgebakend tot het energiegebruik, de emissies van CO₂, NO_x, SO₂, PM₁₀ en VOS, ruimtegebruik, geluidhinder en visuele hinder. In deze paragraaf wordt voor elk van deze effecten een korte toelichting gegeven op de invloed hiervan op het milieu. Ook wordt voor elk van deze milieueffecten het aandeel van verkeer en vervoer in het totale binnenlandse milieueffect besproken. Daarna zal een beschrijving worden gegeven van de wijze waarop de financiële kosten worden onderverdeeld.

5.2.2 Energiegebruik

Het energiegebruik is de oorzaak van de emissies van CO₂, NO_x, SO₂, PM₁₀ en VOS. Deze emissies vinden plaats bij de verbranding van fossiele brandstoffen voor de opwekking van energie. Het energiegebruik is verder van belang voor onder andere een dreigende schaarste van fossiele brandstoffen, en voor ruimtegebruik en horizonvervuiling door elektriciteitscentrales. Bij het energiegebruik speelt een grote rol of het primaire energiegebruik in een elektriciteitscentrale of in het voertuig zelf plaatsvindt. Dit heeft enerzijds gevolgen voor de lokale milieueffecten rondom transportaders en anderzijds voor de noodzaak tot het bouwen van meer elektriciteitscentrales.

In Nederland bedroeg in 1999 het energiegebruik ten behoeve van transport 446 PJ. Dit was 19% van het totale Nederlandse energiegebruik. Van deze 446 PJ energiegebruik was slechts 5,9 PJ in de vorm van elektrische energie. (CBS, 2000a) Naar verwachting zal het energiegebruik in Nederland de komende 30 jaar blijven groeien. Samen met de industrie neemt het verkeer het grootste deel van deze groei voor zijn rekening. (RIVM, 2000) Overheidsbeleid met betrekking op de transportsector kan dus een belangrijke rol spelen in de ontwikkeling van het Nederlandse energiegebruik.

5.2.3 CO₂-emissie

De emissie van CO₂ (koolstofdioxide) is van belang in het kader van de klimaatverandering. CO₂ is een zogenaamd broeikasgas en draagt bij aan de versterking van het broeikaseffect. Dit versterkte broeikaseffect wordt verantwoordelijk gehouden voor de wereldwijde stijging van de temperatuur. Door de wereldwijde opwarming van de aarde verschuiven klimaatzones en kunnen ecosystemen¹⁵ verdwijnen. Uiteindelijk leidt dit tot het uitsterven van plant- en diersoorten. Daarnaast kunnen verschuivingen van klimaatzones op regionaal niveau problemen geven op het gebied van voedselvoorziening, watervoorziening, volksgezondheid en overstromingsrisico's (RIVM, 2000).

CO₂ is van nature in de atmosfeer aanwezig en heeft een wereldwijde complexe huishouding, de zogenaamde koolstofcyclus. Doordat CO₂ zich gemakkelijk kan verspreiden, zowel via de lucht als door het water, hebben emissies hiervan wereldwijd invloed op de concentratie in de lucht. De uiteindelijk gevolgen hiervan zijn eveneens wereldwijd merkbaar, hoewel eventuele problemen per regio kunnen verschillen. Daarom zijn bij de Kyoto-conferentie in 1997 internationale afspraken gemaakt over de beperking van de CO₂-emissies (RIVM, 2000). Voor Nederland speelt het verkeer hierbij een grote rol; circa 18% van de nationale CO₂-uitstoot komt voor rekening van deze sector. Daarnaast is verkeer de sector met de snelst groeiende CO₂-emissies. (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2000)

5.2.4 NO_x-emissie

Emissies van stikstofoxiden (NO en NO₂, gezamenlijk vaak met NO_x aangeduid) heeft op twee gebieden gevolgen voor het milieu. Allereerst leiden NO_x-emissies tot verzuring van de bodem. Als de bodem verzuurt kan dit gevolgen hebben voor de vegetatie die daarop groeit. Hierdoor kan bij vegetatie als bomen en heide een vermindering van de levensvatbaarheid optreden. Daarnaast heeft zure depositie schadelijke gevolgen voor gebouwen en landbouwgewassen. Het tweede effect van NO_x betreft luchtverontreiniging door ozonvorming. Ozon (O₃) ontstaat uit een chemische reactie tussen NO_x en vluchtige organische koolwaterstoffen onder invloed van zonlicht. Luchtverontreiniging door ozon wordt vaak met smog aangeduid.

NO_x kan eenvoudig door luchtstroming verspreid worden, zodat ook buitenlandse emissies bijdragen aan de NO_x-concentratie in de Nederlandse atmosfeer. De NO_x-concentratie is echter duidelijk hoger in de buurt van een NO_x-bron. Omdat 63%¹⁶ van de totale Nederlandse NO_x-uitstoot afkomstig is van verkeer en vervoer, is de luchtverontreiniging het grootst rondom drukke verkeersaders en in stedelijke gebieden. In vergelijking tot CO₂ heeft de NO_x-problematiek veel meer een lokale en regionale uitwerking. De verwachting is dat door strengere emissie-eisen voor voertuigen het aandeel van verkeer en vervoer in de totale NO_x-emissie de komende dertig jaar zal afnemen. (RIVM, 2000)

¹⁵ Ecosystemen zijn het geheel van met elkaar interacterende populaties van specifieke dieren en planten binnen een bepaald gebied. De populaties van verschillende planten- en diersoorten houden elkaar in evenwicht. Verandering in één van deze populaties kan daardoor gevolgen hebben voor het totale ecosysteem. Bij klimaatveranderingen kunnen ecosystemen met de klimaatzones mee verplaatsen. Indien het klimaat echter zeer snel verandert, dan kunnen vooral kleine ecosystemen moeilijkheden krijgen om snel genoeg te migreren zodat zij verdwijnen. Voor geïsoleerde ecosystemen, zoals in bergstreken, kan de voor een ecosysteem geschikte klimaatzone zelfs helemaal verdwijnen. Met de ecosystemen verdwijnen vaak ook de populaties die in het gebied leefden.

¹⁶ Percentages van de emissies zijn voor 1995.

5.2.5 SO₂-emissie

Net als NO_x-emissies is de emissie van SO₂ (zwaveldioxide) verantwoordelijk voor verzuring van het milieu. De sector verkeer en vervoer heeft voor SO₂ een aandeel van slechts 20%¹⁶ in de totale emissie, wat veel lager is dan voor NO_x. Gemeten in zuurequivalenten is de SO₂-emissie door verkeer en vervoer dan ook lager dan de emissies van NO_x. Het aandeel van de SO₂-emissie is circa 12% van de totaal door verkeer en vervoer veroorzaakte verzuring. Het belang van de SO₂-emissie door verkeer en vervoer is daardoor veel kleiner dan dat van de NO_x-emissies, maar toch groot genoeg om rekening mee te houden. (RIVM, 2000)

5.2.6 PM₁₀-emissie

PM₁₀ is een aanduiding voor stofdeeltjes met een diameter kleiner dan 10 µm. Deze fijne stofdeeltjes komen vrij bij onvolledige verbranding van fossiele brandstoffen en door mechanische processen zoals bandenslijtage en op- en overslag. Fijne stofdeeltjes kunnen zowel op lange als op korte termijn leiden tot gezondheidsproblemen. De door de EU gestelde emissienormen worden in vrijwel heel Nederland overschreden. Toch is het fijn-stofgehalte van de lucht sinds de jaren zeventig met 50% gedaald. Verkeer en vervoer is voor 41%¹⁶ verantwoordelijk voor de Nederlandse fijn-stofemissie naar de atmosfeer. Voor de komende 20 jaar wordt een daling van de fijn-stofemissie door verkeer en vervoer verwacht. De onlangs aangescherpte EU-normen voor 2010 zullen echter ook in de toekomst overschreden worden. (RIVM, 2000)

5.2.7 VOS-emissie

De emissie van vluchtige organische stoffen (VOS) is eveneens van belang voor de luchtkwaliteit. Zoals eerder in deze paragraaf is vermeld, wordt uit een combinatie van VOS en NO_x onder invloed van zonlicht het luchtvervuilende ozon gevormd. Het aandeel van verkeer en vervoer in de totale Nederlandse emissie is 42%¹⁶. De VOS-emissie door deze sector zal naar verwachting de komende tien jaar sterk dalen. (RIVM, 2000)

5.2.8 Ruimtegebruik

Het ruimtegebruik heeft in het kader van ondergronds transport voornamelijk invloed op de ruimtelijke indeling van de stedelijke leefomgeving en van andere dichtbebouwde gebieden. Hierbij kan gedacht worden aan de beschikbare ruimte voor groenvoorzieningen of andere objecten, de barrièrewerking van infrastructuur in steden, en de verstoring van voetgangers in winkelgebieden. Het ruimtegebruik is tevens van belang voor de beschikbare ruimte voor natuur- en landbouwgebieden, en daarmee voor de hoeveelheid natuur en de CO₂-opname door gewassen. In samenhang hiermee kan ruimtegebruik door transportinfrastructuur tenslotte versnippering van natuurgebieden tot gevolg hebben.

Voor het ruimtegebruik kan onderscheid gemaakt worden tussen direct en indirect ruimtegebruik. Het directe ruimtegebruik betreft het oppervlakte dat fysiek door het vervoerssysteem in beslag genomen wordt. Indirect ruimtegebruik is het oppervlak dat niet fysiek door het vervoerssysteem wordt gebruikt, maar dat toch zodanig door de aanwezigheid van het vervoerssysteem wordt beïnvloed dat de mogelijkheden voor het gebruik beperkt worden. Oorzaken voor indirect ruimtegebruik zijn factoren zoals geluidhinder, luchtverontreiniging, risico's voor de veiligheid, trillingen en visuele hinder. (Langerak en Reijs, 1995)

De mate waarin het ruimtegebruik een probleem vormt is sterk afhankelijk van de locatie waar de infrastructuur zich bevindt. In 1996 was het directe ruimtegebruik van het totale verkeer in Nederland 134.033 ha. Dit komt overeen met 3,2% van het totale Nederlandse landoppervlak. Van het

ruimtegebruik door verkeer wordt 90% in beslag genomen door het wegennet, 7% door verschillende vormen van railvervoer en 2% door vliegvelden¹⁷. (CBS Statline)

Het ruimtegebruik door een transportmodus is onafhankelijk van de vervoersprestatie van het netwerk. De behandeling van het ruimtegebruik door de verschillende transportmethoden vindt daarom plaats in hoofdstuk 6.

5.2.9 Geluidhinder

Geluidhinder is van belang voor de kwaliteit van de leefomgeving in woongebieden en zorgt tevens voor de verstoring van natuurgebieden en landelijke gebieden. De ernst van geluidhinder door verkeer is dus net als ruimtegebruik sterk afhankelijk van de locatie. In Nederland bedraagt het aantal geluidgehinderden door wegverkeer circa 27% van de bevolking en door railverkeer 1% tot 6% (RIVM, 2000). Hiermee neemt het verkeer een aandeel van ruim 40% in de totale geluidhinder in Nederland voor zijn rekening (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2000). Voor de toekomst wordt een grote stijging verwacht van de geluidsoverlast door zowel het weg- als het railverkeer (RIVM, 2000).

5.2.10 Visuele hinder

Met visuele hinder wordt de hinder bedoeld doordat mensen zich ergeren aan de aanblik van infrastructuur, vervoermiddelen, gebouwen of andere objecten. Visuele hinder is een erg subjectieve vorm van overlast. Het omvat onder andere horizonvervuiling en aantasting van een (beschermde) stads- of dorpsgezicht. Omdat visuele hinder vaak gepaard gaat met ruimtegebruik en geluidhinder zijn deze drie vormen van milieu-effecten nauw met elkaar verweven. Visuele hinder door verkeersinfrastructuur vindt zowel binnen de steden als buiten de steden plaats. Een voorbeeld van visuele hinder binnen een stad is het spoorviaduct in Delft; visuele hinder buiten de stad is bijvoorbeeld de doorkruising van landelijke gebieden door snel- en spoorwegen.

5.2.11 Financiële kosten

In dit en het volgende hoofdstuk worden de kosten behandeld van verschillende processen die het transport mogelijk maken. Deze kosten kunnen door verschillende partijen gemaakt worden, zoals door de overheid, door de exploitant en door de eindgebruiker. Door prijszetting, heffingen en subsidies worden de kosten daarna herverdeeld over de betrokken partijen. Deze herverdeling wordt door verschillende factoren beïnvloed, zoals marktwerking, onderhandelingsresultaten en politieke beslissingen. Omdat een deel van deze factoren buiten het bereik van dit rapport valt, wordt geen onderscheid gemaakt naar wie de kosten voor zijn rekening neemt.

De kosten van het transport worden in dit rapport evenals de milieueffecten opgesplitst in een deel dat direct afhankelijk is van de vervoersprestatie en een deel dat niet direct afhankelijk is van de vervoersprestatie. De kosten die direct afhankelijk zijn van de vervoersprestatie worden ook wel marginale kosten genoemd. Deze kostensoort is op korte termijn afhankelijk van de vervoersprestatie en bestaat uitsluitend uit energiekosten van de voertuigen. (Dings et al., 1999) Dit deel van de kosten wordt in dit hoofdstuk behandeld.

De kosten die op middellange en lange termijn afhankelijk zijn van de vervoersprestatie worden aangeduid met variabele respectievelijk vaste kosten. Voorbeelden van variabele kosten zijn onderhoudskosten, reparatiekosten en personeelskosten. vaste kosten zijn de aanlegkosten van de infrastructuur, de aankoopwaarde van de voertuigen en energiekosten voor het besturingssysteem en de verlichting. (Dings et al., 1999) De variabele en vaste kosten worden in hoofdstuk 6 behandeld.

¹⁷ De percentages tellen door afronding niet op tot 100%.

5.3 Traditioneel en extra-traditioneel ondergronds transport

5.3.1 Traditioneel pijpleidingtransport

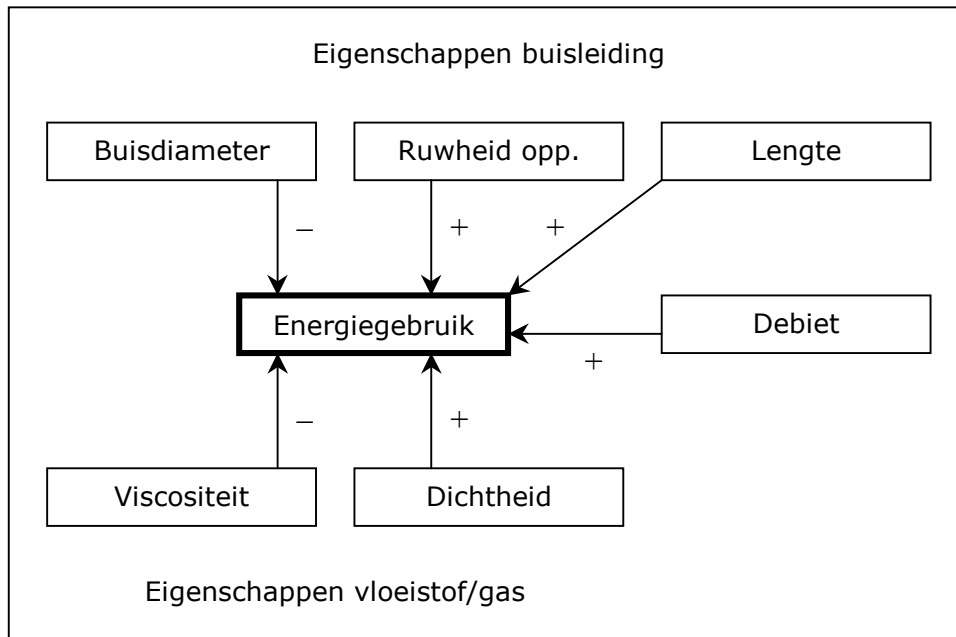
Energie-intensiteit

Het energiegebruik van het traditioneel pijpleidingtransport is afhankelijk van veel factoren. In bijlage 4 is een uitgebreide beschrijving gegeven van de theorie waarmee het energiegebruik van pijpleidingen bepaald kan worden en tevens van de berekeningen die zijn gemaakt om het energiegebruik en de emissies van het pijpleidingtransport te bepalen. Deze paragraaf zal daarom beperkt worden tot het uiteenzetten van de resultaten en de conclusies van de bijlage.

Het energiegebruik van het pijpleidingtransport per kilometer pijpleiding blijkt allereerst tussen verschillende vervoerde stoffen te variëren vanwege hun fysische eigenschappen, zoals dichtheid en viscositeit. Van deze fysische kenmerken is dichtheid veruit de belangrijkste factor. Hierdoor bestaan er grote verschillen in energiegebruik tussen het pijpleidingtransport van gassen en dat van vloeistoffen. Over het algemeen wordt bij het pijpleidingtransport van gassen per tonkm meer energie gebruikt dan bij het transport van vloeistoffen omdat per kubieke meter verpompt gas er een veel lager gewicht is getransporteerd dan bij een kubieke meter vloeistof.

Tussen verschillende vloeistoffen en gassen onderling varieert het energiegebruik weliswaar ook vanwege de verschillende fysische eigenschappen, maar een veel grotere rol wordt hierbij gespeeld door de technische kenmerken en het debiet¹⁸ van individuele pijpleidingen. De technische eigenschappen zijn onder andere de buisdiameter en het materiaal waarvan de buis gemaakt is. Met betrekking tot het debiet is voor de energie-intensiteit ook de continuïteit van de stroming door de pijpleiding van belang. Doordat het energiegebruik afhankelijk is van het debiet in het kwadraat, leidt een onregelmatige stroming tot een hoger energiegebruik dan een regelmatige stroming die gemiddeld hetzelfde debiet heeft. De keuze voor de energiedrager die wordt gebruikt voor het aandrijven van de pompen (elektriciteit, aardgas of vloeibare brandstof) blijkt voor het primaire energiegebruik nauwelijks van belang. Figuur 5.1 geeft een overzicht van de belangrijkste factoren die het energiegebruik van een traditionele pijpleiding bepalen.

¹⁸ Debiet: het per tijdseenheid doorgestroomde volume.



Figuur 5.1: Factoren die invloed hebben op het energiegebruik van traditionele pijpleidingen.

Emissiefactoren en energiekosten

De emissiefactoren en de energiekosten vloeien voort uit het energiegebruik en zijn afhankelijk van de keuze van de energiedrager. De pompen van de pijpleidingen worden aangedreven door stationaire motoren die van energie voorzien kunnen worden door verschillende energiedragers, zoals elektriciteit, aardgas of vloeibare brandstoffen. De verschillende energiedragers leiden tot uiteenlopende emissies en kostenfactoren, zoals weergegeven in tabel 5.1.

Tabel 5.1: Emissies en kosten per gigajoule gebruikte primaire energie voor het gebruik van verschillende energiedragers. De emissies van CO₂, NO_x, en SO₂ van elektriciteit zijn voor het jaar 1998; de overige voor 2000.

Energiedrager	Elektriciteit	Aardgas	Vloeibare brandstoffen
CO ₂ -emissie (kg/GJ)	64,4	55,2	68,4
NO _x -emissie (g/GJ)	82	368	708
SO ₂ -emissie (g/GJ)	22,3	0,0	88,1
VOS-emissie (g/GJ)	1,1	17,2	18,7
PM ₁₀ -emissie (g/GJ)	1,1	0,0	6,6
Energieprijs (€/GJ)	7,16	2,75	8,14

Bronnen: Gijzen en Spakman, 2001; Geurs et al., 1998; op basis van ECN, 1999 en CPB, 1997; ECN, 2001.

In bijlage 4 zijn de berekeningen omschreven van de energie-intensiteiten van drink- en industriewater en van ruwe aardolie. Voor drink- en industriewater is een statistische benadering¹⁹ toegepast. De energie-intensiteit van ruwe aardolie is volgens de ingenieursmethode²⁰ berekend met formules uit de theorie en aan de hand van de kenmerken van de qua vervoersprestatie belangrijkste

¹⁹ Bij de statistische methode wordt het totale energiegebruik bepaald, die vervolgens gedeeld wordt door de vervoersprestatie.

²⁰ Bij de ingenieursmethode wordt voor veronderstelde specificaties van een pijpleiding aan de hand van fysische theorieën de energie-intensiteit berekend.

Nederlandse pijpleidingen. De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in tabel 5.2. Hierin zijn tevens enkele waarden opgenomen die gegeven worden door verschillende literatuurbronnen. Opvallend is dat de meeste van de gevonden literatuurwaarden betrekking hebben op pijpleidingen in de Verenigde Staten.

Tabel 5.2: Directe primaire energie-intensiteit van traditionele pijpleidingnetwerken. Voor toelichting zie bijlage 4.

Product	Gebied	Jaar	Energie-intensiteit (MJ/tonkm)	Bron
Berekend met statistische methode				
Drink- en industriewater	Ned.	1995	0,38	
Berekend met ingenieursmethode				
Ruwe aardolie	Ned.	2000	0,10	
Literatuurwaarden				
Aardgas	Ned.	n.b.	0,56 – 0,84	1
Ruwe aardolie	V.S.	± 1965	0,33	2
Ruwe aardolie	V.S.	1978	0,25	3
Ruwe aardolie	V.S.	1989	0,198	4
Ruwe aardolie en aardolieproducten	V.S.	1998	0,19	5
Aardolieproducten	V.S.	1978	0,11 – 0,18	3

Bronnen: 1 = NEA/Haskoning (1993), 2 = Liu en Assadollahbaik, 3 = Groot, 1991, 4 = Komor (1995), 5 = Davis (2000)

Uit een vergelijking van de berekende waarden met de literatuurwaarden blijkt dat het transport en distributie van drink- en industriewater een relatief hoge energie-intensiteit heeft. Dit komt doordat dit pijpleidingnetwerk fijn vertakt is en een onregelmatige doorstroom heeft. Verder blijkt de met de ingenieursmethode berekende energie-intensiteit van de Nederlandse ruwe-aardoliepijpleidingen gemiddeld lager dan de literatuurwaarden voor de Amerikaanse pijpleidingen. Mogelijk wordt dit veroorzaakt door verschillen in technische kenmerken tussen Nederlandse en Amerikaanse pijpleidingen. Er bestaat een zeer grote spreiding van de energie-intensiteiten van de individuele ruwe-aardoliepijpleidingen.

De emissiefactoren en de energiekosten van verschillende pijpleidingnetwerken zijn uit de energie-intensiteit berekend en zijn weergegeven in tabel 5.3. Literatuurwaarden hiervoor zijn zeldzaam en vrij oud. Over het algemeen komen de waarden redelijk overeen met uitzondering van de NO_x-emissies, die in de literatuur lager worden ingeschat.

In de toekomst wordt voor veel emissiefactoren een daling verwacht. Hierbij treden echter weer grote variaties op tussen verschillende energiedragers. Voor de met elektrische energie aangedreven pompen worden sterke dalingen verwacht voor de emissiefactoren van zowel CO₂, NO_x, SO₂ en PM₁₀. Een stijging van de emissiefactor wordt alleen verwacht voor de vluchtige organische stoffen. De elektriciteitsprijs zal slechts een lichte stijging vertonen.

Voor stationaire motoren op fossiele brandstoffen worden weinig veranderingen in de emissiefactoren verwacht. De motoren op aardgas zullen slechts voor NO_x een dalende emissiefactor hebben. Voor motoren op vloeibare brandstoffen dalen de emissiefactoren van NO_x en SO₂. De brandstofprijzen van aardgas en vloeibare brandstoffen zijn aan elkaar gekoppeld (ECN, 1999). In vergelijking tot de elektriciteitsprijs vertonen zij de komende dertig jaar een sterke stijging (CPB, 1997).

Uit de berekeningen in bijlage 4 blijkt dat in de toekomst over het algemeen een daling van de emissiefactoren verwacht kan worden. Of dit daadwerkelijk gebeurt is echter ook afhankelijk van de specifieke technische karakteristieken van individuele pijpleidingen, zoals het debiet en de diameter van de buisleiding. Voor pijpleidingen met aandrijving door stationaire motoren op fossiele

Tabel 5.3: Emissie- en kostenfactoren van traditionele pijpleidingnetwerken. Voor toelichting zie bijlage 4.

Product	Gebied	Jaar	Emissiefactoren				Energiekosten (€/tonkm)	Bron	
			CO ₂ (g/tonkm)	NO _x (mg/tonkm)	SO ₂ (mg/tonkm)	VOS (mg/tonkm)			PM ₁₀ (mg/tonkm)
Berekend met statistische methode									
Drink- en industriewater	Ned.	2000	24	49	9,1	4,5	0,5	0,0025	
Berekend met ingenieursmethode									
Ruwe aardolie	Ned.	2000	6	38	5,3	1,0	0,37	0,0007	
Berekend uit literatuurwaarden voor de energie-intensiteit									
Aardgas	Ned.	2000	31 – 46	206 – 309	0,0	97 – 145	0,0	0,0043 – 0,0064	1
Ruwe aardolie ^{a)}	Ned.	2000	17	99	13,8	2,5	1,0	0,0019	1
Aardolie-producten ^{a)}	Ned.	2000	7 – 12	43 – 71	6,1 – 9,9	1,1 – 1,8	0,4 – 0,7	0,0008 – 0,0014	1
Literatuurwaarden									
Ruwe aardolie	V.S.	1978	19	23	15	n.b.	n.b.	n.b.	2
Aardolie-producten	V.S.	1978	8 – 13	10 – 16	7 – 11	n.b.	n.b.	n.b.	2
n.b. ^{b)}	Europa	n.b.	10	20	n.b.	20	n.b.	n.b.	3

a) Uitgegaan is van een energievoorziening van 50% elektrisch en 50% vloeibare brandstoffen

b) Emissiefactoren zijn voor het transport door pijpleidingen in Europa, zonder dat hierbij een product gespecificeerd is.

Bronnen: 1 = op basis van NEA/Haskoning (1993), 2 = Groot (1991), 3 = OECD (1996)

brandstoffen, zoals leidingen voor afvalwater en voor aardgas, zullen de emissiefactoren zich veel minder gunstig ontwikkelen dan voor pijpleidingen waarvoor veel gebruik wordt gemaakt van elektrische energie, zoals drink- en industriewater.

Jaarlijks energiegebruik, emissies en energiekosten

Voor elk van de in Nederland per pijpleiding vervoerde productgroepen is het jaarlijkse energiegebruik van het pijpleidingtransport bepaald. De berekening hiervan is beschreven in bijlage 4. Uit het energiegebruik zijn de jaarlijkse emissies en energiekosten berekend. Tabel 5.4 geeft een overzicht van de resultaten van deze berekeningen.

Tabel 5.4: Jaarlijks direct energiegebruik en jaarlijkse emissies van traditionele pijpleidingnetwerken in Nederland voor 2000. Voor toelichting zie bijlage 4.

Product	Vervoersprestatie mld. tonkm	Primair energiegebruik PJ	Jaarlijkse emissies					Energiekosten mln. €
			CO ₂ mln. kg	NO _x mln. kg	SO ₂ 10 ³ kg	VOS 10 ³ kg	PM ₁₀ 10 ³ kg	
Drink- en industriewater	13	4,9	311	0,63	118	58	6,2	32,4
Afvalwater ²¹	?	0,5	28	0,19	0	88	0,0	1,4
Aardgas ²²	ca 3	4,1	227	0,61	0	708	0,0	11,2
Ruwe aardolie ²³	6,7	0,6	43	0,25	35	6	2,4	4,9
Aardolieproducten ²⁵	1,5	0,2	14	0,09	11	2	0,8	1,5
Energiegassen	0,3	0,2	12	0,08	10	2	0,7	1,3
Chemische basisproducten	0,1	0,02	1	0,01	1	0,2	0,1	0,1
Totaal	ca. 25	10,9	659	2,01	195	868	11,7	55,3

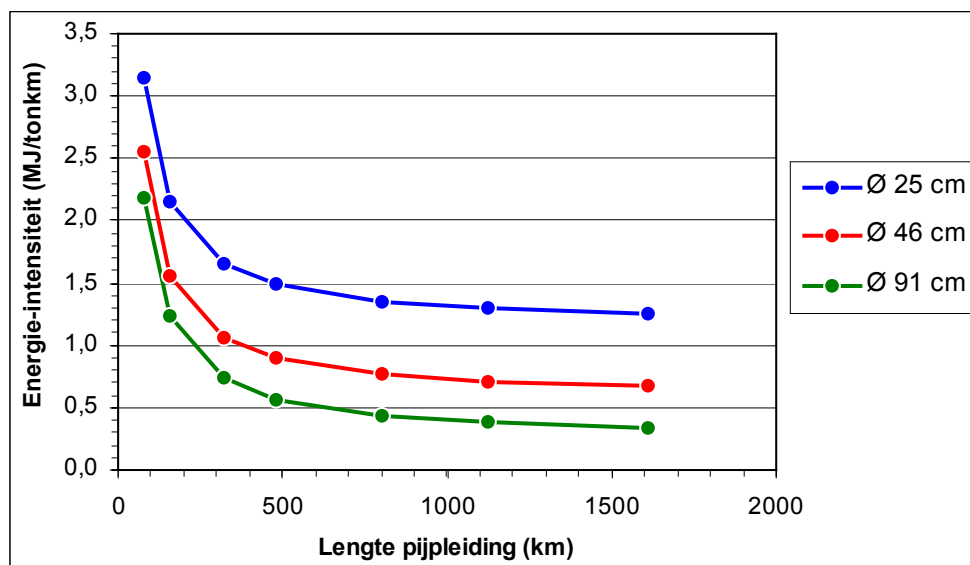
5.3.2 Extra-traditioneel pijpleidingtransport

Het extra-traditionele pijpleidingtransport betreft het pijpleidingtransport van bulkgoederen die nu niet of nauwelijks per pijpleiding vervoerd worden. Het energiegebruik van het daadwerkelijke vervoer door de pijpleiding komt qua theorie overeen met de theorie van het traditionele pijpleidingtransport. Voor veel van deze goederen zijn echter nog aanvullende bewerkingen vereist om ze geschikt te maken voor het pijpleidingtransport. Met name bij de bulkgoederen die per slurripijpleiding vervoerd worden, kunnen deze bewerkingen zeer energie-intensief zijn en hebben ze zo een grote invloed op het totale energiegebruik van het transport. Omdat het energiegebruik van de bewerkingen niet afhankelijk is van de door de goederen afgelegde afstand, kan dit deel van het energiegebruik het beste worden uitgedrukt in een waarde per ton in plaats van per tonkm. In bijlage 4 is de primaire energie-intensiteit van het slurripijpleidingtransport beschouwd. Vanwege het relatief grote afstandsonafhankelijk energiegebruik is de energie-intensiteit negatief afhankelijk van de lengte van de pijpleiding. Dit is grafisch weergegeven in figuur 5.2.

²¹ De waarde voor het energiegebruik is slechts indicatief.

²² Het energiegebruik van aardgastransport is inclusief bewerkingprocessen, zoals de stikstofproductie en het mengen van verschillende kwaliteiten aardgas.

²³ Aangenomen is het gebruik van 50% elektriciteit en 50% vloeibare brandstoffen als energiedragers.

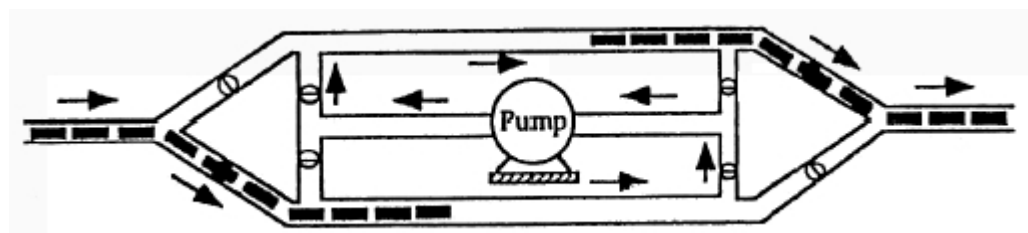


Figuur 5.2: Primaire energie-intensiteit van het slurry-pijpleidingtransport afhankelijk van de afstand waarover vervoerd wordt voor drie pijpleidingdiameters. Bron: Liu & Assadollahbaik, 1979.

5.4 PCP- en HCP-transport

5.4.1 Pneumatisch capsule-pijpleidingtransport

Het energiegebruik van het pneumatische capsule-pijpleidingtransport (PCP) loopt sterk uiteen voor de verschillende aandrijfmethode en voor verschillende diameters van de pijpleiding. Conventionele PCP's komen technisch gezien sterk overeen met traditionele pijpleidingen. Het toepassen van een bypass pompsysteem, waarbij de capsules om de pomp worden geleid (zie figuur 5.3), maakt de inzet van conventionele pompen mogelijk. Het energiegebruik van conventionele PCP's is laag voor systemen met een kleine diameter, zoals buizenpost, maar neemt sterk toe als grotere capsules gebruikt worden.



Figuur 5.3: Een bypass pompsysteem. De capsules worden hierbij om de pomp geleid. De lucht- of vloeistofstroming (aangegeven met pijlen) kan daardoor met een conventionele pomp worden opgewekt. Bron: Liu, 2000a.

Bij PCP-systemen met lineaire motoren (LIM of LSM) worden de capsules direct door de motor aangedreven. Het voornaamste verschil tussen een lineair aangedreven PCP en een ondergrondse trein is dat de directe aandrijving bij een PCP slechts over een klein deel van het traject plaatsvindt. Tijdens deze aandrijftijd wordt extra veel energie verbruikt, omdat niet alleen het voertuig maar ook zoveel mogelijk lucht in beweging wordt gezet. De hierbij opgewekte luchtstroming zorgt voor een indirecte aandrijving gedurende de uitrijdperiode van de capsule. De uitrijdtijd kan daardoor verlengd worden, zodat het extra energiegebruik uit de aandrijfperiode kan worden terugverdiend. Opgemerkt moet worden dat lineaire motoren een relatief nieuw soort motoren zijn, zodat er voor de toekomst mogelijk nog verbeteringen op het gebied van energiegebruik te verwachten zijn.

In bijlage 4 zijn de berekeningen beschreven van de primaire energie-intensiteit, de emissiefactoren en de kosten per tonkm voor zowel de conventionele PCP's als voor PCP's met lineaire aandrijving. Tabel 5.5 geeft een overzicht van de resultaten. Hierbij moet opgemerkt worden dat de energie-intensiteit en emissiefactoren voor de lineaire motoren elk slechts op basis van één bron berekend konden worden. Dit is vanwege de geringe verspreiding van de lineaire aandrijftechniek in concepten voor pneumatische pijpleidingen. De data zijn afhankelijk van de exacte configuratie van de in deze bronnen beschreven systemen. Het energiegebruik kan beïnvloed worden door factoren zoals de diameter van de buis, de lengte en massa van de capsules, de glooiing van het traject en de afstand die de capsules zonder lading afleggen. Doordat deze factoren per systeem verschillen, is het moeilijk om de varianten onderling te vergelijken. Hoewel onduidelijk is in hoeverre de verschillen in energiegebruik het gevolg zijn van de systeemconfiguratie, stemmen de resultaten wel overeen met het beeld uit de literatuur dat lineaire inductiemotoren een lagere energie-efficiëntie hebben dan lineaire synchronmotoren (Zhao en Lundgren, 1996; TubeFreight, 2001).

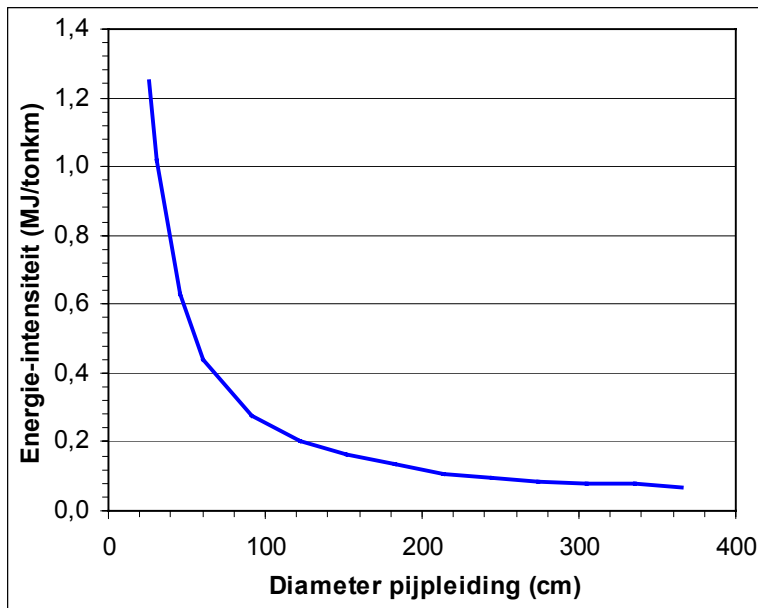
Tabel 5.5: Primair energiegebruik en emissiefactoren van pneumatische capsule-pijpleiding systemen bij gebruik van elektrische energie.

Aandrijving	Energie-intensiteit MJ/tonkm	Emissiefactoren					Energiekosten €/tonkm
		CO ₂ g/tonkm	NO _x mg/tonkm	SO ₂ mg/tonkm	VOS mg/tonkm	PM ₁₀ mg/tonkm	
Conventioneel	0,12 – 1,63	8 – 105	10 – 133	3 – 36	0,1 – 1,7	0,1 – 1,7	0,0009 – 0,0117
LIM	6,39	413	523	143	6,8	6,8	0,0459
LSM	0,67	43	55	15	0,7	0,7	0,0048

Bronnen: conventioneel = NEA/Haskoning, 1993, Kosugi, 1999; LIM = op basis van Liu, 2000b; LSM = op basis van Montgomery et al, 2000.

5.4.2 Hydraulisch capsule-pijpleidingstransport

Hydraulische capsule-pijpleidingssystemen (HCP) hebben over het algemeen een lager energiegebruik dan de PCP-systemen. De energie-intensiteit van HCP is in tegenstelling van PCP negatief afhankelijk van de diameter van de pijpleiding. In figuur 5.4 is de primaire energie-intensiteit van een conventionele HCP weergegeven in relatie met de diameter van de pijpleiding. De weergegeven energie-intensiteit volgt uit een berekening door Liu en Assadollahbaik (1979) volgens de ingenieursmethode voor een HCP voor het transport van steenkool.



Figuur 5.4: De primaire directe energie-intensiteit van een conventionele HCP, afhankelijk van de diameter van de pijpleiding. Het betreft hier een HCP voor het transport van steenkool met 70% lijvulling, een beladingsgraad van 75%²⁴ en een snelheid van 7 km/h en een lengte van 80 km. Bron: Liu & Assadollahbaik, 1979.

Naast de conventionele HCP zijn data beschikbaar voor de Coal Log Pipeline (CLP), waarbij steenkool tot capsules wordt geperst en vervolgens zonder container door een pijpleiding vervoerd kan worden. Uit berekeningen in bijlage 4 blijkt de energie-intensiteit van het CLP-transport, afhankelijk van de gebruikte vloeistof, 0,5 tot 1,5 MJ/tonkm te zijn. Dit is nog exclusief het energiegebruik van het persen van capsules, wat ongeveer 1 GJ per ton bedraagt.

5.5 Overige niet-traditionele ondergrondse transportsystemen

5.5.1 Railgeleide voertuigen

Voor railgeleide voertuigen zijn veel uiteenlopende varianten denkbaar. Omdat er momenteel geen concrete plannen zijn voor de realisatie van een ondergronds netwerk met railgeleide voertuigen zijn geen aparte berekeningen gemaakt van de energie-intensiteit van dit type voertuigen. Een indicatie kan worden gevonden in het energiegebruik van de railgeleide variant van het automatisch geleide voertuig voor het OLS Schiphol. Deze wordt in sub-paragraaf 5.5.3 behandeld en bedraagt 1,6 MJ/tonkm.

5.5.2 Dual-mode voertuigen

Voor het energiegebruik van de dual-mode voertuigen wordt uitgegaan van het gebruik van lichte dual-mode trucks, zoals in het Japanse UFTS gebruikt wordt. Het energiegebruik van dual-mode trucks is tweeledig. Het eerste deel is het energiegebruik van het voertuig in de ondergrondse infrastructuur, waar automatische geleiding plaatsvindt. Het tweede deel is het energiegebruik tijdens

²⁴ Beladingsgraad: het gewicht van de lading van een capsule gedeeld door het gewicht van een capsule inclusief lading.

het rijden op conventionele infrastructuur. Het energiegebruik van dual-mode voertuigen is bepaald uit het simulatiemodel Attack versie 2.0 (Bus et al, 1996) met gegevens voor het jaar 1995. Hierbij is de invloed van het ongehinderd rijden en het rijden in een buisleiding verduidelijkt door de energie-intensiteit ook voor bovengronds ongehinderd rijden en ondergronds gehinderd rijden te berekenen. Er is aangenomen dat bij ondergronds rijden de luchtweerstand ten opzichte van bovengronds rijden verdrievoudigd en dat bij ongehinderd rijden de dynamiekfactor een kwart bedraagt van de factor bij gehinderd rijden. Verder wordt de gemiddelde snelheid constant verondersteld.

De resultaten zijn weergegeven in tabel 5.6. Het blijkt dat de lagere dynamiek van de rit leidt tot een daling van de energie-intensiteit die slechts ten dele teniet wordt gedaan door de toegenomen luchtweerstand. Voor het energiegebruik is het dus gunstiger als zoveel mogelijk bovengronds ongehinderd gereden wordt.

Tabel 5.6: Primaire energie-intensiteit van dual-mode trucks voor zowel boven- als ondergronds rijden op een gehinderd en een ongehinderd traject. Berekend met het simulatiemodel Attack versie 2.0 (Bus et al., 1996) met gegevens voor het jaar 1995.

	gehinderd	ongehinderd
bovengronds	2,7	1,8
ondergronds	2,9	2,0

5.5.3 Automatisch geleide voertuigen

Automatisch geleide voertuigen (AGV's) worden gebruikt in veel concepten voor Ondergrondse Logistieke Systemen (OLS). Hierbij is ook onderzoek gedaan naar het energiegebruik van de voertuigen. Voor industriële OLS is het onderzoek naar het energiegebruik vooral gericht op het OLS Schiphol. Hierbij is een gedetailleerde berekening gemaakt van het energiegebruik van de verschillende operationele processen die in het OLS plaatsvinden. Voor het OLS Schiphol zijn drie verschillende typen AGV's ontwikkeld die uiteenlopende technische eigenschappen en energie-intensiteiten hebben. In tabel 5.7 zijn de grenswaarden van de primaire directe energie-intensiteit voor de voertuigvarianten van het OLS Schiphol weergegeven. De energie-intensiteit die voor het OLS Schiphol is berekend, is heel specifiek voor dit OLS concept en kan moeilijk als indicatie gebruikt worden voor een grootschaliger distributienetwerk.

Voor het stedelijk OLS zijn de technische kenmerken van de AGV's nog niet erg gedetailleerd gespecificeerd en er bestaat een grote technische verscheidenheid tussen AGV's van verschillende OLS-concepten en van verschillende AGV-concepten voor hetzelfde stedelijke OLS. Volgens Roos et al. (2000) bedraagt het primaire energie-intensiteit tussen de 0,7 en 1,4 MJ/tonkm, afhankelijk van de beladingsgraad. Om meer inzicht te krijgen in de verschillende factoren die bepalend zijn voor het energiegebruik is in bijlage 4 aan de hand van de technische eigenschappen van AGV's voor verschillende OLS-concepten het energiegebruik berekend volgens de ingenieursmethode. Omdat er onzekerheid bestaat over enkele technische eigenschappen van de AGV's, zoals de rol- en luchtweerstandcoëfficiënten, zijn voor verschillende varianten de energie-intensiteit berekend.

De energie-intensiteit van het stedelijke OLS blijkt sterk te variëren tussen AGV's van verschillende OLS-concepten. Dit wordt veroorzaakt door verschillen in afmetingen en snelheid van de voertuigen. Daarnaast kunnen binnen elk OLS-concept nog verschillen in energiegebruik voorkomen vanwege verschillende mogelijkheden voor geleiding en energievoorziening van de AGV's. Hiervoor is uitgegaan van de kenmerken van de drie voertuigconcepten van het OLS Schiphol.

Voor elk van de verschillende technische varianten is de energie-intensiteit afhankelijk van de ritlengte. Dit komt doordat een deel van het energiegebruik onafhankelijk is van de afstand. Allereerst gaat het hierbij om de kinetische energie van het voertuig. Dat is de hoeveelheid energie die moet worden toegevoegd bij het versnellen van de AGV, en die weer verloren gaat op het moment dat het voertuig afremt. Vanwege de ongehinderdheid van het systeem hoeft een AGV per rit slechts eenmaal

te versnellen. Indien de AGV's wel gehinderd worden dan stijgt de energie-intensiteit met 0,3 MJ/tonkm voor elke keer per 200 meter dat het voertuig tot stilstand komt en weer opnieuw moet versnellen. Naast de kinetische energie is ook het energiegebruik van het naar straatniveau hijsen of tillen van de lading onafhankelijk van de ritlengte. In tabel 5.7 is voor vier verschillende ritlengtes de in bijlage 4 berekende primaire energie-intensiteit weergegeven. Tabel 5.8 geeft een overzicht van de emissiefactoren en energiekosten die uit de energie-intensiteit zijn berekend aan de hand van de in bijlage 4 behandelde emissiefactoren voor elektrische energie.

Tabel 5.7: Primaire energie-intensiteit voor Ondergrondse Logistieke Systemen die gebruik maken van automatisch geleide voertuigen.

	Energie-intensiteit (MJ/tonkm)	Bron
Literatuurwaarden		
OLS Schiphol	1,56 – 3,81	Van der Heide, 1999
Stedelijk OLS	0,7 – 1,4	Roos et al, 2000
Stedelijk OLS berekend met ingenieursmethode voor verschillende ritlengten (zie bijlage 4)		
100 m	2,5 – 3,6	
200 m	1,4 – 2,5	
1000 m	0,5 – 1,6	
10.000 m	0,3 – 1,4	

Tabel 5.8: Emissiefactoren voor Ondergrondse Logistieke Systemen die gebruik maken van Automatisch Geleide Voertuigen.

	Emissiefactoren					Energie- kosten €/tonkm
	CO ₂ g/tonkm	NO _x g/tonkm	SO ₂ mg/tonkm	VOS mg/tonkm	PM ₁₀ mg/tonkm	
Berekend aan de hand van de literatuurwaarden voor de primaire energie-intensiteit uit tabel 5.8						
OLS Schiphol	101 – 246	0,13 – 0,31	35 – 85	1,7 – 4,0	1,7 – 4,0	0,011 – 0,027
Stedelijk OLS	45 – 90	0,06 – 0,11	16 – 31	0,7 – 1,5	0,7 – 1,5	0,005 – 0,010
Stedelijk OLS berekend met ingenieursmethode voor verschillende ritlengten.						
100 m	159 – 230	0,20 – 0,29	55 – 79	2,6 – 3,8	2,6 – 3,8	0,018 – 0,026
200 m	88 – 158	0,11 – 0,20	31 – 55	1,5 – 2,6	1,5 – 2,6	0,010 – 0,018
1000 m	32 – 100	0,04 – 0,13	11 – 35	0,5 – 1,6	0,5 – 1,6	0,004 – 0,11
10.000 m	20 – 87	0,02 – 0,11	7 – 30	0,3 – 1,4	0,3 – 1,4	0,002 – 0,010

5.6 Bovengrondse transportmethoden

5.6.1 Goederenvervoer over de weg

Inleiding

Bij het directe energiegebruik van het wegverkeer kan enerzijds onderscheid worden gemaakt naar het type voertuig en anderzijds naar het wegtype. Voor het type voertuig wordt vaak onderscheid gemaakt tussen vier gewichtsklassen. De lichtste klasse zijn de bestelwagens, die een eigengewicht plus maximaal laadvermogen (ook wel aangeduid met Gross Vehicle Weight of GVW) van minder dan 3,5 ton hebben. Vrachtauto's hebben een maximaal totaalgewicht van boven de 3,5 ton en worden onderverdeeld in drie gewichtsklassen: 3,5 tot 10 ton, 10 tot 20 ton en zwaarder dan 20 ton. Daarnaast is er een aparte categorie van vrachtvoertuigen die uitsluitend vracht vervoeren in een aanhangwagen, namelijk de trekkers.

Voor het wegtype kan onderscheid worden gemaakt tussen wegen binnen de bebouwde kom, landelijke wegen en autosnelwegen. Wegen binnen de bebouwde kom kenmerken zich doordat de voertuigen daar een sterk wisselende snelheid hebben met veel stops en een lage maximale snelheid.

Op landelijke wegen hebben voertuigen minder variatie in de snelheid, een hogere maximale snelheid en een hogere gemiddelde snelheid. Op autosnelwegen hebben de voertuigen de minste snelheidsfluctuaties en de hoogste maximale en gemiddelde snelheid.

Energie-intensiteit

De energie-intensiteit in MJ/tonkm van bestelauto's, uitgesplitst naar wegtype, kan berekend worden aan de hand van Van den Brink en Van Wee (1997). Hierin is voor het jaar 1995 het energiegebruik per km in totaal en uitgesplitst naar wegtype gegeven en tevens het totale energiegebruik per tonkilometer. Als aangenomen wordt dat de beladingsgraad onafhankelijk is van het wegtype, dan kunnen de energie-intensiteiten berekend worden door per wegtype het energiegebruik per kilometer te vermenigvuldigen met de gemiddeld per rit vervoerde lading.

De energie-intensiteit van vrachtvoertuigen, uitgesplitst naar gewichtsklasse en rittype, voor het jaar 1995 is verkregen uit het simulatiemodel Attack versie 2.0 (Bus et al, 1996). Tabel 5.9 geeft een overzicht van de energie-intensiteiten voor bestelauto's en vrachtauto's. Hieruit blijkt vooral een grote variatie te bestaan tussen de energie-intensiteiten van bestelauto's en van vrachtauto's.

Tabel 5.9: Energie-intensiteit in 1995 van vrachtvoertuigen voor verschillende gewichtsklassen (maximaal gecombineerd gewicht van voertuig en lading) en voor verschillende wegtypen. Bron: Attack versie 2.0 (Bus et al, 1996)

	Bestelauto's	Vrachtauto's			Totaal	Trekkers
		3,5 – 10 ton	10 – 20 ton	> 20 ton		
MJ/tonkm						
Binnen bebouwde kom	12,4	2,5	2,1	1,7	1,9	1,6
Landelijke wegen	8,2	2,2	1,8	1,3	1,5	1,2
Autosnelwegen	10,2	2,6	1,9	1,1	1,5	0,9
Totaal	10,7	2,5	1,9	1,2	1,6	1,1
MJ/km						
Binnen bebouwde kom	4,07	4,60	7,76	18,19	13,01	19,61
Landelijke wegen	2,69	3,93	6,60	13,51	10,05	14,11
Autosnelwegen	3,35	4,81	7,21	11,38	9,24	11,31
Totaal	3,51	4,51	7,09	12,86	9,95	13,50

Bron bestelauto's: Van den Brink en Van Wee, 1997; bron vrachtauto's en trekkers: Attack 2.0, Bus et al., 1996.

Voor de toekomst wordt een daling van de energie-intensiteit voorspeld, enerzijds door een efficiëntere aandrijving en anderzijds door een toename van de beladingsgraad. In 2010 zal de energie-intensiteit naar verwachting 9% lager zijn dan in 1995 en in 2020 ligt de energie-intensiteit 20% onder het niveau van 1995 (Van den Brink en Van Wee, 1997).

Emissiefactoren

De emissiefactoren van bestel- en vrachtauto's wordt berekend aan de hand van gegevens uit CCDM (in voorbereiding). Hierin worden het totale energiegebruik en de totale emissies van vracht- en bestelauto's in Nederland gegeven, zodat de emissies per Joule verbruikte brandstof berekend kan worden. Er wordt geen onderverdeling gemaakt naar gewichtsklassen, daarom is voor de drie gewichtsklassen van vrachtauto's de gemiddelde emissie per Joule voor vrachtauto's gebruikt. Aangezien emissienormen eveneens in een emissiefactor per Joule verbruikte brandstof worden uitgedrukt, zal dit een realistische aanname zijn. Omdat volgens Van den Brink en Van Wee (1997) het brandstofverbruik van vrachtauto's niet of nauwelijks afneemt, wordt aangenomen dat het brandstofverbruik van bestel- en vrachtauto's in 2000 overeenkomt met het brandstofverbruik in

1995. De emissiefactoren zijn uit de emissies per Joule te berekenen met de energie-intensiteiten van bestel- en vrachtauto's uit tabel 5.9. In tabel 5.10 zijn deze emissiefactoren weergegeven.

Tabel 5.10: Geschatte emissiefactoren in 2000 van bestelauto's en vrachtauto's voor verschillende gewichtsklassen (maximaal gecombineerd gewicht van voertuig en lading) en voor verschillende wegtypen. Hierbij is het energiegebruik van leegrijden verdisconteerd.

	CO ₂ -emissie (g/tonkm)	NO _x -emissie (g/tonkm)	SO ₂ -emissie (mg/tonkm)	VOS-emissie (g/tonkm)	PM ₁₀ -emissie (g/tonkm)
Bestelauto's (< 3,5 ton)					
Binnen bebouwde kom	906	3,94	179	1,25	0,62
Landelijke wegen	599	3,00	118	0,63	0,35
Autosnelwegen	746	4,41	148	0,59	0,38
Vrachtauto's 3,5 – 10 ton					
Binnen bebouwde kom	185	1,44	39	0,22	0,059
Landelijke wegen	158	1,44	33	0,13	0,049
Autosnelwegen	193	1,88	41	0,12	0,056
Vrachtauto's 10 – 20 ton					
Binnen bebouwde kom	151	1,18	32	0,18	0,048
Landelijke wegen	128	1,17	27	0,10	0,040
Autosnelwegen	140	1,37	30	0,09	0,041
Vrachtauto's > 20 ton					
Binnen bebouwde kom	126	0,98	27	0,15	0,040
Landelijke wegen	94	0,85	20	0,07	0,029
Autosnelwegen	79	0,77	17	0,05	0,023

Bron bestelauto's: op basis van Van den Brink en Van Wee, 1997 en CCDM, in voorbereiding; bron vrachtauto's: op basis van Attack 2.0, Bus et al., 1996 en CCDM, in voorbereiding.

Voor de toekomst wordt een daling van de emissies verwacht. Dit komt deels door het lagere energiegebruik en verder door strengere emissie-eisen voor de motoren. Ten opzichte van 1995 wordt voor NO_x, VOS en fijn stof in 2010 emissies verwacht die respectievelijk 39%, 43% en 55% lager liggen. De CO₂-emissie is proportioneel met het brandstofverbruik en zal dus in dezelfde periode 9% dalen.

Energiekosten

Uit CCDM (in voorbereiding) blijkt 90% van de bestelauto-kilometers diesel als brandstof te gebruiken, tegen 6% benzine en 3% LPG. Voor vrachtauto's is het aandeel van diesel in het totaal van energiedragers vrijwel 100%. Voor de eenvoud worden de energiekosten van zowel bestel- als vrachtauto's voor uitsluitend diesel als energiedrager berekend. De dieselprijs aan de pomp, inclusief accijns en BTW, bedroeg € 0,72 per liter in september 1999. Voor grootgebruikers ligt deze prijs 25% tot 30% lager. (Dijkstra en Dings, 1999) Dit komt overeen met € 14,49 per gigajoule. Voor de energiekosten worden de energie-intensiteiten van 1995 uit tabel 5.10 gebruikt. De hiermee berekende energiekosten zijn weergegeven in tabel 5.11.

Tabel 5.11: Energiekosten (€/tonkm) in 1999 van bestelauto's en vrachtauto's aan de hand van de energie-intensiteiten voor 1995 uit tabel 5.9.

	Bestelauto's	Vrachtauto's		
		3,5 – 10 ton	10 – 20 ton	> 20 ton
Binnen bebouwde kom	0,180	0,036	0,030	0,025
Landelijke wegen	0,119	0,032	0,026	0,019
Autosnelwegen	0,148	0,038	0,028	0,016

Bron: Dijkstra en Dings, 1999.

5.6.2 Goederenvervoer per spoor

Energie-intensiteit

Voor het goederenvervoer per spoor kan in het algemeen onderscheid worden gemaakt tussen elektrische en diesel-elektrische treinen. In 1993 werd van de totale vervoersprestatie in Nederland 70% door elektrische locomotieven en 30% door diesel-elektrische locomotieven gerealiseerd. Het primaire energiegebruik is voor beide typen locomotieven is gelijk. In 1995 bedroeg dit 0,61 MJ/tonkm (Van den Brink en Van Wee, 1997). Voor de toekomst wordt voor beide energiedragers een daling van de primaire energie-intensiteit verwacht, vanwege hogere efficiënties van elektriciteitsproductie en dieselmotoren. Hierdoor zal bij gelijkblijvend rendement van de elektromotoren het primaire energiegebruik van elektrische locomotieven tussen 1998 en 2010 met 24% dalen (Gijsen en Spakman, 2001). Het energiegebruik van diesel-elektrische locomotieven kan van 1996 tot 2010 met 10% dalen. Hiervoor is echter wel beleid nodig, dat nu nog niet is vastgesteld. Indien dit beleid niet gerealiseerd wordt, dan zal het energiegebruik van diesel-elektrische treinen constant blijven. (Van den Brink en Van Wee, 1997)

Emissiefactoren

In de emissiefactoren zijn in tegenstelling tot de primaire energie-intensiteit wel grote verschillen tussen elektrische en diesel-elektrische locomotieven. De emissiefactoren van elektrische locomotieven zijn afhankelijk van het elektriciteitsgebruik van de locomotieven en van de emissiefactoren van de elektriciteitsopwekking. Op de emissiefactoren van de elektriciteitsopwekking wordt dieper ingegaan in bijlage 4. Voor het energiegebruik van de locomotieven wordt uitgegaan van de energie-intensiteit van 1995, omdat locomotieven een lange levensduur hebben zodat het energiegebruik niet snel zal veranderen. De hieruit berekende emissiefactoren van de elektrische locomotieven zijn weergegeven in tabel 5.12. Voor de diesel-elektrische locomotieven worden de emissiefactoren uit Van den Brink en Van Wee (1997) voor het jaar 1995 gebruikt.

Tabel 5.12: Emissiefactoren van het goederenvervoer per spoor voor elektrische (jaar: 2000) en diesel-elektrische (jaar: 1995) aandrijving.

	CO ₂ -emissie (g/tonkm)	NO _x -emissie (g/tonkm)	SO ₂ -emissie (mg/tonkm)	VOS-emissie (mg/tonkm)	PM ₁₀ -emissie (mg/tonkm)
Elektrisch	39,3	0,05	13,6	64,4	64,4
Diesel-elektrisch	45,2	0,82	25,3	45,1	18,4
Gemiddeld 70:30	41,1	0,28	17,1	58,6	50,6

Bron: Van den Brink en Van Wee, 1997; Gijsen en Spakman, 2001; Geurs et al., 1998.

In de toekomst zullen voor het railtransport met elektrische aandrijving op de VOS-emissiefactor na alle emissiefactoren dalen. Dit komt door de lagere emissiefactoren van de elektriciteitsproductie, mede vanwege het hogere productierendement van elektrische energie. (Van den Brink en Van Wee, 1997) Voor de emissies van diesel-elektrische aandrijving worden in de Nationale Milieuverkenning 5 voor de periode tot 2030 geen veranderingen verwacht vanwege het ontbreken van overheidsbeleid op dit gebied. Wel bestaan er vanuit de railtransportsector zelf plannen voor het verlagen van de emissierichtlijnen, maar er is nog geen zekerheid dat deze plannen gerealiseerd worden. (Feimann et al., 2000)

Energiekosten

De energiekosten zijn berekend aan de hand van de kosten van energiedragers. Deze zijn behandeld in hoofdstuk 1 van bijlage 4. Bij een elektriciteitsprijs voor grootgebruikers van € 17,0 per gigajoule gebruikte elektriciteit (ECN, 1999) bedragen de energiekosten bij elektrische aandrijving € 0,0044 per tonkilometer. De prijs van lichte vloeibare brandstoffen is voor grootgebruikers ongeveer € 8,69 per

gigajoule verbruikte brandstof (ECN, 1999), waarmee de energiekosten uitkomen op € 0,0050 per tonkilometer. De gemiddelde energiekosten van het goederenvervoer per spoor bedraagt dan € 0,0046 per tonkilometer.

5.6.3 Goederenvervoer door de binnenvaart

Energie-intensiteit

De primaire energie-intensiteit van het goederenvervoer door de binnenvaart bedroeg in 1993 gemiddeld 0,60 MJ/tonkm. Hierbij is de energie-intensiteit licht afhankelijk van de laadvermogenklasse, maar alleen voor binnenschepen met een laadvermogen van minder dan 200 ton heeft de primaire energie-intensiteit een duidelijk afwijkende waarde, namelijk 1,39 MJ/tonkm. De totale vervoersprestatie van deze categorie binnenschepen is echter zeer klein ten opzichte van de andere categorieën. Voor de toekomst wordt een lichte daling van de energie-intensiteit verwacht. Van 1993 tot 2010 zal de energie-intensiteit met ongeveer 5% afnemen. (Van den Brink en Van Wee, 1997)

Emissiefactoren

De emissiefactoren van de binnenvaart worden berekend aan de hand van de emissies per joule verbruikte brandstof die gegeven wordt door CCDM (in voorbereiding). Deze emissies per joule worden vermenigvuldigd met de gemiddelde secundaire energie-intensiteit van binnenschepen (0,56 MJ/tonkm volgens Van den Brink en Van Wee, 1997). De emissies die het gevolg zijn van de raffinage van de brandstof worden gelijk verondersteld aan de waarden in 1995. De hieruit resulterende emissiefactoren zijn opgenomen in tabel 5.13. Voor de toekomst worden naast een daling van de emissiefactoren door de lagere energie-intensiteit, geen verdere emissiereducties verwacht.

Tabel 5.13: Emissiefactoren voor het goederenvervoer door de binnenvaart voor het jaar 2000, uitgaande van de energie-intensiteit van 1993. Inclusief emissies door raffinage.

CO ₂ -emissie (g/tonkm)	44,2
NO _x -emissie (g/tonkm)	0,79
SO ₂ -emissie (mg/tonkm)	60
VOS-emissie (mg/tonkm)	38
PM ₁₀ -emissie (mg/tonkm)	34

Bron: Van den Brink en Van Wee, 1997; CCDM, in voorbereiding.

Energiekosten

Voor de energiekosten van de binnenvaart wordt uitgegaan van een brandstofprijs van € 8,69 per gigajoule verbruikte brandstof (ECN, 1999). Bij een secundaire energie-intensiteit van 0,56 MJ/tonkm (Van den Brink en Van Wee, 1997) komen de energiekosten uit op € 0,0049 per tonkilometer.

6. Indirecte milieueffecten en financiële kosten

6.1 Inleiding

Het indirecte energiegebruik is het energiegebruik dat niet direct wordt veroorzaakt door het leveren van een vervoersprestatie. De voornaamste processen die het indirecte energiegebruik veroorzaken zijn de constructie van infrastructuur en voertuigen, onderhoudswerkzaamheden aan het systeem, en verlichting en klimaatregeling in de terminals. In dit hoofdstuk wordt voor elk van de ondergrondse transportmethoden en voor de conventionele transportmethoden het energiegebruik van deze processen behandeld.

Voor elk van de verschillende ondergrondse transportmethoden wordt een kwalitatieve beschrijving gegeven van het ruimtegebruik. Geluid- en visuele hinder van ondergrondse transportsystemen zijn verwaarloosbaar indien het systeem volledig ondergronds wordt aangelegd.

6.2 Traditioneel en extra-traditioneel ondergronds transport

6.2.1 Traditioneel pijpleidingtransport

Energiegebruik

Het energiegebruik van de constructie en aanleg van een pijpleiding is berekend met een proces energie analyse. Hierbij wordt het energiegebruik berekend van elk proces dat leidt tot de totstandkoming van de infrastructuur. Een meer gedetailleerde beschrijving van de methode en van de gebruikte invoerwaarden is opgenomen in bijlage 5. Bij de proces energie analyse wordt voor de aanleg van een pijpleiding uitgegaan van een diepteligging van 1 meter en een marge aan weerszijden van de pijpleiding van 25 centimeter. Uit Lyons et al. (1992) blijkt de wanddikte van de pijpleiding toe te nemen met de diameter. De verhouding tussen wanddikte en diameter ligt in de meeste gevallen tussen 2 / 100 en 3 / 100. Bij de berekening is deze verhouding op 2,5 / 100 gesteld. Voor de transportafstand van de buiselementen naar de bouwput wordt aangenomen dat deze 50 km bedraagt; voor de grond wordt verondersteld dat deze niet hoeft te worden afgevoerd.

Met de proces energie analyse is het indirecte energiegebruik berekend van stalen pijpleidingen met diameters van 60 tot 90 centimeter. Dit blijkt tussen 1,3 GJ en 2,9 GJ per meter pijpleiding te liggen. Het overgrote deel van het energiegebruik (99%) betreft energiegebruik van de fabricage van de stalen pijpleiding. Het totale energiegebruik van de constructie²⁵ van de 7 belangrijkste Nederlandse pijpleidingen (zie §3.1.5 van bijlage 4) bedraagt 1,1 PJ. Als uitgegaan wordt van een levensduur van 50 jaar en een totale jaarlijkse vervoersprestatie van de 7 pijpleidingen van 6,4 – 6,9 mld. tonkm (zie bijlage 3, tabel 23), dan bedraagt de gemiddelde indirecte energie-intensiteit van de constructie van de Nederlandse ruwe-aardoliepijpleidingen 3 kJ/tonkm. Daarmee bedraagt het indirecte energiegebruik 4% van het totale energiegebruik van ruwe-aardoliepijpleidingen.

Voor operationele activiteiten, zoals onderhoud en controle van het systeem, is niet bekend wat het energiegebruik is. Het valt echter niet te verwachten dat dit energiegebruik een wezenlijk deel van het totale energiegebruik uitmaakt.

²⁵ Met het 'energiegebruik van de constructie' wordt bedoeld het gezamenlijke energiegebruik van de graafwerkzaamheden, de fabricage van buiselementen en het transport van materialen.

Emissiefactoren

Doordat het indirecte energiegebruik voor 99% wordt bepaald door de fabricage van pijpleidingen worden de emissiefactoren ook bijna geheel bepaald door de emissiefactoren van de pijpleidingfabricage. De berekende indirecte emissiefactoren zijn weergegeven in tabel 6.1. Voor CO₂ en NO_x zijn de emissiefactoren zeer klein, namelijk ± 3% in de totale emissies. Voor SO₂, VOS en vooral voor PM₁₀ zijn de indirecte emissiefactoren wel aanzienlijk met aandelen van respectievelijk circa 20%, 10% en 90% in de totale emissiefactoren van het pijpleidingtransport van ruwe aardolie. Voor de emissiefactoren speelt de keuze van de energiedrager een grote rol.

Tabel 6.1: Directe en indirecte emissiefactoren voor Nederlandse ruwe-aardoliepijpleidingen. Emissies door onderhoud zijn hierbij verwaarloosbaar geacht.

	Direct	Indirect	Totaal
CO ₂ (g/tonkm)	6	0,2	6
NO _x (mg/tonkm)	38	1	39
SO ₂ (mg/tonkm)	5,3	1	6
VOS (mg/tonkm)	1,0	0,1	1,1
PM ₁₀ (mg/tonkm)	0,37	2	2

Ruimtegebruik

Het ruimtegebruik van een pijpleiding is vrijwel uitsluitend indirect ruimtegebruik. Rondom de pijpleiding gelden binnen een veiligheidszone beperkingen voor het bebouwen van de grond. Voor ongebundelde leidingen is de breedte van de veiligheidszone afhankelijk van de vervoerde stof en van de diameter van de pijpleiding. Het maximum ligt bij een afstand van 60 meter rondom de buisleiding. Leidingstroken waarbij 5 à 10 pijpleidingen gebundeld worden, hebben een veiligheidszone van 55 meter aan weerszijde van de strook, die zelf een breedte van 50 meter heeft. De buisleidingstraat van Rotterdam naar Antwerpen, die circa 40 leidingen bundelt, heeft een zelfde veiligheidszone, maar is zelf 100 meter breed. Hieruit blijkt dat bundeling het ruimtegebruik sterk kan verminderen. Dit geldt niet alleen voor bundeling van pijpleidingen onderling, maar ook voor bundeling van pijpleidingen met spoorwegen, hoogspanningsleidingen, autosnelwegen en vaarwegen. (DGG, 2000)

Aanlegkosten

Een belangrijke factor voor het tot stand komen van pijpleidingen zijn de hoge investering die met de aanleg gepaard gaan (KPMG, 1999). Voor de aanlegkosten van een pijpleiding kan een indicatie worden gevonden in de raming voor de aanlegkosten van de in § 4.2.2 besproken propyleenleiding van Rotterdam en Antwerpen naar het Ruhrgebied. De 313,6 km nieuw aan te leggen pijpleiding heeft een investering nodig van € 166,1 mln., wat resulteert in een gemiddelde investering van € 530 per meter buisleiding (ARG, 1999).

6.2.2 Extra-traditioneel pijpleidingtransport

Energiegebruik en emissies

Het energiegebruik en de emissies van de aanleg van extra-traditionele pijpleidingen zullen in dezelfde orde van grootte liggen als die van de aanleg van traditionele pijpleidingen. In het totale energiegebruik van de pijpleidingen is het aandeel van dit energiegebruik zeer klein. Voor slurry-pijpleidingen zijn naast de pijpleiding ook nog grote installaties nodig voor het prepareren en ontwateren van de suspensie. De hiervoor benodigde hoeveelheid energie is niet bekend, maar gezien de lengte van de slurry-pijpleidingen (veelal enkele honderden kilometers) zal de invloed hiervan naar verwachting verwaarloosbaar zijn.

Het energiegebruik van de terminals, zoals voor verlichting, verwarming en airconditioning, is volgens Liu en Assadollahbaik (1979) 5 GJ per dag. Over dit energiegebruik wordt gemeld dat het zonder merkbare afwijking kan worden genegeerd. De emissies hierdoor kunnen naar verwachting eveneens verwaarloosd worden.

Ruimtegebruik

Voor het ruimtegebruik komt het extra-traditionele pijpleidingtransport grotendeels overeen met het traditionele pijpleidingtransport. Alleen slurripijpleidingen kunnen een duidelijk groter ruimtegebruik hebben vanwege de omvang van de benodigde ontwateringinstallaties.

6.3 PCP- en HCP-transport

6.3.1 Pneumatisch capsule-pijpleidingtransport

Energiegebruik

Het energiegebruik van de constructie van pneumatische capsule-pijpleidingen is bepaald op dezelfde wijze en met dezelfde invoerwaarden als voor de traditionele pijpleidingen. Voor de berekening van het energiegebruik van de aanleg van een conventionele PCP wordt een Japanse PCP als uitgangspunt genomen die wordt gebruikt voor het transport van kalksteen. De PCP heeft een lengte van 3,2 km (inclusief de pijpleiding voor het retourtransport van lege capsules), een diameter van 1 meter en een jaarlijks vervoerde hoeveelheid van 2,0 mln. ton. (Mining Technologie, 2001) Het energiegebruik van de constructie van een dergelijke pijpleiding is 3,6 GJ per meter, dus 12 TJ in totaal, en bestaat vrijwel volledig uit het energiegebruik van de fabricage van pijpleidingelementen.

Het energiegebruik van de constructie van de terminals wordt geschat op basis van de afmetingen van de terminals voor het OLS Schiphol. Volgens Van der Heide (1999) hebben deze terminals een totaal oppervlak (vloer + wanden + dak) van 4000 tot 10000 m². Bij betonnen wanden, dak en vloer met een dikte van 0,5 meter bedraagt het energiegebruik voor de constructie 10 tot 30 TJ. Hierover is een grote onzekerheid, aangezien veel variatie mogelijk is in het exacte ontwerp en de gebruikte materialen. Voor PCP wordt het gebruik van twee kleine terminals verondersteld, waarvoor een gezamenlijke hoeveelheid energie van ± 20 TJ nodig is.

Bij deze PCP wordt gebruik gemaakt van treintjes bestaande uit drie capsules met een gewicht van 1,6 ton per capsule. Ervan uitgaande dat de capsules volledig uit staal gemaakt worden en dat er in totaal 12 capsules in het systeem gebruikt worden, dan bedraagt het energiegebruik van de constructie van de capsules ca. 0,4 TJ en is dus te verwaarlozen. Bij een jaarlijkse vervoersprestatie van 3,2 mln. tonkm en een levensduur van 50 jaar bedraagt de indirecte energie-intensiteit van de constructie van het systeem 0,20 MJ/tonkm. Vergeleken met andere ondergrondse transportsystemen is dit een hoge waarde, wat veroorzaakt wordt door de lage vervoersprestatie die met conventionele pneumatische capsule-pijpleidingen mogelijk is. (Mining Technologie, 2001)

Voor de berekening van het energiegebruik van de aanleg van een LIM-aangedreven PCP worden de systeemkenmerken gebruikt van de hypothetische PCP die door Liu (2000b) beschreven wordt. Deze PCP heeft een diameter van 0,98 meter en een lengte van 100 km. De jaarlijks vervoerde hoeveelheid varieert met de lijnvulling. De lijnvulling bedraagt 5% à 20%; bij deze berekening wordt uitgegaan van 10% waarbij de jaarlijks vervoerde hoeveelheid 9,6 mln. ton per jaar bedraagt. Het energiegebruik van de constructie bedraagt 3,5 GJ per meter, dus 35 TJ in totaal. Met het energiegebruik van de constructie van de terminals (10 TJ per stuk) en van de circa 2500 benodigde capsules (1000 kg staal, dus 23 GJ per capsule) komt het totale energiegebruik op 113 TJ. De energie-intensiteit van de constructie bij een jaarlijkse vervoersprestatie van 960 mln. tonkm is 0,0024 MJ/tonkm.

Het energiegebruik van de aanleg van een LSM-aangedreven PCP wordt berekend op basis van de PCP die beschreven wordt door Montgomery et al. (2000). Deze PCP heeft een diameter van 610 mm en een lengte van 48 km. Voor de constructie van de pijpleiding wordt 1,4 GJ per meter aan energie gebruikt. In totaal is het energiegebruik van de aanleg van de pijpleiding 65 TJ. Over het energiegebruik voor de constructie van de gebruikte elektromagneten zijn geen data bekend. Voor de constructie van de terminals wordt twee maal 10 TJ aan energie gebruikt. De 7800 voertuigen hebben ieder een massa van 275 kg en bestaan voornamelijk uit staal. Het energiegebruik van de constructie van de voertuigen bedraagt daarmee 50 TJ. Bij een levensduur van 50 jaar en een jaarlijkse vervoersprestatie van $4,3 * 10^8$ tonkm bedraagt de energie-intensiteit van de aanleg 0,0063 MJ/tonkm.

Voor het energiegebruik van de terminals zoals voor verlichting, verwarming, koeling en ventilatie, wordt uitgegaan van hetzelfde energiegebruik als een terminal van het OLS Schiphol. Het primaire energiegebruik van deze terminals varieert tussen 0,73 TJ/jaar voor de kleine terminals op Schiphol en 1,91 TJ/jaar voor de grotere terminals in Aalsmeer en Hoofddorp. Dit energiegebruik komt overeen met het energiegebruik dat Liu en Assadollahbaik (1979) voor een HCP terminal berekenden, namelijk per terminal 0,95 TJ secundair per jaar wat primair $\pm 1,6$ TJ/jaar zal zijn. Hiermee is dit deel van het energiegebruik verwaarloosbaar klein.

Door Roos et al. (2000) wordt het jaarlijkse energiegebruik van het onderhoud aan voertuigen en infrastructuur voor een landelijk OLS geraamd op respectievelijk 3% en 2% van het energiegebruik van de aanleg. Aangezien de levensduur van voertuigen en infrastructuur op 50 jaar is verondersteld, bedraagt de energie-intensiteit van onderhoud ongeveer even veel als de jaarlijkse energie-intensiteit van de constructie, namelijk 0,21 MJ/tonkm voor de conventionele PCP, 0,0030 MJ/tonkm voor de LIM-aangedreven PCP en 0,0072 MJ/tonkm voor de LSM-aangedreven PCP

6.3.2 Hydraulisch capsule-pijpleidingtransport

Energiegebruik

Het energiegebruik voor de aanleg van een HCP is afhankelijk van de diameter en de lengte van de pijpleiding. Doordat de door de HCP geleverde maximale vervoersprestatie eveneens afhankelijk is van de pijpleidingdiameter (Liu en Assadollahbaik, 1979), is de energie-intensiteit van de aanleg van de pijpleiding met een diameter groter dan 10 cm vrijwel constant, namelijk ca. 22 J/tonkm bij een lijnvulling²⁶ van 70%. Voor een lijnvulling van 50% bedraagt de energie-intensiteit 31 J/tonkm en bij 30% lijnvulling 52 J/tonkm. Het energiegebruik van de aanleg is hiermee verwaarloosbaar klein.

De totale energie-intensiteit van de constructie van de per meter pijpleiding benodigde capsules kan berekend worden uit het aandeel van de lading in de totale massa van een geladen capsule (75%) en de snelheid van een capsule (7 km/h). Deze energie-intensiteit blijkt 251 J/tonkm te bedragen, onafhankelijk van de diameter en de lijnvulling van de pijpleiding. Ten opzichte van de directe energie-intensiteit van HCP is het indirecte energiegebruik verwaarloosbaar klein.

De bouw van de terminals vergt ongeveer 10 TJ per terminal. Het energiegebruik van verlichting, verwarming, koeling en ventilatie van de terminals wordt door Liu en Assadollahbaik (1979) ingeschat op 1,6 TJ per terminal per jaar. Dit deel van het energiegebruik heeft een aandeel van meer dan 5% bij pijpleidingen korter dan ca. 30 km.

²⁶ Lijnvulling: het percentage van de lengte van de buisleiding dat door capsules bezet is.

6.4 Overige niet-traditionele ondergrondse transportsystemen

Energiegebruik

Het indirecte energiegebruik van railgeleide voertuigen, automatisch geleide voertuigen (AGV) en dual-mode voertuigen komen grotendeels met elkaar overeen. Door de grote spreiding in technische kenmerken van AGV's, zoals de omvang van de voertuigen, en doordat overeenkomstige materialen worden gebruikt, wordt hier volstaan met de berekening van het energiegebruik van verschillende componenten van een ondergronds logistiek systeem (OLS) met AGV's. In hoofdstuk 7 zal het totale indirecte energiegebruik en de indirecte energie-intensiteit van een concreet netwerk voor OLS berekend worden.

Voor een OLS met AGV's is het energiegebruik van de aanleg van tunnels volgens de in bijlage 5 beschreven methode berekend voor verschillende voertuigformaten. Hierbij is uitgegaan van AGV's met een verhouding breedte : hoogte als 1 : 1½. Er wordt aangenomen dat tussen de AGV's en de tunnelwand een minimale vrije ruimte bestaat van 20%. Het energiegebruik van de aanleg wordt voor vijf typen tunnels berekend:

- een enkelbaans boortunnel,
- een rechthoekige enkelbaans open-bouwputtunnel zonder hulpdamwand,
- een rechthoekige enkelbaans open-bouwputtunnel met hulpdamwand,
- een rechthoekige dubbelbaans open-bouwputtunnel met hulpdamwand,
- een ronde enkelbaans open-bouwputtunnel zonder hulpdamwand.

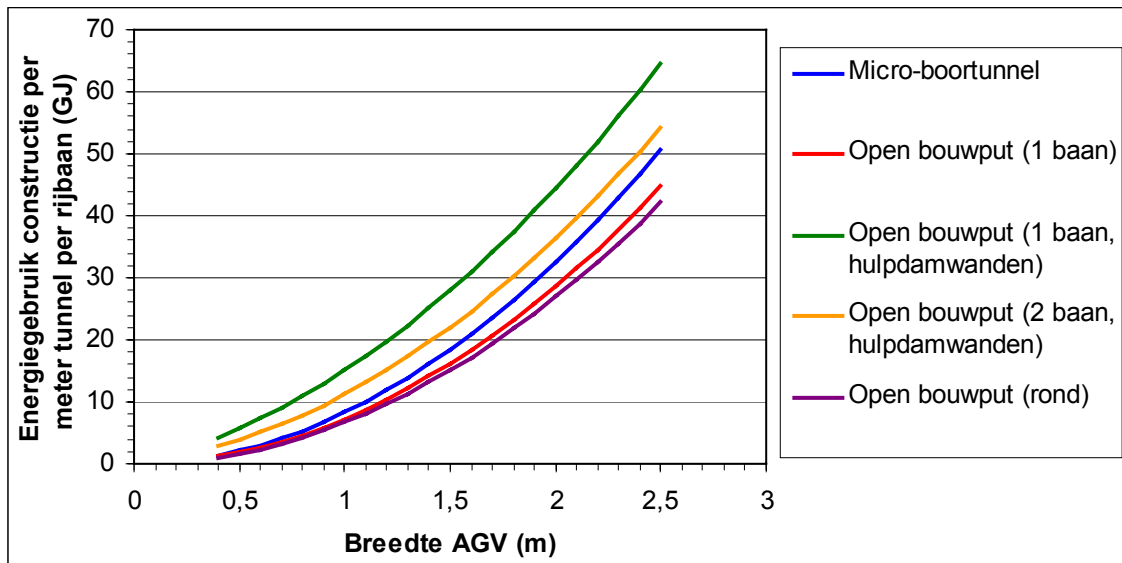
Voor de boortunnel wordt een gronddekking verondersteld die even groot is als de diameter van de tunnel. Een dergelijke gronddekking is nodig om opdrijvende krachten van het grondwater te weerstaan (Kuiper en Ottevanger, 1998). Voor de open bouwput tunnels wordt aangenomen dat het dak op maaiveldniveau ligt.

Het energiegebruik van de tunnelbouw wordt berekend volgens de methode zoals die in bijlage 5 is beschreven. In figuur 6.1 is het energiegebruik van de constructie weergegeven afhankelijk van de breedte van de AGV's. Door uit te gaan van de breedte van het formaat van de AGV kan een betere vergelijking gemaakt worden tussen ronde en rechthoekige tunnels. Uit de berekeningen blijkt dat het gebruik van hulpdamwanden bij een open bouwput een grote invloed heeft op het energiegebruik. Dit komt door de grote hoeveelheid energie die nodig is voor de productie van staal. Indien de tunnel dieper wordt aangelegd, zal ook het voor de hulpdamwand benodigde energiegebruik toenemen. Bij ondiepe bouwputten is het gebruik van hulpdamwanden vaak niet nodig.

Bij een dubbelbaans open-bouwputtunnel zal het energiegebruik van de hulpdamwanden per rijbaan verminderen, doordat evenveel hulpdamwand nodig is voor meer rijbanen. Indien geen hulpdamwand nodig is, zal het energiegebruik van de constructie per rijbaan voor een dubbelbaans open-bouwputtunnel nauwelijks verschillen van een enkelbaans open-bouwputtunnel.

Het energiegebruik voor de constructie van een tunnel die gebouwd wordt door een micro-boormachine is hoger dan het energiegebruik voor een open-bouwputtunnel zonder hulpdamwanden. Dit verschil wordt veroorzaakt door het energiegebruik van de tunnelboormachine, die veel hoger is dan dat van conventionele graafmachines (zie bijlage 5). Vergeleken met een open bouwputtunnel met damwanden is boren wel energetisch gunstiger.

De vorm van de tunnel speelt nauwelijks een rol voor het energiegebruik. Ronde tunnels hebben een minder dikke laag beton nodig dan rechthoekige tunnels, maar nemen wel een groter volume in beslag wat leidt tot een hoger energiegebruik voor de graafwerkzaamheden en voor het transport. Per saldo komt het energiegebruik voor ronde enkelbaans open-bouwputtunnels iets lager uit dan voor rechthoekige.



Figuur 6.1: Het energieverbruik van de constructie van verschillende typen tunnels, afhankelijk van het formaat van de AGV's.

Afhankelijk van het gekozen voertuigconcept is het nog noodzakelijk om aanvullende voorzieningen te construeren in de tunnel, zoals rails voor railgeleide voertuigen, een geleiderail voor stroomvoorziening in de tunnel en eventueel een horizontale vloer bij ronde tunnels. Vooral de stalen componenten kunnen wezenlijk bijdragen aan het energieverbruik van de constructie van de infrastructuur. Een enkele 5×5 cm stalen rail heeft bijvoorbeeld al een energie-inhoud van ca. 460 MJ per meter.

Het energieverbruik van de bouw van terminals is in § 6.3 berekend en bedraagt afhankelijk van de grootte 10 à 30 TJ. Bij een stedelijk OLS kunnen ook kleinere distributiepunten gebouwd worden met een energieverbruik die nauwelijks hoger is dan van alleen een buisleiding. Het operationele energieverbruik van de terminals ligt tussen de 0,7 en 1,9 TJ/jaar; voor distributiepunten is dit lager.

Voor de constructie van voertuigen wordt veel gebruik gemaakt van gegalvaniseerde staalplaten met een energie-intensiteit van 30,2 MJ/kg. Andere voor voertuigen gebruikte materialen hebben vaak een hogere energie-intensiteit: aluminium 198 MJ/kg, rubber 59 MJ/kg en plastic 75 MJ/kg. (Bos, 1998) Over de massa-aandelen van de verschillende materialen in het voertuig bestaat net als over de totale voertuigmassa nog een grote onzekerheid, omdat deze per voertuigontwerp kunnen verschillen. Er wordt daarom bij de verdere berekeningen uitgegaan van een energie-intensiteit van 30 MJ/kg. De AGV's voor het OLS Schiphol, met een massa uiteenlopend van 3500 tot 5000 kg, hebben dan een energie-inhoud van 110 à 150 GJ. Voor de verschillende concepten voor stedelijke OLS loopt het energieverbruik van de constructie van voertuigen afhankelijk van het formaat uiteen van 190 MJ tot 44 GJ.

Emissies

De emissies die het gevolg zijn van het energieverbruik, hebben voor verschillende tunneldiameters een vrijwel constante verhouding met het energieverbruik. De verhoudingen tussen emissies en het energieverbruik kunnen echter wel aanzienlijk verschillen tussen verschillende bouwmethoden, vanwege variaties van aandelen in het energieverbruik van verschillende productieprocessen. In hoofdstuk 7 wordt voor een stedelijk OLS de indirecte emissies berekend.

6.5 Bovengrondse transportmethoden

Energiegebruik

Het indirecte energiegebruik voor het vervoer per weg, per spoor en door de binnenvaart is bepaald door Bos (1998). De indirecte energie-intensiteit bedraagt voor deze drie transportmodi respectievelijk 0,47 MJ/tonkm, 0,30 MJ/tonkm en 0,27 MJ/tonkm. Afhankelijk van de vervoerswijze is van deze energie-intensiteit 25% à 40% het gevolg van onderhoud en constructie van de voertuigen. Het overige deel komt voor rekening van de infrastructuur.

7. Case-studie voor een integrale beschouwing van energiegebruik, emissies en kosten

7.1 Inleiding

Om de directe en indirecte milieu-effecten van een OLS te beschouwen in combinatie met de kosten, is een case-studie uitgevoerd voor een concreet OLS-concept. Omdat grootschalige toepassing van OLS om financiële redenen op korte en middellange termijn niet plausibel lijkt (DGG, 2001), wordt het concept beperkt tot een netwerk binnen één stad. De eventuele aanwezigheid van OLS in andere steden wordt daarbij buiten beschouwing gelaten.

Als case is voor het OLS Utrecht gekozen, omdat voor dit concept uitgebreid onderzoek is gedaan naar de goederenstromen van en naar de stad en er voldoende technische kenmerken gespecificeerd zijn omtrent de infrastructuur en de voertuigen. Een nadeel van dit concept is dat het een onderdeel is van een plan voor grootschalige nieuwbouw in het centrum van Utrecht, het Utrecht City Project, dat later onhaalbaar is gebleken en gedeeltelijk is geschrapt. Door het inkrimpen van dit project zullen de prognoses voor de goederenstromen van het OLS Utrecht niet gehaald worden, zodat de realisatie van het OLS uiterst twijfelachtig is. (DGG, 2001) De resultaten van de case studie hebben dan ook slechts de functie om als indicator te fungeren voor het concept OLS in het algemeen.

In dit hoofdstuk wordt eerst een beschrijving gegeven van het OLS Utrecht. Daarna worden het directe en indirecte energiegebruik en emissies en de kosten van het OLS berekend. De resultaten van deze berekeningen worden tenslotte geëvalueerd. Bij deze evaluatie worden enkele belangrijke motieven voor invoering van een OLS buiten beschouwing gelaten. Het betreft hier onder andere het verminderen van geluidhinder en visuele hinder. De case studie kan dus niet worden opgevat als een volledige kosten-baten analyse.

7.2 Beschrijving van het OLS Utrecht

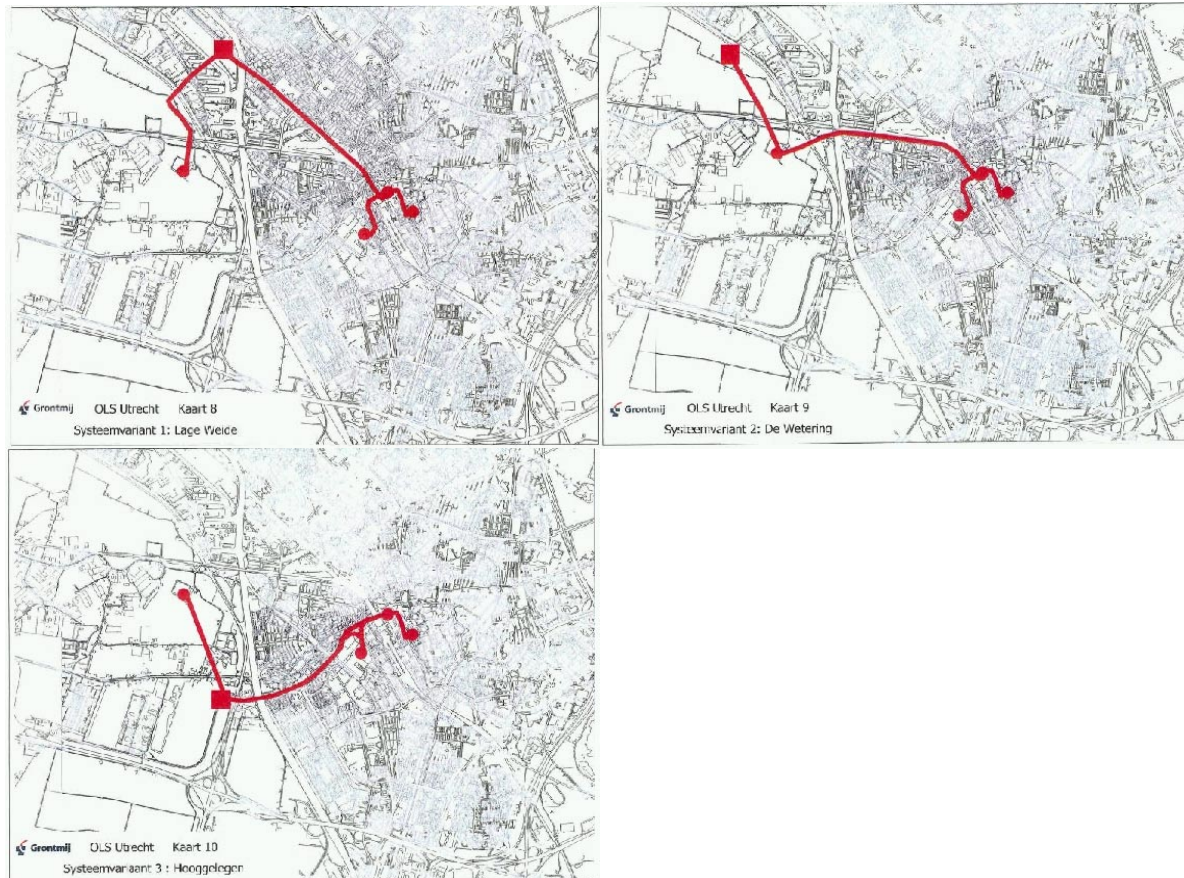
Het OLS Utrecht is een in 1999 ontwikkeld concept van een ondergronds netwerk voor stedelijke distributie in de stad Utrecht. Het verbindt drie wijkdistributiewinkels (WDW) in de Utrechtse binnenstad en eventueel een WDW in het nieuwe stadsgedeelte Leidsche Rijn met een ten westen van de huidige stad gelegen logistiek stadspark (LSP). Hierbij zijn twee systeemvarianten en drie verschillende trajecten mogelijk. De twee systeemvarianten zijn een palletsysteem en een collisysteem. Een palletsysteem is duurder dan een collisysteem, maar met een collisysteem kunnen minder soorten goederen vervoerd worden en is voor andere goederen een andere verpakkingsmethode vereist. (Ettema, 1999) Tabel 7.1 geeft enkele technische kenmerken van voertuigen en infrastructuur voor beide varianten.

Tabel 7.1: Technische kenmerken van de pallet- en de collivariant van het OLS Utrecht. Bron: Ettema, 1999.

	Palletsysteem	Collisysteem
Binnendiameter buisleiding (m)	2,20	1,15
Dikte tunnelwand (cm)	35	5
Dekking ²⁷ (m)	5,00	1,50
Afmetingen voertuig b × h (cm)	100 × 160	60 × 60

²⁷ Dekking: hoogte van de grondlaag boven de buisleiding.

De drie tracévarianten verschillen in de locatie van het LSP, namelijk: Lage Weide, De Wetering of Hooggelegen (zie figuur 7.1). Bij het traject De Wetering loopt de buisleiding bovendien via Leidsche Rijn naar de binnenstad, terwijl Lage Weide en Hooggelegen twee afzonderlijke lussen hebben: één naar de binnenstad en één naar Leidsche Rijn. Hierbij is tevens de optie aanwezig om de lus naar Leidsche Rijn weg te laten. (Ettema, 1999) In dit rapport wordt er van uit gegaan dat Leidsche Rijn wel wordt aangesloten op het OLS.



Figuur 7.1: De drie netwerkconcepten voor het OLS Utrecht. Met de klok mee: Lage Weide, De Wetering en Hooggelegen. Bron: Ettema, 1999.

7.3 Direct energiegebruik en emissies

7.3.1 Inleiding

Voor het directe energiegebruik is het van belang hoeveel goederen worden vervoerd, welke afstanden voor het vervoer door de verschillende transportmodi worden afgelegd en wat de directe energie-intensiteit is van de verschillende transportmodi. Deze drie factoren worden in de volgende drie sub-paragrafen behandeld. Hierbij worden de goederenstromen met zowel herkomst als bestemming binnen Utrecht buiten beschouwing gelaten. Voor dit deel van de goederen is onvoldoende bekend wat de per vervoersmodus afgelegde weg is en bovendien is onduidelijk in hoeverre OLS voor deze goederenstromen een alternatief kan zijn.

7.3.2 Afgelegde afstanden

Zonder OLS

De afgelegde afstanden voor het transport van en naar de stad Utrecht worden gemeten vanaf de plaats waar de goederen de rondweg²⁸ van Utrecht bereiken. Voor de bepaling van deze afstanden voor het wegtransport is gebruik gemaakt van een routeplanner²⁹. In tabel 7.2 zijn de afstanden weergegeven die voertuigen over de weg afleggen indien geen gebruik wordt gemaakt van een OLS. Volgens een enquête onder ondernemers in Utrecht worden in de huidige situatie alle leveringen door wegtransportmiddelen uitgevoerd (Boerkamps en Brouwer, 1999).

Tabel 7.2: Afstanden over de weg vanaf verschillende toegangspunten tot de rondweg van Utrecht naar de Utrechtse binnenstad (Vredenburg) en Leidsche Rijn zonder OLS (km).

	Binnenstad		Leidsche Rijn	
	Snelwegen	Stadswegen	Snelwegen	Stadswegen
Noordwest (A2)	3,6	4,3	3,6	1,0
Noordoost (A27/A28)	1,9	4,5	14,0	1,0
Oost (A12)	6,9	3,9	9,2	1,0
Zuid (A2/A27)	1,7	3,9	4,0	1,0
West (A12)	2,7	3,9	5,1	1,0
Wisselt/onbekend ³⁰	2,6	4,0	5,6	1,0

Met OLS

Indien gebruik wordt gemaakt van een OLS kan het transport op het overige deel van het traject plaatsvinden door wegtransport, railtransport of binnenvaart. Van de drie mogelijke locaties voor een LSP is alleen bij Lage Weide een aansluiting op het landelijke railvervoer en binnenvaart eenvoudig te realiseren. Omdat onbekend is of en, zo ja, in welke mate de realisatie van het OLS Utrecht kan leiden tot een verschuiving van het transport van weg naar rail, wordt er van uit gegaan dat het transport buiten Utrecht over de weg blijft plaatsvinden. Tabel 7.3 geeft de afstanden van de verschillende toegangspunten tot de rondweg van Utrecht naar de drie mogelijke locaties voor een logistiek stadspark. In tabel 7.4 zijn de afstanden weergegeven die de goederen afleggen om van de verschillende mogelijke logistieke stadsparken naar de eindbestemming in Utrecht te gaan. De afstand door het OLS tussen De Wetering en Leidsche Rijn is niet bekend, maar wordt even groot verondersteld als de gemiddelde afstand van Lage Weide en Hooggelegen naar Leidsche Rijn (zie figuur 7.1).

²⁸ De rondweg van Utrecht wordt gevormd door de aan Utrecht grenzende delen van de autosnelwegen A12, A2 en A27, en door de N230

²⁹ Routeplanner: Easy Travel, Versie 210c Pro Net. Instelling: snelste route.

³⁰ De afstanden van de categorie 'Wisselt/onbekend' zijn bepaald door de naar vervoerd volume gewogen gemiddelden te nemen van de andere bestemmingen.

Tabel 7.3: Afstanden naar mogelijke locaties voor een logistieke stadspark over de weg (km).

	Lage Weide		De Wetering		Hooggelegen	
	Snelwegen	Stadswegen	Snelwegen	Stadswegen	Snelwegen	Stadswegen
Noordwest	0,0	4,5	3,6	2,1	5,9	0,7
Noordoost	14,0	4,4	14,0	2,2	11,7	1,0
Oost	9,2	4,4	9,2	2,2	6,9	1,0
Zuid	4,0	4,4	4,0	2,2	1,7	1,0
West	5,1	4,4	5,1	2,2	7,4	1,0
Wisselt	4,5	4,4	5,6	2,2	5,5	1,0
/onbekend						

Tabel 7.4: Afstanden door OLS (km). Bron: Ettema, 1999.

	Binnenstad	Leidsche Rijn
Lage Weide	4,9	1,9
De Wetering	7,4	1,9
Hooggelegen	4,4	1,9

7.3.3 Goederenstromen van en naar Utrecht

Huidige goederenstromen

Uit een enquête onder winkeliers is door Boerkamps en Brouwer (1999) het wekelijks vervoerde volume bepaald, uitgesplitst naar verschillende richtingen van waaruit de goederen Utrecht binnenkomen. Om de volumes om te rekenen naar een vervoerd gewicht, is gebruik gemaakt van een soortelijk gewicht van de goederen van 300 kg/m³ zoals die bepaald is voor het OLS Leiden (Buck et al., 1999). Het aandeel van de verschillende typen ladingdragers in het totaal aantal vervoerde ladingdragers komt voor Leiden (Buck et al., 1999) in grote lijnen overeen met dat van Utrecht (Boerkamps en Brouwer, 1999), zodat geen grote afwijking in het soortelijk gewicht van de goederen verwacht wordt.

Het vervoerde gewicht die hiermee voor het jaar 1999 bepaald is, is weergegeven in tabel 7.5. Omdat het winkelcentrum van het nieuwe stadsdeel Leidsche Rijn nog niet gereed is, worden hier geen goederen naartoe vervoerd. Voor het collisysteem wordt verwacht dat de potentiële goederenstroom een factor 3,4 kleiner is dan voor het palletsysteem. Deze factor is gebaseerd op de vervoerde hoeveelheid van de verschillende typen ladingdragers. Tabel 7.5 heeft alleen betrekking op het goederenvervoer naar Utrecht. Daarnaast kan er ook sprake zijn van vervoer vanaf Utrecht, namelijk in de vorm van afvaltransport. Omdat het afval per binnenschip uit Utrecht wordt afgevoerd, is afvaltransport door het OLS alleen bij een LSP op Lage Weide een aannemelijke optie. In dit rapport wordt de mogelijkheid tot afvaltransport buiten beschouwing gelaten.

Tabel 7.5: Omvang van de voor het OLS Utrecht geschikte goederenstromen (in tonnen) naar Utrecht voor het jaar 1999.

		Bestemming			
		Palletsysteem		Collisysteem	
		Binnenstad	Leidsche Rijn	Binnenstad	Leidsche Rijn
Herkomst	Noordwest	160	0	47	0
	Noordoost	140	0	41	0
	Oost	100	0	30	0
	Zuid	600	0	177	0
	West	620	0	183	0
	Onbekend	220	0	65	0

Bron: Boerkamps en Brouwer (1999) bij een soortelijk gewicht van 300 kg/m³.

Verwachte toekomstige goederenstromen

Door Boerkamps en Brouwer (1999) zijn de goederenstromen in het jaar 2010 geschat. Hierbij is uitgegaan van de volledige realisatie van het Utrecht City Project die een sterke toename van het goederentransport naar Utrecht tot gevolg heeft. In tabel 7.6 zijn de voor het palletsysteem geschatte goederenstromen weergegeven bij een soortelijk gewicht van 300 kg/m³.

Tabel 7.6: Geraamde omvang van de voor het OLS Utrecht geschikte goederenstromen (in tonnen) naar Utrecht voor het jaar 2010 bij volledige realisatie van het Utrecht City Project.

		Bestemming			
		Pallet-systeem		Colli-systeem	
		Binnenstad	Leidsche Rijn	Binnenstad	Leidsche Rijn
Herkomst	Noordwest	241	38	71	11
	Noordoost	211	34	62	10
	Oost	151	24	45	7
	Zuid	905	144	267	43
	West	936	149	276	44
	Onbekend	332	53	98	16

Bron: Boerkamps en Brouwer (1999) bij een soortelijk gewicht van 300 kg/m³.

Vanwege het grotendeels schrappen van het Utrecht City Project is het onwaarschijnlijk dat de in tabel 7.6 gegeven goederenstromen naar de Utrechtse binnenstad gehaald worden. Bij verdere berekeningen (voor de periode na 2010) worden de goederenstromen van tabel 7.6 als bovengrens genomen en fungeren de goederenstromen van tabel 7.5 als ondergrens.

7.3.4 Directe energie-intensiteit en emissiefactoren van het OLS Utrecht

Wegvervoer

Door Boerkamps en Brouwer (1999) is het aandeel van verschillende voertuigtypen in het aantal leveringen bepaald. Omdat de per levering vervoerde hoeveelheid verschilt sterk tussen verschillende voertuigen, kan hieruit niet direct een gemiddelde energie-intensiteit in MJ/tonkm berekend worden. Alvorens het gemiddelde energiegebruik per tonkm bepaald kan worden, moet het gemiddelde energiegebruik per voertuigkilometer berekend worden. Tabel 7.7 geeft een overzicht van de aandelen van de voertuigtypen in het totale aantal leveringen en van de energie-intensiteiten in MJ/km en de emissiefactoren in g/km in 2010. De energie-intensiteiten in 2010 zijn berekend aan de hand van de energie-intensiteiten per wegtype in 1995, zoals die zijn weergegeven in tabel 5.10, en de verwachte afname van de totale³¹ energie-intensiteit in de periode van 1995 tot 2010 met 20% voor bestelauto's en met 1% voor vrachtauto's en trekkers (Feimann et al., 2000). Hierbij is het energiegebruik voor het goederenvervoer door personenauto's (in MJ/km) gelijk gesteld aan dat van bestelauto's. Het aandeel van het energiegebruik van personenauto's in het totale energiegebruik van het wegtransport naar Utrecht is klein en bovendien is het energiegebruik van het goederenvervoer per personenauto ongeveer gelijk aan het energiegebruik van het goederenvervoer per bestelauto. De emissiefactoren in 2010 zijn op overeenkomstige wijze berekend uit de emissiefactoren voor 1995 zoals gegeven door CBS Statline en de verwachte verandering van de totale emissiefactoren uit Feimann et al. (2000).

³¹ Met 'totaal' wordt bedoeld: voor alle wegtypen gezamenlijk.

Tabel 7.7: Aandeel in het totale aantal leveringen en de energie-intensiteiten en emissiefactoren van verschillende typen vrachtoertuigen voor 2010. Bron: Boerkamps & Brouwer, 1999; Attack versie 2.0 (Bus et al., 1996), CBS Statline, Feimann et al., 2000.

Voertuigtype	Bestel/personenauto	Vrachtauto	Trekker	Onbekend
Aandeel in leveringen (%)	54	37	6	4
Energie-intensiteit (MJ/km):				
• Snelwegen	2,68	9,15	11,20	
• Stadswegen	3,26	12,88	19,41	
Emissiefactor CO ₂ (g/km)				
• Snelwegen	196	834	814	
• Stadswegen	238	1169	1424	
Emissiefactor NO _x (g/km)				
• Snelwegen	0,60	3,49	4,09	
• Stadswegen	0,33	4,72	6,94	
Emissiefactor SO ₂ (g/km)				
• Snelwegen	0,01	0,03	0,03	
• Stadswegen	0,01	0,04	0,04	
Emissiefactor VOS (g/km)				
• Snelwegen	0,03	0,19	0,18	
• Stadswegen	0,07	0,59	0,74	
Emissiefactor PM ₁₀ (g/km)				
• Snelwegen	0,02	0,09	0,06	
• Stadswegen	0,04	0,13	0,10	

De energie-intensiteiten en emissiefactoren van de verschillende voertuigtypen worden naar hun aandeel in het aantal leveringen gewogen gemiddeld. Dit houdt in dat de verhouding tussen de voertuigtypen constant gehouden voor de verschillende herkomsten van de goederen en dat verondersteld wordt dat de per levering afgelegde afstand voor alle vervoerswijzen gelijk is. Vanwege een gebrek aan gegevens is echter geen uitsplitsing naar herkomst mogelijk. De gemiddelde energie-intensiteiten en emissiefactoren in 2010 zijn weergegeven in tabel 7.8.

De in totaal 3093 zendingen naar de Utrechtse binnenstad per week vervoeren 5321 m³ aan goederen. Met een soortelijk gewicht van 300 kg/m³ komt dit neer op een gemiddelde van 516 kg per zending. Per rit worden gemiddeld circa 2 zendingen afgeleverd, wat resulteert in 1,0 ton vervoerd gewicht per rit. (Boerkamps en Brouwer, 1999) Als verondersteld wordt dat de voertuigen op de terugrit geen goederen vervoeren, bedraagt de gemiddelde belading 0,50 ton. Aan de hand van deze gemiddelde belading zijn de energie-intensiteiten en emissiefactoren berekend die eveneens in tabel 7.8 zijn weergegeven. De berekende energie-intensiteiten zijn ruim hoger dan de energie-intensiteiten die zijn weergegeven in tabel 5.10. De reden hiervoor is de lage gemiddelde belading. Bij stedelijke distributie worden veel goederen vervoerd met een laag soortelijk gewicht, zoals kleding.

Tabel 7.8: Directe energie-intensiteiten en emissiefactoren van het wegverkeer voor de stedelijke distributie van Utrecht.

	Snelwegen	Stadswegen
Energie-intensiteit (MJ/km)	5,67	7,93
Emissiefactor CO ₂ (g/km)	478	666
Emissiefactor NO _x (g/km)	1,92	2,41
Emissiefactor SO ₂ (g/km)	0,02	0,02
Emissiefactor VOS (g/km)	0,10	0,31
Emissiefactor PM ₁₀ (g/km)	0,05	0,08
Energie-intensiteit (MJ/tonkm)	11,35	15,86
Emissiefactor CO ₂ (g/tonkm)	955	1333
Emissiefactor NO _x (g/tonkm)	3,84	4,83
Emissiefactor SO ₂ (g/tonkm)	0,04	0,05
Emissiefactor VOS (g/tonkm)	0,20	0,62
Emissiefactor PM ₁₀ (g/tonkm)	0,10	0,16

OLS

Het directe energiegebruik van het OLS Utrecht is berekend op overeenkomstige wijze als de energie-intensiteiten van de concepten voor stedelijke OLS die in § 5.3 van bijlage 4 berekend zijn. Voor de technische kenmerken van de voertuigen zijn enkele aannames gedaan. In tabel 7.9 zijn deze weergegeven. Voor het directe energiegebruik van het OLS kan enerzijds onderscheid worden gemaakt tussen een colli- en een palletsysteem en anderzijds tussen een betonnen baan en stalen rails buiten de terminals. Het collisysteem heeft de hoogste directe energie-intensiteit: 2,1 MJ/tonkm voor stalen rails en 4,8 MJ/tonkm voor een betonbaan. De primaire energie-intensiteit van het palletsysteem bedraagt 1,0 MJ/tonkm voor stalen rails en 2,8 MJ/tonkm voor een betonnen baan. Bij de berekening van deze energie-intensiteiten is uitgegaan van een gemiddelde beladingsgraad van 50 massa-%. Voor het rendement van de elektriciteitsproductie en -distributie in 2010 wordt aangenomen dat dit 58% bedraagt; dit is het 50%:50%-gemiddelde van het rendement in het EC- en het GC-scenario (Gijsen en Spakman, 2001). De directe emissies zijn uit het directe energiegebruik berekend met het 50%:50%-gemiddelde van de emissiefactoren in het EC- en het GC-scenario (Gijsen en Spakman, 2001).

Tabel 7.9: Technische specificaties die zijn gebruikt voor de berekening van het energiegebruik van de AGV's voor het OLS Utrecht.

	Colli-systeem	Pallet-systeem
Massa lading	25 kg	229 kg
Frontaal oppervlak	0,36 m ²	1,60 m ²
Versnelling	2 m/s ²	1,5 m/s ²
Remvertraging	2 m/s ²	1,5 m/s ²
Kruissnelheid	5,6 m/s	5,6 m/s

Tabel 7.10: Directe energie-intensiteiten en emissiefactoren van het OLS.

	Collisysteem		Palletsysteem	
	Betonbaan	Rails	Betonbaan	Rails
Energie-intensiteit (MJ/tonkm)	4,8	2,1	2,8	1,0
Emissiefactor CO ₂ (g/tonkm)	270	118	157	56
Emissiefactor NO _x (g/tonkm)	0,21	0,09	0,12	0,04
Emissiefactor SO ₂ (g/tonkm)	0,06	0,03	0,04	0,01
Emissiefactor VOS (g/tonkm)	0,01	0,00	0,01	0,00
Emissiefactor PM ₁₀ (g/tonkm)	0,01	0,00	0,00	0,00

7.3.5 Totaal direct energiegebruik en emissies

Aan de hand van de afgelegde afstanden uit § 7.3.2 en de goederenstromen uit § 7.3.3 kunnen de vervoersprestaties voor de verschillende varianten berekend worden. In tabel 7.11 zijn de maximaal haalbare vervoersprestaties van verschillende combinaties van systeem- en netwerkmogelijkheden. Uit de tabel blijkt dat de vervoersprestatie met een OLS over het algemeen groter is dan zonder OLS. Dit wordt veroorzaakt doordat de goederen in feite een omweg maken via het LSP. Van de totale vervoersprestatie vindt bij een OLS een kleiner deel over stadswegen plaats en neemt de vervoersprestatie over snelwegen in absolute zin toe.

Tabel 7.11: Maximale vervoersprestaties per jaar (1000 tonkm) voor naar Utrecht getransporteerde goederen voor verschillende systemen en netwerken.

Goederenstromen	Maximaal		Minimaal	
	Colli	Pallet	Colli	Pallet
Type OLS				
Zonder OLS				
Snelwegen	150	506	112	379
Stadswegen	178	601	120	406
OLS	0	0	0	0
Totaal	327	1107	232	785
Lage Weide				
Snelwegen	220	744	146	493
Stadswegen	189	639	125	424
OLS	223	754	152	514
Totaal	631	2137	423	1431
De Wetering				
Snelwegen	239	808	158	536
Stadswegen	94	317	62	210
OLS	330	1116	223	755
Totaal	662	2241	443	1501
Hooggelegen				
Snelwegen	234	794	155	526
Stadswegen	42	141	28	93
OLS	201	681	138	466
Totaal	477	1616	321	1086

Met de vervoersprestaties uit tabel 7.9 kan het bijbehorende energiegebruik en de emissies berekend worden met behulp van de in § 7.3.4 behandelde directe energie-intensiteiten en emissiefactoren. De resultaten hiervan zijn weergegeven in tabel 7.12 en tabel 7.13. Als het directe energiegebruik van de drie netwerkvarianten worden vergeleken met de directe energieconsumptie van de situatie zonder OLS, dan blijkt het totale directe energiegebruik voor een LSP op Lage Weide en in de meeste gevallen ook voor een LSP op De Wetering hoger te liggen dan bij vervoer over de weg. Alleen bij een LSP op Hooggelegen is het jaarlijkse directe energiegebruik lager dan in een situatie zonder OLS. Uit tabel 7.12 blijkt dat de locatiekeuze van het LSP van groot belang is voor het effect op het energiegebruik van het OLS.

Verder blijkt uit de tabel dat de realisatie van een pallet-systeem naar verhouding een gunstiger effect heeft op de directe energieconsumptie dan een colli-systeem. De invloed van de gebruikte technische variant (betonbaan of rails) op het directe energiegebruik is zeer klein.

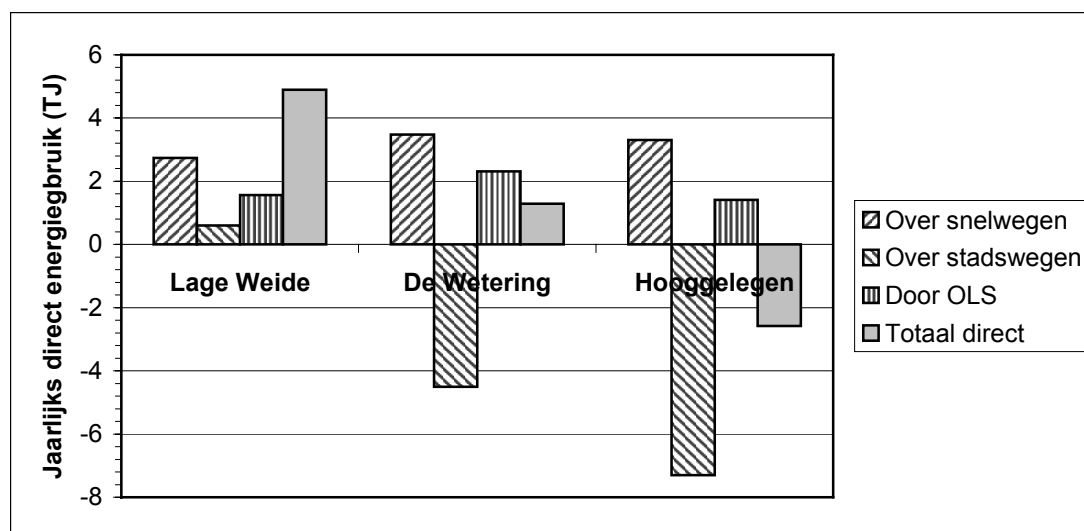
Tabel 7.12: Jaarlijks direct energiegebruik (TJ) van het transport naar Utrecht voor verschillende systemen en netwerken.

Type OLS	Maximale goederenstromen				Minimale goederenstromen			
	Colli		Pallet		Colli		Pallet	
	Betonbaan	Rails	Betonbaan	Rails	Betonbaan	Rails	Betonbaan	Rails
Zonder OLS								
Snelwegen	1,72	1,72	5,83	5,83	1,29	1,29	4,37	4,37
Stadswegen	2,81	2,81	9,53	9,53	1,91	1,91	6,44	6,44
OLS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Totaal	4,53	4,53	15,36	15,36	3,20	3,20	10,81	10,81
Lage Weide								
Snelwegen	2,53	2,53	8,57	8,57	1,68	1,68	5,69	5,69
Stadswegen	2,99	2,99	10,13	10,13	1,98	1,98	6,71	6,71
OLS	1,07	0,61	1,56	0,78	0,73	0,42	1,06	0,53
Totaal	6,59	6,13	20,26	19,48	4,39	4,08	13,46	12,93
De Wetering								
Snelwegen	2,75	2,75	9,31	9,31	1,83	1,83	6,18	6,18
Stadswegen	1,48	1,48	5,03	5,03	0,99	0,99	3,34	3,34
OLS	1,59	0,91	2,31	1,15	1,08	0,61	1,56	0,78
Totaal	5,82	5,14	16,65	15,49	3,90	3,43	11,08	10,30
Hooggelegen								
Snelwegen	2,70	2,70	9,14	9,14	1,80	1,80	6,06	6,06
Stadswegen	0,66	0,66	2,23	2,23	0,43	0,43	1,47	1,47
OLS	0,97	0,56	1,41	0,70	0,67	0,38	0,97	0,48
Totaal	4,33	3,92	12,78	12,07	2,90	2,61	8,50	8,01

Tabel 7.13: Jaarlijkse emissies (ton) van het naar Utrecht voor verschillende systemen en netwerken.

Goederenstromen	Maximale goederenstromen				Minimale goederenstromen			
	Colli		Pallet		Colli		Pallet	
Type OLS	Betonbaan	Rails	Betonbaan	Rails	Betonbaan	Rails	Betonbaan	Rails
CO₂-emissies								
Zonder OLS	381	381	1284	1284	267	267	903	903
Lage Weide	522	488	1681	1605	330	315	1117	1065
De Wetering	443	392	1369	1257	294	260	910	834
Hooggelegen	334	303	1053	984	223	202	699	652
NO_x-emissies								
Zonder OLS	1,44	1,44	4,85	4,85	1,01	1,01	3,42	3,42
Lage Weide	1,80	1,78	6,03	5,97	1,18	1,17	4,00	3,96
De Wetering	1,44	1,40	4,77	4,68	0,95	0,93	3,16	3,10
Hooggelegen	1,14	1,12	3,81	3,76	0,76	0,74	2,52	2,49
SO₂-emissies								
Zonder OLS	0,01	0,01	0,05	0,05	0,01	0,01	0,04	0,04
Lage Weide	0,03	0,02	0,09	0,07	0,02	0,01	0,06	0,05
De Wetering	0,03	0,02	0,09	0,06	0,02	0,02	0,06	0,04
Hooggelegen	0,02	0,02	0,07	0,05	0,02	0,01	0,04	0,03
VOS-emissies								
Zonder OLS	0,14	0,14	0,47	0,47	0,10	0,10	0,33	0,33
Lage Weide	0,16	0,16	0,55	0,54	0,11	0,11	0,37	0,36
De Wetering	0,11	0,11	0,37	0,36	0,07	0,07	0,24	0,24
Hooggelegen	0,07	0,07	0,25	0,25	0,05	0,05	0,17	0,16
PM₁₀-emissies								
Zonder OLS	0,04	0,04	0,15	0,15	0,03	0,03	0,10	0,10
Lage Weide	0,05	0,05	0,18	0,18	0,03	0,03	0,12	0,12
De Wetering	0,04	0,04	0,13	0,13	0,03	0,03	0,09	0,09
Hooggelegen	0,03	0,03	0,10	0,10	0,02	0,02	0,07	0,07

In figuur 7.2 is grafisch weergegeven hoe het effect van het OLS op het directe energiegebruik is opgebouwd. Hieruit blijkt dat een energiebesparing door de eventueel verminderde vervoersprestatie over stadswegen grotendeels, zo niet volledig, teniet wordt gedaan door een toename van de vervoersprestatie over snelwegen en door het directe energiegebruik van het OLS. Uit tabel 7.12 blijkt dat grote toename van de vervoersprestatie nodig is om de goederen op de plaats van bestemming te krijgen. Door de lagere directe energie-intensiteiten van het OLS en het wegvervoer over de snelweg ten opzichte van het wegvervoer door de stad wordt deze toegenomen vervoersprestatie onvoldoende gecompenseerd om tot een netto positief resultaat van een noemenswaardige omvang te leiden. Wel is de verplaatsing van de vervoersprestatie door het wegvervoer van de stadswegen naar de snelwegen van belang voor de lokale luchtkwaliteit.



Figuur 7.2: Opbouw van de invloed van het OLS Utrecht op het jaarlijkse directe energiegebruik van zowel wegverkeer als OLS. De diagram is gebaseerd op data voor de betonbaan-variant van het palletsysteem bij een grote hoeveelheid te vervoeren goederen. Andere systeemvarianten laten een overeenkomstig beeld zien.

7.4 Indirect energiegebruik en emissies

7.4.1 Constructie buisleiding

Het energiegebruik en de emissies van de constructie van de buisleidingen is berekend op de wijze zoals die in bijlage 5 is beschreven. Voor de aanleg van het collisysteem wordt gebruik gemaakt van de open bouwput methode. Hierbij wordt een ronde buisleiding gebruikt met een inwendige diameter van 115 cm en een wanddikte van 5 cm. De laag grond boven de buisleiding heeft een dikte van 150 cm. (Ettema, 1999) Gezien de geringe diepteligging wordt verondersteld dat geen hulpdamwanden nodig zijn.

De buisleiding voor het palletsysteem wordt met een boormachine aangelegd. De buisleiding hiervoor heeft een inwendige diameter van 220 cm en een wanddikte van 35 cm. De laag grond boven de buisleiding heeft een dikte van 500 cm. (Ettema, 1999) Het energiegebruik en de emissies van de constructie van de buisleidingen is per netwerkvariant weergegeven in tabel 7.14. Indien de buisleiding voor het palletsysteem niet met een boormachine maar net als bij het collisysteem met de open-bouwputmethode wordt aangelegd, dan levert dit een energiebesparing op van $\pm 11\%$.

Voor de systeemvariant die gebruik maakt van stalen rails komt hier nog een extra indirect energiegebruik bij voor de constructie van de rails. Hierbij is uitgegaan van een doorsnede van 25 cm^2 per rail voor het palletsysteem en 10 cm^2 voor het collisysteem. Het indirecte energiegebruik van de constructie van de rails is dan $0,37 \text{ GJ/m}$ voor het collisysteem en $0,91 \text{ GJ/m}$ voor het palletsysteem.

Tabel 7.14: Energiegebruik van de tunnelconstructie voor het OLS Utrecht.

	Betonbaan		Stalen rails	
	Pallet	Colli	Pallet	Colli
Energiegebruik (TJ)				
Lage Weide	257	16,3	269	21,2
De Wetering	281	17,8	294	23,2
Hooggelegen	238	15,1	250	19,7
CO₂-emissie (mln. kg)				
Lage Weide	32	2,0	32	2,3
De Wetering	35	2,1	35	2,4
Hooggelegen	29	1,9	30	2,1
NO_x-emissie (ton)				
Lage Weide	139	8,7	144	10,4
De Wetering	152	9,5	157	11,4
Hooggelegen	129	8,0	133	9,6
SO₂-emissie (ton)				
Lage Weide	80	5,0	85	6,9
De Wetering	88	5,5	93	7,5
Hooggelegen	74	4,7	79	6,4
VOS-emissie (ton)				
Lage Weide	32	2,2	32	2,3
De Wetering	35	2,4	36	2,6
Hooggelegen	30	2,0	30	2,2
PM₁₀-emissie (ton)				
Lage Weide	67	4,4	76	8,0
De Wetering	73	4,8	83	8,7
Hooggelegen	62	4,1	70	7,4

7.4.2 Constructie terminals

Het energiegebruik voor de constructie van de WDW's wordt ingeschat op basis van het totale volume van de wanden, ca. 500 m³. Bij een energie-intensiteit voor gewapend beton³² van 4,0 GJ/kg bedraagt het totale energiegebruik per WDW 6 TJ. Het energiegebruik voor het LSP wordt op identieke wijze berekend waarbij het volume van de wanden 4000 m³ bedraagt. Het energiegebruik voor de constructie van het LSP is dan ca. 47 TJ. In totaal bedraagt het energiegebruik voor de constructie van de terminals 70 TJ. Over dit deel van het indirecte energiegebruik is een grote onzekerheid vanwege de vele bouwkundige mogelijkheden voor onder anderen het materiaalgebruik. De emissies van de bouw van OLS-terminals zijn weergegeven in tabel 7.15.

³² Voor het gewapende beton is aangenomen dat de hoeveelheid staal hierin 100 kg/m³ bedraagt. De energie-intensiteiten van staal en beton bedragen respectievelijk 23,4 MJ/kg en 2,5 MJ/kg (Bos, 1998). Het naar massa gewogen gemiddelde van deze energie-intensiteiten is 4,0 MJ/kg.

Tabel 7.15: Energiegebruik en emissies van de constructie van OLS-terminals.

	WDW (per stuk)	LSP	Totaal OLS Utrecht
Energiegebruik (TJ)	6	47	70
CO ₂ -emissie (mln. kg)	0,6	4,8	7,2
NO _x -emissie (ton)	2	20	29
SO ₂ -emissie (ton)	2	13	40
VOS-emissie (ton)	0,4	2,7	4,5
PM ₁₀ -emissie (ton)	1	11	17

7.4.3 Constructie voertuigen

Het energiegebruik van de constructie van de voertuigen wordt bepaald aan de hand van het geschatte voertuiggewicht (153 kg voor een palletsysteem en 17 kg voor een collisysteem) en de energie-intensiteit van de productie van staalplaten (30,2 MJ/kg; bron: Bos, 1998). Dit resulteert in een energiegebruik van 4,6 GJ per AGV voor het palletsysteem en 0,5 GJ per AGV voor het collisysteem. Het benodigde aantal AGV's en het totale energiegebruik en emissies voor de constructie van de AGV's zijn per tracé weergegeven in tabel 7.16.

Tabel 7.16: Aantal benodigde AGV's en het energiegebruik voor de constructie van de AGV's voor verschillende combinaties van systeem- en netwerkeigenschappen. Bron: Ettema, 1999.

	Lage Weide	De Wetering	Hooggelegen
Aantal AGV's			
Palletsysteem	79	108	75
Collisysteem	1328	2120	1203
Energiegebruik (GJ)			
Palletsysteem	365	499	347
Collisysteem	682	1088	618
CO₂-emissie (ton)			
Palletsysteem	15	20	14
Collisysteem	28	44	25
NO_x-emissie (ton)			
Palletsysteem	0,10	0,14	0,10
Collisysteem	0,19	0,30	0,17
SO₂-emissie (ton)			
Palletsysteem	0,11	0,15	0,10
Collisysteem	0,20	0,32	0,18
VOS-emissie (kg)			
Palletsysteem	8	12	8
Collisysteem	16	26	15
PM₁₀-emissie (ton)			
Palletsysteem	0,20	0,28	0,19
Collisysteem	0,38	0,61	0,35

7.4.4 Onderhoud

Het jaarlijkse energiegebruik van het onderhoud kan worden uitgedrukt in een percentage van het (eenmalige) energiegebruik van de investering. Door Roos et al. (2000) wordt een percentage aangehouden van 2% voor infrastructuur en 3% voor voertuigen. In dit rapport wordt van dezelfde

percentages gebruik gemaakt voor zowel het energiegebruik als de emissies. De hiermee berekende energiegebruik en emissies zijn opgenomen in tabel 7.17 en 7.18.

7.4.5 Indirect operationeel energiegebruik terminals

Het tonkm-onafhankelijke energiegebruik van processen die op de terminals plaatsvinden, zoals verlichting, ventilatie en verwarming, wordt bepaald op basis van het door Van der Heide (1999) berekende energiegebruik van deze processen voor het OLS Schiphol. Als aangenomen wordt dat het energiegebruik lineair afhankelijk is van het inwendige volume van de terminals dan blijkt het energiegebruik voor de vier WDW's 0,2 TJ per WDW per jaar en voor een LSP 2,4 TJ per jaar te bedragen. Voor de emissies wordt aangenomen dat uitsluitend elektrische energie gebruikt wordt. De berekende jaarlijkse emissies zijn weergegeven in tabel 7.18.

7.4.6 Totaal indirect energiegebruik

Het totale indirecte energiegebruik is de som van het indirecte energiegebruik van de hiervoor besproken activiteiten. In tabel 7.17 is het totale indirecte energiegebruik per jaar weergegeven voor elk van de verschillende systeem- en netwerkvarianten. Tabel 7.18 geeft een overzicht van de totale emissies.

Tabel 7.17: Indirect energiegebruik (TJ) gemiddeld per jaar voor het OLS Utrecht.

	Buisleiding	Terminals	Voertuigen	Onderhoud	Operationeel	Totaal
Palletsysteem met betonbaan						
Lage Weide	5,14	1,40	0,02	6,56	3,20	16,32
De Wetering	5,62	1,40	0,02	7,04	3,20	17,28
Hooggelegen	4,76	1,40	0,02	6,18	3,20	15,56
Palletsysteem met stalen rails						
Lage Weide	5,39	1,40	0,02	6,81	3,20	16,82
De Wetering	5,89	1,40	0,02	7,31	3,20	17,82
Hooggelegen	4,99	1,40	0,02	6,41	3,20	16,02
Collisysteem met betonbaan						
Lage Weide	0,33	1,40	0,03	1,76	3,20	6,72
De Wetering	0,36	1,40	0,05	1,81	3,20	6,82
Hooggelegen	0,30	1,40	0,03	1,73	3,20	6,66
Collisysteem met stalen rails						
Lage Weide	0,43	1,40	0,03	1,86	3,20	6,92
De Wetering	0,47	1,40	0,05	1,92	3,20	7,04
Hooggelegen	0,39	1,40	0,03	1,82	3,20	6,84

Tabel 7.18: Gemiddelde jaarlijkse indirecte emissies voor het OLS Utrecht.

	CO ₂ -emissie (mln. kg)	NO _x -emissie (ton)	SO ₂ -emissie (ton)	VOS-emissie (ton)	PM ₁₀ -emissie (ton)
Palletsysteem met betonbaan					
Lage Weide	2,02	6,7	4,8	1,61	3,37
De Wetering	2,21	7,2	5,1	1,73	3,63
Hooggelegen	2,00	6,3	4,6	1,51	3,17
Palletsysteem met stalen rails					
Lage Weide	2,04	6,8	4,9	1,62	3,55
De Wetering	2,24	7,3	5,2	1,74	3,82
Hooggelegen	2,02	6,4	4,7	1,52	3,34
Collisysteem met betonbaan					
Lage Weide	0,78	1,9	1,8	0,42	0,89
De Wetering	0,80	1,9	1,8	0,43	0,92
Hooggelegen	0,78	1,9	1,8	0,41	0,87
Collisysteem met stalen rails					
Lage Weide	0,80	1,9	1,8	0,42	0,96
De Wetering	0,82	1,9	1,9	0,43	1,00
Hooggelegen	0,79	1,9	1,8	0,41	0,94

7.5 Kostenberekening

7.5.1 De Netto Contante Waarde methode

Om de financiële kosten van het OLS Utrecht te berekenen wordt gebruik gemaakt van de netto contante waarde methode. De contante waarde van een inkomst of uitgave (ook wel ‘cash flow’ of ‘kasstroom’ genoemd) op een bepaald moment wordt door middel van een discontofactor omgerekend naar een gelijkwaardige kasstroom op een ander moment (de contante waarde). De discontofactor corrigeert de waarde van de kasstroom voor de kapitaalkosten tussen het moment waarop de kasstroom plaatsvindt en het moment waarvoor de contante waarde berekend wordt. De kapitaalkosten zijn de gedeelde opbrengsten door het niet voor investeringen of beleggingen beschikbaar hebben van het kapitaal gedurende een periode. Kapitaalkosten kunnen ook negatief zijn, namelijk als het kapitaal voor een uitgaande kasstroom gedurende een periode voorafgaand aan de kasstroom nog beschikbaar is. De discontofactor is afhankelijk van het voor de investering vereiste opbrengstpercentage. Dit opbrengstpercentage wordt meestal omgerekend naar een winstpercentage (rate of return), zodat de formule voor de contante waarde luidt:

$$CW = \text{discontofactor} * K = \frac{1}{1 + w} * K$$

Hierbij is CW de contante waarde in een willekeurige munteenheid, K de kasstroom in dezelfde munteenheid en w het voor de investering vereiste winstpercentage gedeeld door 100%.

De netto contante waarde van een investeringsproject is de som van de contante waarden van alle kasstromen die ten gevolge van het project plaatsvinden. Over het algemeen worden de kasstromen hierbij over een tijdsinterval gecumuleerd. In dit onderzoek worden hiervoor jaarlijkse kasstromen gebruikt. De onzekerheid over het tijdstip waarop de kasstromen plaatsvinden is zodanig groot dat verdere detaillering van de kasstromen de nauwkeurigheid van de kostenberekening niet zal verbeteren. Bovendien heeft dit rapport niet het doel om gedetailleerde haalbaarheidsanalyses uit te voeren, maar zullen enkele cases doorgerekend worden om een algemene indruk te krijgen van de financiële karakteristieken van ondergrondse transportmethoden. Verdergaande cumulatie van

kasstromen kan echter vanwege de exponentiële eigenschappen van de discontofactor (zie onderstaande formule) wel de nauwkeurigheid verkleinen. Voor de eenvoud wordt ook aangenomen dat de jaarlijkse reële kapitaalkosten constant blijven gedurende de looptijd van het investeringsproject. De formule voor de netto contante waarde aan het begin van het project luidt dan:

$$NCW_{\text{beginjaar}} = \sum_{t=\text{beginjaar}}^{\text{beginjaar}+\text{looptijd}} CW_t = \sum_{t=\text{beginjaar}}^{\text{beginjaar}+\text{looptijd}} \left(\frac{1}{1+w} \right)^t * C_t$$

Hierbij is NCW de netto contante waarde, C_t de kasstromen van de investering, CW_t de contante waarden van deze kasstromen en t een tijdvariabele die loopt van het tijdstip 0 (het begin van het project) tot de looptijd van het project, waarna de investering geen kasstromen meer genereert.

In dit rapport zal 2000 als basisjaar genomen worden. De netto contante waarde van een investering in het beginjaar van het investeringsproject kan worden uitgedrukt in een waarde in het jaar 2000 via de formule:

$$NCW_{2000} = \left(\frac{1}{1+w} \right)^{\text{beginjaar}-2000} * NCW_{\text{beginjaar}}$$

De verschillende kasstromen worden nu per categorie besproken.

7.5.2 Investering

De investeringen van verschillende componenten van het OLS zijn berekend door Ettema (1999). De berekende investeringen zijn weergegeven in de tabellen 7.19 en 7.20. Hierin is tevens de levensduur van de componenten opgenomen. Voor de investeringen wordt aangenomen dat zij verspreid over de vijf jaar voor het begin van de levensduur worden uitgegeven.

Tabel 7.19: Investerings en levensduur van verschillende componenten van het palletsysteem van het OLS Utrecht. Bron: Ettema, 1999.

	Investering (mln. €)			Levensduur (jaar)
	Lage Weide	De Wetering	Hooggelegen	
LSP	5,22	5,54	5,45	50
WDWs	5,13	5,13	5,13	50
Besturingssysteem	2,72	2,72	2,72	50
Buisleiding	67,39	73,63	62,39	50
AGVs	1,45	1,95	1,36	30

Tabel 7.20: Investerings en levensduur van verschillende componenten van het collisysteem van het OLS Utrecht. Bron: Ettema, 1999.

	Investering (mln. €)			Levensduur (jaar)
	Lage Weide	De Wetering	Hooggelegen	
LSP	5,22	5,54	5,45	50
WDWs	5,13	5,13	5,13	50
Besturingssysteem	2,72	2,72	2,72	50
Buisleiding	26,64	27,23	25,18	50
AGVs	6,04	9,62	5,45	30

7.5.3 Operationele uitgaven

De operationele uitgaven betreffen met name onderhoudskosten en kosten van het natransport. De onderhoudskosten zijn overeenkomstig voor alle systeemvarianten en bedragen in totaal € 2,05 mln. per jaar. De kosten van natransport bedragen f 12,- per pallet, oftewel € 7,07 per m³. De kosten van

het energiegebruik blijken met € 0,02 mln. à € 0,03 mln. per jaar zeer klein te zijn. (DynaVision, 1999)

7.5.4 Opbrengsten

De inkomsten van het OLS bestaat uit een tarief dat door de distributeur aan het OLS betaald wordt. Hierbij wordt aangenomen dat het tarief afhankelijk is van het volume van de te vervoeren goederen. Voor het transport door het OLS wordt een tarief gerekend van ca. f 60,- per pallet (DynaVision, 1999). Dit komt neer op € 35,36 per m³.

7.5.5 Netto Contante Waarde

Met de aan het begin van deze paragraaf beschreven Netto Contante Waarde methode is de Netto Contante Waarde (NCW) van het OLS berekend. Hierbij is rekening gehouden met de kasstromen over de gehele levensduur van de infrastructuur, dus tot en met het jaar 2060. Als kapitaalkosten (w) is een percentage van 7% genomen (DynaVision, 1999). De resultaten van de berekening zijn weergegeven in tabel 7.21. Uit de tabel blijkt het palletsysteem een positieve NCW te hebben, wat wil zeggen dat het project op lange termijn voldoende rendabel is om zonder overheidssubsidie te worden gerealiseerd. Wel is mogelijk een lening nodig om de hoge investering te financieren. Het collisysteem heeft een negatieve NCW. Voor dit systeem is het onwaarschijnlijk dat het wordt gerealiseerd zonder een overheidssubsidie die voldoende is om de NCW tot nul aan te vullen.

Tabel 7.21: Netto Contante Waarden van het OLS Utrecht voor verschillende verwachte omvang van de goederenstromen voor het pallet- en collisysteem. (mln. €)

Systeem	Pallet		Colli	
	Maximaal	Minimaal	Maximaal	Minimaal
Goederenstroom				
Lage Weide	48,8	15,3	-10,2	-20,1
De Wetering	44,4	10,8	-13,4	-23,3
Hooggelegen	48,7	15,2	-9,0	-18,9

7.6 Evaluatie van het energiegebruik en de kosten

7.6.1 Totaal energiegebruik

In tabel 7.22 is per tracé het effect van het OLS op het totale jaarlijkse energiegebruik weergegeven. Er bestaan grote verschillen tussen de gevolgen voor het energiegebruik van de verschillende netwerk- en technische varianten, echter alle mogelijke systemen hebben een stijging van het totale energiegebruik tot gevolg.

Tabel 7.22: Verandering van het jaarlijks energiegebruik (TJ) voor verschillende systemen en netwerken van het OLS Utrecht, vergeleken met een situatie zonder OLS.

Type OLS	Maximale goederenstroom				Minimale goederenstroom			
	Colli		Pallet		Colli		Pallet	
	Betonbaan	Rails	Betonbaan	Rails	Betonbaan	Rails	Betonbaan	Rails
Lage Weide								
Direct	2,06	1,60	4,90	4,12	1,19	0,88	2,65	2,12
Indirect	5,96	6,16	15,57	16,07	5,96	6,16	15,57	16,07
Totaal	8,02	7,76	20,47	20,19	7,15	7,04	18,22	18,19
De Wetering								
Direct	1,29	0,61	1,29	0,13	0,70	0,23	0,27	-0,51
Indirect	6,05	6,27	16,53	17,07	6,05	6,27	16,53	17,07
Totaal	7,34	6,88	17,82	17,20	6,75	6,50	16,80	16,56
Hooggelegen								
Direct	-0,20	-0,61	-2,58	-3,29	-0,30	-0,59	-2,31	-2,80
Indirect	5,91	6,09	14,81	15,27	5,91	6,09	14,81	15,27
Totaal	5,71	5,48	12,23	11,98	5,61	5,50	12,50	12,47

7.6.2 Totale energie-intensiteit

Van de verschillende netwerkvarianten lijkt gezien de kosten en het energiegebruik de locatie Hooggelegen het beste geschikt voor een LSP. Voor de berekening van de energie-intensiteit wordt daarom deze variant als uitgangspunt genomen. De directe energie-intensiteit is in §7.3.4 berekend en is weergegeven in tabel 7.23. Het indirecte energiegebruik voor de verschillende OLS-varianten is opgenomen in tabel 7.22. Als deze voor de variant Hooggelegen worden gedeeld door de vervoersprestaties uit tabel 7.11, dan wordt de indirecte energie-intensiteit verkregen voor beide varianten van de omvang van de goederenstroom. Deze zijn eveneens weergegeven in tabel 7.23.

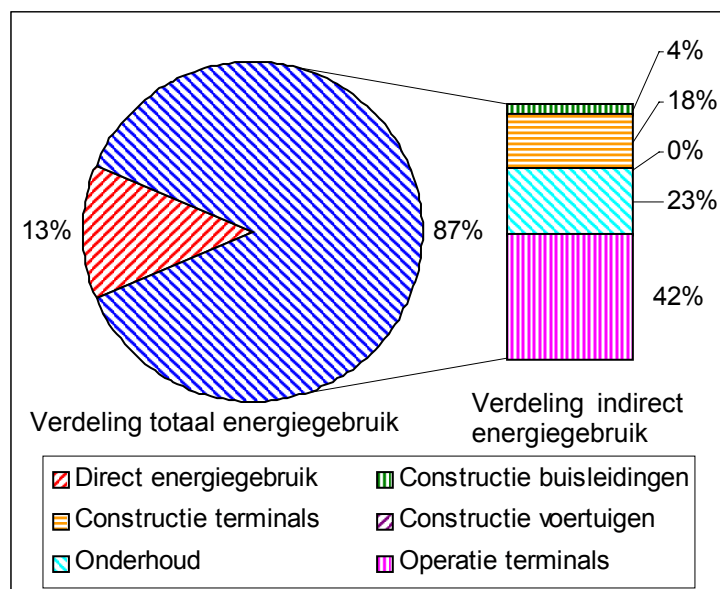
Tabel 7.23: Directe en indirecte energie-intensiteit (MJ/tonkm) van verschillende OLS-varianten voor het tracé Hooggelegen.

	Pallet		Colli	
	Betonbaan	Rails	Betonbaan	Rails
Direct	2,8	1,0	4,8	2,1
Indirect	22,8 – 33,4	23,5 – 34,3	33,1 – 48,3	34,0 – 49,6
Totaal	25,6 – 36,2	24,4 – 35,3	37,9 – 53,1	36,1 – 51,7

De energie-intensiteit van de betonbaan-variant van het collisysteem bestaat voor 87% tot 91% uit indirect energiegebruik (zie tabel 7.24). Figuur 7.3 toont hoe het energiegebruik is opgebouwd uit de verschillende factoren. Bij de rails-variant is het aandeel van het indirecte energiegebruik groter, vanwege de lagere directe energie-intensiteit. Het indirecte energiegebruik bestaat voor het grootste deel uit onderhoudswerkzaamheden. Het energiegebruik van de onderhoudswerkzaamheden is berekend door uit te gaan van een vast percentage van het energiegebruik van de constructie. Dit percentage is zodanig groot dat het energiegebruik van het onderhoud voor alle systemen even groot is als het gemiddelde jaarlijkse energiegebruik van de constructiewerkzaamheden. Van het energiegebruik voor de aanleg neemt de constructie van de terminals verreweg het grootste deel voor zijn rekening.

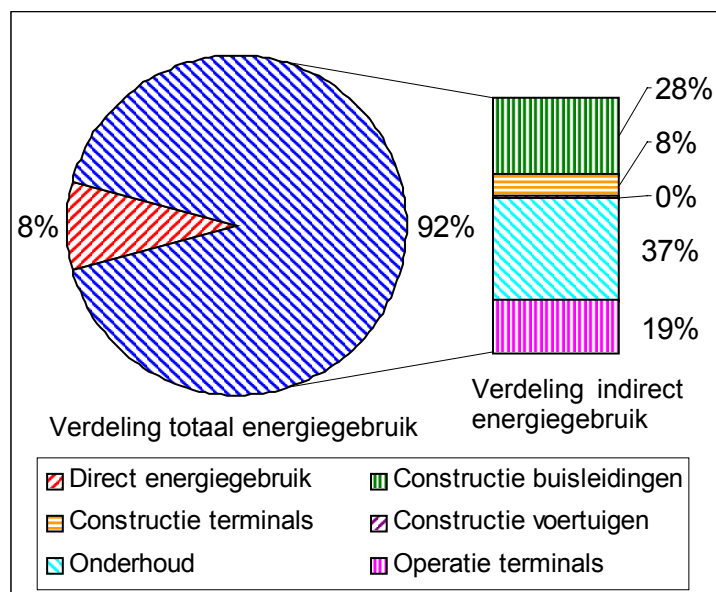
Tabel 7.24: Aandeel van het indirecte energiegebruik in het totale energiegebruik.

	Collisysteem		Palletsysteem	
	Betonbaan	Rails	Betonbaan	Rails
Maximale goederenstroom	87%	92%	92%	96%
Minimale goederenstroom	91%	95%	94%	97%



Figuur 7.3: Direct versus indirect energiegebruik voor het collisysteem (betonbaan-variant, LSP op Hoogegelegen, grote goederenstroom) van het OLS Utrecht. Het indirecte energiegebruik (donker blauw) is hierbij uitgesplitst naar vijf categorieën. Het weergegeven directe energiegebruik is uitsluitend het directe energiegebruik van het OLS; het effect van het OLS op het directe energiegebruik van het wegvervoer is niet in het diagram verwerkt.

Het aandeel van het directe en indirecte energiegebruik voor het palletsysteem is weergegeven in figuur 7.4. In vergelijking tot het collisysteem heeft bij het palletsysteem het indirecte energiegebruik een hoger aandeel in de totale energie-intensiteit, namelijk 92% tot 94% voor de betonbaan-variant. Dit wordt veroorzaakt door de voor het palletsysteem veel hogere energiegebruik van de constructie van buisleidingen: 28% van het totale energiegebruik voor het palletsysteem tegen 4% voor het collisysteem. Het energiegebruik voor het onderhoud neemt evenredig met het energiegebruik voor de constructie toe.



Figuur 7.4: Indirect versus direct energiegebruik voor het palletsysteem (betonbaan-variant, LSP op Hooggelegen, grote goederenstroom) van het OLS Utrecht. Het indirecte energiegebruik (donker blauw) is hierbij uitgesplitst naar vijf categorieën. Het weergegeven directe energiegebruik is uitsluitend het directe energiegebruik van het OLS; het effect van het OLS op het directe energiegebruik van het wegvervoer is niet in het diagram verwerkt.

7.6.3 Totale emissies

In tabel 7.25 is het effect op de totale emissies weergegeven van de totstandkoming van het OLS Utrecht. Alle varianten van het OLS blijken een stijging van de emissies tot gevolg te hebben. De relatieve stijging van de emissies van CO₂ en NO_x ten opzichte van het de directe emissiefactoren van het wegverkeer, blijken overeen te komen met de relatieve stijging van het energiegebruik. De emissies van VOS, PM₁₀ en vooral voor SO₂ nemen echter naar verhouding veel meer toe dan het energiegebruik. Voor het (totale) energiegebruik van het OLS zijn de emissiefactoren van deze stoffen in kg/J hoger dan de emissiefactoren voor het directe energiegebruik van het wegvervoer.

Tabel 7.25: Verandering van de jaarlijks emissies voor verschillende systemen en netwerken van het OLS Utrecht, ten opzicht van een situatie zonder OLS.

Type OLS	Maximale goederenstroom				Minimale goederenstroom			
	Colli		Pallet		Colli		Pallet	
	Betonbaan	Rails	Betonbaan	Rails	Betonbaan	Rails	Betonbaan	Rails
CO₂-emissie (mln. kg)								
Lage Weide	0,92	0,91	2,42	2,36	0,84	0,85	2,23	2,20
De Wetering	0,86	0,83	2,30	2,21	0,83	0,81	2,22	2,17
Hooggelegen	0,73	0,71	1,77	1,72	0,74	0,73	1,80	1,77
NO_x-emissie (ton)								
Lage Weide	2,26	2,24	7,88	7,92	2,07	2,06	7,28	7,34
De Wetering	1,90	1,86	7,12	7,13	1,84	1,82	6,94	6,98
Hooggelegen	1,60	1,58	5,26	5,31	1,65	1,63	5,40	5,47
SO₂-emissie (ton)								
Lage Weide	1,82	1,81	4,84	4,92	1,81	1,80	4,82	4,91
De Wetering	1,82	1,91	5,14	5,21	1,81	1,91	5,12	5,20
Hooggelegen	1,81	1,81	4,62	4,70	1,81	1,80	4,60	4,69
VOS-emissie (ton)								
Lage Weide	0,44	0,44	1,69	1,69	0,43	0,43	1,65	1,65
De Wetering	0,40	0,40	1,63	1,63	0,40	0,40	1,64	1,65
Hooggelegen	0,34	0,34	1,29	1,30	0,36	0,36	1,35	1,35
PM₁₀-emissie (ton)								
Lage Weide	0,90	0,97	3,40	3,58	0,89	0,96	3,39	3,57
De Wetering	0,92	1,00	3,61	3,80	0,92	1,00	3,62	3,81
Hooggelegen	0,86	0,93	3,12	3,29	0,86	0,93	3,14	3,31

7.6.4 Vergelijking met andere studies

In twee eerder uitgevoerde studies zijn het indirecte energieverbruik en de indirecte energie-intensiteit berekend. De eerste studie betreft een proces energie analyse van het indirecte energieverbruik voor de constructie van de infrastructuur van het OLS Schiphol en het OLT Den Haag. Hierbij zijn processen zoals onderhoud, klimaatregulatie, constructie van de voertuigen en voor het OLS Schiphol ook de constructie van de terminals buiten beschouwing gelaten. Bij de tweede studie is met een input-output energie analyse het directe energieverbruik van een landelijk netwerk bepaald.

In tabel 7.26 zijn de in dit rapport berekende directe energie-intensiteiten voor het colli- en palletsysteem van het OLS Utrecht vergeleken met de waarden uit de literatuur. In vergelijking met de andere netwerken voor OLS heeft het OLS Utrecht een hoge indirecte energie-intensiteit. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de relatief kleine hoeveelheid goederen die met het OLS Utrecht wordt vervoerd.

Tabel 7.26: *Vergelijking van het indirecte energiegebruik van OLS-netwerken volgens verschillende bronnen.*

Netwerk	OLS Utrecht ^{a)}		OLS Schiphol ^{b)}	OLT Den Haag ^{c)}	Landelijk OLS
	Pallet	Colli			
Jaar	2010	2010	2020	2040	2030
Methode ^{d)}	PEA	PEA	PEA	PEA	IOEA
Gemiddeld jaarlijks indirect energiegebruik (TJ)	16	7	18	91 à 97	37000
Jaarlijkse vervoersprestatie (mln. tonkm)	0,47 à 0,68	0,14 à 0,20	12	197	7100
Indirecte energie-intensiteit (MJ/tonkm)	23 à 34	33 à 50	1,52	0,46 à 0,49	5,3
Directe energie-intensiteit van OLS (MJ/tonkm)	1,0 à 2,8	2,1 à 4,8	0,67	0,2	1,0
Aandeel indirect energiegebruik in totaal energiegebruik	89% à 97%	87% à 96%	69%	70% à 71%	84%
Bron			Groot, 2000	Groot, 2000	Roos <i>et al.</i> , 2000

a) LSP op Hooggelegen

b) Bij het indirecte energiegebruik is alleen het energiegebruik van de constructie van de buisleidingen meegenomen.

c) Variant met een grote buisdiameter; bij het indirecte energiegebruik is alleen het energiegebruik van de constructie van de buisleidingen en terminals meegenomen.

d) PEA = proces energie analyse, IOEA = input-output energie analyse

7.6.5 Kanttekeningen bij de resultaten van de case-studie

Bij de resultaten van de case-studie kunnen enkele kanttekeningen worden geplaatst. De meeste kanttekeningen hebben betrekking op het directe energiegebruik. Vanwege het kleine aandeel van het directe energiegebruik in het totale energiegebruik is de invloed van deze items beperkt. Onzekerheden in het indirecte energiegebruik kunnen een veel grotere invloed hebben op het totale energiegebruik. De gemaakte kanttekeningen zijn:

- Bij de berekening is ervan uitgegaan dat 100% van het voor het OLS geschikte goederenvervoer naar de Utrechtse binnenstad en Leidsche Rijn daadwerkelijk gebruik maakt van het OLS. Indien niet alle transporten via het OLS plaatsvinden is zowel een stijging als een daling van het directe energiegebruik mogelijk, afhankelijk van herkomst en bestemming van de goederen.
- Onder bepaalde omstandigheden is het verdedigbaar om het energiegebruik van de constructie en bedrijfsvoering van terminals niet of in mindere mate mee te nemen in de berekening. Dit is bijvoorbeeld het geval indien de aanleg van OLS-terminals de constructie van overslagfaciliteiten bij winkels overbodig maakt.
- Door de afname van het vrachtverkeer op stadswegen is waarschijnlijk minder onderhoud nodig aan met name klinkerwegen in de binnenstad. Dit inverdieneffect is niet in beschouwing genomen omdat niet bekend is wat de omvang van dit effect is.
- Het transport van afval in tegengestelde richting als de stedelijke distributie is niet in de beschouwing meegenomen. Dit kan een daling van de directe energie-intensiteit tot gevolg hebben en leidt tot een grotere door OLS vervoerde hoeveelheid wat ook gevolgen heeft voor het directe energiegebruik.
- De locatie Lage Weide heeft een slechte aansluiting op het landelijke wegennet, maar kan wel gebruikt worden voor directe overslag van goederen tussen OLS en Railvervoer en tussen OLS en binnenvaart. Een verschuiving van het goederenvervoer van de weg naar rail of binnenvaart kan

gunstige gevolgen hebben voor het directe energiegebruik. Dit hoeft echter niet het geval te zijn: bij lichte goederen is ook een ongunstig effect mogelijk (Janse et al., 2000).

- De directe energie-intensiteit kan verder verlaagd worden door het aanleggen van een nieuwe verbindingsweg naar de snelweg, zodat de over stadswegen af te leggen afstand kan worden verminderd. Dit speelt met name een rol bij het netwerk met een LSP op Lage Weide. De aanleg van een dergelijke weg brengt echter weer een hoger indirect energiegebruik met zich mee en heeft ook andere nadelige effecten, zoals voor ruimtegebruik en geluidhinder.
- In deze case-studie is uitsluitend gekeken naar een volledig ondergrondse verbinding. Het is echter denkbaar dat het systeem buiten de binnenstad gedeeltelijk bovengronds wordt aangelegd. Dit kan tot een daling van het indirecte energiegebruik leiden, vooral voor het palletsysteem. In dat geval vervalt ten dele het positieve effect op bijvoorbeeld geluidhinder.

8. Discussie

8.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de voorgaande hoofdstukken gecombineerd en bediscussieerd. Hierbij wordt de aandacht vooral gericht op het beantwoorden van de negen in hoofdstuk 1 geformuleerde deelvragen. In dit hoofdstuk wordt wederom onderscheid gemaakt tussen de drie categorieën ondergronds goederentransport die op basis van technische en logistieke eigenschappen onderscheiden kunnen worden:

- Traditionele en extra-traditionele pijpleidingen voor het transport van gasvormige, vloeibare en anderszins pompbare bulkgoederen,
- Capsule-pijpleidingen voor het transport van vaste bulkgoederen en stukgoederen over lange afstand,
- Overige ondergrondse transportmethoden (railgeleide voertuigen, automatisch geleide voertuigen en dual mode voertuigen) voor het transport van stukgoederen over korte afstand.

8.2 Traditioneel en extra-traditioneel pijpleidingstransport

8.2.1 Traditioneel pijpleidingstransport

De techniek voor traditionele pijpleidingen is over vele honderden jaren geëvolueerd. Onder de meest recente technische ontwikkelingen vallen met name methoden die betrekking hebben op het voorkomen van corrosie en het detecteren van lekkages. Gezien de ontwikkeling van de techniek in het verleden ligt het niet in de lijn der verwachting dat in de komende 30 jaar technische innovaties optreden met een grote invloed op het energiegebruik. De voornaamste vernieuwingen voor het traditionele pijpleidingstransport vinden plaats op het gebied van de organisatie van aanleg, onderhoud en gebruik van pijpleidingen. Zo worden door bundeling kosten bespaard van de aanleg en het onderhoud van pijpleidingen. Common carrier netwerken stimuleren het gebruik van pijpleidingen en kunnen leiden tot een optimale routing van het transport.

Het Nederlandse pijpleidingnetwerk bestaat voor het grootste deel uit de distributienetwerken voor water en aardgas, de lengte van deze netwerken bedraagt respectievelijk 100.000 en 113.600 km. Deze netwerken zijn maar iets kleiner dan het Nederlandse wegennet, dat in 1997 een lengte had van 116.000 km. De ruwe-aardolieleidingen hadden in 1990 een totale lengte van 530 km en de overige pijpleidingen waren in datzelfde jaar gezamenlijk 1480 km lang. De vervoersprestatie van de pijpleidingen is slechts in jaarstatistieken opgenomen voor grensoverschrijdende pijpleidingen voor het transport van ruwe aardolie en aardolieproducten. In 1999 bedroegen deze vervoersprestaties respectievelijk 4,54 mld. tonkm en 1,47 mld. tonkm. Voor drink- en industriewater is in dit rapport een vervoersprestatie van 13 mld. tonkm in 1995 berekend. De jaarlijkse vervoersprestatie door pijpleidingen is daarmee lager dan dat van wegtransport (41,0 mld. tonkm) en binnenvaart (26,8 mld. tonkm), maar wel hoger dan de 2,9 mld. tonkm vervoersprestatie van het railvervoer (AVV, 1997a).

De afgelopen 15 jaar is de per pijpleiding vervoerde hoeveelheid ruwe aardolie en aardolieproducten sterk gestegen, namelijk met $\pm 50\%$ tegen nog geen 10% voor het totale goederenvervoer. De vervoerde hoeveelheden aardgas, drink- en industriewater, en afvalwater volgden de trend van het totale goederenvervoer. Voor de toekomst wordt een verdere toename van het pijpleidingstransport verwacht, maar minder dan de afgelopen 15 jaar. Een uitzondering hierop vormen chemicaliën; hiervoor wordt een sterke toename van het pijpleidingstransport verwacht.

De huidige milieukeurmerken van het traditionele pijpleidingstransport zijn berekend in de hoofdstukken 5 en 6. Het energiegebruik en de hieruit voortkomende emissies zijn opgesplitst in een

direct en een indirect deel. Het directe energiegebruik is voor de Nederlandse ruwe-aardoliepijpleidingen berekend op basis van de vloeistofdynamische theorie, waarbij gebruik is gemaakt van technische data uit een inventarisatie van individuele pijpleidingen uit het jaar 1993. Het betreft hier dus enigszins oude gegevens, maar een meer recente bron is niet aangetroffen. De directe energie-intensiteit van ruwe-aardoliepijpleidingen die via de ingenieursmethode is berekend, is ruim lager dan de literatuurwaarden die betrekking hebben op pijpleidingen in de Verenigde Staten. Het is niet bekend hoe deze afwijking tot stand is gekomen. Mogelijke oorzaken zijn technische verschillen tussen de pijpleidingen en verschillen in het gebruik van de pijpleidingen, zoals de benutting van capaciteit en de regelmaat van de stroming. Omdat informatie over de continuïteit van de stroming niet bekend is, is er met name voor pijpleidingen met een lage benuttingsgraad onzekerheid over het directe energiegebruik. Vanwege het ontbreken van literatuurwaarden voor de energie-intensiteit van Nederlandse pijpleidingen, is verificatie van de berekende energie-intensiteiten op basis van de aangetroffen literatuur niet mogelijk.

De directe energie-intensiteiten van pijpleidingen die andere producten vervoeren dan ruwe aardolie zijn niet berekend. Voor de energie-intensiteit van Nederlandse aardgasleidingen is wel een literatuurwaarde bekend, echter met een grote onzekerheidsinterval. Voor aardolieproducten is een literatuurwaarde beschikbaar die bepaald is op basis van Amerikaanse pijpleidingen. Ook hierover is een onzekerheid, omdat de energie-intensiteit per vervoerd product verschilt.

De berekende directe energie-intensiteit voor het transport door Nederlandse ruwe-aardoliepijpleidingen bedraagt 0,10 MJ/tonkm. Dit is laag in vergelijking tot de directe energie-intensiteiten van concurrerende vervoersmiddelen, zoals van trekkers op autosnelwegen (0,93 MJ/tonkm), van goederenvervoer per spoor (0,61 MJ/tonkm) en van goederenvervoer per binnenvaart (0,60 MJ/tonkm). Literatuurwaarden voor de directe energie-intensiteit van het pijpleidingstransport van andere producten bedragen 0,11 – 0,18 MJ/tonkm voor het pijpleidingstransport van aardolieproducten in de Verenigde Staten en 0,56 – 0,84 voor het Nederlandse transport en distributienetwerk van aardgas. Er bestaan dus grote verschillen in energiegebruik tussen het pijpleidingstransport van gas en dat van vloeistoffen, en tussen het pijpleidingstransport van verschillende vloeistoffen onderling. Daarnaast bestaan ook tussen individuele pijpleidingen onderling grote verschillen, door verschillen in technische kenmerken en gebruikskennmerken.

Een vergelijking van literatuurwaarden voor de energie-intensiteit van Amerikaanse ruwe-aardoliepijpleidingen in verschillende jaren geeft de indruk dat er een daling is opgetreden van de energie-intensiteit in de periode 1965 – 1990. De meest recente data laten echter nauwelijks een verandering zien in energie-intensiteit. Voor de toekomst is het niet bekend of veranderingen in de energie-intensiteit zullen optreden.

De emissies die door het directe energiegebruik van het pijpleidingstransport veroorzaakt worden, zijn eveneens laag in vergelijking tot de emissies van andere transportmethoden. Dit komt door de lagere energie-intensiteit van het pijpleidingstransport. Hierbij speelt ook de keuze van de energiedrager een grote rol. De pompen voor het pijpleidingstransport van vloeistoffen worden in de regel aangedreven door elektro- of dieselmotoren. Het gebruik van diesel als energiedrager leidt tot hogere emissies van NO_x , SO_2 , VOS en PM_{10} .

Het indirecte energiegebruik van het pijpleidingstransport is berekend met de proces energie analyse methode. In tegenstelling tot het indirecte energiegebruik van andere transportmethoden bleek voor het pijpleidingstransport het aandeel van het indirecte energiegebruik in het totale energiegebruik zeer laag te zijn. Voor ruwe-aardoliepijpleidingen in Nederland heeft het indirecte energiegebruik een aandeel van 4% in het totale energiegebruik. Voor de emissies ten gevolge van dit indirecte energiegebruik is het aandeel in de totale emissie groter. Vooral indirecte PM_{10} -emissies, maar ook de indirecte emissies van SO_2 en VOS hebben een aanzienlijk aandeel in de totale emissie.

Voor de financiële kenmerken van traditionele pijpleidingen zijn de kosten van het directe energiegebruik en de aanleg van pijpleidingen bepaald. Pijpleidingen hebben als belangrijk financieel

kenmerk hoge aanlegkosten. Deze hoge aanlegkosten kunnen gecompenseerd worden door de lage operationele kosten, veroorzaakt door een laag direct energiegebruik en een relatief lage arbeidsintensiviteit. Dit maakt pijpleidingen financieel alleen aantrekkelijk bij constant grote goederenstromen over een lange periode.

Het totale energiegebruik van het pijpleidingtransport in Nederland bedraagt ca. 10,9 PJ. Van dit energiegebruik komt het grootste deel voor rekening van het transport van drink- en industriewater (4,9 PJ) vanwege de grote vervoersprestatie, en voor de distributie van aardgas (4,1 PJ) vanwege de hoge energie-intensiteit. Van de industriële pijpleidingen hebben de ruwe-aardoliepijpleidingen een energiegebruik van 0,6 PJ en verbruiken de overige pijpleidingen 0,4 PJ. Het pijpleidingtransport neemt hiermee maar een klein deel van het totale energiegebruik door goederenvervoer voor zijn rekening. Het totale energiegebruik van transport in 1998 is 446 PJ (CBS StatLine); het aandeel van het pijpleidingtransport is daarmee 2,4%. Indien de verwachte toename van het pijpleidingtransport verwezenlijkt wordt, dan kan dit leiden tot een toename van dit percentage. De verdere ontwikkeling van het pijpleidingtransport heeft over het algemeen een gunstig effect op het totale energiegebruik van het goederentransport.

8.2.2 Extra-traditioneel pijpleidingtransport

De energie-intensiteit en emissiefactoren van extra-traditionele pijpleidingen zijn in het algemeen vergelijkbaar met die van traditionele pijpleidingen. Verschillen in de energie-intensiteit worden veroorzaakt door de fysische eigenschappen van de vervoerde stof, zoals viscositeit en dichtheid. Slurry-pijpleidingen hebben echter een hoger direct energiegebruik vanwege de energie die nodig is voor het creëren en het ontwateren van de suspensie. Hierdoor neemt de energie-intensiteit van slurry-pijpleidingen af naarmate de lengte van de pijpleidingen toeneemt.

Extra-traditioneel pijpleidingtransport wordt momenteel in Nederland per definitie nog weinig toegepast. Voor de toekomst heeft deze vorm van pijpleidingtransport wel een grote potentiële vervoersprestatie van 12 mld. tonkm in 2020 (NEA/DHV, 1998). Of het extra-traditionele pijpleidingtransport werkelijk deze hoge vervoersprestatie haalt is twijfelachtig, vanwege de hoge investeringskosten voor de pijpleidingen. Bovendien zijn er momenteel geen concepten bekend voor concrete toepassing van extra-traditioneel pijpleidingtransport.

8.3 Capsule-pijpleidingtransport

8.3.1 Pneumatisch capsule-pijpleidingtransport

Het concept van de pneumatische capsule-pijpleidingen (PCP) is ontstaan in de 19e eeuw en is sindsdien wereldwijd toegepast voor met name de distributie van post. PCP's met een grote diameter worden momenteel gebruikt door de mijnbouwindustrie in de voormalige Sovjet-Unie en in Japan. Deze conventionele PCP's maken gebruik van bewezen technieken. Er bestaan tevens prototypes van modernere PCP's die door lineaire motoren worden aangedreven. Deze techniek is nog niet uitontwikkeld. Voor de toekomst zijn wellicht nog verbeteringen mogelijk ten aanzien van het energiegebruik.

PCP's hebben zeer uiteenlopende energie-intensiteiten, afhankelijk van het type aandrijving dat gebruikt wordt. De conventionele PCP's met een grote diameter hebben een directe energie-intensiteit die hoger ligt dan de energie-intensiteiten van conventionele transportmiddelen. Ook het indirecte energiegebruik is met 20% van het totale energiegebruik aanzienlijk. Dit komt door de lage maximale vervoersprestatie die dit type PCP kan leveren.

Voor de nieuwere PCP-concepten, die gebruik maken van lineaire motoren, zijn de directe energie-intensiteiten zeer uiteenlopend, omdat het hier nog geen uitontwikkelde technieken betreft. De PCP met LSM-aandrijving heeft een directe energie-intensiteit die lager is dan de energie-intensiteit van de

conventionele PCP en vergelijkbaar met die van het railtransport. Voor de PCP met LIM-aandrijving is de energie-intensiteit bijna 10 maal zo hoog als voor de PCP met LSM-aandrijving. Wegens een schaarste aan literatuurbronnen bestaat er onzekerheid in hoeverre de berekende energie-intensiteiten representatief zijn voor het transport per PCP. In de toekomst kan verdere ontwikkeling van deze innovatieve technieken het rendement van de motoren nog optimaliseren. Het indirecte energiegebruik van de door lineaire motoren aangedreven PCP's is uitermate klein.

De pneumatische capsule-pijpleidingen zijn een oud concept dat tot nog toe slechts weinig is toegepast. Een belangrijke reden hiervoor is de lage potentiële vervoersprestatie van deze systemen, waardoor investeringskosten moeilijk kunnen worden terugverdiend en PCP slechts in uitzonderlijke gevallen competitief is gebleken ten opzichte van conventionele vervoersmethoden, zoals weg- en railvervoer. De nieuwere PCP-concepten met lineaire aandrijving maken een hogere vervoersprestatie mogelijk, zeker als de capsules ook off-line geladen en uitgeladen worden. (Liu, 2000b) Vanwege de logistieke kenmerken van PCP-systemen is toepassing hiervan het best mogelijk op point-to-point relaties waarbij hoge snelheden vereist zijn (zie hoofdstuk 4). De totstandkoming van PCP-systemen in Nederland wordt voor de korte en middellange termijn niet verwacht.

8.3.2 Hydraulisch capsule-pijpleidingtransport

Hydraulische capsule-pijpleidingen (HCP) zijn de afgelopen decennia uitgebreid onderzocht, maar worden nog niet toegepast. Oorspronkelijk ging men daarbij uit van meerdere malen bruikbare containers. Het meest recente onderzoek richt zich daarentegen op de Coal Log Pipeline (CLP) waarbij steenkool tot capsules wordt geperst die zonder container door de pijpleiding kunnen worden getransporteerd. Deze techniek kan waarschijnlijk in de nabije toekomst in de praktijk geïmplementeerd worden.

HCP's hebben een lage energie-intensiteit, die afneemt naarmate de diameter van de buisleiding groter is. Voor een hypothetische HCP met een lengte van 80 km en een diameter van 90 cm is de energie-intensiteit 0,27 MJ/tonkm (zie bijlage 4). Dit is lager dan het energiegebruik van concurrerende transportmethoden, zoals railvervoer (0,61 MJ/tonkm), binnenvaart (0,60 MJ/tonkm) en trekkers op autosnelwegen (0,93 MJ/tonkm). De emissiefactoren zijn eveneens laag, omdat gebruik kan worden gemaakt van elektrische energie. De Coal Log Pipeline (CLP) heeft naast het tonkm-afhankelijke deel van de directe energie-intensiteit (0,5 à 1,5 MJ/tonkm) nog een ton-afhankelijk deel in de orde van 1 GJ/ton. Hierdoor is de energie-intensiteit van CLP negatief afhankelijk van de lengte van de pijpleiding.

Ondanks uitgebreid onderzoek en de lage energiekosten is HCP tot nog toe niet toegepast, onder andere vanwege de hoge investeringskosten van een HCP-systeem. Er is een grote goederenstroom nodig om de investering met de lage operationele kosten terug te verdienen. Voor de korte en middellange termijn is het onwaarschijnlijk dat HCP in Nederland wordt toegepast.

8.4 Overige ondergrondse transportsystemen

8.4.1 Algemeen

De overige ondergrondse transportsystemen hebben een grote verscheidenheid aan technische kenmerken, zoals afmetingen, geleiding en energievoorziening. Daarmee varieert ook het directe en indirecte energiegebruik van de systemen sterk. Het directe energiegebruik is voor systemen die gebruik maken van stalen wielen op rails over het algemeen lager dan voor systemen die gebruik maken van rubber banden. Het indirecte energiegebruik neemt sterk toe naarmate de voertuigen groter zijn, vanwege het hoge energiegebruik voor de constructie van de buisleiding.

Het directe energiegebruik van railgeleide voertuigen is niet in dit rapport berekend, omdat het niet waarschijnlijk is dat deze op korte of middellange termijn in ondergrondse transportsystemen gebruikt

worden. Voor railgeleide voertuigen ligt het directe energiegebruik waarschijnlijk in de buurt van de 1,6 MJ/tonkm. Voor dual-mode voertuigen wijst een berekening op een energie-intensiteit van 2,0 MJ/tonkm ongehinderd ondergronds en van 2,7 MJ/tonkm op de openbare weg bovengronds. Toepassing van dit type ondergronds goederentransport op korte en middellange termijn is eveneens onwaarschijnlijk. Het resterende deel van deze paragraaf blijft daarom beperkt tot ondergrondse logistieke systemen (OLS) die gebruik maken van automatisch geleide voertuigen (AGV).

8.4.2 Industrieel OLS

Een industrieel OLS vereist een grote buisdiameter die, indien ondergronds, op grote diepte moet worden aangelegd. Hiervoor zijn verschillende aanlegtechnieken mogelijk, waarvan een aantal zich in de praktijk heeft bewezen. De AGV's die bij een OLS gebruikt worden, zijn inmiddels op een testbaan getest. Daarnaast worden AGV's in andere systemen al in de praktijk toegepast. Een OLS kan dus als technisch haalbaar worden beschouwd. (IPOT, 2000)

Het energiegebruik van een industrieel OLS is berekend in de energiestudie van het OLS Schiphol (Van der Heide, 1999). Voor verschillende technische varianten loopt de directe energie-intensiteit uiteen van 1,6 tot 3,8 MJ/tonkm. Vrachtvervoer over landelijke wegen heeft voor grote vrachtauto's een lagere energie-intensiteit, namelijk 1,2 MJ/tonkm. Voor kleine vrachtauto's ligt de energie-intensiteit (2,2 MJ/tonkm) tussen waarden voor de verschillende OLS-varianten. Bestelauto's hebben wel een hogere directe energie-intensiteit dan het OLS: 8,2 MJ/tonkm. Het indirecte energiegebruik van een industrieel OLS is niet berekend; het berekende indirecte energiegebruik van het OLS Utrecht doet vermoeden dat dit aanzienlijk zal zijn.

Het OLS Schiphol is de oudste en meest onderzochte van de verschillende concept-OLS. Dit OLS is mogelijk in 2011 volledig operationeel (DGG, 2001). Andere industriële toepassingen van een OLS zijn netwerken in de Rotterdamse haven, in Zuid Limburg en tussen Hengelo en Enschede. De meest recente conceptversies van de twee laatstgenoemde netwerken zijn vrijwel geheel bovengronds en vallen daarom buiten de onderzoeksvraag van dit rapport. Het OLS in de Rotterdamse haven bevindt zich nog in de onderzoeksfase; het is niet bekend wanneer dit systeem operationeel kan zijn.

8.4.3 Stedelijk OLS

Het directe energiegebruik van een stedelijk OLS heeft een klein tonkm-afhankelijk deel, zodat het ton-afhankelijke deel een grote rol speelt. Daardoor neemt de directe energie-intensiteit af naarmate de ritlengte toeneemt. Bij een ritlengte van 200 meter bedraagt de energie-intensiteit 1,4 à 2,5 MJ/tonkm. Dit is voor een ritlengte van 1000 meter gedaald tot 0,5 à 1,6 MJ/tonkm. De directe energie-intensiteit van een stedelijk OLS is laag in vergelijking tot het wegverkeer. Voor stedelijke distributie in Utrecht is de gemiddelde energie-intensiteit van het wegverkeer in 2010 geschat op 15,9 MJ/tonkm.

Uit de case-studie van het OLS Utrecht blijkt de realisatie van een stedelijk OLS ondanks de fors lagere directe energie-intensiteit van het OLS toch te kunnen leiden tot een hoger direct energiegebruik van wegvervoer en OLS gezamenlijk. Dit komt door de toename van de totale benodigde vervoersprestatie vanwege het omrijden via een overslagterminal. Hierbij speelt de locatiekeuze van de overslagterminal een belangrijke rol.

Het indirecte energiegebruik van een stedelijk OLS is aanzienlijk. Het aandeel van het indirecte energiegebruik in het totale energiegebruik neemt bovendien toe bij een grotere buisdiameter. Er bestaat nog wel een grote onzekerheid over het indirecte energiegebruik, vooral voor de constructie van de terminals en voor het onderhoud van voertuigen en infrastructuur. Uit de case-studie van het OLS Utrecht blijkt bij het gebruik van rubber banden het indirecte energiegebruik 87% à 91% van het totale energiegebruik van een collisysteem en 92% à 94% bij een palletsysteem te bedragen. Bij stalen wielen op rails is het aandeel van het indirecte energiegebruik hoger. Andere transportmethoden hebben een lager aandeel van het indirecte energiegebruik in het totale energiegebruik. Voor

wegvervoer is dit het laagst: 18%. Bij railvervoer en binnenvaart is dit aandeel respectievelijk 45% en 60% (Bos, 1998). Uit de case-studie van het OLS Utrecht blijkt het indirecte energiegebruik zodanig hoog te zijn dat ondanks eventuele besparingen in het directe energiegebruik de totstandkoming van het OLS leidt tot een toename van het gemiddelde jaarlijkse energiegebruik.

De constructie van het OLS Utrecht heeft ongunstige gevolgen voor het energiegebruik en daarmee ook voor emissies die effect hebben op een mondiale of regionale schaal, zoals voor de emissie van het broeikasgas CO₂. Wel zorgt het OLS voor een verplaatsing van de emissies van de stad naar de snelwegen en elektriciteitscentrales, wat de lokale luchtkwaliteit in de stad ten goede komt vanwege een daling van de emissies aldaar van luchtverontreinigende stoffen als NO_x, PM₁₀ en VOS. Bovendien heeft het OLS gunstige gevolgen voor ruimtegebruik, geluidhinder en visuele hinder.

Uit de case-studie naar het OLS Utrecht blijkt dat het belangrijk is dat het gehele transporttraject in ogenschouw wordt genomen. Eventuele energiebesparingen door het lagere energiegebruik van het OLS kunnen teniet gedaan worden door een toename van de per rit af te leggen afstand. De locatiekeuze voor het logistieke stadspark is hierbij van cruciaal belang.

Voor verschillende Nederlandse steden zijn netwerken ontworpen voor stukgoederendistributie door een OLS, namelijk voor Den Haag, Leiden, Utrecht en Tilburg. Daarnaast is een concept voor een regionaal OLS onderzocht in de agglomeratie Arnhem/Nijmegen. Uit de verschillende haalbaarheidsonderzoeken is gebleken dat stedelijke OLS-en niet haalbaar zijn zonder een bovengronds verbindend netwerk (IPOT, 2000). Voordat een stedelijk OLS gerealiseerd wordt zullen dus veranderingen moeten plaatsvinden in de structuur van de Nederlandse logistieke verbindingen. Momenteel zijn geen van alle concepten voldoende ontwikkeld om op korte termijn uitgevoerd te worden.

Voor de langere termijn is het nog twijfelachtig of en, zo ja, welke stedelijke OLS wordt toegepast, omdat uit de haalbaarheidsonderzoeken is gebleken dat een OLS pas bij grote goederenstromen rendabel is. Vanwege de grote rol van de investeringskosten is de haalbaarheid het grootst bij een kleinschalige OLS die waar mogelijk bovengronds wordt aangelegd. Bovengrondse aanleg heeft echter wel negatieve gevolgen voor ruimtegebruik, geluidhinder en visuele hinder.

8.5 Overzicht van energie-intensiteiten

Tabel 8.1 geeft een overzicht van de directe en indirecte energie-intensiteiten van de verschillende vormen van ondergronds goederentransport. Hierbij is onderscheid gemaakt naar de verschillende goederencategorieën. Ter vergelijking zijn per goederencategorie ook de energie-intensiteiten van concurrerende bovengrondse transportmethoden in de tabel opgenomen.

Tabel 8.1: Overzicht van de energie-intensiteiten per goederensoort en vervoermiddel.

Energie-intensiteit (MJ/tonkm)	Direct	Indirect	Totaal
Gassen			
Traditionele pijpleidingen:			
• Aardgas	0,56 – 0,84	?	?
Bulkgoederen			
Traditionele pijpleidingen:			
• Ruwe aardolie	0,10	0,00	0,10
• Aardolieproducten	0,11 – 0,18	?	?
• Drinkwater	0,38	?	?
Pneumatische capsule-pijpleidingen:			
• Conventioneel	0,12 – 1,6	0,20	0,3 – 1,8
• Met lineaire motoren	0,67 – 6,4	≤ 0,01	0,7 – 6,4
Hydraulische capsule-pijpleidingen (Ø 0,5 – 2 m)	0,12 – 0,63	≤ 0,01	0,12 – 0,64
Wegvervoer (zware vrachtauto's / trekkers)	0,9 – 1,1	0,47	1,4 – 1,6
Railvervoer	0,61	0,30	0,91
Binnenvaart	0,60	0,27	0,87
Stukgoederen			
OLS Utrecht (stedelijk OLS)	1,0 – 4,8	23 – 50	25 – 53
OLS Schiphol (industrieel OLS)	1,56 – 3,81	> 1,52	> 3,1
Wegvervoer (stedelijke distributie naar Utrecht)	11,4 – 15,9	0,47	11,8 – 16,3

9. Conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek

9.1 Conclusies

Het directe energiegebruik van traditioneel pijpleidingtransport is laag, vooral voor het transport van vloeistoffen. Het pijpleidingtransport van vloeistoffen heeft een directe energie-intensiteit die lager is dan de energie-intensiteit van de conventionele bovengrondse transportmethoden. De energie-intensiteit van het pijpleidingtransport van gassen ligt hoger dan voor het transport van vloeistoffen. Dit komt met name door de lagere dichtheid van de vervoerde stof.

Het indirecte energiegebruik van het traditionele pijpleidingtransport is zeer laag in vergelijking tot het directe energiegebruik. De indirecte emissies van CO₂ en NO_x zijn eveneens laag, maar voor SO₂, VOS en PM₁₀ is de indirecte emissie wel aanzienlijk.

Voor een OLS heeft het indirecte energiegebruik een groot aandeel in het totale energiegebruik. Het aandeel van het indirecte energiegebruik in het totale energiegebruik van het concept OLS Utrecht ligt tussen 87% en 97%. Dit is een veel hoger percentage dan voor de traditionele bovengrondse transportmethoden.

Alle beschouwde ondergrondse transportmethoden hebben als financieel kenmerk een relatief hoge investering en lage operationele kosten. De grote kapitaalbehoefte vormt een belemmering voor het totstandkomen van de infrastructuur. Voor de financiering van ondergrondse infrastructuur wordt publiek private samenwerking noodzakelijk geacht.

Het huidige Nederlandse pijpleidingnetwerk heeft een totale lengte van enkele honderdduizenden kilometers, waarvan het grootste deel bestaat uit fijnvertakte landelijke netwerken voor drinkwater, afvalwater en aardgas. Pijpleidingen voor industriële grondstoffen en producten hebben een gezamenlijke lengte van ruim 2000 km.

De jaarlijks door pijpleidingen vervoerde hoeveelheid is 3,4 mld. ton, wat vrijwel geheel bestaat uit drink- en industriewater en afvalwater. Voor industriële grondstoffen en producten is de vervoerde hoeveelheid 57 mln. ton. De vervoersprestatie van pijpleidingen voor het transport van ruwe aardolie en aardolieproducten is ruim 6 mld. tonkm; voor het distributienetwerk van drink- en industriewater is dit ca. 13 mld. tonkm.

Het totale energiegebruik van pijpleidingen bedraagt 11 PJ, waarvan 1,0 PJ door pijpleidingen voor het transport van industriële producten en grondstoffen. Hiermee heeft het pijpleidingtransport een aandeel van 2,4% in het totale energiegebruik van transport.

Voor de toekomst wordt een verdere toename van het pijpleidingtransport verwacht, vooral voor het transport van chemicaliën. Het OLS Schiphol wordt verwacht volledig operationeel te zijn in 2011. Voor andere netwerken met OLS, waaronder de verschillende stedelijke distributienetwerken, bestaan twijfels over de haalbaarheid vanwege de grote investering die hier voor nodig is. Voor andere concepten voor ondergronds goedertransport, zoals capsule-pijpleidingen, valt niet te verwachten dat deze in Nederland op korte of middellange termijn worden toegepast.

Ondanks de lage directe energie-intensiteit van OLS-en leidt de totstandkoming van een ondergronds stedelijk distributienetwerk niet in alle gevallen tot een daling van het gezamenlijke directe energiegebruik van wegverkeer en OLS. Door het hoge indirecte energiegebruik heeft een OLS vaak een toename van het totale energiegebruik tot gevolg.

9.2 Aanbevelingen voor verder onderzoek

Met betrekking tot ruwe-aardoliepijpleidingen is niet bekend wat de continuïteit van de vloeistofstroming door de pijpleiding. Vooral bij een lage gemiddelde benutting van een pijpleiding is de mate van continuïteit van belang om aan de hand van de vloeistofdynamische theorie het gemiddelde directe energiegebruik van de pijpleiding te berekenen. Nader onderzoek is daarom gewenst naar de wijze waarop de pijpleidingen worden gebruikt.

Voor verschillende per conventionele pijpleiding vervoerde producten is niet bekend wat de vervoersprestatie is van deze pijpleidingen. Tijdreeksen van vervoersprestaties worden alleen bijgehouden voor internationale pijpleidingen voor het transport van ruwe aardolie en aardolieproducten. De vervoersprestatie van drink- en industriewater is in dit rapport geschat. Voor andere goederencategorieën, zoals afvalwater, aardgas, energiegassen en chemische basisproducten, is de vervoersprestatie echter onbekend.

Er zijn geen praktische waarden bekend van het energiegebruik van Nederlandse pijpleidingen. Hierdoor is het niet mogelijk geweest om de aan de hand van de vloeistofdynamische theorie berekende energie-intensiteiten te vergelijken met praktische data. De beschikbare literatuurwaarden hebben allen betrekking op pijpleidingen in de Verenigde Staten. Omdat het energiegebruik per pijpleiding sterk kan verschillen en het totale energiegebruik van pijpleidingen in Nederland grotendeels bepaald wordt door slechts enkele grote pijpleidingen, is het zeer twijfelachtig in hoeverre deze pijpleidingen als indicator gebruikt kunnen worden voor pijpleidingen in Nederland. Daarom is het gewenst dat praktijkwaarden verkregen worden om de berekende energie-intensiteiten te valideren.

In dit rapport is vooral aandacht besteedt aan het energiegebruik van ruwe-aardoliepijpleidingen. Ruwe aardolie is het industriële product waarvan pijpleidingen verreweg de grootste vervoersprestatie leveren en waarvoor pijpleidingen ook het meeste energie gebruiken (ca. 60% van het totaal van industriële pijpleidingen). Het energiegebruik van het pijpleidingstransport van andere industriële producten is voor de Nederlandse pijpleidingen niet berekend. Een nadere beschouwing van het energiegebruik van deze pijpleidingen is, gezien het aandeel van 40% in het totale energiegebruik van industriële pijpleidingen, wellicht zinvol.

Voor capsule-pijpleidingen is nog onzekerheid over het energiegebruik van de moderne systemen die worden aangedreven door lineaire motoren. Deze onzekerheid wordt veroorzaakt door de beschikbaarheid van slechts één literatuurbron per type lineaire motor en door de mogelijkheid dat in de toekomst nog technische verbeteringen aan de motoren plaatsvinden die het energiegebruik verminderen.

Het energiegebruik van het OLS blijkt voor een zeer groot deel uit indirect energiegebruik te bestaan. Het berekenen van het indirecte energiegebruik volgens de gebruikte methode, de proces energie analyse, vereist veel gegevens over de materialen en processen waar gebruik van wordt gemaakt. Met name voor de terminals van het OLS is de exacte constructie en inrichting onbekend, zodat er nog een grote onzekerheid bestaat over het energiegebruik van de constructie van de terminals. Nader onderzoek is daarom gewenst naar het energiegebruik voor de constructie van terminals.

Een belangrijk aandeel in het indirecte energiegebruik heeft het onderhoudsproces. In dit rapport is aangenomen dat het energiegebruik van het onderhoud aan infrastructuur en voertuigen respectievelijk 2% en 3% bedraagt van het energiegebruik van de constructie van de infrastructuur dan wel voertuigen. Deze percentages zijn gebaseerd op een schatting van het CE (Roos et al., 2000). Het is echter niet bekend wat de nauwkeurigheid van de methode is en wat de onzekerheid is in de percentages.

Bij de case-studie naar een stedelijk OLS is alleen een geheel ondergronds transportnetwerk beschouwd. Gezien de hoge kosten van ondergronds bouwen is het echter zeer aannemelijk dat

eventuele toekomstige OLS-en gedeeltelijk bovengronds worden aangelegd. Dit kan leiden tot een lager direct energiegebruik, allereerst omdat er minder geboord/gegraven hoeft te worden en minder materiaal gebruikt wordt en ten tweede omdat de lagere veiligheidseisen voor bovengrondse infrastructuur combinatie van personen- en goederenvervoer vergemakkelijkt. Deze mogelijkheid vereist nog nader onderzoek.

Literatuur

- Arends, G., B. Grote (2000), The use of trenchless technology (horizontal directional drilling [HDD], microtunnelling [MT] and pipejacking) for the construction of underground pipelines for transport of goods. (bulk and non-bulk), 2nd International Symposium on Underground Freight Transportation by Capsule Pipelines and Other Tube/ Tunnel Systems, Delft, 28-29 September 2000.
- ARG (1999), Feasibility study propylene pipeline network Benelux Cologne Gelsenkirchen, Executive summary, Aethylen Rohrleitungs Gesellschaft Mbh & Co.Kg (ARG).
- ASCE (1998), Freight pipelines: Current status and anticipated future use, American Society of Civil Engineers (ASCE) Task Committee on Freight Pipelines of the Pipeline Division, Journal of Transportation Engineering, Vol. 124, Nr. 4, July-Aug 1998, pag. 300-310.
- AVV (1997a), Achtergrondrapportage Vervoer-Economische Verkenningen 1997-2002, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Adviesdienst Verkeer en Vervoer (AVV), Rotterdam.
- AVV (1997b), Goederenvervoer, Editie 1997, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Adviesdienst Verkeer en Vervoer (AVV), Rotterdam.
- AVV (1997c), Vervoer-Economische Verkenningen 1997-2002, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Adviesdienst Verkeer en Vervoer (AVV), Rotterdam.
- Bliss, D. (2000), Mail Rail – 70 years of automated underground freight transport, 2nd International Symposium on Underground Freight Transportation by Capsule Pipelines and Other Tube/ Tunnel Systems, Delft, 28-29 September 2000.
- Boerkamps, J.H.K. (2000), Data collection and potential freight volume for urban, underground logistics systems, 2nd International Symposium on Underground Freight Transportation by Capsule Pipelines and Other Tube/ Tunnel Systems, Delft, 28-29 September 2000.
- Boerkamps, J., M. Cornelissen (2000), Ondergronds Logistiek Systeem Tilburg, Concept eindverslag d.d. 19 september 2000, DHV Milieu en Infrastructuur.
- Boerkamps, J., W. Brouwer (1999), Inventarisatie goederenstromen, Inventarisatie van de goederenstromen van en naar de binnenstad van Utrecht in het kader van haalbaarheidsstudie ondergronds transport, in opdracht van de gemeente Utrecht, DHV Milieu en Infrastructuur.
- Bos, S. (1998), Direction indirect, the indirect energy requirements and emissions from freight transport, Rijksuniversiteit Groningen.
- Brink, R.M. van den Brink, G.P. van Wee (1997), Energiegebruik en emissies per vervoerwijze, Rapportnr. 773002007, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven.
- Broere, W. (2000), Settlements of micro-tunnels in relation to their use in underground logistic systems, 2nd International Symposium on Underground Freight Transportation by Capsule Pipelines and Other Tube/ Tunnel Systems, Delft, 28-29 September 2000.
- Brouwer, W., W.E. van Lierop, G.A.A. Erens, A.F.C. Carlebur, J.G.S.N. Visser (1997a), Buisleidingtransport (BLT) voor Stedelijk Goederenvervoer, Deel A, Interdepartementaal onderzoekprogramma Duurzame Technologische Ontwikkeling, DTO werkdocument M9, DHV Milieu en Infrastructuur, TRAIL Onderzoekschool, TU Delft/OTB.
- Brouwer, W., W.E. van Lierop, G.A.A. Erens, A.F.C. Carlebur, J.G.S.N. Visser (1997b), Buisleidingtransport (BLT) voor Stedelijk Goederenvervoer, Deel B, Interdepartementaal onderzoekprogramma Duurzame Technologische Ontwikkeling, DTO werkdocument M10, DHV Milieu en Infrastructuur, TRAIL Onderzoekschool, TU Delft/OTB.
- Buck, R., E. Wever, A.J. van Binsbergen, J.G.S.N. Visser, J. Katgerman, D. Piebenga (1999), Gaat Leiden ondergronds?, Buck Consultants International/TRAIL Onderzoekschool/Rups.
- CBS (1999), De Nederlandse energiehuishouding, jaarcijfers 1997, Centraal Bureau voor de Statistiek, Sdu/uitgeverij / Cbs-publikaties, 's-Gravenhage.
- CBS (2000a), Energiemonitor 2000-4, Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), Voorburg/Heerlen.
- CBS (2000b), Statistiek van het goederenvervoer 1999, Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), Voorburg/Heerlen.

- CBS (2001), website, bezocht op 18-5-2001, URL: <http://www.cbs.nl>
- CCDM (in voorbereiding), Methode-beschrijving van de berekening van de emissies door mobiele bronnen in Nederland, taakgroep verkeer en vervoer, CoördinatieCommissie DoelgroepMonitoring (CCDM), Hoofdingspectie Milieuhygiëne, Den Haag.
- Chem systems (1999), Development options in chlorine and ethylene derivatives, Summary report, A report prepared for the Antheus Magnesium Development Delfzijl, Chem systems, London.
- COB (2000), Het Ondergronds Logistiek Systeem Aalsmeer-Schiphol-Hoofddorp, Deelproject 3A en 3B, Eindrapportage, Centrum Ondergronds Bouwen (COB), Gouda.
- Connekt (2001), website, bezocht op 5 januari 2001, URL: <http://www.connekt.nl>
- CPB (1997), Economie en fysieke omgeving, Beleidsopgaven en oplossingsrichtingen 1995-2020, Centraal Planbureau (CPB), Sdu Uitgevers, Den Haag.
- Davis, S.C. (2000), Transportation energy data book, Edition 20, Center for Transportation Analysis, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge.
- Deelen, C., T. Dekker, E. Snijders (1999), 2020, Integrale verkenningen voor haven en industrie, werkdocument Verkeer en Vervoer, Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam.
- DGG (2000), Ruimtelijke consequenties van buisleidingen, Directoraat-Generaal Goederenvervoer (DGG), Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag.
- DGG (2001), Nieuwsbrief Ondergronds transport en buisleidingen, juni 2001, Directoraat-Generaal Goederenvervoer (DGG), Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag.
- DHV (1999), Antheus Magnesium Development Program Delfzijl, Milieu Effecten Inventarisatie, Eindrapport, DHV Milieu en Infrastructuur BV.
- Dijkstra, W.J., J.M.W. Dings (1999), Brandstofprijzen en accijnsbeleid in het Europese wegverkeer 1980-1999, Centrum voor energiebesparing en schone technologie (CE), Delft.
- Dings, J.M.W., P. Janse, B.A. Leurs, M.D. Davidson (1999), Efficiënte prijzen voor het verkeer, Raming van maatschappelijke kosten van het gebruik van verschillende vervoermiddelen, Eindrapportage, Centrum voor energiebesparing en schone technologie (CE), Delft.
- DynaVision (1999). OLS-Utrecht, Een uitweg onder de grond, Eindrapportage haalbaarheidsverkenning OLS Utrecht, in opdracht van de Gemeente Utrecht, DynaVison Management Consultancy, Wassenaar.
- Ebihara, D., M. Yoshimuro, S. Osawa (1993), Research on Linear Motor of the Vehicle in Tokyo L-NET System, Institute for Posts and Telecommunications Policy, www.ippt.go.jp/research/survey/develop/1993/005.html.
- ECN (1999), Energie Verslag Nederland 1999, Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN), Petten.
- ECN (2001), Email-contact met Pieter Kroon, Energieonderzoek Centrum Nederland, juni 2001.
- Encyclopædia Britannica (2001), Britannica.com, website, bezocht op 12 februari 2001, URL: <http://www.britannica.com>
- EnergieNed (2000), Energie in Nederland, EnergieNed Federatie van Energiebedrijven in Nederland, Arnhem.
- Ettema (1999), Ondergronds Logistiek Systeem (OLS) Utrecht, Uitwerking en evaluatie van systeemvarianten, Definitief, in opdracht van: Gemeente Utrecht, Dienst Stadsontwikkeling, uitgegeven door: Divisie Verkeer & Infrastructuur, De Bilt.
- Feimann, P.F.L., K.T. Geurs, R.M.M. van den Brink, J.A. Annema, G.P. van Wee (2000), Verkeer en vervoer in de Nationale Milieuverkenning 5, Rapportnr. 408129014, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), Bilthoven.
- Gaalen, F.W. van, J.H.C. Mülschlegel (2000), Toepassing Atlantis, in het kader van de Nationale Milieuverkenning 5, 2000-2030, Intern rapport, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), Bilthoven.
- Gasunie (2001a), N.V. Nederlandse Gasunie, website, bezocht op 12 februari 2001, URL: <http://www.gasunie.nl>
- Gasunie (2001b), Veiligheid, Gezondheid en Milieu - jaarverslag 2000, N.V. Nederlandse Gasunie, Groningen.
- Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam (2001), website, bezocht op 15 maart 2001, URL: <http://www.portmanagement.com>

- Geurs, K.T., R.M.M. van den Brink, J.A. Annema, G.P. van Wee (1998), Verkeer en vervoer in de Nationale Milieuverkenning 4, Rapportnr. 773002011, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), Bilthoven.
- Gijzen, A., J. Spakman (2001), DAMES: Een bestand voor de macro-emissies van het Nederlandse elektriciteitsaanbod in 1995, 1998, 2010, 2020 en 2030, Rapportnr. 773001017, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), Bilthoven.
- Groot, P.J.M. (1991), Goederenvervoer per pijpleiding, Economisch instituut voor de bouwnijverheid, Amsterdam.
- GWA (2001), Gemeentewaterleidingen Amsterdam, website, bezocht op 12 februari 2001, URL: <http://www.gwa.nl>
- Haccoû, H.A., J.G.S.N. Visser, R.L. Elting (1996), Buisleidingen voor goederenvervoer, Definitiestudie, Interdepartementaal onderzoekprogramma Duurzame Technologische Ontwikkeling, DTO werkdocument M2, Heidemij Advies BV, TRAIL Onderzoekschool.
- Heide, J. van der (1999), Energiestudie OLS, in opdracht van NOVEM, TNO Wegtransportmiddelen, Delft.
- Heijden, M. van der, M. Iding, L. Tavasszy (1999), Naar een landelijk netwerk voor goederenvervoer met ondergronds transport per buisleiding, verkennende studie naar kritische ontwerpfactoren, ruimtelijke ontwerpprincipes en ontwikkelstrategieën, eindrapportage, TNO Inro, Delft.
- Hoorn, R. van der (2001), Interview afgenomen op 30 januari 2001.
- Houten, H.M. van den (1999), Ethyleentransport naar Delfzijl, Aanvullend onderzoek B, Tebodin B.V., Den Haag.
- Howgego, T., M. Roe (1998), The use of pipelines for the urban distribution of goods, Transport Policy, Vol. 5, Nr. 2, 1998, pag. 61-72.
- Hucho, W-H (1987), Aerodynamics of Road Vehicles, From fluid mechanics to vehicle engineering, Butterworths, Londen.
- IPOT (1998), Transport onder ons, Voortgangsverslag bij de kabinetsbrief over toekomstige mogelijkheden van Ondergronds Transport en Buisleidingen (OTB), Interdepartementale Projectorganisatie Ondergronds Transport (IPOT), Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag.
- IPOT (1999), Transport onder ons: Schakel in de keten, 2e voortgangsrapportage, Interdepartementale Projectorganisatie Ondergronds Transport (IPOT), Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag.
- IPOT (2000), Transport onder ons: Van visie naar realisatie, Eindrapportage, Interdepartementale Projectorganisatie Ondergronds Transport (IPOT), Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag.
- Janse, P., W.J. Dijkstra, J.M.W. Dings, G.P. van Wee, R.M.M. van den Brink, C.J. Ruijgrok, H. Uitenboogaart, D.A. Henstra, C.E. Cornelissen (2000), Milieuwinst op het spoor?, Synthese van onderzoeken naar milieu-effecten van het goederenvervoer per spoor, CE, RIVM, TNO Inro, Delft/Bilthoven.
- Kass, G., M. Norton (1997), Tunnel vision?, The future role of tunnels in transport Infrastructure, Parliamentary office of science and technology, London.
- Katgerman, J., J.C. Rijsenbrij, J.G.S.N. Visser (1998), Technologie Ondergronds Transportsysteem, Quick scan verkenning ten behoeve van IPOT, Rotterdam/Delft.
- Klomps, G., Th de Rijk (1988), Tien hydraulische graafmachines, BouwMachines 23, Nr. 10, 28 oktober 1988.
- Koet, P., J.C.J. Stumphius, M.J.C. Everaers (2000), Verkennende marktstudie OLS Havengebied, Van de Geijn Partners bv, Raadgevend Ingenieursbureau Lievense, Houten/Breda.
- Komor, P. (1995), Reducing energy use in US freight transport, Transport Policy, Vol. 2, Nr. 2, 1995, pag. 119-128.
- Koshi, M. (1992), An automated underground tube network for urban goods transport, IATSS Research, Vol. 16, Nr. 2, 1992.
- Kosugi, S. (1999), Effect of traveling resistance factor on pneumatic capsule pipeline system, Powder Technology, Vol. 104, Nr. 3, 1999, pag. 227-232.
- Kosugi, S., K. Saitou, N. Matsui, Y. Tomita (2000), Development of vertical pneumatic capsule pipeline system for deep underground, 2nd International Symposium on Underground Freight

- Transportation by Capsule Pipelines and Other Tube/ Tunnel Systems, Delft, 28-29 September 2000.
- KPMG (1999), Marktanalyse Ondergronds Transport en Buisleidingen Zuidwest-Nederland, Eindrapportage, KPMG Bureau voor Economische Argumentatie.
- Kuiper, J.C., W. Ottevanger (1998), Inventarisatie aanlegtechnieken tunnels met een doorsnede van 2 tot 5 meter, eindrapport, Werkgroep Markt, van de Interdepartementale Projectorganisatie Ondergronds Transport, kenmerk HR/VI/1997-475/WO - versie 4.0, Centrum Ondergronds Bouwen, Utrecht.
- Kusters, L.J.J. (2000), Development of dedicated vehicles for a tunnel transport system, 2nd International Symposium on Underground Freight Transportation by Capsule Pipelines and Other Tube/ Tunnel Systems, Delft, 28-29 September 2000.
- KvK Centraal Gelderland (1999), Verkenning mogelijkheden ondergronds logistiek systeem in het knooppunt Arnhem-Nijmegen, Eindrapport, Kamer van Koophandel voor Centraal Gelderland.
- Langerak, L., Th.A.M. Reijs (1995), Indicatoren voor indirect ruimtebeslag door vervoerssystemen, TNO Beleidsstudies en Advies, Delft.
- Larock, B.E., R.W. Jeppson, G.Z. Watters (2000), Hydraulics of pipeline systems, CRC Press LLC, Boca Raton.
- Lensink, S.M., H.C. Moll (2000), Energieanalyse van de Westerscheldetunnel, Bijdrage aan het Colloquium 'Verkeer, Milieu en Techniek', Bilthoven, 29 juni 2000.
- Liu, H. (2000a), Capsule pipeline: an overview, 2nd International Symposium on Underground Freight Transportation by Capsule Pipelines and Other Tube/ Tunnel Systems, Delft, 28-29 September 2000.
- Liu, H. (2000b), Improving economics of existing pneumatic capsule pipeline system for transporting general cargoes, 2nd International Symposium on Underground Freight Transportation by Capsule Pipelines and Other Tube/ Tunnel Systems, Delft, 28-29 September 2000.
- Liu, H. (2001), Email-contact met Henry Liu, University of Missouri-Columbia, juli 2001.
- Liu, H., M. Assadollahbaik (1979), Energy conservation value of hydraulic container pipeline (HCP), Project completion report, Prepared for the U.S. department of energy, University of Missouri-Columbia, Columbia.
- Liu, H., J.S. Noble, J. Wu, R. Zuniga (1998), Economics of coal log pipeline for transporting coal, Transportation research, Part A, Policy and practice, Vol. 32, Nr. 5, 1998, pag. 377-391.
- Lundgren, T.S., Y. Zhao (2000), Aerodynamics of electrically driven freight pipeline system, Journal of Transportation Engineering, Vol. 126, Nr. 3, 2000, pag. 263-270.
- Lyons, D., Y. Barriol, C.R. Meriggi, P. Pries (1992), Performance of oil industry cross-country pipelines in western Europe, statistical summary of reported spillages, Concawe, Brussels.
- Mining Technologie (2001), Sumitomo Metal Industries Ltd, website, bezocht op 28 augustus 2001, URL: <http://www.mining-technology.com/contractors/materials/sumitomo>
- Ministerie van Defensie (2001), website, bezocht op 15 maart 2001, URL: <http://www.mindef.nl>
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2000), Van A naar Beter, Nationaal Verkeers- en Vervoersplan 2001-2020, Beleidsvoornemen – Deel A, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2001), website, bezocht op 21 februari 2001, URL: <http://www.minvenw.nl>
- Montgomery, B., S. Fairfax, D. Beals, E. Taylor, J. Whitley, B. Smith (2000), Electromagnetic pipeline demonstration Project, 2nd International Symposium on Underground Freight Transportation by Capsule Pipelines and Other Tube/ Tunnel Systems, Delft, 28-29 September 2000.
- Mott, R.L. (2000), Applied fluid mechanics, Fifth edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River.
- NEA, DHV (1998), Eindrapport referentiekader vervoer ondergronds transport, R970234\12585, Uitgebracht aan: Interdepartementale Projectorganisatie Ondergronds Transport (Werkgroep Markt), NEA/DHV, Rijswijk/Amersfoort.
- NEA, Haskoning (1993), Goederenvervoer per buisleiding, een onderzoek naar de huidige en potentiële omvang van het goederenvervoer per buisleiding in Nederland, uitgebracht aan NOVEM en Ministerie van Verkeer & Waterstaat, NEA/Haskoning, Tilburg/Nijmegen.

- OECD (1996), The environmental effects of freight, Joint session of trade and environment experts, COM/TD/ENV(96)72, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris.
- OLS (2001), Stichting Initiatiefgroep Ondergronds Logistiek Systeem (OLS) - Aalsmeer, Schiphol, Hoofddorp, website, bezocht op 5 januari 2001, URL: <http://www.het-ols.nl>
- Perrels, A.H., L.P. Schippers (1991), Eerste raming van de marktomvang van hogesnelheidstunneltransport, Vrije Universiteit Amsterdam.
- Pielage, B.A. (2000), Design approach and prototyping of automated underground freight transportation systems in the Netherlands, 2nd International Symposium on Underground Freight Transportation by Capsule Pipelines and Other Tube/ Tunnel Systems, Delft, 28-29 September 2000.
- Porter, M.E., V.E. Millar (1985), How information gives you competitive advantage, the information revolution is transforming the nature of competition, Harvard Business Review, July-August 1985, pag. 149-160.
- Rauwerdink, A. (2001), Ondergrondse levensader voor Tilburgse binnenstad, DHV Times, februari 2001, pag. 4-6.
- Rijk, Th de, G. Klomps (1987), Laadschoppen, BouwMachines 22, Nr. 9, 29 September 1987.
- Rijkeboer, R.C., P. van Sloten, M. Elderman, B. van den Haspel, P. Kroon (1992), Wijziging brandstofmix, Een studie naar de gevolgen voor energigebruik en emissie van een drastische wijziging van de verdeling benzine-diesel-LPG bij personen- en bestelwagens, TNO-Industrie, Delft.
- RIVM (2000), Nationale Milieuverkenning 5, 2000-2030, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), Samsom bv, Alphen aan de Rijn.
- Roop, S.S., D.H. Bierling (2000), Economic and technical feasibility of a freight pipeline system in Texas, 2nd International Symposium on Underground Freight Transportation by Capsule Pipelines and Other Tube/ Tunnel Systems, Delft, 28-29 September 2000.
- Roos, J.H.J., F.G.P. Corten, W.J. Dijkstra (2000), Maatschappelijke baten van ondergrondse logistieke systemen, CE-bijdrage IPOT-project, Centrum voor energiebesparing en schone technologie, Delft.
- Rutten, B.J.C.M. (1993), Energieverbruik en CO₂-uitstoot in het goederenvervoer, Versie 1, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Werktuigbouwkunde en Maritieme Techniek, Delft.
- Sanders, F.M., E. Horvat, G. Arends, D.J. Kevelam, R.A.A. van der Krogt (1998), Logistiek Kader OLT Den Haag, Eerste deelonderzoek, literatuurstudie en conceptomschrijving, TU Delft / DHV.
- Schee, G. van der, T. Garritsen (1997), Verdroging door infrastructuur, Een landelijke verkenning, concept, Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling.
- Serway, R.A. (1996), Physics for scientists and engineers, With modern physics, Fourth edition, Saunders college publishing, Philadelphia.
- Sinfield, J.V., H.H. Einstein (1998), Tunnel construction costs for tube transportation systems, Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 124, Nr. 1, 1998, pag: 48-57.
- Stein, D., B. Schoesser (2000), Current progress of the research project "underground transportation and utility systems" at the Ruhr-University Bochum, 2nd International Symposium on Underground Freight Transportation by Capsule Pipelines and Other Tube/ Tunnel Systems, Delft, 28-29 September 2000.
- Stichting Buisleidingenstraat Zuidwest Nederland (2001), website, bezocht op 5 januari 2001, URL: <http://www.buisleidingenstraat.nl>
- Stichting RIONED (2001), Telefonisch contact met Rob Hermans, Stichting RIONED, april 2001.
- Taniguchi, E., R. Ooishi, T. Kono (2000), Development and future perspectives for underground freight transport systems in Japan, 2nd International Symposium on Underground Freight Transportation by Capsule Pipelines and Other Tube/ Tunnel Systems, Delft, 28-29 September 2000.
- Tops, L. (1999), Schiphol aan de buisvoeding, ShellVenster, mei/juni 1999, pag. 20-23.

- TubeFreight (2001), Tubexpress, website, bezocht op 8 januari 2001, URL:
<http://www.tubexpress.com>
- University of Washington (2001), Japanese Automated Freight Transport System, website, bezocht op 8 januari 2001, URL: <http://faculty.washington.edu/~jbs/itrans/japanaf.htm>
- Vance, L., M.K. Mills (1994), Tube freight transportation, Public roads, Vol. 58, Nr. 2, 1994, pag. 21-27.
- Veen, R.Th. van der (1996), Unit transport per pijpleiding, een uitweg onder de grond, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Raadgevend Ingenieursbureau Lieveense B.V., Breda.
- Verbraeck, A.Y. Saanen, E. Valentin, Designing effective terminals and their control systems for the underground logistic system Schiphol, 2nd International Symposium on Underground Freight Transportation by Capsule Pipelines and Other Tube/ Tunnel Systems, Delft, 28-29 September 2000.
- Verkerk, G., J.B. Broens, W. Kranendonk, F.J. van der Puijl, J.L. Sikkema, C.W. Stam (1992), Binas, Informatieboek vwo-havo voor het onderwijs in de natuurwetenschappen, Wolters-Noordhoff, Groningen.
- VEWIN (1998), Waterleidingstatistiek 1997, Vereniging van Exploitanten van Waterleidingbedrijven in Nederland (VEWIN), Rijswijk.
- Visser, J.G.S.N. (2001), Interview afgenomen op 25 januari 2001.
- Vogel N.C (1895), Overzicht der waterleidingen in Nederland, Wed. P. van Waesberge & zoon, Rotterdam.
- Wada, M., M. Yoshimuro, M. Nagai, M. Sato (1992), Research report on weight reduction of Tokyo L-NET underground transport vehicles, Institute for Posts and Telecommunications Policy, www.iptp.go.jp/research/survey/develop/1992/008.html.
- Wal, G. van der, E.H. Knol (1979), Elektrotechniek in kort bestek, B.V. Uitgeverij Nijgh & Van Ditmar, Den Haag.
- Walwijk, M. van, P.A.J. Achten (1991), Mobiele werktuigen, energieverbruik en emissies, Innas B.V., Breda.
- Zhao, Y., T.S. Lundgren (1996), Characteristics of a freight pipeline transportation system, International Conference on PRT and Other Emerging Transportation Technologies, Minneapolis, november 1996.

Bijlage 1: Verzendlijst

1. DGM, Directie Strategie en Bestuur, mr. Ing. J.H. Enter
2. Directeur-Generaal Milieubeheer, ir. J van der Vlist
3. Prof. Dr P. Nijkamp – Vrije Universiteit Amsterdam
4. Prof. Dr P. Rietveld – Vrije Universiteit Amsterdam
5. Prof. Dr F. den Butter – Vrije Universiteit
6. Prof. Dr F.M. Dieleman – Universiteit Utrecht
7. Prof. Dr Ir R.E.C.M. van der Heijden – Katholieke Universiteit Nijmegen
8. Prof. Dr P.H.L. Bovy – Technische Universiteit Delft
9. Prof. Dr A.I.J.M. van der Hoorn – Universiteit van Amsterdam/ AVV
10. Prof. Dr F. le Clercq – Universiteit van Amsterdam/Twijnstra Gudde
11. Prof. Dr M. van Maarseveen – Technische Universiteit Twenthe
12. Prof. Ir F. Sanders – Technische Universiteit Delft
13. Prof. Dr Ir H. Priemus – Technische Universiteit Delft/OTB
14. Prof. Dr H.J. van Zuylen – Technische Universiteit Delft
15. Prof. Ir R van der Hoorn – Technische Universiteit Eindhoven
16. Dr C.M. Plug – VROM/DGM
17. Ir A.J. Baayen – VROM/DGM
18. Ir M. van den Berg – VROM/DGM
19. Drs R. Bouman – VROM/DGM
20. Drs H.C.G.M. Brouwer – VROM/DGM
21. Ir W.J. Dijkstra – VROM/DGM
22. Dr C. Havenith – VROM/DGM
23. Ir B.J.F. Kortbeek – VROM/DGM
24. Ing. D. de Jong – VROM/DGM
25. Mr M.C. Kroon – VROM/DGM
26. W.J. Lenstra – VROM/DGM
27. Drs. A.J. van Marlen – VROM/DGM
28. Drs H.E. ten Velden – RPD
29. Drs R. Braakenburg van Backum – V&W
30. Ir A.N. Bleijenberg – V&W
31. Ir P.C.M. Polak – RWS-AVV
32. Drs J.M. Francke – RWS-AVV
33. Ir J. van der Waard – RWS-AVV
34. Mr Ir J.P. Jonges – RWS-AVV
35. Ir P. Jorritsma – RWS-AVV
36. J. Veurman – RWS-AVV
37. Dr C. Koopmans – CPB
38. Dr ir J.G.S.N. Visser – EZ
39. Dr M. Dijkstra – Universiteit Utrecht
40. Dr T.J.M. Spit – Universiteit Utrecht
41. Ir J.J.E.A van Meel – NOVEM
42. Ing. A. Jansen – NOVEM
43. Ir P. Kroon – ECN
44. Ir W. J. van Grondelle – SNM
45. Drs J. Steijn – VNO/NCW
46. Ir P.H.R. Langeweg – ANWB
47. Ing. R. Hendriks – ANWB, redactie verkeerskunde
48. W. Zijlstra – BOVAG
49. Drs W. Korver – TNO-INRO
50. Ir E.J. Verroen – TNO-INRO
51. Dr Ir B.J.M. Rutten – CMG
52. Ing. F.M.C. Gommers – XTNT

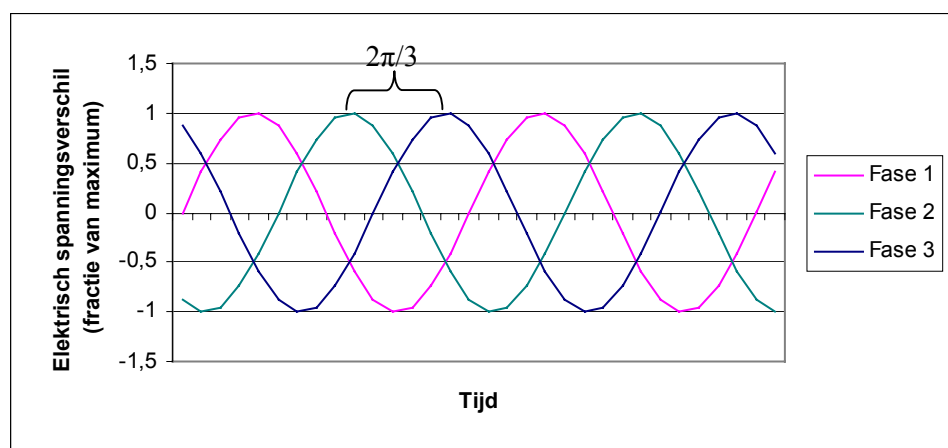
53. Dr H.J. Meurs – MuConsult
54. Ing. P.M. Peeters – Peeters advies
55. Ing. K.L. van de Zande – AGV
56. D.H.W.H. Hermans – Goudappel Coffeng
57. J.T. Jetten – NEA
58. Ir J.M.W. Dings – Centrum voor energiebesparing en schone technologie
59. Ir P. Janse – Centrum voor energiebesparing en schone technologie
60. Drs U.Ph. Blom – B&A
61. Grontmij
62. Arcadis
63. Ir P.M. Schrijnen – TUD
64. Drs R.J.J. Hermans – Stichting RIONED
65. Drs M. van Schuylenburg – Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam
66. Depot van Nederlandse publikaties en Nederlandse bibliografie
67. Nederlands Instituut voor Wetenschappelijke Informatiediensten
68. Bibliotheek VU
69. Bibliotheek UvA
70. Bibliotheek Faculteit der Economische Wetenschappen en Econometrie – UvA
71. Bibliotheek SEO
72. Bibliotheek RPD
73. Bibliotheek V&W
74. Bibliotheek AVV
75. Bibliotheek TU Delft
76. Bibliotheek TU Eindhoven
77. Bibliotheek TU Twente
78. Bibliotheek RUU
79. Bibliotheek KUN
80. Bibliotheek NHTV
81. Connekt
82. Directie RIVM
83. Ir F. Langeweg
84. Drs R.J.M. Maas
85. Dr J.A. Hoekstra
86. Drs O.J. van Gerwen
87. Dr Th.G. Aalbers
88. Dr G.P. van Wee
89. Drs J.A. Annema
90. Ir R.M.M. van den Brink
91. Drs ing. K.T. Geurs
92. Drs H.A. Nijland
93. Drs K. van Velze
- 94-97. Auteur
98. Hoofd Bureau Voorlichting en Public Relations
99. Bibliotheek RIVM
- 100-110. Bureau Rapportenbeheer
- 111-117. Reserve-exemplaren
118. Rapportenregistratie

Bijlage 2: De werking van lineaire motoren

Bij lineaire motoren vindt aandrijving plaats zonder dat daarvoor een roterende beweging in de motor nodig is. Er zijn twee soorten lineaire motoren, namelijk lineaire inductiemotoren (LIM) en lineaire synchronmotoren (LSM). De LIM's kunnen dan nog onderverdeeld worden in externe LIM's en interne LIM's.

1. Externe lineaire inductiemotoren

Een lineaire inductiemotor (LIM) bestaat uit twee onderdelen die vergelijkbaar zijn met de rotor (het roterende gedeelte) en de stator (het niet-roterende gedeelte) van een conventionele elektromotor (Katgerman et al., 1998). In het geval van een externe LIM is het 'stator'-deel op de baan gevestigd. Dit bestaat uit een rij elektromagneten die zijn aangesloten op een driefasen-wisselspanningsstelsel (Zhao en Lundgren, 1996). In figuur 1 is het verloop van het elektrisch spanningsverschil over de tijd voor een driefasen-wisselspanningsstelsel weergegeven. Elk van de elektromagneten wordt gevoed door een wisselspanning die steeds een fase $2\pi/3$ voorloopt ten opzichte van de vorige elektromagneet (Van der Wal en Knol, 1979). Het door de elektromagneten geproduceerde primaire magnetische veld volgt dit fasepatroon. Hierdoor ontstaat het effect van een zich verplaatsend magnetisch veld. In figuur 2 is het zich verplaatsende magnetische veld schematisch weergegeven.

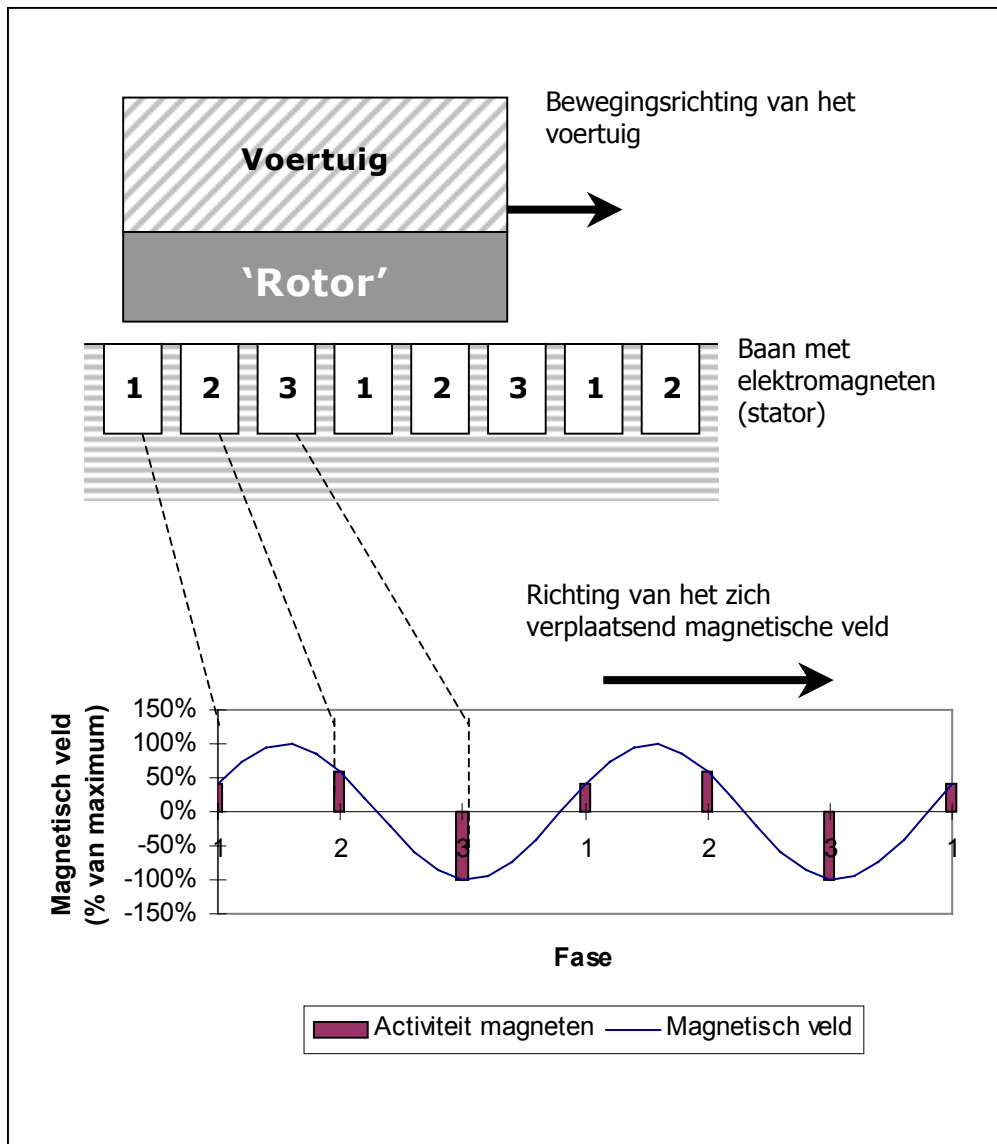


Figuur 1: Het verloop van het elektrisch spanningsverschil over de tijd voor een driefasen-wisselspanningsstelsel.

De 'rotor' is een stroomgeleidend voorwerp dat zich op of in het voertuig bevindt. Dit kan bijvoorbeeld de huls van een metalen capsule zijn. Als de 'rotor' zich niet met dezelfde snelheid en richting beweegt als het magnetische veld, dan ontstaan er elektrische stromen in de 'rotor'. Dit kan verklaard worden aan de hand van de magnetische kracht op een elektron³³ in een elektrisch geleidend voorwerp. In formule-vorm kan deze kracht worden weergegeven als: $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$; hierbij is \mathbf{F} de magnetische kracht, q de lading van het deeltje, \mathbf{v} de het snelheidsverschil tussen deeltje en magnetisch veld, en \mathbf{B} de grootte van het magnetisch veld; vetgedrukte symbolen zijn vectorgrootheden (Serway, 1996). Als het elektrische veld door een deel van de 'rotor' naar beneden is gericht ($\mathbf{B} > 0$) dan is de kracht \mathbf{F} op de elektronen in dat deel van de 'rotor' naar de rechterkant van de 'rotor' gericht; voor een naar boven gericht elektrisch veld ($\mathbf{B} < 0$) is de kracht \mathbf{F} op de elektronen naar

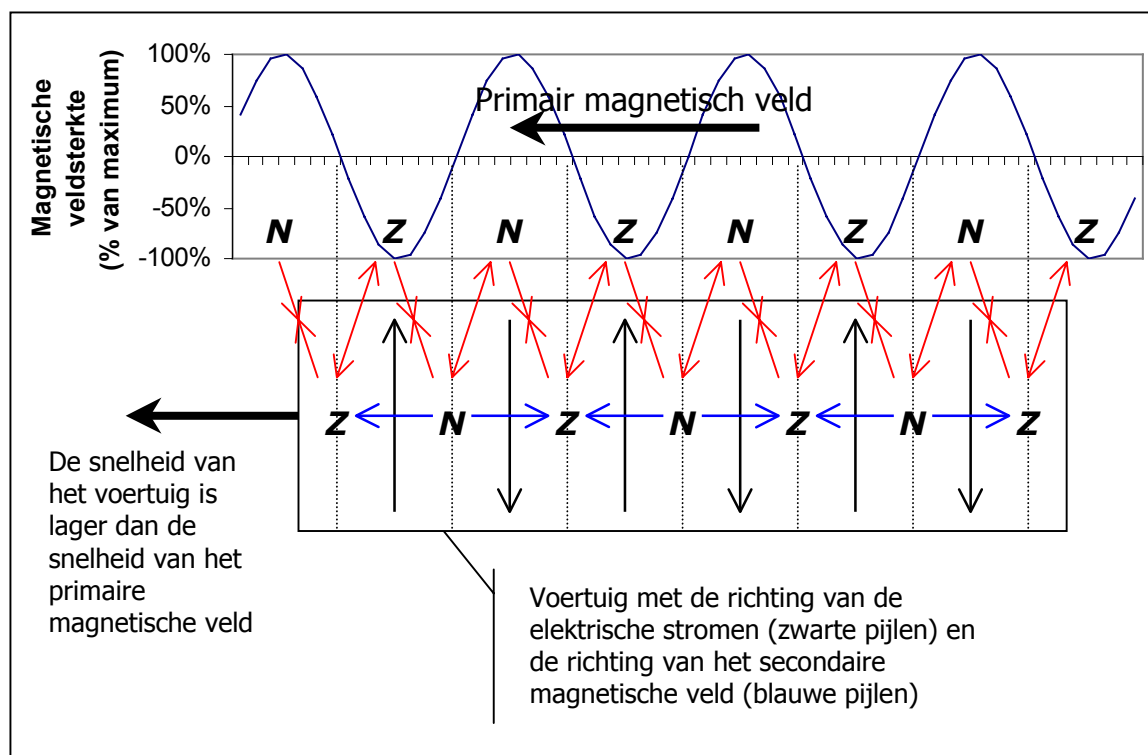
³³ Een elektron is een negatief geladen deeltje dat zich in elektrisch geleidende voorwerpen vrij kan bewegen. Een elektrische stroom bestaat uit een groot aantal van deze elektronen die zich in dezelfde richting voortbewegen.

de linkerkant van de 'rotor' gericht. De magnetische kracht die op de elektronen in de 'rotor' werkt, zorgt voor elektrische stromen in de richting van de kracht. In figuur 3 zijn de elektrische stromen in de 'rotor' weergegeven.



Figuur 2: Schematische weergave van het zich verplaatsende magnetische veld bij een externe lineaire inductiemotor. De nummers op de elektromagneten duiden de fase aan, overeenkomstig met figuur 1. De activiteit van de magneten en het daardoor ontstane magnetische veld veranderen met de wisselspanning; de weergegeven grafiek is dus een momentopname.

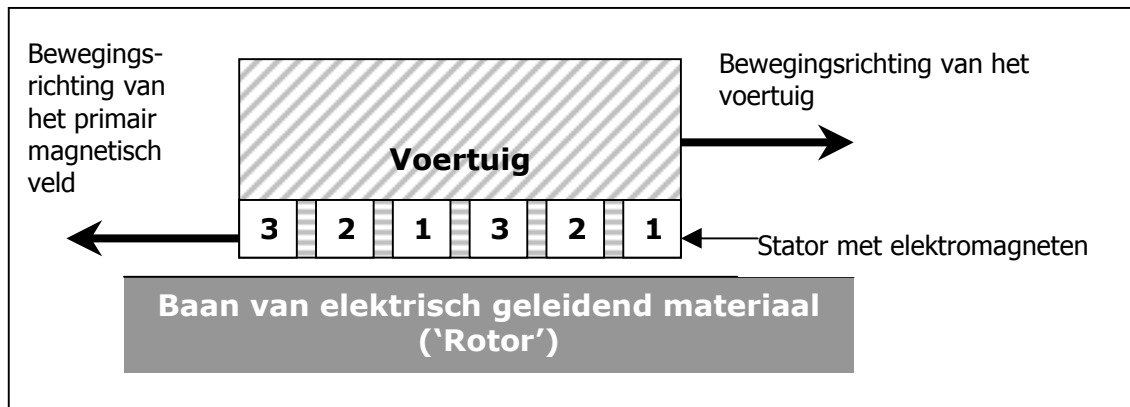
De elektrische stromen wekken een magnetisch veld op, wat verklaard kan worden met behulp van de wet van Biot-Savart. In formule-vorm luidt deze wet: $d\mathbf{B} = k_m \frac{I \cdot d\mathbf{s} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}$; hierbij is k_m een constante, ds de lengte van een oneindig klein lijnelement van de elektrische stroom en $d\mathbf{B}$ de grootte van het door de stroom in ds opgewekte magnetisch veld in een punt op afstand r van de draad; vetgedrukte symbolen zijn vectorgrootheden (Serway, 1996). Het geïnduceerde magnetische veld van een lijnvormige elektrische stroom wordt verkregen door de formule te integreren over de lengte s van de stroom. Een lijnvormige elektrische stroom wekt een cirkelvormig magnetisch veld op rondom en loodrecht op de stroom. De 'rotor' van een LIM kan gezien worden als een rij naast elkaar gelegen lijnvormige stromen. Deze lijnvormige stromen vormen samen een magnetisch veld evenwijdig aan de 'rotor'. Dit secundaire magnetische veld is aan de onderkant van de 'rotor' naar achteren gericht op plaatsen nabij de noordpool van het primaire magnetische veld en naar voren gericht nabij de zuidpool van het primaire magnetische veld. De noord- en zuidpolen van het secundaire magnetische veld bevinden zich dan altijd precies tussen een noord- en een zuidpool van het primaire magnetische veld. In figuur 3 is de magnetische inductie schematisch weergegeven. In de figuur is tevens te zien, dat de noordpolen (N) en de zuidpolen (Z) van het secundaire magnetische veld altijd zo geordend zijn ten opzichte van de noord- en zuidpolen van het primaire magnetische veld, dat elk deel van de 'rotor' een netto voorwaartse kracht zal ondervinden.



Figuur 3: Boveaanzicht van het 'rotor'-deel van het voertuig. In de grafiek is de veldsterkte van het primair magnetisch veld getekend. Een positieve veldsterkte duidt op de nabijheid van de noordpool van een elektromagneet; bij een negatieve veldsterkte is er een zuidpool nabij. De noord- en zuidpolen zijn in de figuur weergegeven met de letters 'N' en 'Z'. De rode pijlen verbeelden de krachten tussen het primaire en het secundaire magnetische veld.

2. Interne lineaire inductiemotoren

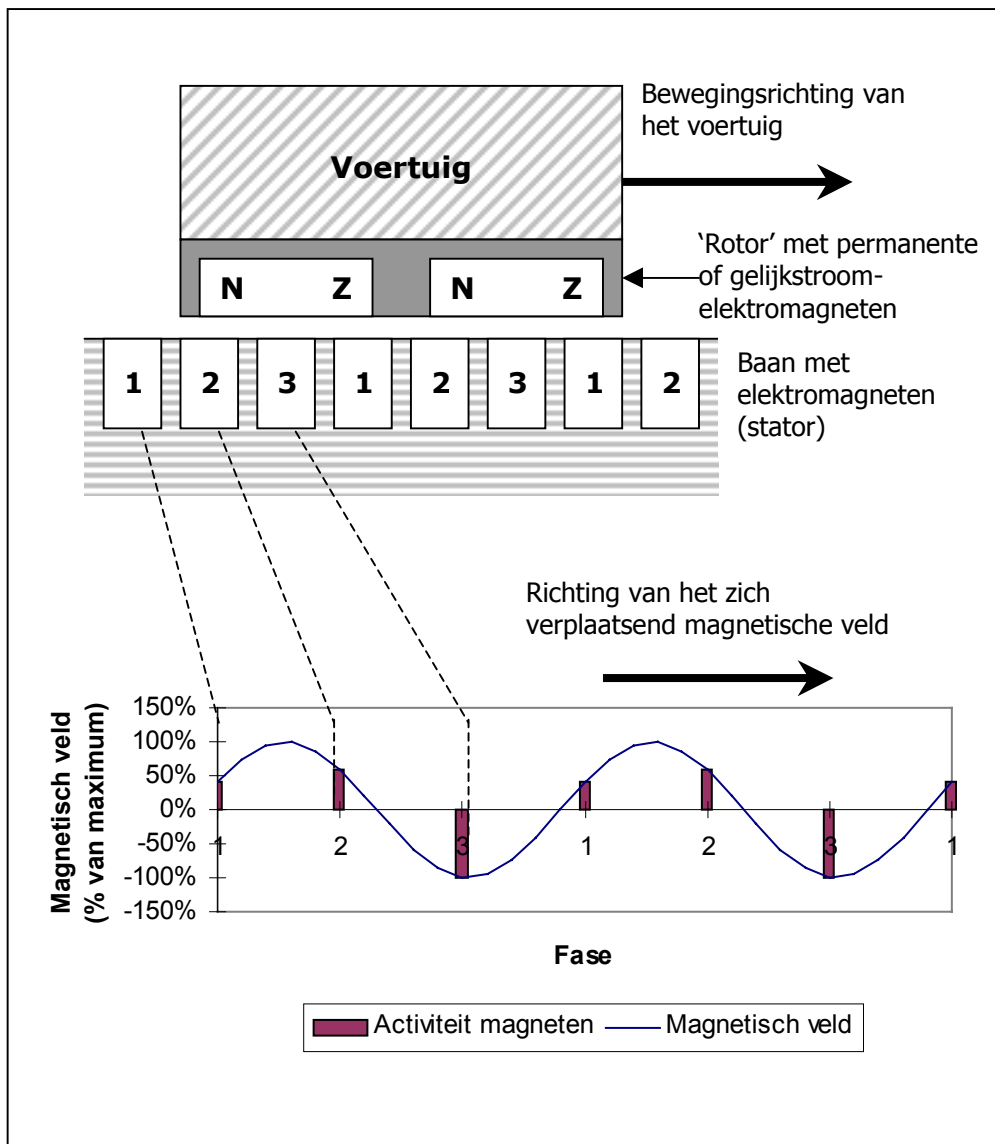
Een interne lineaire inductiemotor (interne LIM) werkt volgens hetzelfde principe als een externe lineaire inductiemotor, maar dan is het 'rotor'-deel op de baan bevestigd en het 'stator'-deel op het voertuig. In figuur 4 is de interne LIM schematisch weergegeven.



Figuur 4: Schematische weergave van een interne lineaire inductiemotor. De nummers op de elektromagneten duiden de fase aan, overeenkomstig met figuur 1.

3. Lineaire synchroonmotoren

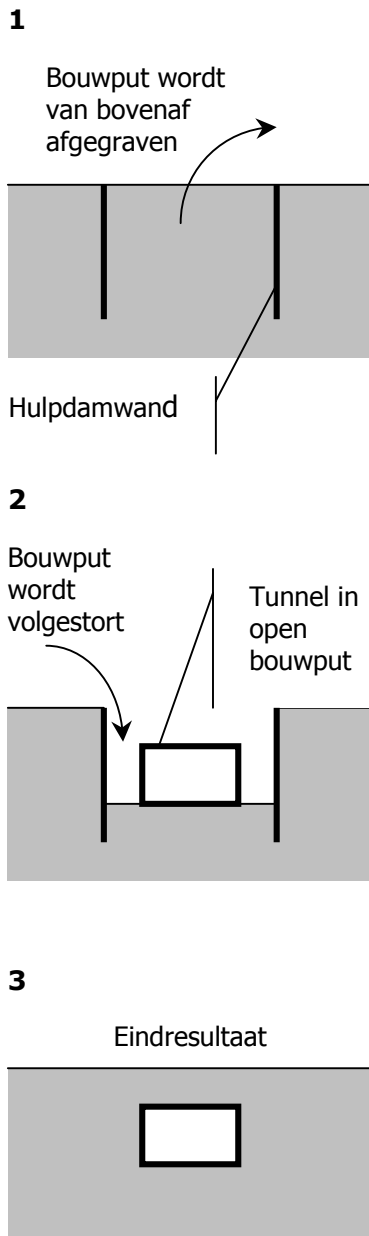
Een lineaire synchroonmotor (LSM) heeft een structuur die vergelijkbaar is met de externe LIM, maar heeft als stator één of meer permanente magneten of gelijkstroom elektromagneten. In figuur 5 is de werking van een LSM schematisch weergegeven. Bij een LSM beweegt het magnetisch veld altijd even snel als de stator. Daardoor ondervinden de magneten in de stator continu een voorwaartse kracht. De snelheid van de capsules is hierdoor bij een LSM beter te regelen dan bij een LIM (Katgerman et al., 1998). Een ander voordeel van een LSM ten opzichte van een LIM is dat bij een LSM de ruimte tussen de 'rotor' en de stator groter kan zijn.



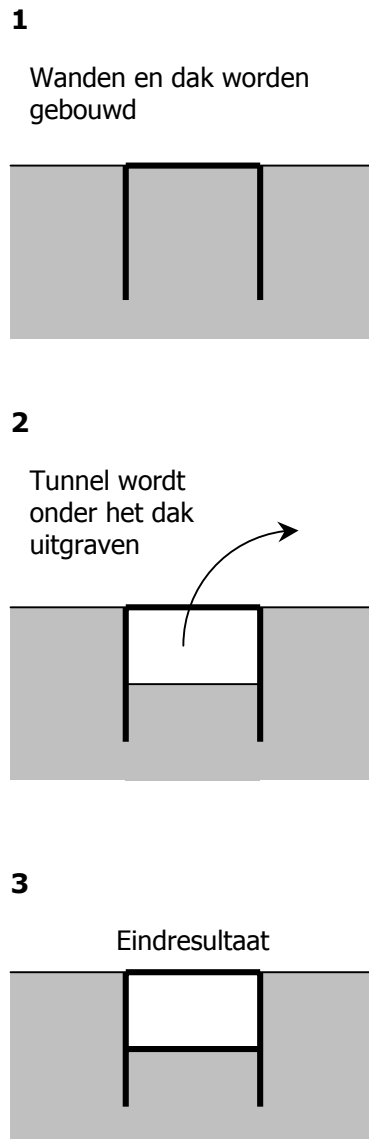
Figuur 5: Schematische weergave van het zich verplaatsende magnetische veld bij een lineaire synchroonmotor. De nummers op de elektromagneten duiden de fase aan, overeenkomstig met figuur 1. De activiteit van de magneten en het daardoor ontstane magnetische veld veranderen met de wisselspanning; de weergegeven grafiek is dus een momentopname.

Bijlage 3: Schematische weergaven van tunnelbouwtechnieken

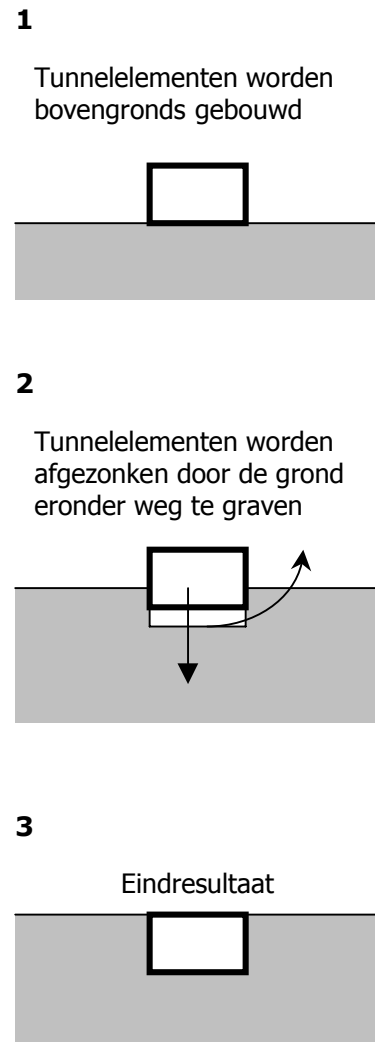
Open bouwput methode



Wanden-dak methode



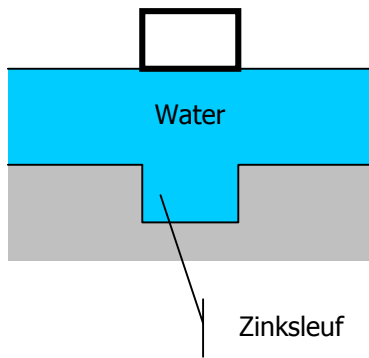
Caissonmethode



Afzinkmethode

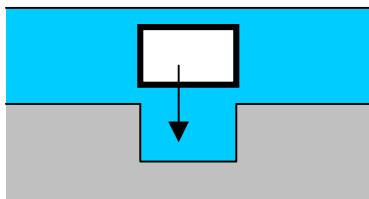
1

Tunnelementen worden naar plaats van bestemming vervoerd



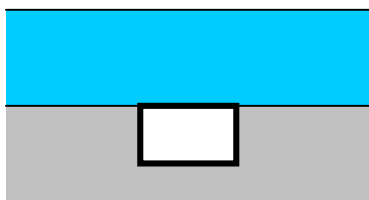
2

Tunnelementen worden afgezonken in de zinksleuf



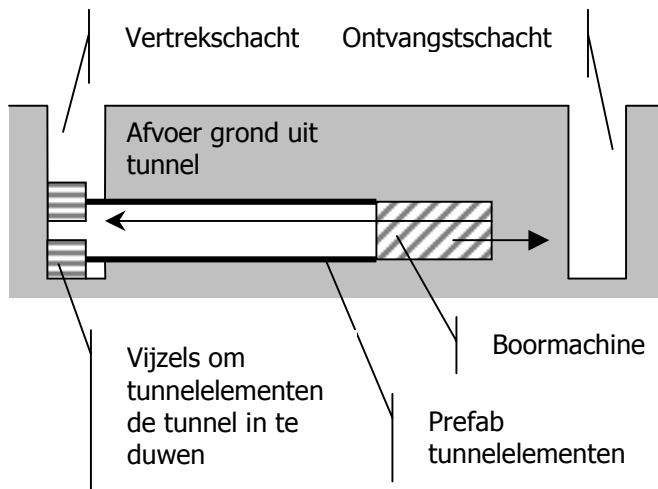
3

Eindresultaat

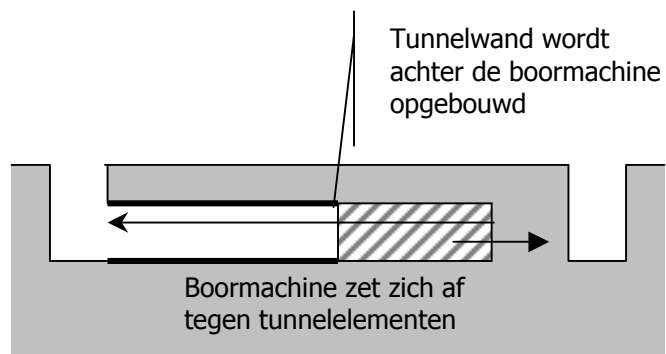


Boormethoden

Open-fronttechniek,
Gesloten-fronttechniek voor microtunneling,

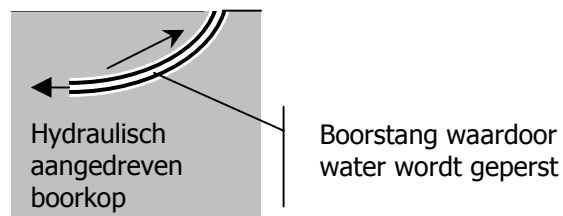


Gesloten-fronttechniek voor macrotunneling



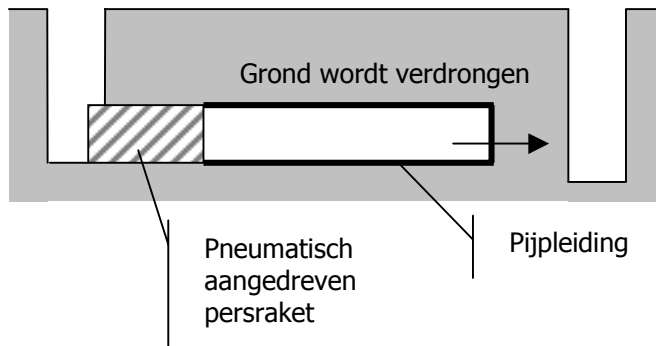
Horizontaal gestuurd boren

Grond stroomt met het water langs de boorstang de tunnel uit

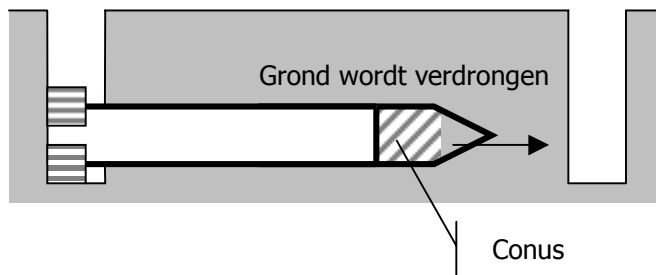


Methoden met grondverdringing

Impact ramming

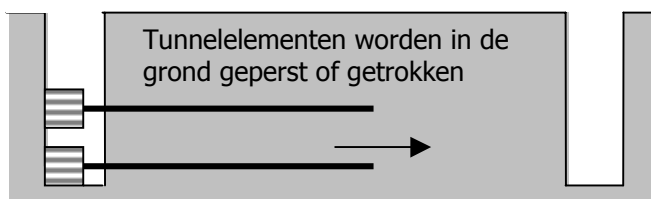


Worm-techniek

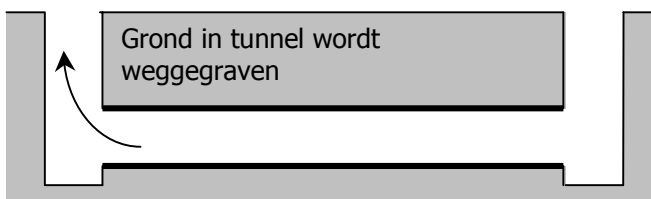


Pers- en trektunnels

1



2



Bijlage 4: Direct energiegebruik, emissies en kosten van ondergrondse transportmethoden

1. Inleiding

In deze bijlage wordt dieper ingegaan op de berekening van het directe energiegebruik, de directe emissies en de energiekosten van de ondergrondse transportmiddelen. Omdat het energetisch rendement, de emissiefactoren en de kosten van het energiegebruik afhankelijk zijn van de gebruikte energiedrager en de wijze van energieopwekking, worden deze in het begin van deze bijlage per energiedrager afzonderlijk behandeld. Vervolgens worden deze factoren gebruikt om aan de hand van het brandstof- en/of elektriciteitsgebruik van de verschillende ondergrondse transportmiddelen het primair energiegebruik, de emissies en de energiekosten van deze transportmiddelen te berekenen.

2. Rendement, emissiefactoren en kosten voor verschillende energiedragers

2.1 Elektriciteit

2.1.1 Elektriciteitopwekking

Voor verschillende transportmiddelen wordt gebruik gemaakt van elektrische energie. Om de uiteindelijke milieueffecten en kosten van de transportmiddelen te kunnen berekenen, is het noodzakelijk om eerst dieper in te gaan op de emissies en de kosten van de elektriciteitsopwekking.

De emissiefactoren voor CO₂, NO_x en SO₂ van de in Nederland gebruikte elektriciteit zijn berekend door Gijsen en Spakman (2001). Het betreft hier de emissiefactoren van de bij de elektriciteitscentrale beschikbare elektrische energie. Voor de emissiefactoren van de uiteindelijk gebruikte energie moet ook rekening worden gehouden met netverliezen. Deze waarden zijn eveneens in Gijsen en Spakman (2001) berekend. In de tabellen 1 en 2 zijn de emissiefactoren weergegeven voor respectievelijk het European Coordination (EC) en het Global Competition (GC) scenario.

De emissies van PM₁₀ en VOS van de totale in Nederland gebruikte elektrische energie zijn niet bekend. Wel zijn deze emissies bekend voor de Nederlandse centrale elektriciteitsproductie. Deze centrale productie draagt voor 61% bij aan de totale in Nederland beschikbare hoeveelheid elektriciteit en is dus grotendeels bepalend voor de emissiefactoren van de in Nederland geconsumeerde elektriciteit (Gijsen en Spakman, 2001). Vanwege het niet beschikbaar zijn van de VOS- en PM₁₀-emissies door decentrale elektriciteitopwekking en import van elektriciteit, zal in dit rapport voor het berekenen van VOS- en PM₁₀-emissies de emissiefactoren van de Nederlandse centrale elektriciteitsproductie gebruikt worden.

Het directe en indirecte energiegebruik van de transportmiddelen moeten worden uitgedrukt in de gebruikte hoeveelheid primaire energie. De gebruikte hoeveelheid elektrische energie wordt daarvoor gecorrigeerd voor de energieverliezen die optreden bij de productie en de distributie van de elektrische energie. In de tabellen 1 en 2 zijn de rendementen van deze twee processen weergegeven, zoals die berekend zijn in Gijsen en Spakman (2001).

Voor de kosten van het gebruik van elektrische energie wordt in dit rapport gebruik gemaakt van de elektriciteitsprijs voor grootgebruikers. In 1998 bedroeg het elektriciteitsstarief voor grootgebruikers gemiddeld 12,9 cent/kWh (ECN, 1999); dit komt overeen met $1,63 \cdot 10^{-8}$ €/J. De toekomstige

ontwikkeling van de elektriciteitsprijzen wordt door het Centraal Planbureau uitgedrukt in een reëel³⁴ jaarlijks stijgingspercentage. In het EC-scenario stijgen de elektriciteitsprijzen jaarlijks met 0,3% terwijl in het GC-scenario een stijgingspercentage van 0,6% verwacht wordt (CPB, 1997). De kosten zullen worden weergegeven in prijzen per 1 januari 2001. Hiervoor wordt de elektriciteitsprijs gecorrigeerd voor het inflatie, die 2,0% bedroeg in 1998 en 2,2% in 2000 (CBS, 2001). De hiermee berekende ontwikkeling van de elektriciteitsprijs is weergegeven in de tabellen 1 en 2.

Voor de berekening van het huidige primaire energiegebruik, de huidige emissies en de huidige energiekosten zal gebruik gemaakt worden van de data voor het meest recente jaar waarvoor gegevens beschikbaar zijn. Dit houdt in dat voor de VOS- en PM₁₀-emissies de emissiefactoren van het jaar 2000 gebruikt worden en dat voor de overige factoren de data van 1998 gebruikt worden.

Tabel 1: Ontwikkeling van de emissiefactoren en het rendement van centrale elektriciteitsopwekking en de ontwikkeling van de elektriciteitsprijs voor het European Coordination (EC) scenario. De emissiefactoren hebben betrekking op de door de eindgebruiker gebruikte hoeveelheid energie en zijn dus gecorrigeerd voor de efficiëntie van elektriciteitsproductie en –distributie. Ook zijn voor CO₂, SO₂ en NO_x de emissies van winning en distributie van de primaire energiedragers meegenomen. Bronnen: 1 = Gijsen & Spakman, 2001; 2 = Geurs et al., 1998; 3 = op basis van ECN, 1999 en CPB, 1997.

Jaar	1998	2000	2010	2020	2030	Bron
CO ₂ -emissie (kg/GJ)	153	n.b.	90,7	77,2	73,4	1
NO _x -emissie (g/GJ)	193	n.b.	72,5	58,4	50,0	1
SO ₂ -emissie (g/GJ)	52,8	n.b.	20,5	13,6	6,07	1
VOS-emissie (g/GJ) ³⁵	n.b.	2,5	3,4	4,2	n.b.	2
PM ₁₀ -emissie (g/GJ) ³⁵	n.b.	2,5	1,9	1,2	n.b.	2
Rendement elektriciteitsproductie	44%	n.b.	58%	60%	64%	1
Rendement elektriciteitsdistributie	96%	n.b.	96%	96%	96%	1
Elektriciteitsprijs (€/GJ)	16,8	16,9	17,4	18,0	18,5	3

³⁴ 'Reëel' is voor de inflatie gecorrigeerd.

³⁵ Emissiefactoren van de Nederlandse centrale elektriciteitsopwekking; emissies door decentrale elektriciteitsopwekking en import van elektriciteit zijn niet bekend.

Tabel 2: Ontwikkeling van de emissiefactoren en het rendement van centrale elektriciteitsopwekking en de ontwikkeling van de elektriciteitsprijs voor het Global Competition (GC) scenario. De emissiefactoren hebben betrekking op de door de eindgebruiker gebruikte hoeveelheid energie en zijn dus gecorrigeerd voor de efficiëntie van elektriciteitsproductie en –distributie. Ook zijn voor CO₂, SO₂ en NO_x de emissies van winning en distributie van de primaire energiedragers meegenomen. Bronnen: 1 = Gijsen & Spakman, 2001; 2 = Geurs et al., 1998; 3 = op basis van ECN, 1999 en CPB, 1997.

Jaar	1998	2000	2010	2020	2030	Bron
CO ₂ -emissie (kg/GJ)	153	n.b.	103	84,1	78,4	1
NO _x -emissie (g/GJ)	193	n.b.	79,7	48,7	46,2	1
SO ₂ -emissie (g/GJ)	52,8	n.b.	25,8	9,86	2,90	1
VOS-emissie (g/GJ) ³⁵	n.b.	2,5	2,9	3,0	n.b.	2
PM ₁₀ -emissie (g/GJ) ³⁵	n.b.	2,5	2,1	0,6	n.b.	2
Rendement elektriciteitsproductie	44%	n.b.	62%	63%	66%	1
Rendement elektriciteitsdistributie	96%	n.b.	97%	96%	96%	1
Elektriciteitsprijs (€/GJ) ³⁶	16,8	17,0	18,1	19,2	20,3	3

2.1.2 Stationaire elektromotoren

Het rendement van elektromotoren ligt tussen 85% en 95% (NEA/Haskoning, 1993). Voor de efficiëntie van deze motoren wordt in de toekomst geen significante verbeteringen verwacht. Bij de berekeningen in deze bijlage zal uit worden gegaan van een rendement van 90%.

2.2 Aardgas

2.2.1 Aardgasprijs en rendement van de aardgasdistributie

Het rendement van de aardgasdistributie wordt berekend door de verhouding te nemen tussen de posten ‘Levering aan aardgashandelaren’ en ‘Winning’ van de aardgasbalans (CBS Statline). Hieruit volgt een rendement van 98,5%. De overige 1,5% wordt gedeeltelijk gebruikt voor de winning en de distributie van het aardgas en wordt voor de rest afgefakkeld of afgeblazen. Voor de toekomst wordt aangenomen dat het rendement constant blijft.

Voor de kosten van het gebruik van aardgas wordt gebruik gemaakt van de aardgasprijs voor grootgebruikers. Deze bedroeg in 1999 gemiddeld 5,9 f/GJ, wat overeenkomt met $2,7 \cdot 10^{-9}$ €/J. Voor de toekomstige ontwikkeling van de aardgasprijzen geeft het Centraal Planbureau een reëel jaarlijks stijgingspercentage van 0,3% voor het EC-scenario en van 0,6% voor het GC-scenario (CPB, 1997). De hiermee berekende ontwikkeling van de aardgasprijs is weergegeven in tabel 3.

2.2.2 Stationaire aardgasmotoren

Het rendement van aardgasmotoren is positief afhankelijk van de capaciteit; het stijgt gemiddeld van ca. 26% voor < 50 kW_e via 30% voor 50 à 100 kW_e en rond de 33% voor 300 à 1000 kW_e tot 36% voor > 1000 kW_e. Voor de toekomst worden hierin geen significante wijzigingen verwacht. De emissie van CO₂ is afhankelijk van het brandstofgebruik en bedraagt gemiddeld 56 kg/GJ_{th}. Voor SO₂ en PM₁₀ zijn de emissiefactoren nihil. De emissie van VOS bedraagt circa 200 g/GJ_{th}, maar kunnen met een driewegkatalysator worden teruggebracht tot 150 g/GJ_{th}. (ECN, 2001) Over de toekomstige ontwikkeling van de VOS-emissie is weinig bekend; er wordt daarom verondersteld dat de VOS-emissie in de toekomst constant blijft. Tabel 3 geeft een overzicht van de emissiefactoren en het rendement voor het gebruik van aardgas als energiedrager.

³⁶ Reëel in prijzen van 2000.

De NO_x-emissie is erg afhankelijk van het bouwjaar van de motor. Voor motoren van voor 29 mei 1987 geldt een emissienorm van 500 g/GJ_{th}. Emissienormen voor latere gasmotoren zijn afhankelijk van het rendement (η) en is gedaald van $800 * \eta / 30\%$ g/GJ_{th} voor 29-05-1987 tot 01-01-1990 via $270 * \eta / 30\%$ g/GJ_{th} voor 01-01-1990 tot 1-1-1994 naar $140 * \eta / 30\%$ g/GJ_{th} vanaf 01-01-1994. Vooral voor installaties met een capaciteit groter dan 1 MW_{th} zijn dit strenge emissie-eisen, zodat de werkelijke NO_x-emissie niet veel van de normen zal verschillen. Voor kleinere gasmotoren met een driewegkatalysator bedraagt de NO_x-emissie 100 g/GJ_{th}. Grotere gasmotoren kunnen met nieuwe technieken de huidige emissienorm van 140 g/GJ_{th} halen. (ECN, 2001) Voor de algemene trend van de emissiefactoren van NO_x wordt uitgegaan van een gelijkmatige verdeling van het bouwjaar over de motoren bij een levensduur van 15 jaar. Aangenomen wordt dat de werkelijke emissies overeenkomen met de voor het betreffende bouwjaar geldende emissienormen en dat het rendement 32% bedraagt. De hiermee berekende algemene trendwaarden zijn weergegeven in tabel 3.

Tabel 3: Ontwikkeling van het rendement van aardgasdistributie, de emissiefactoren en het rendement van aardgasmotoren, en de ontwikkeling van de aardgasprijs voor het European Coordination (EC) en het Global Competition (GC) scenario. De emissiefactoren hebben betrekking op de door de eindgebruiker gebruikte hoeveelheid energie en zijn dus gecorrigeerd voor de efficiëntie van de aardgasdistributie. Bronnen: 1 = ECN, 2001; 2 = CBS Statline; 3 = op basis van ECN, 1999 en CPB, 1997.

Jaar	1998	2000	2010	2020	2030	Bron
CO ₂ -emissie (kg/GJ)	56	56	56	56	56	1
NO _x -emissie (g/GJ) ³⁷	421	374	149	149	149	1
SO ₂ -emissie (g/GJ)	0	0	0	0	0	1
VOS-emissie (g/GJ) ³⁸	175	175	175	175	175	1
PM ₁₀ -emissie (g/GJ)	0	0	0	0	0	1
Rendement aardgasdistributie	98,5%	98,5%	98,5%	98,5%	98,5%	2
Rendement aardgasmotoren ³⁹	32%	32%	32%	32%	32%	1
Aardgasprijs EC-scenario	2,71	2,80	3,32	3,92	4,64	3
(€/GJ) ⁴⁰ GC-scenario	2,71	2,78	3,16	3,60	4,09	3

2.3 Vloeibare brandstoffen

2.3.1 Prijs en distributierendement van vloeibare fossiele brandstoffen

De laatste behandelde energiedrager is een groep van vloeibare fossiele brandstoffen, zoals huisbrandolie, lichte stookolie en diesel. Het energiegebruik van de dieselproductie in 2000 bedroeg 2,85 MJ/kg wat bij een verbrandingswaarde van 42,7 MJ/kg neerkomt op een productierendement van 93,7%. Bij de distributie van de diesel werd per GJ brandstof in 1995 0,09 MJ aan energie gebruikt, zodat het distributierendement vrijwel 100% bedraagt. Voor de toekomst worden voor deze rendementen geen grote veranderingen verwacht. (Rijkeboer et al., 1992)

De prijs van de vloeibare fossiele brandstoffen wordt bepaald aan de hand van de inkoopwaarde van gas- en lichte stookolie bij industriële bedrijven. In 1997 bedroeg deze f 17,36 per gigajoule, wat overeenkomt met 7,88 €/GJ. Doordat aardgas en olie substituu-producten zijn, bestaat er een koppeling op lange termijn tussen de prijzen van aardgas en olie. Voor de toekomstige ontwikkeling

³⁷ Gemiddelde waarde; de emissiefactor is afhankelijk van het bouwjaar en de capaciteit van de gasmotor.

³⁸ Gemiddelde waarde; de emissiefactor is afhankelijk van de capaciteit van de gasmotor.

³⁹ Gemiddelde waarde; het rendement is positief afhankelijk van de capaciteit van de gasmotor.

⁴⁰ Reëel in prijzen van 2000.

van de vloeibare-brandstofprijzen kan daarom worden aangenomen dat er een stijging plaatsvindt die overeenkomt met de ontwikkeling van de aardgasprijs (ECN, 1999). Om de brandstofprijzen voor 1997 uit te drukken in prijzen van 2000 worden inflatiepercentages gebruikt die voor 1997, 1998 en 1999 respectievelijk 2,2%, 2,0% en 2,2% bedragen. (CBS, 2001) In tabel 4 zijn voor twee scenario's de ontwikkelingen van de brandstofprijzen en het distributierendement weergegeven.

2.3.2 Stationaire motoren op vloeibare fossiele brandstoffen

Het rendement van dieselmotoren ligt volgens NEA/Haskoning (1993) tussen de 40 en 50%. Omdat een rendement van 40% waarschijnlijker lijkt dan 50%, zal in dit rapport 40% als rendement voor motoren op vloeibare brandstoffen worden aangehouden. De emissie van CO₂ is lineair afhankelijk van het brandstofverbruik en bedraagt 73 kg/GJ_{th}. (ECN, 2001) In tabel 4 zijn voor twee scenario's het rendement en de emissiefactoren van dieselmotoren weergegeven.

De emissie van SO₂ wordt bepaald door het zwavelgehalte van de brandstof en bedraagt bij de huidige norm van 0,2 gewicht-% zwavel 94 g/GJ_{th}. Over enkele jaren wordt deze norm gehalveerd, zodat de emissiefactor zal dalen tot 47 g/GJ_{th}. De emissie van PM₁₀ bedraagt 7 g/GJ_{th} en is afhankelijk van de gebruikte brandstof. Het beperken van deze emissie is moeilijk, zodat voor de toekomst geen grote veranderingen worden aangenomen. Hetzelfde geldt voor de emissie van VOS, die 20 g/GJ_{th} bedraagt. (ECN, 2001)

De NO_x-emissie van dieselmotoren met een bouwjaar van voor 1990 bedraagt circa 1200 g/GJ_{th}. Dieselmotoren met als bouwjaar 1990 of later mogen maximaal $400 * \frac{\eta}{30\%}$ g/GJ_{th} uitstoten. Dit kan alleen gehaald worden door met een DeNOx-installatie NO_x uit de rookgassen te halen. (ECN, 2001) Voor de algemene trend wordt een levensduur van 15 jaar verondersteld, waarbij de motoren evenredig over de bouwjaren verdeeld zijn. Voor het rendement wordt 40% genomen. De hiermee berekende trendwaarden zijn weergegeven in tabel 4.

Tabel 4: Ontwikkeling van het rendement van vloeibare-brandstofdistributie, de emissiefactoren en het rendement van vloeibare-brandstofmotoren, en de ontwikkeling van de vloeibare-brandstofprijzen voor het European Coordination (EC) en het Global Competition (GC) scenario. De emissiefactoren hebben betrekking op de door de eindgebruiker gebruikte hoeveelheid energie en dus gecorrigeerd voor de efficiëntie van de brandstofdistributie. Bronnen: 1 = ECN, 2001; 2 = op basis van Gijzen & Spakman, 2001; 3 = op basis van CBS, 1999 en CPB, 1997.

Jaar	1998	2000	2010	2020	2030	Bron
CO ₂ -emissie (kg/GJ)	73	73	73	73	73	1
NO _x -emissie (g/GJ)	844	756	530	530	530	1
SO ₂ -emissie (g/GJ)	94	94	47	47	47	1
VOS-emissie (g/GJ)	20	20	20	20	20	1
PM ₁₀ -emissie (g/GJ)	7	7	7	7	7	1
Rendement brandstofproductie en -distributie	94%	94%	94%	94%	94%	2
Rendement motoren	40%	40%	40%	40%	40%	1
Brandstofprijzen						
EC-scenario	8,44	8,74	10,3	12,2	14,4	3
GC-scenario	8,41	8,63	9,82	11,2	12,8	3

⁴¹ Reëel in prijzen van 2000.

3. Traditioneel en extra-traditioneel pijpleidingtransport

3.1 Traditioneel pijpleidingtransport

3.1.1 Theorie

Het directe energiegebruik van traditioneel pijpleidingtransport is de energie die de pompen gebruiken om de vloeistof of het gas door de pijpleiding te pompen. Dit energiegebruik wordt bepaald door het drukverschil dat de pompen moet creëren en door het rendement van de pomp en de aandrijfmotor.

Bij een pijpleiding met constante hoogte en buisdiameter is het drukverschil die door de pomp gecreëerd moet worden afhankelijk van de weerstand die de vloeistof of het gas ondervindt van de buisleidingwand en van lokale verstoringen zoals door de aanwezigheid van ventielen, bochten, fittingen e.d. Over het algemeen is het drukverlies door frictie met de pijpleidingwand van een grotere orde dan die door lokale verstoringen van de vloeistofstroming. Deze lokale verstoringen hebben in de regel een lengte-equivalent van enkele tientallen maal de buisdiameter. Omdat het in dit rapport gaat om pijpleidingtransport over grote afstand met in de regel weinig bochten, splitsingen e.d. wordt aangenomen dat drukverliezen die niet veroorzaakt worden door frictie met de buisleidingwand, verwaarloosd kunnen worden. Het drukverval h kan berekend worden met de Darcy formule (Mott, 2000):

$$\text{Formule 1:} \quad h = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Hierbij is f een weerstandscoefficiënt, L de lengte van de pijpleiding, D de diameter van de buis, v de gemiddelde stroomsnelheid van de vloeistof of het gas en g de valversnelling die gemiddeld in Nederland 9,81 m/s² bedraagt (Mott, 2000; Verkerk, 1992). Deze formule is toepasbaar voor zowel turbulente als laminaire stromingen.

Als aangenomen wordt dat het een onsamendrukbare vloeistof betreft (deze methode is dus niet bruikbaar voor gassen) dan moet voor de stroomsnelheid door een ronde pijpleiding gelden:

$$\text{Formule 2:} \quad v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2}$$

Hierbij is Q de per seconde doorgestroomde hoeveelheid vloeistof.

Combinatie van de formules 1 en 2 levert:

$$\text{Formule 3:} \quad h = f \cdot L \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot D^5}$$

De weerstandscoefficiënt f is afhankelijk van de turbulentie van de stroming. De mate van turbulentie wordt uitgedrukt in het Reynolds getal N_R :

$$\text{Formule 4:} \quad N_R = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu} = \frac{4 \cdot Q \cdot \rho}{\pi \cdot D \cdot \mu}$$

Hierbij is ρ de dichtheid en μ de viscositeit van de vloeistof (zie tabel 5).

Tabel 5: Fysische eigenschappen van enkele per pijpleiding vervoerde stoffen. Bij 101 kPa en 25 °C.
Bron: Mott, 2000.

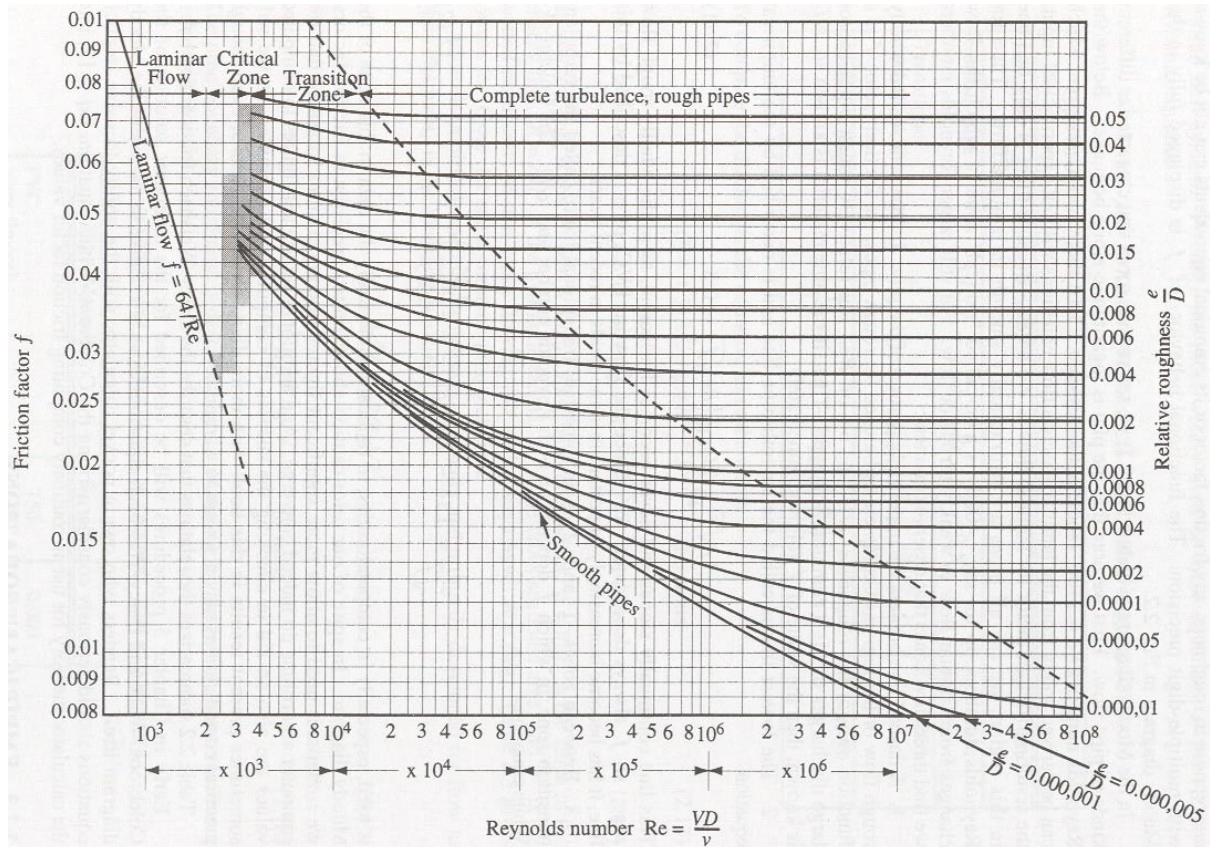
Vervoerde stof	Dichtheid ρ (kg/m ³)	Viscositeit μ (Pa·s)	Specifiek gewicht γ (kN/m ³)
Benzine	680	$2,87 * 10^{-4}$	6,67
Kerosine	823	$1,64 * 10^{-3}$	8,07
Medium stookolie	852	$2,99 * 10^{-3}$	8,36
Ruwe olie	860	$6,5 * 10^{-3}$	8,4
	930	$6,0 * 10^{-2}$	9,1
Water	997	$8,91 * 10^{-4}$	9,78
Zware stookolie	906	$1,07 * 10^{-1}$	8,89

Naast het Reynolds getal is voor de weerstandscoefficiënt ook de relatieve ruwheid van de buisleiding van belang. De ruwheid van een pijpleiding wordt uitgedrukt in een materiaalafhankelijke constante e . In tabel 6 is voor twee bronnen de ruwheid van verschillende materialen weergegeven. Tevens is van deze bronnen de gemiddelde waarde berekend, die gebruikt zal worden bij de berekeningen in deze bijlage. De relatieve ruwheid van de pijpleiding wordt verkregen door de ruwheid e te delen door de diameter D van de buis.

Tabel 6: De ruwheid van enkele materialen volgens twee bronnen en het gemiddelde van deze waarden. Het gemiddelde wordt berekend volgens 50% : 50% van de twee bronnen.

Materiaal	Ruwheid e (mm)		
	Mott, 2000	Larock <i>et al.</i> , 2000	Gemiddeld
Beton	0,12	0,3 – 3,0	0,89
Gietijzer	Met coating	0,12	0,12
	Zonder coating	0,24	0,26
Glas en plastic/PVC	Volkomen glad	0,0015	0,0015
Staal	Gelast	0,046	0,046
	Genageld	1,8	0,9 – 9,0

Als het Reynolds getal N_R en de relatieve ruwheid e/D bekend zijn, dan kan de weerstandscoefficiënt f uit het Moody diagram (figuur 1) worden afgelezen.



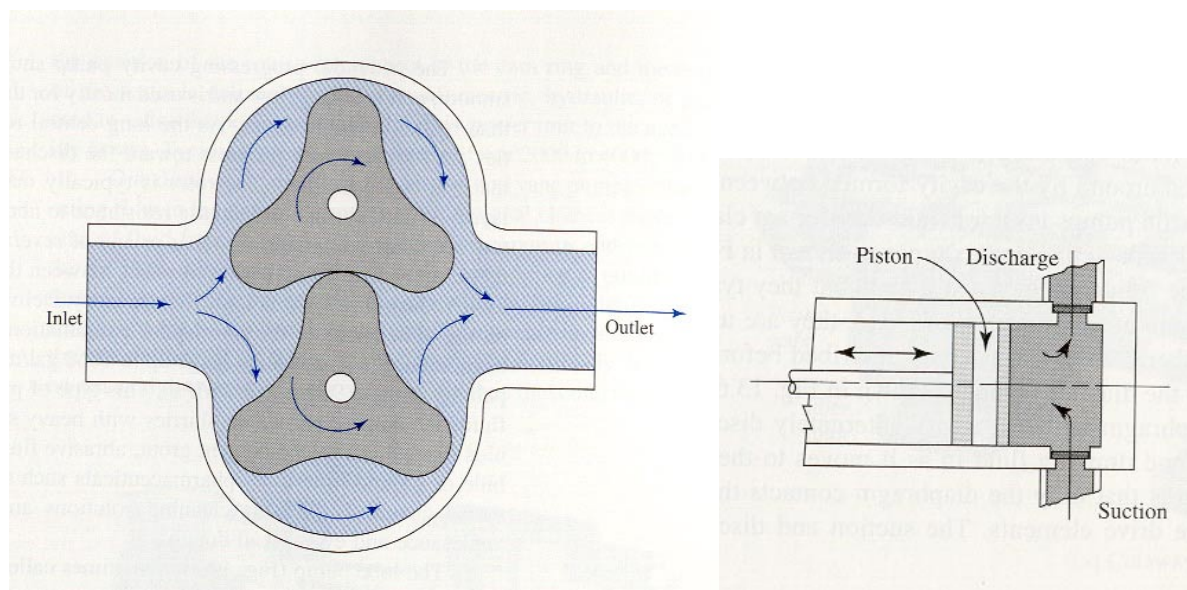
Figuur 1: Moody diagram voor de bepaling van de Darcy weerstandscoefficiënt f . Bron: Larock et al., 2000.

Het door de pompen geleverde vermogen P_A voor het creëren van het benodigde drukverschil h kan berekend worden met formule 5 (Mott, 2000):

$$\text{Formule 5: } P_A = h \cdot \gamma \cdot Q$$

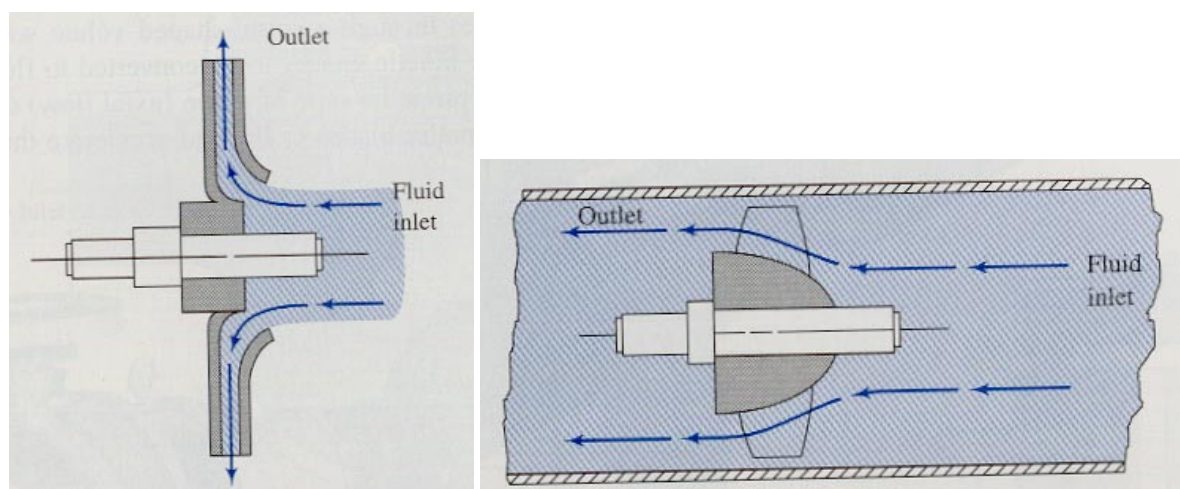
Hierbij is h het drukverval in de pijpleiding, γ het specifiek gewicht van de vervoerde stof (zie tabel 5) en Q de doorgestroomde hoeveelheid vloeistof (Mott, 2000).

Voor het ontwerp van vloeistofpompen zijn veel verschillende technieken mogelijk. Globaal kunnen de pompen in twee hoofdcategorieën worden ingedeeld. De eerste categorie zijn de verdringerpompen, die ongeacht de druk een vaste hoeveelheid vloeistof of gas verpompen. Twee voorbeelden van verdringerpompen zijn weergegeven in figuur 2. Het rendement van de verdringerpompen is wel afhankelijk van de druk en ligt tussen de 80% en 90%. Verdringerpompen zijn in staat om een zeer hoge druk te creëren, maar hebben een beperkt debiet. (Mott, 2000)



Figuur 2: Twee voorbeelden van verdringerpompen: de lobpomp en de zuigerpomp. Bron: Mott, 2000

De tweede categorie pompen zijn de kinetische pompen, waarbij rotorbladen gebruikt worden. In figuur 3 zijn twee voorbeelden van kinetische pompen weergegeven. Kinetische pompen hebben een zeer groot debiet, maar kunnen over het algemeen een minder hoog drukverschil opbouwen dan de verdringerpompen omdat de vloeistofverplaatsing door de pomp afneemt bij een toenemend drukverschil. Het rendement van de kinetische pompen is eveneens sterk afhankelijk van het drukverschil en is met 60% à 80% lager dan het rendement van de verdringerpompen. In dit rapport zal voor kinetische pompen een rendement van 70% worden aangehouden. (Mott, 2000)



Figuur 3: Twee voorbeelden van kinetische pompen: de centrifugale pomp en de propellerpomp. Bron: Mott, 2000

De berekening van het energiegebruik met de hierboven beschreven theorie vraagt gedetailleerde informatie over fysieke eigenschappen van de pijpleiding en de vervoersprestatie. Bovendien is het een tijdrovende bezigheid. Daarom zal toepassing van deze methode beperkt blijven tot pijpleidingen voor het ruwe-aardolie-transport. Voor het energiegebruik van andere pijpleidingen zal gebruik gemaakt worden van literatuurwaarden en van statistische data.

3.1.2 Drink- en industriewater

Voor het totale energiegebruik van het distributie- en transportnet van water in Nederland is voor 1995 bekend dat het secundaire energiegebruik van pompstations 650 mln. kWh bedroeg (Van Gaalen en Mülschlegel, 2000). Dit komt overeen met 2,34 PJ. Aangenomen wordt dat dit energiegebruik gelijk is aan de hoeveelheid ten behoeve van het watertransport gebruikte energie. Voor de berekening van het primaire energiegebruik moet de secundair gebruikte energie gecorrigeerd worden voor verliezen bij de productie en de distributie van de energiedragers. De waterleidingbedrijven maakten in 1997 voor 78% gebruik van elektrische energie, voor 12% van aardgas, voor 10% van lichte stookolie en huisbrandolie en voor 1% van andere energiedragers (CBS, 1999). Als de eerder besproken rendementen gebruikt worden, dan komt het primaire energiegebruik uit op $4,87 \cdot 10^{15}$ J.

De emissies en kosten kunnen eenvoudig berekend worden door het secundaire energiegebruik te vermenigvuldigen met de emissie- en kostenfactoren die eerder in deze bijlage berekend zijn. Het berekende energiegebruik, de emissies en de energiekosten van het drink- en industriewatertransport is weergegeven in tabel 7.

Tabel 7: Energiegebruik, emissies en energiekosten in het jaar 2000 per energiedrager van het drink- en industriewatertransport per pijpleiding in Nederland.

	Elektriciteit	Aardgas	Vloeibare brandstoffen	Totaal
Secundair energiegebruik (PJ)	1,83	0,28	0,23	2,34
Primair energiegebruik (PJ)	4,32	0,29	0,25	4,86
CO ₂ -emissie (10 ⁶ kg)	278	16	17	311
NO _x -emissie (10 ³ kg)	352	105	177	634
SO ₂ -emissie (10 ³ kg)	96	0,0	22	118
VOS-emissie (10 ³ kg)	4,6	49,1	4,7	58,4
PM ₁₀ -emissie (10 ³ kg)	4,56	0,00	1,64	6,20
Energiekosten (mln. €)	30,7	0,8	2,0	33,5

Voor de vervoersprestatie van het Nederlandse waterleidingnet zijn geen gegevens in statistieken beschikbaar. Wel is de totale hoeveelheid gedistribueerd leidingwater bekend. Dit bedroeg in 1995 namelijk 1227,3 mln. m³ drinkwater en 62,3 mln. m³ ander water (VEWIN, 1998). Bij een dichtheid van water van $1,00 \cdot 10^3$ kg/m³ komt dit overeen met $1,29 \cdot 10^9$ ton in totaal. De gemiddelde afstand die het water aflegt van een pompstation naar het distributienet wordt geschat op 10 km (Van Gaalen en Mülschlegel, 2000). Als deze afstand wordt aangenomen voor de totale door het water afgelegde weg, dan komt de vervoersprestatie van het Nederlandse waterleidingnet in 1995 uit op $1,29 \cdot 10^{10}$ tonkm.

Met de hierboven beschreven vervoersprestatie en energiegebruik, bedraagt de directe secundaire energie-intensiteit van het waterleidingnet 0,18 MJ/tonkm. De primaire energie-intensiteit van deze vorm van pijpleidingtransport is 0,38 MJ/tonkm. Gezien de onzekerheden in de gebruikte data is de nauwkeurigheid van deze energie-intensiteit beperkt. Vergeleken met literatuurwaarden voor het energiegebruik van pijpleidingtransport van aardolie- en aardolieproducten (zie tabel 3 in §5.3.1 van de hoofdtekst) is dit een hoge waarde. Redenen hiervoor kunnen een grote doorstromingsnelheid en een grote hoeveelheid bochten, splitsingen, kranen (dus lokale verliezen) zijn. Tabel 8 geeft een overzicht per energiedrager van de berekende energie-intensiteit, en de emissie- en kostenfactoren van het drink- en industriewatertransport. In tabel 9 is voor het EC- en het GC-scenario de toekomstige ontwikkeling van de primaire energie-intensiteit, de emissies en de energiekosten van het drink- en industriewatertransport weergegeven. De verschillen tussen de energie-intensiteit en de emissiefactoren van de twee scenario's worden volledig veroorzaakt door de elektriciteitsproductie.

Tabel 8: Energie-intensiteit, emissies en energiekosten per energiedrager van het drink- en industriewatertransport per pijpleiding in Nederland.

	Elektriciteit	Aardgas	Vloeibare brandstoffen	Totaal
Secundair energie-intensiteit (MJ/tonkm)	0,14	0,02	0,02	0,18
Primair energie-intensiteit (MJ/tonkm)	0,33	0,02	0,02	0,37
CO ₂ -emissiefactor (g/tonkm)	21	1	1	24
NO _x -emissiefactor (mg/tonkm)	27	8	14	49
SO ₂ -emissiefactor (mg/tonkm)	7,4	0,0	1,7	9,1
VOS-emissiefactor (mg/tonkm)	0,4	3,8	0,4	4,5
PM ₁₀ -emissiefactor (mg/tonkm)	0,4	0,0	0,1	0,5
Energiekostenfactor (€/tonkm)	0,0024	0,0001	0,0001	0,0026

Tabel 9: Toekomstige ontwikkeling van de energie-intensiteit, emissies en energiekosten van het drink- en industriewatertransport per pijpleiding in Nederland voor twee scenario 's.

Emissie- en kostenfactoren	Scenario	2000	2010	2020	2030
Primaire energie-intensiteit (MJ/tonkm)	EC	0,37	0,29	0,28	0,27
	GC	0,37	0,27	0,27	0,26
CO ₂ -emissiefactor (g/tonkm)	EC	24	15	13	13
	GC	24	17	14	14
NO _x -emissiefactor (mg/tonkm)	EC	49	23	23	20
	GC	49	24	20	19
SO ₂ -emissiefactor (mg/tonkm)	EC	9,1	3,7	2,8	1,7
	GC	9,1	4,5	2,2	1,3
VOS-emissiefactor (mg/tonkm)	EC	4,5	4,6	4,7	n.b.
	GC	4,5	4,5	4,6	n.b.
PM ₁₀ -emissiefactor (mg/tonkm)	EC	0,5	0,4	0,3	n.b.
	GC	0,5	0,4	0,2	n.b.
Energiekostenfactor (€/tonkm)	EC	0,0026	0,0027	0,0028	0,0030
	GC	0,0026	0,0028	0,0030	0,0032

3.1.3 Afvalwater

De door rioolleidingen vervoerde hoeveelheid bedraagt $1,9 \cdot 10^9$ m³ met een nauwkeurigheidsmarge van 20%. Uitgaande van een dichtheid van $1,0 \cdot 10^3$ kg/m³ (de dichtheid van water) komt dit neer op $1,9 \cdot 10^{12}$ kg. Voor dit transport wordt volgens Rioned $1,4 \cdot 10^8$ kWh verbruikt, wat overeenkomt met $5,0 \cdot 10^{14}$ J. Deze waarde heeft een mogelijke afwijking van een factor 4, zodat het slechts een indicatieve kwantificering betreft. (Stichting RIONED, 2001)

Uit statistieken van het Centraal Bureau voor de Statistiek blijken rioolwaterzuiveringsbedrijven veel gebruik te maken van gasmotoren. Aangenomen wordt dat voor het transport van rioolwater uitsluitend gebruik wordt gemaakt van aardgasmotoren. Rekening houdend met het rendement van aardgaswinning en -distributie komt het primaire energiegebruik op $5,1 \cdot 10^{14}$ J. De emissies en energiekosten van het afvalwatertransport kunnen eenvoudig uit het energiegebruik berekend worden en zijn weergegeven in tabel 10.

Tabel 10: Energiegebruik, emissies en energiekosten van het afvalwatertransport per pijpleiding in Nederland, uitgaande van aardgas als energiedrager.

Secundair energiegebruik (PJ)	0,50
Primair energiegebruik (PJ)	0,51
CO ₂ -emissie (10 ⁶ kg)	28
NO _x -emissie (10 ⁶ kg)	0,19
SO ₂ -emissie (10 ³ kg)	0
VOS-emissie (10 ³ kg)	88
PM ₁₀ -emissie (10 ³ kg)	0
Kosten (mln. €)	1,4

3.1.4 Aardgas

De totale in 2000 gewonnen en ingevoerde hoeveelheid aardgas bedroeg 85,7 mrd. m³, wat bij een dichtheid van 0,829 kg/m³ overeenkomt met 7,10 * 10⁷ ton. Van deze hoeveelheid aardgas werd 39,3 mrd. m³ geëxporteerd. (CBS Statline) Voor de aandrijving van de aardgascompressoren wordt aardgas als energiedrager gebruikt. De in het jaar 2000 door de Gasunie verbruikte hoeveelheid aardgas bedraagt 130 mln. m³, wat overeenkomt met 4,11 PJ. (Gasunie, 2001b)

De emissies en energiekosten van het aardgastransport zijn eenvoudig uit het energiegebruik te berekenen. Bij de berekening van de NO_x-emissie van het aardgastransport wordt echter een emissiefactor gebruikt die afwijkt van de in § 2.2 berekende waarde. Voor de door de Gasunie gebruikte gasmotoren is uit literatuur bekend dat de NO_x-emissiefactor 250 kg/TJ bedraagt (ECN, 2001). Hieruit komt echter een waarde voor de jaarlijkse NO_x-emissie van 1,01 mln. kg, die een factor 2 hoger is dan de door de Gasunie zelf opgegeven waarde (Gasunie, 2001b). De oorzaak van dit verschil ligt in de emissiefactor. Uit Gasunie (2001b) blijkt de emissiefactor voor NO_x circa 150 kg/TJ te bedragen. De bij de berekening gebruikte 250 kg/TJ is vastgesteld in 1996 en betreft dus een enigszins verouderde waarde. De emissiefactor is de laatste jaren gedaald (Gasunie, 2001b). Het gebruik van de emissiefactor van 150 kg/TJ resulteert in een NO_x-emissie van 6,1 * 10⁵ kg per jaar. Het berekende energiegebruik, de emissies en de energiekosten zijn weergegeven in tabel 11. Hierbij zijn ter vergelijking tevens de waarden opgenomen die de Gasunie zelf geven in hun jaarverslag.

Tabel 11: Energiegebruik, emissies en energiekosten van het afvalwatertransport per pijpleiding in Nederland, uitgaande van aardgas als energiedrager. Weergegeven zijn zowel de berekende waarden als de waarden die de Gasunie geven in hun V,G&M-jaarverslag (Bron: Gasunie, 2001b).

	Berekend	Volgens Gasunie
Secundair energiegebruik (PJ)	4,05	
Primair energiegebruik (PJ)	4,11	4,11
CO ₂ -emissie (10 ⁶ kg)	227	230
NO _x -emissie (10 ⁶ kg)	0,61	0,5
SO ₂ -emissie (10 ³ kg)	0,00	
VOS-emissie (10 ³ kg)	708	
PM ₁₀ -emissie (10 ³ kg)	0,00	
Kosten (mln. €)	11,3	

3.1.5 Ruwe aardolie

Inleiding

Voor ruwe aardolie worden in deze sub-paragraaf het energiegebruik en de emissies met de ingenieursmethode berekend. Voor de ingenieursmethode worden zeven ruwe-aardoliepijpleidingen beschouwd waarvan de karakteristieken overeenkomen met belangrijke oliepijpleidingen in Nederland. Deze pijpleidingen worden voor de overzichtelijkheid genummerd, waarbij de pijpleidingen 1 en 2 qua vervoersprestatie het belangrijkste zijn. Pijpleiding 1 heeft een diameter van 90 cm en een gelijkmatige vervoerde hoeveelheid van 0,56 m³/s, vergelijkbaar met de ruwe-

oliepijpleiding tussen het Rijnmondgebied en het Ruhrgebied. Pijpleiding 2 heeft een diameter van 85 cm en een vervoerde hoeveelheid van $0,96 \text{ m}^3/\text{s}$, vergelijkbaar met de ruwe-oliepijpleiding tussen het Rotterdam en Antwerpen. De overige pijpleidingen betreffen binnenlandse pijpleidingen, veelal binnen het Rijnmondgebied. Deze zullen na de eerste twee pijpleidingen kort behandeld worden. Tabel 12 geeft een overzicht van de technische kenmerken van de beschouwde ruwe-aardoliepijpleidingen.

Tabel 12: Technische kenmerken van binnenlandse ruwe-aardoliepijpleidingen voor 1990. De vervoersprestaties zijn berekend op basis van de grenswaarden $\rho = 860 \text{ kg/m}^3$ en $\rho = 930 \text{ kg/m}^3$ voor het gegeven vervoerde volume. Bron: NEA/Haskoning (1993).

#	Verbinding	Diameter (m)	Lengte (km)	Jaargemiddelde vervoerde hoeveelheid (m^3/s)	Vervoersprestatie (mln. tonkm)
1	Rijnmond – Ruhrgebied	0,90	176	0,56	2670 – 2890
2	Rijnmond – Antwerpen	0,85	95	0,96	2470 – 2670
3	Europoort – Pernis	0,60	22	0,37	221 – 239
4	Europoort – Pernis	0,70	22	0,32	191 – 207
5	Europoort – Pernis	0,60	20	0,030	16 – 18
6	Maasvlakte – Europoort	0,85	6	0,25	41 – 44
7	Maasvlakte – Borssele	0,61	138	0,21	791 – 856

Pijpleiding 1

Ruwe olie is er in verschillende samenstellingen en dus ook met verschillende fysische eigenschappen. Het energiegebruik zal daarom voor ruwe olie zowel met een dichtheid van 860 kg/m^3 als met een dichtheid van 930 kg/m^3 berekend worden. De jaarlijks vervoerde hoeveelheid voor pijpleiding 1 komt daarmee op respectievelijk 15,2 mln. ton en 16,4 mln. ton. De lengte van de pijpleiding wordt op 1 km gesteld.

Oliepijpleidingen bestaan in de regel uit aaneengelaste stalen buiselementen, waarvan de ruwheid e 0,046 mm bedraagt. De relatieve ruwheid e/D bedraagt voor deze pijpleiding daarom $5,1 \cdot 10^{-5}$. Het Reynolds getal kan berekend worden met formule 4 en blijkt $1,05 \cdot 10^5$ te zijn voor een dichtheid van 860 kg/m^3 en $1,23 \cdot 10^5$ voor 930 kg/m^3 . De weerstandscoefficienten kunnen dan bepaald worden uit het Moody diagram (figuur 1); deze blijken respectievelijk 0,018 en 0,028 te zijn. Het uiteindelijke drukverval kan berekend worden met formule 3; voor de dichtheid van 860 kg/m^3 is dit 0,79 Pa en voor 930 kg/m^3 is het drukverval 1,23 Pa. Het pompvermogen dat de pompen leveren kan berekend worden met formule 5 en bedraagt voor de twee dichtheden respectievelijk 3,72 kW en 6,26 kW. In tabel 13 zijn de waarden van de verschillende factoren nogmaals weergegeven.

Tabel 13: Factoren voor stromingsweerstand, drukverval en pompvermogen van een oliepijpleiding met $D = 0,9 \text{ m}$, $L = 1000 \text{ m}$ en $Q = 0,56 \text{ m}^3/\text{s}$ voor twee verschillende dichtheden van ruwe olie.

Dichtheid (kg/m^3)	Relatieve ruwheid	Reynolds getal	Weerstandscoefficiënt	Drukverval (Pa)	Door de pompen geleverd vermogen (kW)
860	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$1,05 \cdot 10^5$	0,018	0,79	3,72
930	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$1,23 \cdot 10^4$	0,028	1,23	6,26

Aangenomen wordt dat kinetische pompen worden gebruikt, omdat verdringerpompen een te kleine capaciteit hebben. Kinetische pompen hebben een rendement van ca. 70%. Het voor het pompen benodigde energiegebruik komt daarmee op 168 GJ (0,011 MJ/tonkm) voor 860 kg/m^3 en 282 GJ (0,017) voor 930 kg/m^3 . Voor de berekening van het secundaire energiegebruik kan onderscheid worden gemaakt tussen aandrijving door elektromotoren en aandrijving door motoren op diesel of lichte stookolie. In tabel 14 zijn voor beide aandrijfmethoden het berekende jaarlijkse secundaire energiegebruik en de energie-intensiteit weergegeven.

Tabel 14: Secundaire energie-intensiteit van een oliepijpleiding met $D = 0,9$ m, $L = 1000$ m en $Q = 0,56$ m³/s voor twee dichtheden en twee aandrijfmethode.

Dichtheid (kg/m ³)	Jaarlijks secundair energiegebruik (GJ)		Energie-intensiteit (MJ/tonkm)	
	Elektromotoren	Dieselmotoren	Elektromotoren	Dieselmotoren
860	186	418	0,012	0,028
930	313	705	0,019	0,043

De primaire energie-intensiteit wordt uit de secundaire energie-intensiteit berekend door rekening te houden met het rendement van de productie en de distributie van de energiedrager. In tabel 15 zijn het berekende jaarlijkse primaire energiegebruik en de primaire energie-intensiteit weergegeven.

Tabel 15: Primaire energie-intensiteit van een oliepijpleiding met $D = 0,9$ m, $L = 1000$ m en $Q = 0,56$ m³/s voor twee dichtheden en twee aandrijfmethode.

Dichtheid (kg/m ³)	Jaarlijks primair energiegebruik (GJ)		Energie-intensiteit (MJ/tonkm)	
	Elektromotoren	Dieselmotoren	Elektromotoren	Dieselmotoren
860	440	446	0,028	0,030
930	741	752	0,045	0,046

Pijpleiding 2

Voor pijpleiding 2 wordt het energiegebruik met dezelfde methode berekend als voor pijpleiding 1. De jaarlijks vervoerde hoeveelheid van pijpleiding 2 bedraagt 26,0 mln. ton voor een dichtheid van 860 kg/m³ en 28,2 mln. ton voor 930 kg/m³. De buisleiding heeft een relatieve ruwheid van $5,4 * 10^{-5}$; het Reynolds getal is voor de twee dichtheden respectievelijk $1,90 * 10^5$ en $2,23 * 10^4$. De weerstandscoëfficiënten komen daarmee uit op 0,016 en 0,025, wat resulteert in een drukverval van respectievelijk 2,75 Pa en 4,29 Pa. Het hiervoor door de pompen geleverde vermogen bedraagt 24,0 kW voor 860 kg/m³ en 37,5 kW voor 930 kg/m³. Tabel 16 geeft een overzicht van de berekende waarden.

Tabel 16: Factoren voor stromingsweerstand, drukverval en pompvermogen van een oliepijpleiding met $D = 0,85$ m, $L = 1000$ m en $Q = 0,96$ m³/s voor twee verschillende dichtheden van ruwe olie.

Dichtheid (kg/m ³)	Relatieve ruwheid	Reynolds getal	Weerstands- coëfficiënt	Drukverval (Pa)	Door de pompen geleverd vermogen (kW)
860	$5,4 * 10^{-5}$	$1,90 * 10^5$	0,016	2,75	24,0
930	$5,4 * 10^{-5}$	$2,23 * 10^4$	0,025	4,29	37,5

Het pompvermogen dat de pompen leveren kan berekend worden met formule 5 en bedraagt voor de twee dichtheden respectievelijk 3,72 kW en 6,26 kW. Aangenomen wordt dat kinetische pompen worden gebruikt, omdat verdringerpompen een te kleine capaciteit hebben. Kinetische pompen hebben een rendement van ca. 70%. Het voor het pompen benodigde energiegebruik komt daarmee op 168 GJ (0,011 MJ/tonkm) voor 860 kg/m³ en 282 GJ (0,017) voor 930 kg/m³. Voor de berekening van het secundaire energiegebruik kan onderscheid worden gemaakt tussen aandrijving door elektromotoren en aandrijving door motoren op diesel of lichte stookolie. In tabel 17 is voor beide aandrijfmethode het berekende jaarlijkse secundaire energiegebruik en de energie-intensiteit weergegeven.

Tabel 17: Secundaire energie-intensiteit van een oliepijpleiding met $D = 0,85$ m, $L = 1000$ m en $Q = 0,96$ m³/s voor twee dichtheden en twee aandrijfmethode.

Dichtheid (kg/m ³)	Jaarlijks secundair energiegebruik (GJ)		Energie-intensiteit (MJ/tonkm)	
	Elektromotoren	Dieselmotoren	Elektromotoren	Dieselmotoren
860	1108	2494	0,043	0,096
930	1876	4222	0,067	0,15

Met het rendement van de productie en de distributie van de energiedrager kan uit de secundaire energie-intensiteit de primaire energie-intensiteit berekend worden. Deze waarden zijn weergegeven in tabel 18.

Tabel 18: Primaire energie-intensiteit van een oliepijpleiding met $D = 0,85$ m, $L = 1000$ m en $Q = 0,96$ m³/s voor twee dichtheden en twee aandrijfmethoden.

Dichtheid (kg/m ³)	Jaarlijks primair energiegebruik (GJ)		Energie-intensiteit (MJ/tonkm)	
	Elektromotoren	Dieselmotoren	Elektromotoren	Dieselmotoren
860	2623	2662	0,10	0,10
930	4441	4506	0,16	0,16

Overige pijpleidingen

De berekening van het energiegebruik en de energie-intensiteit gebeurt op dezelfde wijze als voor de pijpleidingen 1 en 2. Omdat gebleken is dat de keuze van de energiedrager een relatief kleine rol speelt in het energiegebruik, wordt een opsplitsing naar energiedrager achterwege gelaten. Op basis van de technische kenmerken van de pijpleidingen in 1990 is in tabel 19 een overzicht gegeven van de vloeistofdynamische kenmerken. In tabel 20 zijn het daaruit berekende energiegebruik en energie-intensiteit weergegeven.

Tabel 19: Vloeistofdynamische kenmerken van ruwe-aardoliestromingen door enkele binnenlandse pijpleidingen.

#	Relatieve ruwheid	Reynolds getal ($\rho = 860$ kg/m ³)	Reynolds getal ($\rho = 930$ kg/m ³)	Weerstand- coëfficiënt ($\rho = 860$ kg/m ³)	Weerstand- coëfficiënt ($\rho = 930$ kg/m ³)
3	$7,7 * 10^{-5}$	$1,04 * 10^5$	$1,22 * 10^4$	0,018	0,028
4	$6,6 * 10^{-5}$	$7,70 * 10^4$	$9,02 * 10^3$	0,019	0,031
5	$7,7 * 10^{-5}$	$8,42 * 10^3$	$9,87 * 10^2$	0,031	0,066
6	$5,4 * 10^{-5}$	$4,95 * 10^4$	$5,80 * 10^3$	0,022	0,035
7	$7,5 * 10^{-5}$	$5,80 * 10^4$	$6,79 * 10^3$	0,021	0,033

Tabel 20: Energetische kenmerken van binnenlandse ruwe-aardoliepijpleidingen bij gebruik van 50% elektriciteit en 50% vloeibare brandstoffen als energiedragers.

#	Secundair energiegebruik (TJ)	Primair energiegebruik (TJ)	Secundaire energie- intensiteit (MJ/tonkm)	Primaire energie- intensiteit (MJ/tonkm)
3	14,6 – 24,5	21,3 – 36,0	0,066 – 0,103	0,097 – 0,150
4	4,6 – 8,1	6,7 – 11,9	0,024 – 0,039	0,035 – 0,058
5	0,012 – 0,028	0,018 – 0,041	0,001 – 0,002	0,001 – 0,002
6	0,26 – 0,45	0,38 – 0,66	0,006 – 0,010	0,009 – 0,015
7	17,9 – 30,5	26,3 – 44,7	0,023 – 0,036	0,033 – 0,052

Evaluatie van resultaten

Uit bovenstaande berekeningen blijkt het energiegebruik van de beschouwde pijpleidingen fors van elkaar te verschillen. De energie-intensiteiten van pijpleidingen blijkt sterk afhankelijk te zijn van de diameter van de buis en van de door de pijpleiding vervoerde hoeveelheid vloeistof. Ook de viscositeit van de vloeistof speelt een grote rol; de invloed van de aandrijfmethode is daarentegen veel kleiner.

In tabel 21 is een totaalbeeld gegeven van het secundair energiegebruik en de energie-intensiteit van de zeven beschouwde pijpleidingen. Voor het totale energiegebruik en vervoersprestatie van de pijpleidingen zijn de werkelijke lengten van het Nederlandse deel van de pijpleidingen gebruikt, zodat de waarde kan worden berekend van het gezamenlijke secundaire energiegebruik en van de

gemiddelde secundaire energie-intensiteit. Vervolgens zijn het primaire energiegebruik en de primaire energie-intensiteit opgenomen in tabel 22.

Tabel 21: Secundair energiegebruik en energie-intensiteit van Nederlandse pijpleidingen voor ruwe olie. Bron: op basis van NEA/Haskoning, 1993 en CBS, 2000b.

Pijpleiding	Jaarlijks secundair energiegebruik per km (GJ)	Lengte pijpleiding (km)	Jaarlijks secundair energiegebruik (TJ)	Vervoersprestatie (mln. tonkm)	Energie-intensiteit (MJ/tonkm)
1	186 – 705	176	33 – 124	2670 – 2890	0,012 – 0,043
2	1108 – 4222	95	105 – 401	2470 – 2670	0,043 – 0,150
3	660 – 1110	22	14,6 – 24,5	221 – 239	0,066 – 0,103
4	210 – 370	22	4,6 – 8,1	191 – 207	0,024 – 0,039
5	0,6 – 1,4	20	0,012 – 0,028	16 – 18	0,001 – 0,002
6	43 – 75	6	0,26 – 0,45	41 – 44	0,006 – 0,010
7	130 – 221	138	17,9 – 30,5	791 – 856	0,023 – 0,036
Totaal	365 – 1230	479	175 – 589	6400 – 6924	0,027 – 0,085

Tabel 22: Primair energiegebruik en energie-intensiteit van Nederlandse pijpleidingen voor ruwe olie. Bron: op basis van NEA/Haskoning, 1993 en CBS, 2000b.

Pijpleiding	Jaarlijks primair energiegebruik per km (GJ)	Lengte pijpleiding (km)	Jaarlijks primair energiegebruik (TJ)	Vervoersprestatie (mln. tonkm)	Energie-intensiteit (MJ/tonkm)
1	440 – 752	176	77 – 132	2670 – 2890	0,029 – 0,046
2	2623 – 4506	95	249 – 428	2470 – 2670	0,101 – 0,160
3	968 – 1636	22	21,3 – 36,0	221 – 239	0,097 – 0,150
4	305 – 541	22	6,7 – 11,9	191 – 207	0,035 – 0,058
5	0,9 – 2,1	20	0,018 – 0,041	16 – 18	0,001 – 0,002
6	63 – 110	6	0,38 – 0,66	41 – 44	0,009 – 0,015
7	191 – 324	138	26,3 – 44,7	791 – 856	0,033 – 0,052
Totaal	795 – 1363	479	381 – 653	6400 – 6924	0,060 – 0,094

Voor het pijpleidingtransport van ruwe aardolie is de met de ingenieursmethode berekende energie-intensiteit duidelijk lager dan de literatuurwaarden (zie tabel 23). Een oorzaak hiervan kan zijn dat de beschouwde Nederlandse pijpleidingen vanwege hun technische kenmerken (zoals diameter, vervoerde hoeveelheid en hoogteverschillen) efficiënter zijn dan de Amerikaanse pijpleidingen waar de literatuurbronnen betrekking op hebben. Uit de grote verschillen tussen de bestudeerde pijpleidingen blijkt dat deze technische kenmerken zeer grote verschillen in energie-intensiteit kunnen veroorzaken.

Tabel 23: Literatuurwaarden voor de energie-intensiteit van ruwe-aardolietransport per pijpleiding. Onbekend is of het hier gaat om de primaire of de secundaire energie-intensiteit.

Gebied	Jaar	Energie-intensiteit	Bron
Verenigde Staten	± 1965	0,33 MJ/tonkm	Liu & Assadollahbaik, 1979
Verenigde Staten	1978	0,25 MJ/tonkm	Groot, 1991
Verenigde Staten	1989	0,198 MJ/tonkm	Komor, 1995
Verenigde Staten*	1998	0,19 MJ/tonkm	Davis, 2000

* = inclusief transport van aardolieproducten

Een andere mogelijke reden van het verschil is dat aannames zijn gemaakt die leiden tot een lagere berekende waarde dan het werkelijke energiegebruik. Eén van deze aannames is dat het pijpleidingtransport plaatsvindt door middel van een continue, gelijkmatige stroming. Doordat het energiegebruik afhankelijk is van de doorgestroomde hoeveelheid tot de derde macht, leidt een discontinue of ongelijkmatige stroming bij een gelijke totale jaarlijkse vervoerde hoeveelheid tot een hoger energiegebruik. Stel dat voor een pijpleiding de volledige jaarlijks vervoerde hoeveelheid in

slechts de helft van de tijd vervoerd wordt en de andere helft van de tijd geen transport plaatsvindt. In dat geval zal de energie-intensiteit van het pijpleidingstransport met iets minder dan een factor 3 toenemen.

Een dergelijke ongelijkmatige verdeling van het transport over de tijd is echter niet waarschijnlijk, omdat de capaciteit van de pijpleidingen beperkt is. Voor de pijpleidingen 1, 2 en 7 bedraagt de capaciteit 23, 33 en 6,5 mln. ton per jaar (NEA/Haskoning, 1993). Aan de hand van deze capaciteit kan berekend worden wat de maximale variatie van de vloeistofstroming is. In tabel 24 is de energie-intensiteit bij maximale variatie van de vloeistofstroming, dus een volledig discontinue stroming, vergeleken met de energie-intensiteit bij een volledig continue stroming.

Tabel 24: De invloed van discontinuïteit van het ruwe-aardolie-transport op de energie-intensiteit.

Pijpleiding	Vervoerde hoeveelheid (jaargemiddeld m ³)		Benutting	Primaire energie-intensiteit (MJ/tonkm)	
	Capaciteit	Berekend		Volledig continu	Volledig discontinu
Pijpleiding 1	0,82	0,56	69%	0,029 – 0,046	0,058 – 0,088
Pijpleiding 2	1,17	0,96	82%	0,101 – 0,160	0,141 – 0,223
Pijpleiding 7	0,23	0,21	92%	0,033 – 0,052	0,038 – 0,060

De werkelijke variatie van de vloeistofstroming door pijpleidingen over de tijd is niet bekend; hiervoor is nader onderzoek nodig. De gemiddelde primaire energie-intensiteit van de drie pijpleidingen bedraagt voor volledig discontinue stromingen 0,090 tot 0,141 MJ/tonkm. Met volledig continue stromingen is dit 0,060 tot 0,094 MJ/tonkm, wat gelijk is aan de eerder berekende gemiddelde primaire energie-intensiteit van het totale Nederlandse netwerk ruwe-aardoliepijpleidingen. In het vervolg zal gerekend worden met het gemiddelde van de totale energie-intensiteit van de Nederlandse ruwe-aardoliepijpleidingen voor volledig continue en volledig discontinue energie-intensiteit. Dit gemiddelde bedraagt 0,096 MJ/tonkm. Bij een vervoersprestatie van gemiddeld 6,66 mld. tonkm komt dit neer op een primair energiegebruik van 0,64 PJ per jaar.

De emissie- en kostenfactoren van het pijpleidingstransport zijn aan de hand van het energiegebruik en de in hoofdstuk 2 van deze bijlage berekende emissie- en kostenfactoren voor het energiegebruik eenvoudig te berekenen. De resultaten hiervan zijn voor beide bestudeerde energiedragers weergegeven in tabel 25. In tabel 26 zijn de totale jaarlijkse emissies kosten voor het ruwe-aardoliepijpleidingstransport weergegeven.

Tabel 25: Emissie- en kostenfactoren voor pijpleidingstransport met twee verschillende energiedragers.

Energiedrager	Emissies					Kosten (€/tonkm)
	CO ₂ (g/tonkm)	NO _x (mg/tonkm)	SO ₂ (mg/tonkm)	VOS (mg/tonkm)	PM ₁₀ (mg/tonkm)	
Elektriciteit	6,2	7,8	2,1	0,10	0,10	0,00069
Vloeibare brandstoffen	6,6	68,0	8,5	1,8	0,63	0,00078

Tabel 26: Jaarlijkse emissies en kosten voor pijpleidingstransport met twee verschillende energiedragers.

Energiedrager	Emissies					Kosten (mln. €)
	CO ₂ (10 ⁶ kg)	NO _x (10 ³ kg)	SO ₂ (10 ³ kg)	VOS (10 ³ kg)	PM ₁₀ (10 ³ kg)	
Elektriciteit	41,2	52	14	0,7	0,7	4,6
Vloeibare brandstoffen	43,8	453	56	12,0	4,2	5,2

In tabel 27 is de toekomstige ontwikkeling van de primaire energie-intensiteit en de emissie- en kostenfactoren voor het EC- en het GC-scenario weergegeven. Hierbij is uitgegaan van een constant blijvende secundaire energie-intensiteit. Er worden dus geen veranderingen in technische eigenschappen van de pijpleidingen en de vloeistofpompen verondersteld. De primaire energie-intensiteit en de emissiefactoren worden uit de secundaire energie-intensiteit berekend met behulp van de emissiefactoren uit hoofdstuk 2.

Tabel 27: Toekomstige ontwikkeling van de energie-intensiteit, emissies en energiekosten van het ruwe-aardolietransport per pijpleiding in Nederland voor twee scenario's. Uitgegaan is van een verhouding elektriciteit – vloeibare brandstoffen van 50% : 50%.

Emissie- en kostenfactoren	Scenario	2000	2010	2020	2030
Primaire energie-intensiteit (MJ/tonkm)	EC	0,096	0,084	0,083	0,081
	GC	0,096	0,082	0,082	0,080
CO ₂ -emissiefactor (g/tonkm)	EC	6,4	5,1	4,8	4,8
	GC	6,4	5,4	5,0	4,9
NO _x -emissiefactor (mg/tonkm)	EC	38	25	25	25
	GC	38	25	25	25
SO ₂ -emissiefactor (mg/tonkm)	EC	5,3	2,5	2,4	2,2
	GC	5,3	2,6	2,3	2,2
VOS-emissiefactor (mg/tonkm)	EC	0,95	0,97	0,98	n.b.
	GC	0,95	0,96	0,96	n.b.
PM ₁₀ -emissiefactor (mg/tonkm)	EC	0,37	0,35	0,34	n.b.
	GC	0,37	0,36	0,33	n.b.
Kostenfactor (€/tonkm)	EC	0,00073	0,00082	0,00091	0,00102
	GC	0,00073	0,00081	0,00089	0,00099

3.1.6 Aardolieproducten

Het energiegebruik van het pijpleidingtransport voor olieproducten bedraagt tussen 0,11 en de 0,18 MJ/tonkm (NEA/Haskoning, 1993). Omdat onbekend is wat de aandelen van de verschillende aardolieproducten in de totale vervoersprestatie is, zal voor het berekenen van het totale energiegebruik en emissies het gemiddelde van de grenswaarden (d.i. 0,145 MJ/tonkm) worden genomen. Verder wordt evenals voor ruwe aardolie aangenomen dat geen significante verbeteringen in de efficiëntie van de pompen optreden. Het pijpleidingtransport van aardolieproducten behaalde in 1999 een vervoersprestatie van $1,47 \cdot 10^9$ tonkilometer (CBS, 2000b). Het primaire energiegebruik van het pijpleidingtransport van aardolieproducten is dan 162 – 264 TJ.

Evenals voor ruwe aardolie is niets bekend over de energiedrager die voor het pijpleidingtransport van aardolieproducten gebruikt wordt. De meest waarschijnlijke mogelijkheden zijn wederom het gebruik van elektrische energie en van vloeibare fossiele brandstoffen. Tabel 28 geeft een overzicht van de uit de energie-intensiteit berekende emissie- en kosten factoren. In tabel 29 zijn vervolgens de jaarlijkse emissies en kosten van het pijpleidingtransport van aardolieproducten weergegeven.

Tabel 28: Emissie- en kostenfactoren voor pijpleidingtransport met twee verschillende energiedragers.

Energiedrager	Emissies					Kosten (€/tonkm)
	CO ₂ (g/tonkm)	NO _x (mg/tonkm)	SO ₂ (mg/tonkm)	VOS (mg/tonkm)	PM ₁₀ (mg/tonkm)	
Elektriciteit	7,09 – 11,59	9,0 – 14,7	2,45 – 4,01	0,116 – 0,190	0,116 – 0,190	0,0008 – 0,0012
Vloeibare brandstoffen	7,33 – 11,73	87 – 141	9,3 – 15,3	1,98 – 3,24	0,69 – 1,13	0,0008 – 0,0015

Tabel 29: Jaarlijkse emissies en kosten voor pijpleidingtransport met twee verschillende energiedragers.

Energiedrager	Emissies					Kosten (mln. €)
	CO ₂ (10 ⁶ kg)	NO _x (10 ³ kg)	SO ₂ (10 ³ kg)	VOS (10 ³ kg)	PM ₁₀ (10 ³ kg)	
Elektriciteit	10,4 – 17,0	13 – 22	3,7 – 5,9	0,17 – 0,28	0,171 – 0,279	1,15 – 1,87
Vloeibare brandstoffen	10,6 – 17,4	127 – 207	13,7 – 22,3	2,91 – 4,75	1,02 – 1,66	1,32 – 2,14

In tabel 30 is de toekomstige ontwikkeling van de primaire energie-intensiteit en de emissie- en kostenfactoren voor het EC- en het GC-scenario weergegeven. Hierbij is uitgegaan van de gemiddelde primaire energie-intensiteit van 0,145 MJ/tonkm in 2000. Verder worden er geen veranderingen in technische eigenschappen van de pijpleidingen en de vloeistofpompen verondersteld.

Tabel 30: Toekomstige ontwikkeling van de energie-intensiteit, emissies en energiekosten van het ruwe-aardolie-transport per pijpleiding in Nederland voor twee scenario's. Uitgegaan is van een verhouding elektriciteit – vloeibare brandstoffen van 50% : 50%.

Emissie- en kostenfactoren	Scenario	2000	2010	2020	2030
Primaire energie-intensiteit (MJ/tonkm)	EC	0,15	0,13	0,13	0,12
	GC	0,15	0,12	0,12	0,12
CO ₂ -emissiefactor (g/tonkm)	EC	9,4	7,5	7,1	7,0
	GC	9,4	7,9	7,3	7,2
NO _x -emissiefactor (mg/tonkm)	EC	63	37	37	36
	GC	63	37	36	36
SO ₂ -emissiefactor (mg/tonkm)	EC	7,7	3,7	3,5	3,3
	GC	7,7	3,9	3,4	3,2
VOS-emissiefactor (mg/tonkm)	EC	1,4	1,4	1,4	n.b.
	GC	1,4	1,4	1,4	n.b.
PM ₁₀ -emissiefactor (mg/tonkm)	EC	0,53	0,51	0,49	n.b.
	GC	0,53	0,52	0,48	n.b.
Kostenfactor (€/tonkm)	EC	0,0010	0,0013	0,0014	0,0015
	GC	0,0010	0,0011	0,0014	0,0015

3.1.7 Energiegassen

Voor het pijpleidingtransport van energie-gassen is slechts bekend dat de in 1997 grensoverschrijdend vervoerde hoeveelheid 3,4 mln. ton bedroeg (AVV, 1997c). Omdat het grensoverschrijdende pijpleidingtransport voor een zeer groot deel plaatsvindt op de verbinding Rotterdam – Antwerpen, wordt een gemiddelde transportafstand van 75 km aangenomen. De vervoersprestatie bedraagt dan 255 mln. tonkm.

De energie-intensiteit van het transport van energie-gassen is onbekend. Daarom wordt aangenomen dat deze vergelijkbaar is met de energie-intensiteit van aardgas en dus 0,70 MJ/tonkm bedraagt. Het totale energiegebruik van het pijpleidingtransport van energie-gassen wordt daarmee geschat op $1,8 \cdot 10^{14}$ J. In tabel 31 zijn het energiegebruik en de hieruit berekende emissies en energiekosten weergegeven.

Tabel 31: Energiegebruik, emissies en energiekosten van het transport van olieproducten per pijpleiding, uitgaande van 50% elektriciteit en 50% vloeibare brandstoffen als energiedragers.

Secundair energiegebruik (PJ)	0,12
Primair energiegebruik (PJ)	0,18
CO ₂ -emissie (10 ⁶ kg)	12
NO _x -emissie (10 ³ kg)	78
SO ₂ -emissie (10 ³ kg)	9,6
VOS-emissie (10 ³ kg)	1,7
PM ₁₀ -emissie (10 ³ kg)	0,66
Kosten (mln. €)	1,4

3.1.8 Chemische basisproducten

De vervoerde hoeveelheid chemische basisproducten bedroeg voor het grensoverschrijdende vervoer 1,5 mln. ton in 1997 (AVV, 1997c). Bij een vervoerde afstand van 75 km resulteert dit in een vervoersprestatie van 113 mln. tonkm. Als aangenomen wordt dat het pijpleidingtransport van chemische basisproducten een energie-intensiteit heeft die overeenkomt met die van aardolieproducten (0,17 MJ/tonkm), dan resulteert dit in een jaarlijks energiegebruik van $1,9 * 10^{13}$ J. In tabel 32 zijn het energiegebruik en de hieruit berekende emissies en energiekosten weergegeven.

Tabel 32: Energiegebruik, emissies en energiekosten van het transport van chemische basisproducten per pijpleiding, uitgaande van 50% elektriciteit en 50% vloeibare brandstoffen als energiedragers.

Secundair energiegebruik (PJ)	0,013
Primair energiegebruik (PJ)	0,019
CO ₂ -emissie (10 ⁶ kg)	1,2
NO _x -emissie (10 ⁶ kg)	8,2
SO ₂ -emissie (10 ³ kg)	1,0
VOS-emissie (10 ³ kg)	0,18
PM ₁₀ -emissie (10 ³ kg)	0,070
Kosten (mln. €)	0,15

3.2 Extra-traditioneel

3.2.1 Theorie

Bij het extra-traditioneel pijpleidingtransport worden door conventionele pijpleidingen bulkgoederen vervoerd die nu niet per pijpleiding vervoerd worden. De voor dit type pijpleidingtransport gebruikte instrumenten komen technisch overeen met die van het traditionele pijpleidingtransport. Een uitzondering hierop is echter het slurripijpleidingtransport. Bij dit type pijpleidingtransport wordt de te vervoeren vaste stof voor het transport gebroken en tot kleine korrels vermalen. Dit breken en malen zijn energie-intensieve processen. Na het transport wordt de vaste stof van de vloeistof gescheiden en wordt het afvalwater gezuiverd. Deze processen brengen hoge kosten met zich mee. (NEA/Haskoning, 1993)

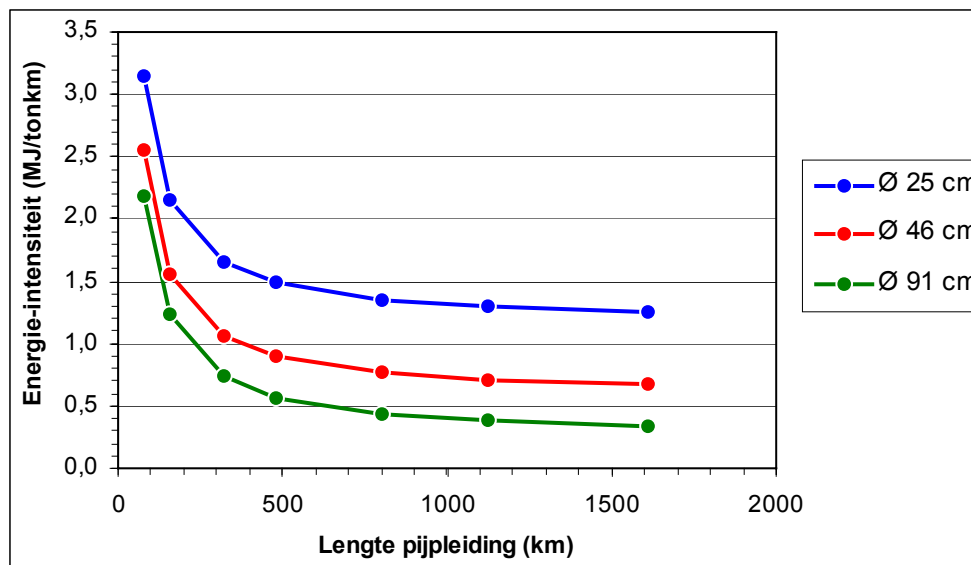
De aanwezigheid van korrels heeft invloed op de kosten doordat het invloed heeft op de viscositeit van de suspensie en doordat het eisen stelt aan het ontwerp van de pompen. De aanwezigheid van korrels in de vloeistof resulteert daardoor in een hoger energiegebruik van de pompen (NEA/Haskoning, 1993). Bovendien zijn de pompen voor slurripijpleidingen duurder dan die voor vloeistofpijpleidingen (ASCE, 1998).

Bij slurripijpleidingen zullen over het algemeen de kosten en de milieueffecten van het pompen per tonkm vervoerde stof hoger zijn dan bij vloeistofpijpleidingen. Dit komt doordat de te transporteren vaste stof slechts een beperkt deel van het totaal vervoerde volume inneemt. Het aandeel van de vaste stof in de suspensie varieert van 46% voor conventionele slurripijpleidingen tot 70% voor nieuwe

kolen-watmengsels die direct als brandstof kunnen worden gebruikt in bijvoorbeeld elektriciteitscentrales. (NEA/Haskoning, 1993; ASCE, 1998).

3.2.2 Slurrypijpleidingstransport

Het energiegebruik van het conventionele slurrypijpleidingstransport van steenkool kan gesplitst worden in een afstandsafhankelijk en een afstandsonafhankelijk deel. Het afstandsonafhankelijke deel van het energiegebruik bedraagt volgens berekeningen door Liu en Assadollahbaik (1979) op basis van de theoretische vloeistofdynamica 160 MJ/ton (primair). Het afstandsonafhankelijke deel van de energie-intensiteit is afhankelijk van de diameter van de pijpleiding en bedraagt over het algemeen tussen de 0,24 MJ/tonkm voor een diameter van 91 cm en 1,16 MJ/tonkm voor een diameter van 25 cm. Vanwege het grote afstandsonafhankelijke energiegebruik is de energie-intensiteit negatief afhankelijk van de afstand waarover vervoerd wordt. Dit is weergegeven in figuur 4.



Figuur 4: Primaire energie-intensiteit van het slurry-pijpleidingstransport afhankelijk van de afstand waarover vervoerd wordt voor drie pijpleidingdiameters. Bron: Liu & Assadollahbaik, 1979.

4. Capsule-pijpleidingstransport

4.1 Pneumatische capsule-pijpleiding

4.1.1 Theorie

De aandrijving van pneumatisch capsule pijpleidingsystemen (PCP) en daarmee ook de bepalende factoren voor het energiegebruik, komen theoretisch sterk overeen met de aandrijving van het traditioneel en extra-traditioneel pijpleidingstransport. Er wordt door een pomp een luchtstroming in beweging gebracht, die vervolgens zorgt voor voortstuwing van de capsules. De luchtstroming ondervindt wrijvingsweerstand van de buisleidingwand volgens de theorie die behandeld is bij het traditionele pijpleidingstransport.

Op de capsules werkt een netto kracht in die opgebouwd is uit drie afzonderlijke krachten. Allereerst ondervinden de capsules een kracht door het snelheidsverschil met de luchtstroming. Bij een conventionele PCP zal het hierbij uitsluitend gaan om een voorwaartse kracht. Bij een PCP met lineaire aandrijving (LIM of LSM) kan het zowel een weerstand als een voortstuwing betreffen, al

naargelang de snelheid van de capsule lager of hoger is dan de snelheid van de lucht. De tweede kracht is een weerstand die veroorzaakt wordt door het contact met de pijpleidingwand. Bij een PCP op wielen gaat het om een rolweerstand; een PCP zonder wielen heeft te maken met een wrijvingsweerstand.

De capsules van een moderne PCP-systemen met aandrijving door lineaire motoren ondervinden nog een derde kracht door een directe voortstuwing van de motor, net zoals dat bij een ondergrondse trein gebeurt. Het voornaamste verschil tussen een lineair aangedreven PCP en een ondergrondse trein is dat de directe aandrijving bij een PCP slechts over een klein deel van het traject plaatsvindt. Tijdens deze aandrijftijd wordt extra veel energie verbruikt, omdat niet alleen het voertuig maar ook zoveel mogelijk lucht in beweging wordt gezet. De hierbij opgewekte luchtstroming zorgt voor een indirecte aandrijving gedurende de uitrijdperiode van de capsule. De uitrijdtijd kan daardoor verlengd worden, zodat het extra energiegebruik uit de aandrijfperiode kan worden terugverdiend.

Het energiegebruik van PCP-systemen verschilt sterk tussen verschillende typen en formaten. Er moet in ogenschouw worden genomen dat lineaire aandrijving nog een relatief nieuwe techniek is en dat in de toekomst mogelijk nog verbeteringen op het gebied van energiegebruik te verwachten zijn.

4.1.2 Conventionele pneumatische capsule-pijpleiding

Het energiegebruik van de conventionele PCP's is voor een groot deel afhankelijk van de diameter van de pijpleiding. Volgens NEA/Haskoning (1993) varieert het primaire energiegebruik van de conventionele PCP's tussen de 0,12 en 1,10 MJ/tonkm. Kosugi (1999) berekende voor een concept-PCP in Canada met een diameter van 1,05 meter een secundair energiegebruik van tussen de 0,69 en 0,89 MJ/tonkm bij temperaturen van respectievelijk 17,7 °C en -18,9 °C. Voor Nederland zijn deze temperaturen echter niet reëel, zodat een secundaire energie-intensiteit van 0,69 zal worden aangehouden. Dit komt neer op een primair energiegebruik van 1,63 MJ/tonkm, wat duidelijk hoger is dan de 1,10 MJ/tonkm die door NEA/Haskoning (1993) verondersteld werd. Daarom wordt voor het primaire energiegebruik van conventionele PCP's een bereik van 0,12 tot 1,63 MJ/tonkm genomen.

4.1.3 Pneumatische capsule-pijpleiding met LIM-aandrijving

Voor een PCP met aandrijving door een lineaire inductiemotor (LIM) is het energiegebruik berekend door Liu (2000b). Hierbij werd een hypothetisch systeem beschouwd van 100 km lengte en met een buisdiameter van ca. 1 meter. De LIM's hebben een efficiëntie van 80% en een onderlinge afstand van 10 km. In de LIM's halen de capsules een snelheid van 19 m/s (68 km/h) waarna zij in de buisleiding uitrijden. Hierdoor zakt de snelheid in de buisleiding terug tot een gemiddelde van 12,2 m/s (44 km/h).

Voor het systeem werden van vier verschillende lijnvullingpercentages⁴² de jaarlijks vervoerde hoeveelheid en het door de LIM's gebruikte elektrische vermogen berekend. Er werd daarbij uitgegaan van een continue stroom capsules die een 100% bezettingsgraad hebben. Doordat zowel de vervoersprestatie als het energiegebruik rechtevenredig toenemen met de lijnvulling, is er sprake van een constant direct energiegebruik per ladingtonkilometer. Bij een lijnvulling van 10% wordt $9,6 \cdot 10^6$ ton per jaar over een afstand van 100 km vervoerd, wat resulteert in een vervoersprestatie van $9,6 \cdot 10^8$ tonkm. Het vermogen dat de LIM's dan gebruiken is 81,9 MW, zodat 2,7 MJ/tonkm elektrische energie gebruikt wordt. Als uitgegaan wordt van elektriciteitslevering via het landelijke elektriciteitsnet, dan bedraagt voor het jaar 1998 de gebruikte hoeveelheid primaire energie 6,4 MJ/tonkm

⁴² Lijnvulling: het percentage van de lengte van de buisleiding dat door capsules bezet is.

4.1.4 Pneumatische capsule-pijpleiding met LSM-aandrijving

Het energiegebruik van een PCP met aandrijving door een lineaire synchronomotor (LSM) kan berekend worden aan de hand van data van Montgomery et al. (2000). Deze data hebben betrekking op een proeftraject voor een PCP met een diameter van 560 mm. waardoor capsules met een maximum snelheid van 18 m/s (65 km/h) getransporteerd worden. Aandrijving door LSM's vindt plaats over 5 meter met intervallen van 240 meter. Gedurende het aandrijvingloze gedeelte daalt de snelheid van de capsules van 18 tot 16 m/s.

Aan de hand van testresultaten werd de jaarlijks vervoerde hoeveelheid op $9 \cdot 10^6$ ton geschat (in een continue goederenstroom), waarbij een afstand van 48 km afgelegd wordt. De jaarlijkse vervoersprestatie komt daardoor op $4,3 \cdot 10^8$ tonkm. Het gemiddelde operationele energiegebruik van het systeem is 3,9 MW, wat overeenkomt met $1,23 \cdot 10^{14}$ J per jaar. De PCP met LSM gebruikt dus 0,28 MJ/tonkm secundaire, elektrische energie. Uitgaande van het gebruik van via het landelijke elektriciteitsnet geleverde energie, bedraagt het primaire energiegebruik 0,67 MJ/tonkm.

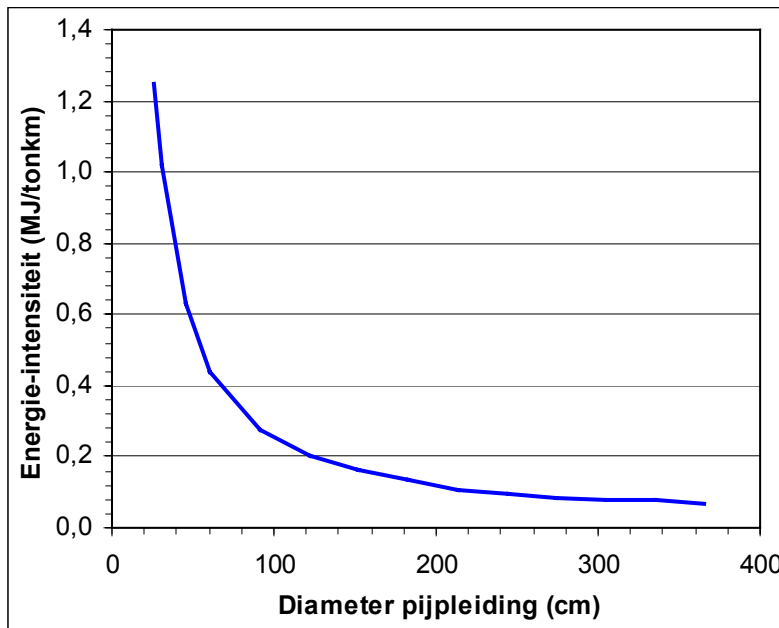
4.2 Hydraulische capsulepijpleiding

4.2.1 Theorie

Theoretisch komt het energiegebruik van hydraulische capsule-pijpleidingen (HCP) grotendeels overeen met dat van pneumatische capsule-pijpleidingen (PCP). Vergeleken met de PCP's is het energiegebruik van de HCP's meer afhankelijk van de lijnvulling. Bij een grotere lijnvulling neemt het energiegebruik per tonkm af, omdat dan per tonkm minder water door de pijpleiding hoeft te worden gepompt.

4.2.2 Conventionele hydraulische capsule-pijpleiding

Het energiegebruik van conventionele HCP's is onderzocht door Liu en Assadollahbaik (1979). Uit hun resultaten blijkt de energie-intensiteit nauwelijks afhankelijk te zijn van de lengte van de pijpleiding maar vooral van de diameter van de pijpleiding, net als bij een conventionele vloeistofpijpleiding. In figuur 5 is de relatie tussen de primaire energie-intensiteit en de diameter van de pijpleiding grafisch weergegeven. Hierbij is uitgegaan van het gebruik van elektrische energie en het huidige Nederlandse rendement voor de elektriciteitsproductie en -distributie.



Figuur 5: De primaire directe energie-intensiteit van een conventionele HCP, afhankelijk van de diameter van de pijpleiding. Het betreft hier een HCP voor het transport van steenkool met 70% lijnvulling, een beladingsgraad van 75%⁴³ een snelheid van 7 km/h en een lengte van 80 km. Bron: Liu & Assadollahbaik, 1979.

4.2.3 Coal Log Pipeline

Bij een Coal Log Pipeline (CLP) is een groot deel van het energiegebruik bestemd voor het fabriceren van capsules uit ‘losse’ steenkool. Dit deel van het energiegebruik is onafhankelijk van de afstand waar over vervoerd wordt. Het directe energiegebruik van CLP kan overeenkomstig met het slurry-pijpleidingstransport gesplitst worden in een ladington-afhankelijk deel en een ladingtonkm-afhankelijk deel.

Het energiegebruik kan berekend worden aan de hand van Liu et al. (1998), waarin de financiële kenmerken van CLP-systemen onderzocht worden. In Liu et al. (1998) wordt een CLP beschouwd met een diameter van 203 mm en een lengte van 160 km. De lijnvulling is 90% en de snelheid van de capsules is ca. 3 m/s, zodat de jaarlijks getransporteerde hoeveelheid steenkool 2,3 Mton bedraagt. De jaarlijkse vervoersprestatie is daardoor $3,6 \cdot 10^8$ tonkm.

Het ladington-afhankelijke deel van het energiegebruik bestaat voornamelijk uit de benodigde energie voor het produceren van de capsules uit ‘losse’ steenkool. Over dit energiegebruik zijn echter geen concrete waarden bekend. Op basis van de energiekosten uit Liu et al. (1998) wordt het jaarlijkse ladington-afhankelijke deel van het primaire energiegebruik geschat op 2,5 PJ per jaar. Dit komt neer op 1 GJ per ton.

Het ladingtonkm-afhankelijke deel van het energiegebruik is het energiegebruik van de pompinstallaties. Het totale pompvermogen van de beschouwde pijpleiding bedraagt 5,80 MW (Liu et al., 1998). Het ladingtonkm-afhankelijke deel van het primaire energiegebruik bedraagt daarmee 0,54 PJ per jaar; per tonkm is dit 1,5 MJ. Het vermengen van een weerstandsreducerende polymeer met het water kan het energiegebruik dan nog laten dalen tot ca. 0,45 MJ/tonkm.

⁴³ Beladingsgraad: het gewicht van de lading van een capsule gedeeld door het gewicht van een capsule inclusief lading.

De totale primaire energie-intensiteit van het CLP-transport is negatief afhankelijk van lengte van de pijpleiding. Voor een pijpleiding van 100 km bedraagt de primaire energie-intensiteit ongeveer 12 MJ/tonkm. Bij een afstand van 200 km is dit gedaald tot 7 MJ/tonkm en bij 300 km tot 5 MJ/tonkm.

5. Automatisch geleide voertuigen

5.1 Theorie

Het directe energiegebruik van automatisch geleide voertuigen (AGV's) wordt bepaald door de kracht die op de wielen uitgeoefend moet worden, door de energieverliezen vanwege het rendement van de aandrijving en de gebruikte accu, en door de afstand dat het voertuig uitrijdt. Het energiegebruik E van een AGV kan worden weergegeven als formule 6:

$$\text{Formule 6: } E = \frac{F \cdot s}{\eta}$$

Hierbij is η het rendement van de motor en de aandrijving van het voertuig, F de door de aandrijving uitgeoefende kracht en s de afgelegde afstand. De energie-intensiteit EI van het voertuig uitgedrukt in MJ/tonkm wordt bepaald door formule 7:

$$\text{Formule 7: } EI = \frac{E}{m \cdot s} = \frac{F}{\eta \cdot m}$$

Hierbij is m de massa van de vervoerde lading.

De kracht die de aandrijving op de wielen moet uitoefenen, compenseert drie tegenwerkende krachten. De eerste kracht is de rolweerstand van het voertuig. Deze wordt bepaald door het voor de wielen gebruikte materiaal. Bij het gebruik van een hard materiaal, zoals staal, zal de rolweerstand lager zijn dan indien een zacht materiaal, zoals rubber, gebruikt wordt. Met betrekking tot de rolweerstand kunnen zeer grote verschillen (tot zelfs een factor 30) bestaan tussen verschillende voertuigconcepten, afhankelijk van de gebruikte geleidingmethode voor in de tunnel. (Van der Heide, 1999) De rolweerstand F_r van het voertuig wordt bepaald door formule 8 (Van der Heide, 1999):

$$\text{Formule 8: } F_r = C_r \cdot m_{tot} \cdot g$$

Hierbij is C_r een voertuigafhankelijke rolweerstandconstante, m_{tot} de massa van het voertuig inclusief de lading en g de valversnelling die voor Nederland 9,81 m/s² bedraagt. Het energiegebruik E_r ten gevolge van de rolweerstand volgt uit de combinatie van formule 6 en formule 8:

$$\text{Formule 9: } E_r = \frac{C_r \cdot m_{tot} \cdot g \cdot s}{\eta}$$

De tweede kracht die de aandrijfkraft moet compenseren is de luchtweerstand. In tunnels wijkt de luchtweerstand af van de bovengrondse luchtweerstand, vanwege de invloed die de tunnel uitoefent op de aerodynamica. De luchtweerstand neemt sterk toe naarmate minder vrije ruimte beschikbaar is tussen de AGV's en de tunnelwand. Daarnaast kunnen vooral bij hoge voertuigsnelheden drukgolven ontstaan die instabiliteit bij de voertuigen veroorzaken en de luchtweerstand met een factor 2 à 3 kunnen laten toenemen (Van der Heide, 1999). Uit fysisch onderzoek met schaalmodellen voor autobussen (Hucho, 1987) blijkt de luchtweerstand van een voertuig in een lange tunnel (meer dan 20 maal de voertuiglengte) ongeveer 4,3 maal zo groot te zijn als de luchtweerstand van het voertuig in het vrije veld.

Ook van invloed op de luchtweerstand is het rijden in colonnes. Evenals bij pneumatische capsules is er in de buisleiding sprake van een meezuigeffect tussen de voertuigen. Langere colonnes zorgen dus voor een lager energiegebruik. Uit het bovenvermelde fysische onderzoek bleek bij een colonne van 3 voertuigen in een tunnel de luchtweerstand van het voorste voertuig 86%, van het tweede voertuig 69% en van het achterste voertuig 60% te zijn van de luchtweerstand van een voertuig dat niet in colonne door de tunnel rijdt (Hucho, 1987). Hierbij gaat het om een enkelbaans tunnel waarbij het frontale oppervlak van het voertuig 0,54 keer het oppervlak van een doorsnede van de tunnel is. Dit is een situatie zoals die ook voor een OLS heel aannemelijk is. De bij het onderzoek gebruikte voertuigsnelheid is 70 km/h, wat onwaarschijnlijk hoog is voor een OLS. Voor lagere snelheden zijn echter geen gegevens bekend omtrent de invloed van het tunneleffect en colonnevorming op de luchtweerstand.

De effecten van de tunnel en colonnevorming op de luchtweerstand kunnen worden uitgedrukt in een compensatiefactor die met de luchtweerstand in het vrije veld vermenigvuldigt kan worden. In de energiestudie van het OLS Schiphol (Van der Heide, 1999) is de waarde van deze factor bepaald op 2,7. In het algemeen zal de waarde afhankelijk van de onderlinge afstand tussen de 2 en 4,5 liggen, waarbij een factor van 3 wel de meest waarschijnlijke waarde is. Voor dubbelbaans tunnels zal de compensatiefactor lager liggen; een concrete waarde kan echter niet gegeven worden. Er kan geconcludeerd worden dat er veel onzekerheid is over het effect van tunnels en colonnevorming op de luchtweerstand voor het OLS.

De luchtweerstand F_l van een AGV wordt bepaald door formule 10: (Van der Heide, 1999)

$$\text{Formule 10: } F_l = \frac{1}{2} \cdot \rho_l \cdot C_w \cdot A \cdot v^2 \cdot c_t$$

Hierbij is ρ_l de dichtheid van de lucht (1,293 kg/m³), C_w de luchtweerstandcoëfficiënt van het voertuig, A het frontale oppervlak, v de snelheid van het voertuig en c_t de compensatiefactor voor het rijden in een tunnel. (Van der Heide, 1999) Het energiegebruik E_l voor het compenseren van de luchtweerstand is dan:

$$\text{Formule 11: } E_l = \frac{\rho_l \cdot C_w \cdot A \cdot v^2 \cdot c_t \cdot s}{2 \cdot \eta}$$

De laatste component van de aandrijfkraft is de kracht die nodig is voor het versnellen van het voertuig. Als uitgegaan wordt van een eenmalig gelijkmatig versnellen aan het begin van de rit (wat vanwege de ongehinderdheid naar verwachting een realistisch snelheidsverloop is), dan is het energiegebruik E_v ten gevolge van het versnellen gelijk aan de kinetische energie van de kruissnelheid gecompenseerd voor het rendement van de aandrijving:

$$\text{Formule 12: } E_v = \frac{m_{tot} \cdot v_{max}^2}{2 \cdot \eta}$$

Hierbij is m_{tot} de massa van het voertuig inclusief de lading en v_{max} de maximale snelheid.

5.2 Industrieel OLS

Over het directe energiegebruik van het industriële OLS is inmiddels veel bekend door onderzoek naar het energiegebruik van het OLS Schiphol. Hierbij is zowel gekeken naar het energiegebruik van de voertuigen als naar het energiegebruik door activiteiten in de terminal, zoals het laden en lossen.

Voor het OLS Schiphol zijn drie verschillende voertuigconcepten ontwikkeld. Deze concepten verschillen van elkaar in hun technische configuratie en daardoor ook in hun (directe en indirecte)

energiegebruik. In de sub-paragraaf 3.4.5 van het hoofdrapport zijn de voornaamste technische verschillen tussen de concepten besproken, namelijk de energievoorziening en de geleiding in de buisleiding. De drie voertuigconcepten verschillen in beide elementen van elkaar. Het directe energiegebruik van de verschillende varianten is uitgebreid onderzocht. De drie concepten zullen nu achtereenvolgens besproken worden.

Concept A gaat uit van bewezen technieken zoals geleiding door middel van rubber banden op een vlakke betonnen baan en aandrijving door een conventionele gelijkstroom elektromotor. Voor de stroomvoorziening beschikt het voertuig over een accu die regelmatig opgeladen of verwisseld moet worden. De gebruikte technieken leiden tot een relatief hoog secundair energiegebruik, van 1,92 MJ/tonkm. (Kusters, 2000)

In concept B heeft het voertuig naast de mogelijkheid om op rubber banden door de terminal te rijden ook stalen wielen waarmee over (conventionele) rails door de tunnel kan worden gereden. Hierdoor wordt de rolweerstand beperkt, wat leidt tot een lager energiegebruik dan indien op rubber banden door de tunnel wordt gereden. De aandrijving vindt plaats door middel van een wisselstroom elektromotor. Voor de stroomvoorziening wordt in de buisleiding gebruik gemaakt van een geleiderail. Hierbij wordt tevens een accu opgeladen die zorgt voor de stroomvoorziening in de terminal. De stroomvoorziening door een geleiderail zorgt voor een lager energieverlies dan het gebruik van de accu. Bovendien hoeven de voertuigen geen stop te maken voor het opladen of verwisselen van de accu. Dit bespaart tijd en vermindert de afstand die zonder lading afgelegd moet worden. Dit concept leidt tot een laag energiegebruik van 0,85 MJ/tonkm. (Kusters, 2000)

Bij concept C hebben de AGV's een mechanisme waarmee ze direct op de binnenwand van de buisleiding kunnen rijden. Doordat dit mechanisme ervoor zorgt dat de wielen altijd in de richting van de buisleiding staan, is geen elektronische geleiding nodig. Voor de aandrijving heeft het voertuig een wisselstroom elektromotor. De stroomvoorziening wordt net als bij het eerste concept verzorgd door een accu. Qua energiegebruik valt dit concept tussen de andere twee concepten; per tonkm wordt 1,50 MJ gebruikt. (Kusters, 2000)

Onderzocht is ook het energiegebruik ten gevolge van andere activiteiten in de terminal, zoals overslag, intern transport, verwarming, ventilatie, verkoeling en verlichting. Dit energiegebruik bedraagt 1,99 MJ per ton lading, wat bij een door de lading afgelegde weg van 10,31 km (de gemiddelde ritlengte) neerkomt op 0,19 MJ/tonkm. Voor de concepten A en C wordt tevens energie gebruikt door de accu-laadfaciliteiten. Dit bedraagt naar verwachting 1,2 MJ per ton, dus 0,12 MJ/tonkm, exclusief het laden van de batterijen. (Van der Heide, 1999) In tabel 33 is een overzicht gegeven van de opbouw van het secundaire energiegebruik door de drie voertuigconcepten.

Tabel 33: Opbouw van het secundair energiegebruik (MJ/tonkm) van de drie AGV-concepten voor het OLS Schiphol. Bron: Van der Heide, 1999.

	Concept A	Concept B	Concept C	Gemiddeld
Rijden AGV's met (1,72 ton) lading	1,10	0,43	0,80	0,78
Rijden AGV's zonder lading ⁴⁴	0,50	0,22	0,38	0,37
Rijden AGV's in de terminals	0,01	0,01	0,01	0,01
Totaal energiegebruik rijden AGV's	1,61	0,66	1,19	1,16
Energiegebruik van terminalactiviteiten ⁴⁵	0,19	0,19	0,19	0,19
Energiegebruik van accu-laadfaciliteiten ⁴⁶	0,12	0,00	0,12	0,08
Totaal energiegebruik overige activiteiten	0,31	0,19	0,31	0,27
Totaal secundair energiegebruik OLS	1,92	0,85	1,50	1,42

Van het hierboven beschreven energiegebruik behoort alleen de energie-intensiteit ten gevolge van het rijden van de AGV's tot de directe energie-intensiteit. Het energiegebruik van terminalactiviteiten en accu-laadfaciliteiten behoort tot de indirecte energie-intensiteit. De primaire directe energie-intensiteiten van de drie concepten zijn respectievelijk 0,0273 MJ/tonkm, 0,0112 MJ/tonkm en 0,0202 MJ/tonkm, wat neerkomt op een gemiddelde van 0,0197 MJ/tonkm.

De voor het OLS Schiphol ontworpen voertuigen zijn niet representatief voor alle mogelijke toepassingen van industriële OLS. In de energiestudie voor het OLS Schiphol wordt tevens het energiegebruik van een meer grootschalige toepassing van OLS beschouwd. Hierbij is uitgegaan van een lading met een massa van 7 tot 32 ton, dus veel groter dan de maximale belading van 3,5 ton die de AGV's van het OLS Schiphol kunnen vervoeren. Uit het onderzoek konden geen eenduidige conclusies getrokken worden, omdat het energiegebruik sterk verschilt tussen verschillende systeemvarianten.

5.3 Stedelijk OLS

De AGV's voor het stedelijk OLS komen technisch overeen met die van het industriële OLS met uitzondering van het formaat van de voertuigen. Het energiegebruik van AGV's voor stedelijke goederendistributie is berekend door Roos et al. (2000). De primaire directe energie-intensiteit bleek tussen de 0,7 en 1,4 MJ/tonkm te liggen, afhankelijk van de beladingsgraad. Het beschouwde OLS heeft een lading van maximaal 3 ton, een voertuigmassa van 1 ton, een diameter van vermoedelijk 3 meter en een snelheid van 10 m/s (36 km/h). Voor een stedelijk OLS betreft het hier dus een relatief grote buisdiameter en een hoge snelheid. Kleinere buisdiameters zullen een hogere energie-intensiteit geven, omdat dan de luchtweerstand groter wordt in verhouding tot de vervoerde massa.⁴⁷

Om de variatie in energie-intensiteit tussen verschillende systemen nader te onderzoeken, zijn de energie-intensiteiten berekend voor verschillende typen en formaten AGV's. Hiervoor is uitgegaan van systeemkenmerken die in haalbaarheidsstudies naar verschillende stedelijke concept-netwerken beschreven zijn. De beschouwde voertuigen zijn drie typen AGV's voor het OLS Leiden, de AGV's voor het OLS Knooppunt Arnhem/Nijmegen (OLS KAN) en de (onbemande) AGV's voor het OLS Tilburg. Deze voertuigconcepten verschillen onderling in met name grootte en snelheid. In tabel 34

⁴⁴ in 38% van de ritten wordt geen lading vervoerd.

⁴⁵ terminalactiviteiten: overslag, intern transport, verwarming, ventilatie, verkoeling en verlichting.

⁴⁶ exclusief het laden van de batterijen.

⁴⁷ Er geldt: $F_l \propto A$ en $m \propto A \cdot l$ (l is de lengte van het voertuig). Als de verhouding tussen de afmetingen van het voertuig (lengte : breedte : hoogte) als constant wordt aangenomen, dan is de relatieve luchtweerstand $F_l / m \propto l / l$ negatief afhankelijk van de diameter van de buisleiding.

zijn de technische kenmerken van de verschillende AGV's weergegeven. Voor ontbrekende voertuigkenmerken zijn aannames gemaakt die hieronder besproken worden.

Tabel 34: Technische kenmerken van AGV's voor verschillende stedelijke OLS-concepten. Het betreft hier veelal aannames die zijn gemaakt voor het bepalen van de systeemcapaciteit. Voor ontbrekende data zijn aannames gemaakt op basis van de waarde voor andere OLS-concepten. Deze zijn tussen haakjes weergegeven.

	OLS Leiden			OLS KAN	OLS Tilburg
	Colli-systeem	Pallet-systeem	Box-systeem		
Massa lading	19 kg	229 kg	4331 kg	(400 kg)	(300 kg)
Frontaal oppervlak	0,152 m ²	1,20 m ²	6,84 m ²	1,25 m ²	2,66 m ²
Versnelling	(2 m/s ²)	(1,5 m/s ²)	(1m/s ²)	(1,5 m/s ²)	(1 m/s ²)
Remvertraging	(2 m/s ²)	(1,5 m/s ²)	(1 m/s ²)	(1,5 m/s ²)	(1 m/s ²)
Kruissnelheid	3,5 m/s	4,5 m/s	6,1 m/s	5,5 m/s	3 m/s
Bron:	Buck <i>et al.</i> , 1999			KvK Centraal Gelderland, 1999	Boerkamps & Cornelissen, 2000

Voor het berekenen van de capaciteit van het OLS Leiden zijn drie typen voertuigen beschouwd: een klein systeem voor het vervoeren van dozen en pakketten (het colli-systeem), een middelgroot systeem voor het vervoeren van pallets, rolcontainers en palletboxen (het pallet-systeem) en een groot systeem voor het vervoeren van grotere laadeenheden (het box-systeem). Van deze systemen wordt het pallet-systeem als de meest waarschijnlijke genoemd. De technische gegevens van de voertuigen zijn opgenomen in tabel 39. Hierbij zijn enkele aannames gemaakt omtrent de versnelling en remvertraging van de voertuigen. De enige bekende waarde is namelijk de maximale remvertraging. De maximale remkracht zal waarschijnlijk alleen in noodsituaties gebruikt worden. Voor de reguliere remvertraging wordt aangenomen dat deze de helft van de maximale remvertraging bedraagt. De versnelling wordt gelijk gesteld aan de remvertraging.

De voertuigen voor het OLS Knooppunt Arnhem/Nijmegen komen qua breedte en hoogte bij benadering overeen met de voertuigen van het pallet-systeem van het OLS Leiden. De AGV's voor Arnhem/Nijmegen zijn echter wel langer en kunnen daardoor een groter volume aan lading transporteren. Omdat de massa van de lading voor de voertuigen niet is gespecificeerd, wordt aangenomen dat de beladingsgraad van het voertuig en het soortelijk van de lading overeenkomen met die van het palletsysteem van het OLS Leiden. Voor de versnelling en remvertraging worden eveneens de waarden overgenomen van het pallet systeem van het OLS Leiden.

De AGV's die voor het OLS Tilburg zijn gespecificeerd, hebben als meest opvallende eigenschap een lagere kruissnelheid dan de andere concepten. Vanwege de lage snelheid wordt ook een lage versnelling aangenomen. Evenals voor het OLS Knooppunt Arnhem/Nijmegen wordt voor het OLS Tilburg geen beladingmassa opgegeven. Daarom wordt op basis van het volume van de te vervoeren ladingdragers en het soortelijk gewicht en beladingsgraad van het OLS Leiden het gemiddeld vervoerde gewicht op 300 kg geschat.

Naast de in tabel 39 weergegeven systeemeigenschappen zijn voor de berekening van de energie-intensiteit nog enkele eigenschappen van de voertuigen nodig, zoals het voertuiggewicht, het rendement van het voertuig en de rol- en luchtweerstandcoëfficiënten. Voor het voertuiggewicht is aangenomen dat deze gelijk is aan een derde deel van het maximale gewicht van de lading, wat overeenkomt met de verhouding die gebruikt is door Roos et al. (2000). Voor het rendement en de weerstandcoëfficiënten wordt gebruik gemaakt van de waarden voor de drie AGV-concepten voor het OLS Schiphol.

Op basis van de in sub-paragraaf beschreven theorie, is de energie-intensiteit van de verschillende typen AGV's berekend voor vier verschillende ritlengten: 100, 200, 1000 en 10.000 meter. Er is hierbij uitgegaan van een constante versnelling in het begin van de rit, waarna een constante snelheid

wordt aangehouden totdat het voertuig aan het einde van de rit afremt. Verder is een compensatiefactor voor het tunnel-rijden aangenomen ten grootte van 3. Over deze factor is echter veel onzekerheid, omdat het afhangt van de gebruikte buisleiding en van het al of niet in colonnes rijden door de AGV's.

Aangenomen is dat het niveauverschil in de tunnel verwaarloosbaar is; de infrastructuur ligt op een constante diepte. Wel significant is de energie die nodig is om de goederen uit de tunnel naar straatniveau te hijsen of te tillen. Dit energiegebruik wordt berekend door de aan de lading toe te voegen zwaarte-energie te delen door het rendement van het hijstoestel, zoals weergegeven in formule 13. De kinetische energie wordt hierbij verwaarloosbaar geacht.

$$\text{Formule 13: } E_z = \frac{m \cdot g \cdot \Delta h}{\eta_h}$$

Hierbij is m de massa van de lading, g de valversnelling die in Nederland $9,81 \text{ m/s}^2$ bedraagt, Δh het hoogteverschil dat overbrugt moet worden en η_h het rendement van het hijstoestel. Het hoogteverschil dat overbrugt moet worden is afhankelijk van de diepteligging van de buisleiding. In het haalbaarheidsonderzoek van het OLS Utrecht (Ettema, 1999) worden diepteliggingen van 275 cm voor een colli-systeem en 790 cm voor een pallet-systeem genoemd. Omdat de bepaling van de diepteligging zeer complex is, wordt uitgegaan van een eenduidige diepteligging van 5 meter voor alle systemen. Voor het hijstoestel wordt een rendement van 70% verondersteld (Van der Heide, 1999). In tabel 35 zijn de resultaten van de berekeningen weergegeven.

Tabel 35: Secundaire energie-intensiteit (MJ/tonkm) van verschillende AGV-concepten voor stedelijke OLS. De spreiding geeft de uiterste waarden aan voor verschillende varianten van gebruikte aandrijf- en geleidingstechnieken.

Ritlengte	OLS Leiden			OLS KAN	OLS Tilburg
	Colli-systeem	Pallet-systeem	Box-systeem		
100 m	0,96 – 1,42	1,06 – 1,57	1,18 – 1,63	1,15 – 1,67	0,85 – 1,24
200 m	0,55 – 1,00	0,61 – 1,10	0,64 – 1,08	0,65 – 1,15	0,46 – 0,84
1000 m	0,22 – 0,67	0,25 – 0,73	0,21 – 0,63	0,24 – 0,73	0,14 – 0,52
10.000 m	0,15 – 0,59	0,16 – 0,65	0,11 – 0,54	0,15 – 0,63	0,07 – 0,44

Van de verschillende systeemvarianten zijn de grenswaarden van het secundaire energiegebruik gemiddeld waarna hieruit de primaire energie-intensiteit is berekend. De resultaten hiervan zijn weergegeven in tabel 36. Hieruit blijkt de energie-intensiteit erg afhankelijk te zijn van de ritlengte. Bij de berekening is uitgegaan van een volkomen ongehinderd transport. Indien een AGV zodanig gehinderd wordt dat deze volkomen tot stilstand komt en weer opnieuw moet versnellen, dan stijgt de primaire energie-intensiteit voor elke hindering per 200 meter met 0,3 MJ/tonkm.

Tabel 36: Berekende gemiddelde energie-intensiteit (MJ/tonkm) van het stedelijk OLS.

Ritlengte	100 m	200 m	1000 m	10.000 m
Secundair	1,04 – 1,51	0,58 – 1,03	0,21 – 0,66	0,13 – 0,57
Primair	2,46 – 3,57	1,37 – 2,45	0,50 – 1,55	0,30 – 1,35

Bijlage 5: Indirect energieverbruik en emissies van de aanleg van buisleidingen

1. Inleiding

Het energieverbruik van de constructie van infrastructuur kan met twee methoden bepaald worden. De eerste methode is de input-output energie analyse (IOEA), waarbij het energieverbruik bepaald wordt op basis van de macro-economische activiteit. Voor elke economische sector wordt het energieverbruik per geldeenheid productie vastgesteld. Vervolgens wordt de productie per sector vastgesteld aan de hand van een input-output matrix, waarin voor de verschillende sectoren de import, export, onderlinge leveranties en finale consumptie worden bepaald. Het energieverbruik van een sector is het product van totale productie van de sector en de bij de sector horende energie-intensiteit. Het energieverbruik van alle sectoren tezamen vormt het landelijke energieverbruik. Het indirecte energieverbruik van een investering kan bepaald worden door het verschil te nemen tussen het landelijke energieverbruik met de investering en het energieverbruik zonder de investering. Vaak volstaat het om het energieverbruik van enkele meest beïnvloede sectoren te nemen, zodat de berekening van het energieverbruik van niet-relevante sectoren achterwege kan worden gelaten. De emissies van een investering kunnen op identieke wijze bepaald worden aan de hand van de emissie-intensiteiten van de sectoren. (Blom, 1999)

Het gebruik van de IOEA heeft enkele nadelen. Een zwak punt is dat het berekende energieverbruik afhankelijk is van kostenramingen van de infrastructuur. In het verleden is gebleken dat investeringen vaak moeilijk ingeschat kunnen worden. Een ander nadeel van de IOEA is dat de energie-intensiteiten van de sectoren slechts een gemiddelde zijn van allerlei uiteenlopende investeringen. Voor een afzonderlijk project kan de energie-intensiteit afwijken van deze gemiddelde waarde. Een grootschalige investering kan zelfs de energie-intensiteit van een sector beïnvloeden. (Roos et al., 2000)

De tweede methode is de proces energie analyse (PEA), waarbij het energieverbruik bepaald wordt door het inventariseren van de verschillende processen die leiden tot het totstandkomen van de infrastructuur. Hierbij worden veelal gestandaardiseerde waarden gebruikt voor de totale energiebehoefte voor winning, bewerking en eventueel transport van de gebruikte materialen. Voor het energieverbruik van de constructie van infrastructuur is het dus noodzakelijk om het energieverbruik van de processen van de werkelijke bouw te inventariseren en hier de gestandaardiseerde waarden voor de gebruikte materialen bij op te tellen. De emissies van een investering kunnen op identieke wijze bepaald worden. (Bos, 1998)

De bepaling van het energieverbruik met de PEA heeft als nadeel dat erg veel kennis en gegevens nodig zijn omtrent de gebruikte materialen. Bovendien kan er onzekerheid zijn over de wijze waarop een project uitgevoerd zal worden. Tenslotte kan de totale energiebehoefte van een materiaal sterk variëren naarmate er voor een materiaal verschillen bestaan in factoren zoals land van herkomst en de mate van hergebruik van het materiaal.

Voor het bepalen van het energieverbruik van de constructie wordt in dit rapport een PEA gebruikt. Om de IOEA toe te passen zijn gegevens over de kosten van de infrastructuur nodig. Deze zijn afhankelijk van verschillende factoren, zoals lokale omstandigheden, de gebruikte aanlegtechniek en technische eigenschappen van het systeem. De kosten zijn hierdoor moeilijk te bepalen. Met de PEA kan beter met de onzekerheden omgegaan worden door voor verschillende mogelijkheden het energieverbruik te berekenen.

Voor de PEA worden de processen van de constructie van de infrastructuur ingedeeld in vijf categorieën. De categorie zijn:

- De graafwerkzaamheden, waarbij de bouwputten en de tunnel worden uitgegraven en de bouwputten achteraf weer worden gedicht.
- De fabricage en/of voorfabricage van de tunnelwand of tunnelwandelementen en van de eventuele hulpwandelementen.
- Het transport van afgegraven grond, benodigde materialen en eventuele tunnelwand- en hulpdamwandelementen.
- De constructie van de tunnelwand en de eventuele hulpdamwand. Hierbij worden de voorgefabriceerde tunnel- en hulpdamwandelementen op hun plaats gezet.
- De bemaling die indien nodig wordt toegepast om de bouwput watervrij te maken en te houden.

De verschillende processen zullen nu achtereenvolgens behandeld worden. Daarna wordt de constructie van de voertuigen behandeld.

2. Graafwerkzaamheden

2.1 Inleiding

Het energiegebruik van de graafwerkzaamheden is afhankelijk van de methode waarop dit gedaan wordt. Over het algemeen kan onderscheid gemaakt worden tussen het graven met conventionele graafmachines, hydraulisch graven bij de caisson methode, het graven met een tunnelboormachine en het verdringen van de grond. Daarbij wordt de afzinkmethode buiten beschouwing gelaten, omdat deze methode slechts op zeer beperkte locaties kan worden toegepast. De voor het graven benodigde energie is ook afhankelijk van de eigenschappen grondsoort waarin gegraven wordt, zoals dichtheid en kleefkracht (Van Walwijk en Achten, 1991). Omdat hier geen gegevens over bekend zijn en er een grote variatie kan optreden tussen de samenstelling van de bodem op verschillende plaatsen, wordt hier geen nader onderscheid in gemaakt.

Voor elk van de graafmethoden wordt in deze paragraaf het energiegebruik per kubieke meter afgegraven grond bepaald. Het totale energiegebruik voor het graven van een tunnel kan dan berekend worden door dit specifieke energiegebruik te vermenigvuldigen met de hoeveelheid af te graven grond. Deze hoeveelheid is afhankelijk van de afmetingen van de tunnel, de diepteligging van de tunnel en eventuele marges die rondom de tunnel moeten worden afgegraven.

2.2 Graafmachines

Het energiegebruik van graafwerkzaamheden door graafmachines is bepaald aan de hand van twee praktijktesten gepubliceerd in het tijdschrift "Bouwmachines" (De Rijk en Klomps, 1987; Klomps en De Rijk, 1988). Bij de eerste test werden door dertien laadschoppen van verschillende merken en typen drie opdrachten uitgevoerd waarbij de tijd, de verzette hoeveelheid grond en het energiegebruik bepaald werden. De drie opdrachten betroffen het laden van grond in een vrachtwagen, een 'load and carry'-proef (het afgraven en over vijftig meter verplaatsen van grond) en een 'garage-inrit'-proef (het graven van een aflopende kuil met een diepte tot 2 meter). (De Rijk en Klomps, 1987)

Bij de tweede test werden door tien hydraulische graafmachines twee opdrachten uitgevoerd, waarbij de tijd, de verzette hoeveelheid grond en het energiegebruik bepaald werden. De opdrachten waren het laden van grond in een vrachtwagen en het graven van een 1,5 meter diepe sleuf. (Klomps en De Rijk, 1988) Voor elk van de opdrachten van beide tests is het energiegebruik per kubieke meter afgegraven grond bepaald. Hierbij is waar nodig gebruik gemaakt van een dichtheid van de grond van 2000 ton/m³.

In tabel 1 zijn het ongewogen gemiddelde, het maximum en het minimum van de berekende energie-intensiteiten weergegeven. Hieruit blijkt dat er een vrij grote variatie bestaat in energiegebruik tussen de verschillende activiteiten en tussen verschillende merken. Voor de totale energie-intensiteit van de

graafwerkzaamheden wordt ervan uitgegaan dat er per m³ verwerkte grond twee afzonderlijke handelingen verricht worden, namelijk het afgraven van de grond en het in een vrachtwagen van de grond. Voor de laadschoppen wordt aangenomen dat ‘load and carry’ en garage-inrit graven een even groot aandeel hebben in de graafwerkzaamheden. Verder wordt uitgegaan van het ongewogen gemiddelde van de verschillende merken graafmachines. De energie-intensiteiten van laadschoppen en hydraulische graafmachines worden gewogen gemiddeld volgens de verhouding 34% : 66%. Deze weging is gebaseerd op de verhouding van het totale Nederlandse parkomvang maal de jaarlijkse inzet (in uren) zoals voor het jaar 1990 gegeven wordt door Bouwman (1996). De energie-intensiteit voor het afgraven van de grond bedraagt dan 3,5 MJ/m³ en voor het laden van de vrachtauto 3,3 MJ/m³, wat gezamenlijk neerkomt op 6,7 MJ/m³.

Tabel 1: Het ongewogen gemiddelde, minimum en maximum van de energie-intensiteit (MJ/m³) van verschillende soorten graafwerkzaamheden. Bron: op basis van De Rijk & Klomps, 1987 en Klomps & De Rijk, 1988.

Laadschoppen			
	Gemiddeld	Minimum	Maximum
Vrachtwagen laden	3,1	1,5	5,9
‘Load and carry’	4,9	2,3	7,4
Garage-inrit graven	6,7	4,0	10,9
Hydraulische graafmachines			
	Gemiddeld	Minimum	Maximum
Vrachtwagen laden	3,3	2,3	4,6
Sleufgraven	2,3	1,7	3,1

De emissies van graafmachines per kubieke meter afgegraven grond zijn aan de hand van de berekende energie-intensiteit bepaald uit de emissiefactoren per kg brandstof die gegeven worden door Bouwman (1996). De resultaten hiervan zijn weergegeven in tabel 2.

Tabel 2: Emissies door conventionele graafmachines per kubieke meter afgegraven grond voor 1990. Bron: op basis van Bouwman, 1996, De Rijk & Klomps, 1987 en Klomps & De Rijk, 1988.

CO ₂ (kg/m ³)	0,49
NO _x (g/m ³)	7,8
SO ₂ (g/m ³)	0,53
VOS (g/m ³)	1,6
PM ₁₀ (g/m ³)	0,2

Het is onbekend in hoeverre het energiegebruik van de graafmachines tijdens de uitgevoerde tests representatief is voor het energiegebruik van de graafmachines tijdens graafwerkzaamheden in de praktijk. Naar verwachting zal het energiegebruik in de praktijk hoger liggen dan de waarden uit tabel 1, omdat bij deze waarden geen rekening is gehouden met onder andere het transport van de graafmachines van en naar de bouwput. Nader onderzoek is nodig om te achterhalen in hoeverre de hier bepaalde energie-intensiteit overeenkomt met de werkelijkheid.

2.3 Tunnelboormachines

2.3.1 Macro-tunneling

Het secundaire energiegebruik van een macro-tunnelboormachine is door Lensink en Moll (2000) berekend voor een drietal recent geboorde tunnels (zie tabel 3). Aan de hand van de diameter en de lengte van deze tunnels is het energiegebruik per m³ afgegraven grond berekend. De resultaten hiervan zijn weergegeven in tabel 3. Er blijken grote verschillen te bestaan tussen het energiegebruik van de relatief kleine 2e Heinenoordtunnel en de grotere Botlek- en Westerscheldetunnels. Mogelijke

verklaringen hiervoor zijn schaalvoordelen bij grotere diameters, verschillen in grondsoort en verschillen in de gebruikte boortechneik.

Tabel 3: Het energieverbruik van tunnelboormachines voor drie verschillende tunnels. Secundair = elektrische energie.

Tunnels	Totaal secundair energieverbruik (TJ)	Diameter (m)	Lengte enkele buis* (m)	Volume (km ³)	Secundair energieverbruik per volume grond (MJ/m ³)	Primair energieverbruik per volume grond (MJ/m ³)
2e Heinenoord	16,4	8,3	1350	0,073	225	598
Botlek	35,3	9,45	1835	0,257	137	364
Westerschelde	145	10,10	6600	1,06	137	364

* = De Botlektunnel en de Westerscheldetunnel hebben een dubbele buisleiding.

Bron: Lensink & Moll, 2000; www.cob.nl/tht/, 31-7-2001; www.betuwroute.nl, 31-7-2001.

Voor de energievoorziening van tunnelboormachines wordt vaak gebruik gemaakt van dieselgeneratoren (Lensink & Moll, 2000). De emissiefactoren van stationaire motoren op vloeibare brandstoffen zijn berekend in § 2.3 van bijlage 4. In tabel 4 zijn deze emissiefactoren omgerekend naar een emissie per kubieke meter afgegraven grond. Hierbij is gebruik gemaakt van een primair energieverbruik van 364 MJ/m³.

Tabel 4: Emissies door macro-tunnelboormachines per kubieke meter afgegraven grond. Bron: op basis van Lensink & Moll, 2000.

CO ₂ (kg/m ³)	25
NO _x (g/m ³)	258
SO ₂ (g/m ³)	32
VOS (g/m ³)	6,8
PM ₁₀ (g/m ³)	2,4

2.3.2 Micro-tunneling

In Groot (2000) wordt een 600 meter lange micro-boortunnel in kleigrond op Schiphol met een diameter van 2,16 meter beschouwd. Hierbij gebruikte de dieselgenerator per meter gegraven tunnel 1,3 GJ secundaire energie, wat neerkomt op een primaire energie-intensiteit van 376 MJ per kubieke meter afgegraven grond. Dit is inclusief logistiek op de werkplek, à 0,3 GJ secundair per meter tunnel. Dit deel van het energieverbruik wordt lineair afhankelijk van de diameter geacht; van het overige deel wordt verwacht dat het evenredig is met de diameter in het kwadraat.

Op identieke wijze als voor de macro-tunnelboormachine zijn voor de hierboven vermelde micro-tunnelboormachine met een diameter van 2,16 meter de emissies per kubieke meter afgegraven grondberekend. De resultaten hiervan zijn weergegeven in tabel 5.

Tabel 5: Emissies van een micro-tunnelboormachine met diameter 2,16 meter per kubieke meter afgegraven grond. Bron: op basis van Groot, 2000.

CO ₂ (kg/m ³)	26
NO _x (g/m ³)	266
SO ₂ (g/m ³)	33
VOS (g/m ³)	7,0
PM ₁₀ (g/m ³)	2,5

3. Fabricatie/prefabricatie tunnel- en hulpwandelementen

Het energiegebruik van de (pre)fabricage van de tunnelwand en hulpdamwand wordt bepaald aan de hand van gestandaardiseerde waarden voor het energiegebruik van de processen die de gebruikte materialen hebben doorlopen. Voor het totale energiegebruik voor de fabricage van tunnel- en hulpdamwanden moeten deze energie-intensiteiten per materiaal vermenigvuldigd worden met de dichtheid en het gebruikte volume. Tabel 6 geeft een overzicht van de energie-intensiteiten en de dichtheden van een aantal voor de constructie gebruikte materialen. In tabel 7 zijn de emissiefactoren van beton en staal weergegeven.

Tabel 6: Energie-intensiteiten (Bron: Bos, 1998) en dichtheden (Bron: Verkerk et al., 1996) van enkele voor de constructie gebruikte materialen.

Materiaal	Energie-intensiteit (MJ/kg)	Dichtheid (kg/m ³)	Transport
Ballast materiaal	0,25	2000–3000	Inclusief transport naar een binnenvaarthaven
Beton	2,5	2000	
Staal (in blokken)	23,4	7800	Exclusief transport vanaf Hoogovens
Staal (in platen)	30,2	7800	Exclusief transport vanaf Hoogovens
Zand	0,1	1600	Inclusief transport naar een binnenvaarthaven

Tabel 7: Emissiefactoren voor een proces emissie analyse. Bron: Bos, 1998.

Materiaal	CO ₂ (g/kg)	NO _x (g/kg)	SO ₂ (g/kg)	VOS (g/kg)	PM ₁₀ (g/kg)
Beton	480	1,61	0,88	0,58	0,022
Staal	1233	8,29	8,82	0,73	16,9

De volumes van de voor de tunnelwand gebruikte materialen wordt bepaald door de afmetingen van de tunnel, de dikte van de wand en de verhouding in volumes van gebruikte materialen. In tabel 8 is de wanddikte van enkele tunnels en concepten voor tunnels weergegeven in combinatie met hun inwendige afmetingen. Over het algemeen blijkt de tunnelwand dikker te zijn naarmate de tunnel een grotere doorsnede heeft. Bij verdere berekeningen wordt voor zowel de (rechthoekige) openbouwputtunnels als de ronde boortunnel de dikte van de tunnelwand rechtevenredig verondersteld met de doorsnede volgens de verhouding doorsnede : dikte als 1 : 0,08.

Voor de tunnelwanden wordt meestal gewapend beton gebruikt. De hoeveelheid staal die hierbij gebruikt wordt ligt rond de 100 kg/m³ (Lensink en Moll, 2000). Ook tunnelwanden van staal of kunststof behoren tot de mogelijkheden. De volume van het voor de hulpdamwand gebruikte staal wordt bepaald door de dikte en de hoogte van de wand. Hiervoor wordt aangenomen dat de dikte 7 mm is en de hoogte gelijk is aan 1½ maal de diepte van de af te graven tunnelbak.

Tabel 8: De wanddikte van tunnels en concepten voor tunnels, in combinatie met hun inwendige afmetingen.

Ronde tunnels				
Tunnel	Binnendiameter (m)	Wanddikte (cm)	Bron	
Botlekspoortunnel	8,65	40	www.betuweroute.nl, 31-7-2001	
HSL zuid	13,3	80	www.hslzuid.nl, 31-7-2001	
OLS Utrecht Colli	1,15	5	Ettema 1999	
OLS Utrecht Pallet	2,20	35	Ettema 1999	
OLS KAN	2,00	25	KvK Centraal Gelderland, 1999	
OLS Schiphol	5,00	30	COB, 2000	
Westerscheldetunnel	10,10	40	Lensink & Moll, 2000	
Rechthoekige tunnels				
Tunnel	Hoogte (m)	Breedte (m)	Wanddikte (cm)	Bron
OLS Schiphol	3,75	4,00	45	COB, 2000
OLS Tilburg	2,15	4,00	50	Boerkamp & Cornelissen, 2000
OLS Tilburg	2,10	3,50	40	Boerkamp & Cornelissen, 2000

4. Transportprocessen

Bij de bouw van een tunnel vindt transport plaats van constructiematerialen naar de bouwplaats en van vrijgekomen grond vanaf de bouwplaats. Het transport van de constructiematerialen is voor een deel vaak al in de energie-intensiteit van het materiaal meegenomen. Hiervoor moet dus alleen nog het energiegebruik van het natransport berekend worden. De afstand waarover de materialen vervoerd worden is afhankelijk van de locatie van de tunnel en bedraagt rond de 100 km (Groot, 2000).

De bij de bouw vrijgekomen grond die niet in het project kan worden gebruikt, moet naar een andere plaats worden vervoerd om daar te worden gebruikt. Het volume van de hoeveelheid af te voeren grond is gelijk aan het volume dat de tunnel ondergronds in beslag neemt. Het af te voeren gewicht volgt uit het volume en uit de dichtheid van de grond, die afhankelijk is van de grondsoort.

Er wordt aangenomen dat het transport van en naar de bouwput plaatsvindt met behulp van vrachtauto's. Voor kleinere bouwprojecten lijkt dit een plausibele aanname. Bij grotere bouwprojecten vindt het transport ook wel via een spoorweg plaats, zoals bijvoorbeeld bij de bouw van de Westerscheldetunnel (www.westerscheldetunnel.nl, 31-7-2001). Indien vrachtauto's met een maximaal gecombineerd gewicht van voertuig en lading (Gross Vehicle Weight) van meer 20 ton gebruikt worden, dan bedraagt de energie-intensiteit van het transport circa 1,2 MJ/tonkm.

5. Evaluatie

Uit een tussentijdse berekening van het energiegebruik van het bouwen van een tunnel volgens de open-bouwput methode bleek het energiegebruik van het graven van een bouwput met graafmachines verwaarloosbaar klein te zijn ten opzichte van het energiegebruik van de productie en het transport van de tunnel- en hulpdamwandelementen en van het transport van de overtollige grond. Omdat verwacht wordt dat het energiegebruik van de bemaling van de bouwput en de constructie van de tunnelwand en de hulpdamwand van een even grote orde is als het energiegebruik van de graafmachines, worden deze activiteiten verder buiten beschouwing gelaten. In tegenstelling tot het graven met conventionele graafmachines is bij het gebruik van een tunnelboormachine het energiegebruik wel van belang.