

RIVM rapport 773002 021/2002

**Het spoor in model: energiegebruik en emissies door het
railvervoer**

Beschrijving en toepassing van het model PRORIN

A. Gijsen, R.M.M. van den Brink

Dit onderzoek werd verricht in opdracht en ten laste van MAP-Milieu, in het kader van project 773002, doelgroepproject Verkeer en Vervoer, mijlpaal 773002/01/CC

Abstract

Specific energy use by trains is generally based on aggregated data on use of energy and on transport volume (top-down method). However, to determine specific energy use for new rail concepts, or to assess the effects of change on such aspects as train speed, a bottom-up method is essential. This method uses physical, operational and logistical train characteristics.

Here the development and application of PRORIN is described: PRORIN is a bottom-up model for assessing energy use by and emissions (CO₂, SO₂ and NO_x) from both passenger and freight rail transport. The model calculates traction energy using equations for the intercorrelation of physical, operational and logistical characteristics, on the one hand, and traction-energy use on the other. Subsequently, the total fossil energy use was determined by means of a well-to-wheel chain analysis. The energy losses during the production of electricity and diesel, and the efficiencies of the electric and diesel engines, was also taken into account for this well-to-wheel analysis. Furthermore, consideration had to be taken of the extraction, transport and, in some cases, processing prior to use of fuels by electricity generating plants and refineries.

The physical, operational and logistical characteristics of rail transport were obtained both from the literature and from actual measurements. Electric train emissions were calculated using the results of a separate research project focusing on emissions from electricity plants.

PRORIN was used to assess energy use by and emissions from passenger and freight rail transport in 1998. The bottom-up method (model) yielded results for the total energy use by passenger rail transport, which appears to correspond fairly well with the results reported by Dutch Rail (measured). However, large differences were found for freight transport by rail. These differences are apparently due to train-shunting, which is not yet modelled and/or underestimation of the number of empty railway carriages.

Voorwoord

Voor u ligt het resultaat van 9 maanden onderzoek bij het de doelgroep Verkeer en Vervoer van het Laboratorium voor Afvalstoffen en Emissies van het RIVM te Bilthoven. Dit afstudeerverslag beschrijft onderzoek dat heeft geresulteerd in een berekeningsmethode voor het bepalen van de milieubelasting van railvervoer. Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van een afstudeeronderzoek van de studie Natuurwetenschappen en Bedrijf & Bestuur aan de Universiteit Utrecht. Alexander werd tijdens zijn stage- en afstudeeronderzoek vanuit het RIVM begeleidt door Ir Robert van den Brink en vanuit de Universiteit Utrecht door Prof. Dr Bert van Wee, die tevens bij het RIVM werkzaam is.

Het RIVM dankt mede namens Alexander Gijsen Dhr. G.W. Fiechter (NS), Dhr. P. Lukasewicz (Royal Institute of Technology, Stockholm), B. Klimbie (CE, Delft), J. Spakman (RIVM), Dhr. Wiersma (TU Delft), Dhr. W. Wolf-Dieter (Siemens AG) voor hun waardevolle kennisbijdrage aan dit onderzoek.

Alexander Gijsen

Robert van den Brink

Bilthoven, 8 november 2001

Inhoud

SAMENVATTING.....	9
1. ALGEMENE INLEIDING	11
1.1 AANLEIDING VAN HET ONDERZOEK	11
1.2 DOEL- EN PROBLEEMSTELLING.....	12
1.3 BEGRENZINGEN VAN HET ONDERZOEK	13
1.4 LEESWIJZER.....	13
2. MODELBESCHRIJVING.....	15
2.1 INLEIDING.....	15
2.2 ENERGIE VOOR DE VOORTBEWEGING.....	16
2.2.1 <i>Het berekenen van de aandrijfenergie</i>	17
2.2.2 <i>Het berekenen van het totaalrendement</i>	18
2.3 ENERGIE VOOR DE KLIMAATBEHEERSING	19
2.3.1 <i>Airconditioning</i>	19
2.3.2 <i>Ventilatie</i>	19
2.3.3 <i>Verwarming</i>	20
3. BEREKENING VAN AANDRIJFENERGIE.....	21
3.1 INLEIDING.....	21
3.2 KRACHTENVERGELIJKINGEN	22
3.2.1 <i>Weerstandskrachten</i>	22
3.2.2 <i>Aandrijfkracht</i>	25
3.2.3 <i>Versnellingsweerstand</i>	27
3.3 BEWEGINGSVERGELIJKINGEN	27
3.3.1 <i>Versnellen</i>	28
3.3.2 <i>Uitrijden</i>	29
3.4 ENERGIEVERGELIJKINGEN	30
3.5 BEREKENEN VAN DE RENDEMENTEN	31
3.5.1 <i>Elektrische tractie</i>	32
3.5.2 <i>Diesel-elektrische tractie</i>	36
3.5.3 <i>Diesel-hydraulische tractie</i>	37
3.6 ENERGIE VOOR DE VERWARMING	38
4. MILIEUBELASTING VAN ELEKTRICITEITSPRODUCTIE	39
4.1 INLEIDING.....	39
4.2 METHODE VOOR DE BEREKENINGEN	40
4.3 RESULTATEN BEREKENINGEN.....	41
4.3.1 <i>Emissiefactoren inclusief winning en transport</i>	41
5. DE MILIEUBELASTING VAN DIESELMOTOREN	43
5.1 INLEIDING.....	43
5.2 EMISSIEFACTOREN VAN DE DIESELMOTOR.....	43
5.2.1 <i>Inleiding</i>	43
5.2.2 <i>Emissiefactor van CO₂</i>	44
5.2.3 <i>Emissiefactor van NO_x</i>	44
5.2.4 <i>Emissiefactor van SO₂</i>	46
5.3 REDUCTIE VAN EMISSIES	47
5.3.1 <i>CO₂-reductie</i>	47
5.3.2 <i>NO_x-reductie</i>	47
5.3.3 <i>SO₂-reductie</i>	47

5.4	DELVING, RAFFINAGE EN DISTRIBUTIE VAN DIESEL	48
5.4.1	<i>Winning van de ruwe olie</i>	48
5.4.2	<i>Transport van de ruwe olie</i>	48
5.4.3	<i>Raffinage van de ruwe olie tot dieselolie</i>	48
5.4.4	<i>Transport van dieselolie</i>	49
6.	MILIEUBELASTING VAN HET RAILVERVOER IN 1998.....	51
6.1	INLEIDING.....	51
6.2	INVOERFACTOREN REIZIGERSVERVOER	51
6.2.1	<i>Inleiding</i>	51
6.2.2	<i>Technische factoren</i>	53
6.2.3	<i>Operationele factoren</i>	53
6.3	RESULTATEN REIZIGERSVERVOER	59
6.3.1	<i>Energiegebruik</i>	59
6.3.2	<i>Emissies</i>	60
6.3.3	<i>Vergelijking met NS-gegevens</i>	60
6.3.4	<i>Vergelijking met de literatuur</i>	61
6.4	INVOER VOOR DE FACTOREN VAN GOEDERENVERVOER.....	62
6.4.1	<i>Inleiding</i>	62
6.4.2	<i>Technische factoren goederenvervoer</i>	62
6.4.3	<i>Operationele factoren</i>	63
6.5	RESULTATEN GOEDERENVERVOER	65
6.5.1	<i>Energiegebruik</i>	65
6.5.2	<i>Emissies</i>	66
6.5.3	<i>Vergelijking andere rapporten</i>	66
6.5.4	<i>Variatie invoergegevens goederenvervoer</i>	67
7.	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN VOOR VERDER ONDERZOEK	69
7.1	CONCLUSIES	69
7.2	AANBEVELINGEN VOOR VERDER ONDERZOEK	69
	LITERATUUR.....	71
	BIJLAGEN.....	75

Samenvatting

Het specifieke energiegebruik door treinen wordt in het algemeen berekend op basis van geaggregeerde gegevens over energiegebruik en vervoersprestatie (top-down methode). Om het energiegebruik (en de emissies) van nieuwe railconcepten te kunnen berekenen of om het effect van veranderingen op het spoor te kunnen berekenen is een top-down methode echter niet geschikt maar moet een bottom-up methode worden gebruikt. Een bottom-up methode berekent het energiegebruik van treinen uitgaande van de fysische, operationele en logistieke kenmerken. Dit rapport beschrijft de ontwikkeling en toepassing van een bottom-up model (PRORIN) voor de berekening van het energiegebruik en de emissies (CO₂, SO₂ en NO_x) door het personen- en goederenvervoer per spoor. Zowel elektrische treinen als dieseltreinen komen aan bod.

Het model berekent allereerst de aan de treinwielen benodigde aandrijfenergie met behulp van formules voor het verband tussen de fysische, operationele en logistieke kenmerken enerzijds en het energiegebruik aan de wielen anderzijds. De berekende aandrijfenergie is vervolgens omgerekend tot het 'well-to-wheel' energiegebruik. Hierbij is rekening gehouden met de energieverliezen tijdens de productie en distributie van elektriciteit of dieselolie en met de rendementen van elektromotoren of dieselmotoren. Daarnaast is rekening gehouden met het feit dat de brandstoffen die elektriciteitscentrales en raffinaderijen gebruiken eerst moeten worden gewonnen, getransporteerd en in sommige gevallen bewerkt.

De verschillende treinkenmerken zijn geschat op basis van de literatuur of eigen metingen. Bij de berekening van de emissies door elektrische treinen is gebruik gemaakt van de resultaten van een afzonderlijk onderzoek gericht op de emissies door elektriciteitsopwekking. Met PRORIN is het energiegebruik van het personenvervoer per spoor in 1998 berekend en vergeleken met de door de Nederlandse Spoorwegen (NS) opgegeven waarde. Het blijkt dat de berekende waarde goed overeenkomt met de NS-waarde. Bij het goederenvervoer zijn er echter grote verschillen gevonden. De redenen hiervoor moeten vermoedelijk worden gezocht in het feit dat het rangeren van treinen niet gemodelleerd is en/of in een onderschatting van het rijden met lege wagons. Het verdient aanbeveling nader onderzoek uit te voeren naar de oorzaken van het verschil tussen beide methodes.

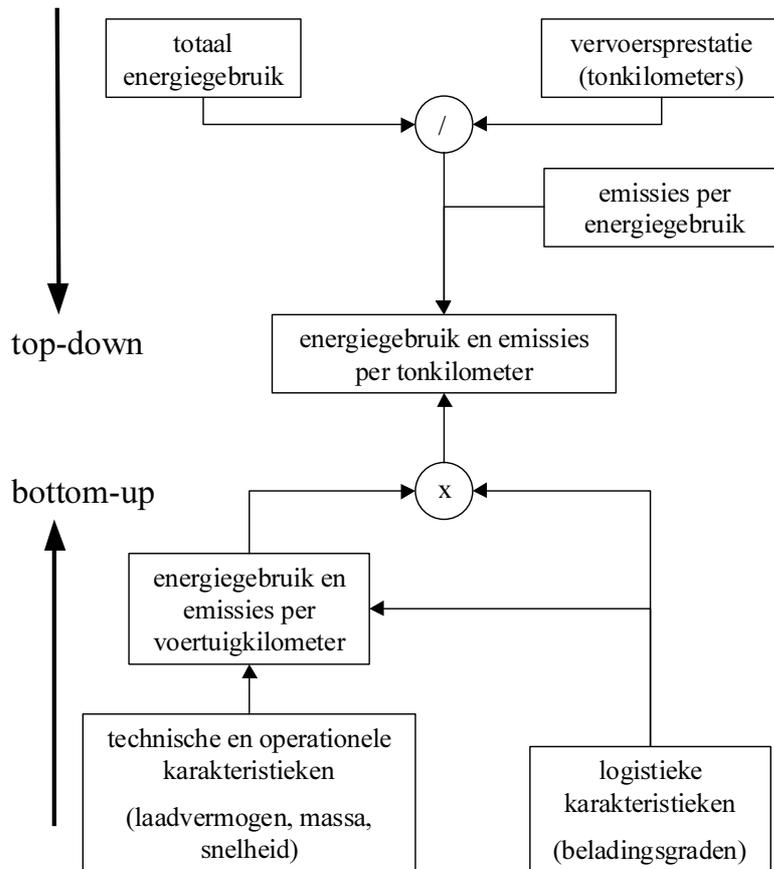
1. Algemene inleiding

1.1 Aanleiding van het onderzoek

Het RIVM heeft enkele jaren geleden een onderzoek uitgevoerd naar het specifieke energiegebruik en emissies van verschillende personen- en goederenvervoerswijzen (Van den Brink en Van Wee, 1997). Voor het personen- en goederenvervoer per spoor is dit gedaan aan de hand van een top-down methodiek. Bij een top-down berekeningswijze wordt er uitgegaan van statistische jaargegevens over de totale vervoerprestatie door het railvervoer en van het totale energiegebruik door het railvervoer (zie Figuur 1.1). Door deze gegevens op elkaar te delen wordt een gemiddeld energiegebruik per vervoerprestatie gevonden. Vervolgens worden emissies per vervoersprestatie berekend door het specifieke energiegebruik te vermenigvuldigen met emissies per eenheid energie (g/MJ). Op deze manier wordt, bij een goede kwaliteit en goede vergelijkbaarheid van de statistische gegevens, een goede schatting van het gemiddelde energiegebruik en emissie per vervoerprestatie verkregen. Voordelen van deze top-down methodiek zijn dat het snel en goedkoop is, dat er weinig invoergegevens nodig zijn en dat op deze manier ook onbekende aspecten zoals bijvoorbeeld rangers worden meegenomen. Nadeel van deze methode is echter dat veel factoren die het energiegebruik beïnvloeden impliciet zijn en niet gekwantificeerd kunnen worden. Ook is het niet mogelijk het effect te berekenen van veranderingen in de determinanten die het energiegebruik en emissies per vervoerprestatie kunnen bepalen (bijv. massa en snelheid). Daarnaast is het met een top-down methodiek moeilijk een vergelijking te maken tussen verschillende vervoerswijzen, aangezien de aard van de te vervoeren goederen per vervoerswijze in het algemeen verschilt. In het algemeen geldt namelijk: hoe hoger de benutting van het laadvermogen hoe lager ceteris paribus het energiegebruik per vervoersprestatie. Het railvervoer vervoert veelal zware bulkgoederen terwijl het wegvervoer in het algemeen lichtere stukgoederen vervoert. Hierdoor is de gemiddelde benutting van het laadvermogen in het railvervoer sowieso al hoger dan die in het wegvervoer.

Een andere methodiek om het energiegebruik per vervoersprestatie te schatten is een bottom-up methodiek. In deze methodiek wordt uitgegaan van het energiegebruik per treinkilometer van afzonderlijke trein(typ)en. Dit kan worden berekend met behulp van formules uit de voertuigdynamica waarbij kennis vereist is over technische en operationele kenmerken van treinen. De emissies per treinkilometer worden berekend door gebruikmaking van energiegerelateerde emissiefactoren. Vervolgens worden energiegebruik en emissies per treinkilometer gedeeld door de gemiddelde belading of het gemiddelde aantal reizigers. Om uitspraken te kunnen doen over het gemiddelde energiegebruik per vervoersprestatie van het railvervoer moeten de trein(typ)en worden geaggregeerd middels het aandeel in de totale vervoersprestatie (zie Figuur 1.1). Een nadeel van een bottom-up methode is dat veel invoergegevens nodig zijn waarvoor niet altijd eenduidige en betrouwbare bronnen bestaan. Hierdoor kennen de uitkomsten een relatief grote mate van onzekerheid.

Voor een uitgebreide discussie over de voor- en nadelen van enerzijds de top-down methodiek en anderzijds de bottom-up methodiek wordt verwezen naar Janse *et al.* (2000).



Figuur 1.1: Bottom-up versus top-down methode

1.2 Doel- en probleemstelling

Dit onderzoek heeft tot doel het ontwikkelen van een bottom-up berekeningsmethodiek voor het schatten van het energiegebruik en emissies van railvervoer. Deze doelstelling vertaalt zich in de volgende probleemstelling:

Hoe kan het energiegebruik en de daarmee gepaard gaande emissies veroorzaakt door railvervoer via een bottom-up methode worden berekend?

Deze probleemstelling kan in een aantal concrete onderzoeksvragen worden geformuleerd:

1. Wat bepaalt het energiegebruik en de emissies van een treintype?
2. Hoe kunnen energiegebruik en emissies van een treintype worden berekend?
3. Zijn alle noodzakelijke invoergegevens beschikbaar?
4. Wat is de samenstelling naar treintypen van de treinkilometers in Nederland?
5. Komt het bottom-up berekende energiegebruik door het personen- en goederenvervoer per spoor overeen met de gegevens van de NS?

Het onderzoek is als volgt uitgevoerd: Als eerste is een conceptueel model ontwikkeld om onderzoeksvraag 1 te beantwoorden. Met dit conceptuele model is vervolgens een rekenmodel ontwikkeld getiteld PRORIN (PROgnosemodel voor energiegebruik en emissies van Railvervoer In Nederland-PRORIN¹). Daarna is data verzameld voor de invoer van het rekenmodel en als laatste is PRORIN toegepast om het totale energiegebruik en emissies door het personen- en goederenvervoer per spoor op Nederlands grondgebied in 1998 te berekenen.

1.3 Begrenzings van het onderzoek

De milieuproblemen die in het kader van dit onderzoek worden onderzocht zijn het energiegebruik (uitputting van fossiele brandstoffen) en de emissies van CO₂, NO_x en SO₂. Railvervoer zorgt (uiteeraard) voor meer milieuproblemen dan alleen bovengenoemde. Er is voor deze emissies gekozen omdat deze als de belangrijkste emissies worden gezien van elektriciteitsproductie. De emissies van fijn stof, CO en VOS door elektriciteitsproductie zijn zeer gering. Dieseltreinen emitteren daarentegen wel significante hoeveelheden fijn stof. Echter, het aandeel van dieseltreinen in het totale railvervoer is beperkt. Bovendien speelt fijn stof met name binnenstedelijk een rol waar nauwelijks dieseltreinen rijden. Daarom wordt fijn stof in dit onderzoek niet meegenomen.

Voor dit onderzoek worden alleen het energiegebruik en de emissies van het feitelijke gebruik van railvervoer onderzocht. Het energiegebruik en de emissies die gepaard gaan met de productie, onderhoud en sloop van infrastructuur en voertuigen (de zogenaamde indirecte milieu-effecten) worden niet in beschouwing genomen. Hieruit mag niet de conclusie getrokken worden dat deze indirecte effecten niet belangrijk zijn; een studie van Bos (1998) wijst uit dat het indirecte energiegebruik en de indirecte emissies door railvervoer in dezelfde ordegrootte liggen als het directe energiegebruik en de directe emissies.

Verder wordt alleen ingegaan op treintypen die in 1998 in Nederland werden gebruikt.

1.4 Leeswijzer

Aan de hand van een literatuurstudie is een methode ontwikkeld om het energiegebruik van een trein bepalen. Deze methode is uitgewerkt in hoofdstuk 2 en heeft geresulteerd in een conceptuele model. In hoofdstuk 3 worden de rekenregels van het model PRORIN afgeleid en wordt beschreven op welke wijze de invoergegevens zijn bepaald. Hoofdstukken 2 en 3 geven een antwoord op de eerste twee onderzoeksvragen.

Bij de beantwoording van onderzoeksvraag 3 ('Zijn alle noodzakelijke invoergegevens beschikbaar?') bleek dat er geen recente informatie kon worden gevonden over de emissies

¹ Dit model prognosticeert alleen de milieubelasting van railvervoer en maakt geen prognoses over de volumeontwikkelingen.

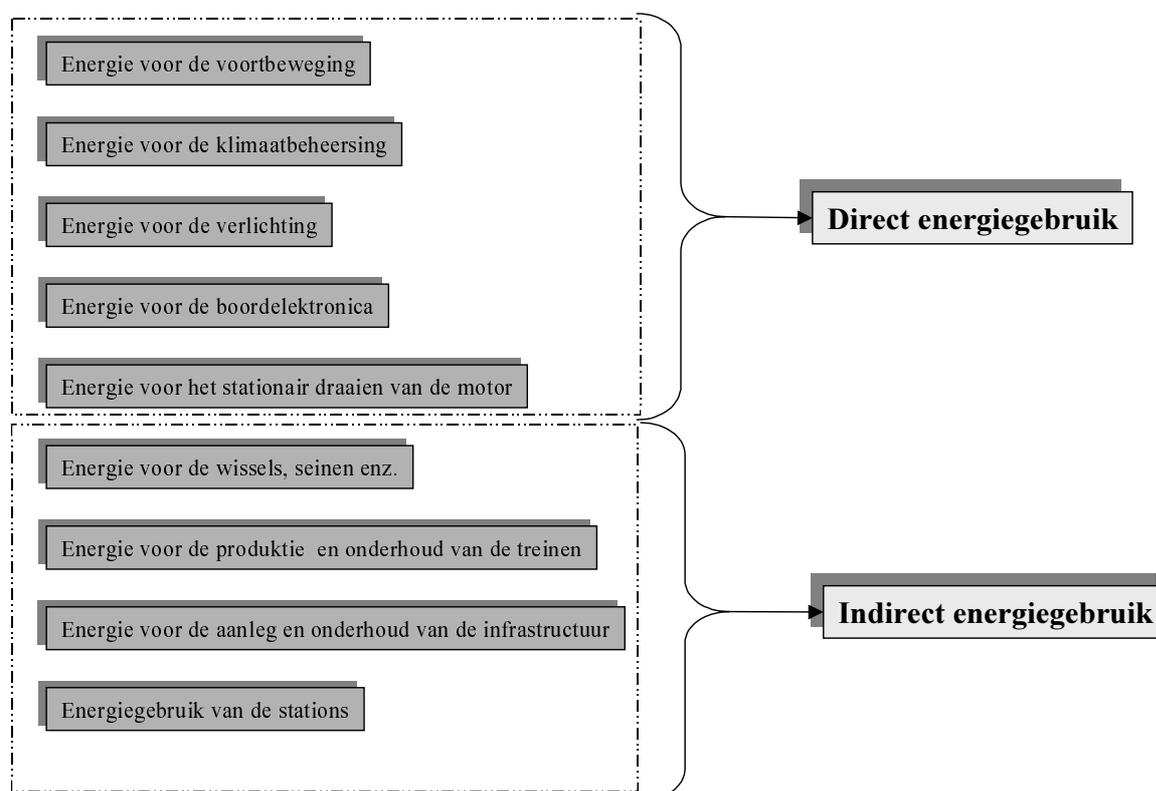
ten gevolge van elektriciteitsproductie in Nederland. Om deze reden is besloten om hiernaar een apart onderzoek uit te voeren. Hoofdstuk 4 geeft een samenvatting van dit onderzoek. Het volledige onderzoek wordt beschreven in Gijsen en Spakman (2001). Hoofdstuk 5 behandelt de emissies door dieseltreinen. In hoofdstuk 6 wordt PRORIN toegepast om het energiegebruik en de emissies door het totale railvervoer in Nederland in 1998 te schatten. Personen- en goederenvervoer komen afzonderlijk aan bod.

2. Modelbeschrijving

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft het voor dit onderzoek ontwikkelde bottom-up rekenmodel PRORIN. Met PRORIN kan de milieubelasting (energiegebruik en de emissies van CO₂, NO_x en SO₂) van railvervoer worden bepaald. De emissies van CO₂, NO_x en SO₂ veroorzaakt door elektrisch railvervoer hangen direct samen met het energiegebruik van de trein. Bij dieseltreinen is naast het energiegebruik ook de motorbelasting van belang (zie hoofdstuk 5). Om die reden wordt eerst het energiegebruik berekend en vervolgens de daaraan gekoppelde emissies.

Het energiegebruik van railvervoer is voor dit onderzoek onderverdeeld in de volgende componenten (Figuur 2.1):



Figuur 2.1: Componenten van het energiegebruik van railvervoer

Het energiegebruik dat afhankelijk is van het wel of niet rijden van de trein wordt het *directe* energiegebruik genoemd. *Indirect* energiegebruik is het energiegebruik dat niet direct gekoppeld is aan het gebruik van de trein. Het indirecte energiegebruik wordt in PRORIN niet meegenomen. Voor literatuur over het indirecte energiegebruik van railvervoer wordt verwezen naar Bos (1998).

Van het directe energiegebruik wordt in PRORIN alleen het energiegebruik voor de voortbeweging en het energiegebruik voor de klimaatbeheersing berekend. Dit omdat de hoeveelheid energie benodigd voor het stationair laten draaien van de dieselmotor (Andersson, 1994), de verlichting en de boordelektronica¹ verwaarloosbaar zijn ten opzichte van de hoeveelheden energie nodig voor de voortbeweging en de klimaatbeheersing (< 5%).

In paragraaf 2.2 wordt de methodiek voor het berekenen van het energiegebruik door de voortbeweging beschreven. Paragraaf 2.3 gaat in op het energiegebruik door de klimaatbeheersing.

2.2 Energie voor de voortbeweging

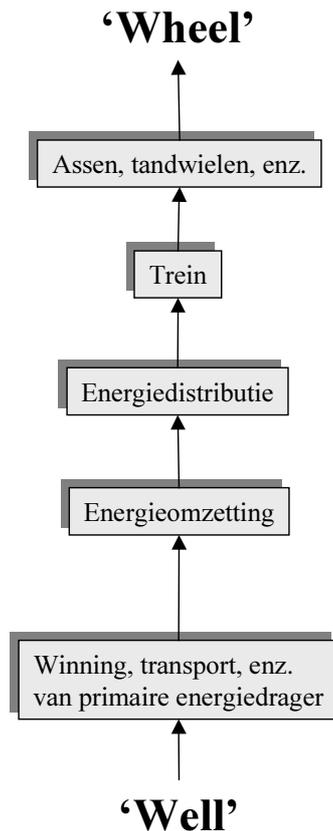
De energie voor de voortbeweging wordt gedefinieerd als de hoeveelheid energie die aan de aangedreven wielen van de trein nodig is om een bepaalde beweging te realiseren. De gehele weg die de energie aflegt voordat het van de 'bron' (winplaats van aardolie, kolen, etc.) bij de wielen van de trein is, wordt een 'well-to-wheel'-keten genoemd (zie Figuur 2.2). Energie voor de voortbeweging begint bij de 'well' in de vorm van een primaire energiedrager zoals bijvoorbeeld olie of uranium. Van hieruit wordt het getransporteerd naar een energie-omzettingsbedrijf, bijvoorbeeld een elektriciteitscentrale of raffinaderij. Vervolgens wordt de energie (in de vorm van bijv. elektriciteit of dieselolie) getransporteerd naar de trein, waar het vervolgens wordt omgezet in mechanische energie voor de aandrijving. Bij iedere omzetting en tijdens iedere vorm van distributie treden energieverliezen op.

In dit onderzoek is de volgende methode gehanteerd om met behulp van een 'well-to-wheel'-analyse het energiegebruik van de voortbeweging uit te rekenen:

1. allereerst wordt de aandrijfenergie aan de wielen berekend die nodig is om een bepaalde treinbeweging te realiseren;
2. vervolgens worden voor alle energie-omzettingen en verschillende vormen van energiedistributie bepaald wat de energieverliezen (rendementen) zijn;
3. het ketenrendement wordt berekend door alle deelrendementen te vermenigvuldigen;
4. het primaire energiegebruik wordt berekend door de in punt 1 berekende aandrijfenergie te delen door het ketenrendement.

De methode om de aandrijfenergie te berekenen zal in paragraaf 2.2.1 worden beschreven. Paragraaf 2.2.2 gaat in op het ketenrendement.

¹ Volgens de laatste inzichten van de NS is het aandeel van de hulpenergie ongeveer 4,5% van het totaal aan tractie-energie. Het gaat hierbij om energie voor verlichting, de compressor (voor luchtdruk van de remmen) en andere (laagspannings)energieverbruikers. Deze informatie kwam echter te laat om nog in de berekeningen te worden verwerkt.



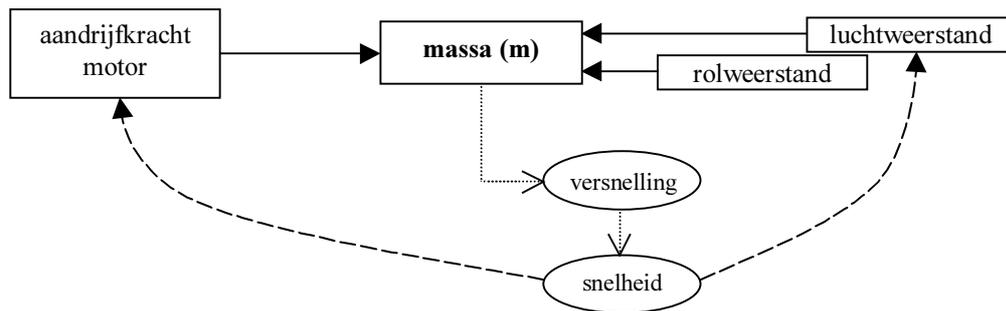
Figuur 2.2: "well-to-wheel"-keten van treinen

2.2.1 Het berekenen van de aandrijfenergie

Op een trein werken twee typen krachten die de versnelling en daarmee de snelheid van de trein bepalen: aandrijfkraften en weerstandskraften. Aandrijfkraften geven de trein een positieve versnelling terwijl weerstandskraften de trein vertragen (negatieve versnelling). De aandrijfkraft wordt geleverd door de motor. De weerstandskraften zijn de rol- en de luchtweerstand (zie hoofdstuk 3). De grootte van de versnelling van het voertuig is afhankelijk van het verschil tussen de aandrijfkraft en de weerstandskraften (= versnellingskraft) en van het gewicht van het voertuig (massa), ofwel:

$$\text{versnelling (a)} = (F_{\text{aandrijf}} - F_{\text{lucht}} - F_{\text{rol}}) / \text{massa}$$

Het produkt van massa en versnelling wordt ookwel versnellingsweerstand genoemd. De aandrijfkraft en de luchtweerstandskraft zijn niet constant, maar variëren met de snelheid. De relaties tussen de voertuigmassa, de krachten en de versnelling zijn weergegeven in Figuur 2.3. Het verloop van de snelheid in de tijd kan worden afgeleid uit het verloop van de versnelling in de tijd.



Figuur 2.3: Relatie tussen massa, krachten en voortbeweging

Aan de hand van Figuur 2.3 wordt duidelijk gemaakt welke methode in PRORIN wordt gebruikt om het energiegebruik aan de wielband te berekenen:

1. berekening van het verloop van de versnelling in de tijd.. Hiervoor zijn technische gegevens nodig als gewicht, maximale motorvermogen en rol- en luchtweerstandscoefficienten maar ook operationale gegevens als beginversnelling en de maximale snelheid. Het resultaat wordt het *ritprofiel* van de trein genoemd;
2. berekening van de aandrijfkraft per tijdseenheid (vermogen) die door de motor moet worden geleverd om het ritprofiel te realiseren en om de maximale snelheid te handhaven. Het resultaat wordt het *vermogensprofiel* genoemd;
3. berekening van het energiegebruik door middel van integratie naar de tijd van het vermogensprofiel.

Hoofdstuk 3 gaat uitgebreid in op bovenstaande berekeningsstappen.

2.2.2 Het berekenen van het totaalrendement

Het ketenrendement (zie Figuur 2.2), is onder andere afhankelijk van het treintype. Er kan onderscheid gemaakt worden naar de volgende treintypen (Keizer en Wiersma, 1999):

- elektrisch;
- diesel-hydraulisch;
- diesel-elektrisch;
- diesel-mechanisch.

Voor dit onderzoek wordt het diesel-mechanische tractiesysteem (zoals de dieselmotoren van auto's) niet beschouwd omdat deze in treinen in Nederland niet worden toegepast¹. Dit omdat er meestal een grote afstand zit tussen de motor en de aan te drijven assen en omdat er vaak meerdere assen tegelijk aangedreven worden. Diesel-mechanische systemen zijn hier minder geschikt voor (Keizer en Wiersma, 1999).

¹ Er zijn geen cijfers bekend over de toepassing van diesel-mechanische systemen in het buitenland.

In Figuur 2.4 is de ‘well-to-wheel’-ketenen van de verschillende beschouwde treintypen weergegeven. In Figuur 2.4 zijn de punten waar emissies plaatsvinden zwart gemaakt. De totale emissies worden berekend door de totale energie-input per punt te vermenigvuldigen met de emissies per eenheid van energie-input en dit te sommeren.

Hoofdstuk 3 gaat in op de rendementen van verschillende treintypen en op de rendementen van de elektriciteitsdistributie. De rendementen van de elektriciteitscentrales komen uitgebreid aan bod in hoofdstuk 4. Hoofdstuk 5 beschouwt de rendementen van de raffinage en de distributie van dieselolie.

2.3 Energie voor de klimaatbeheersing

Onder klimaatbeheersing wordt in dit verband verwarming, ventilatie¹ en airconditioning verstaan. Deze drie vormen van klimaatbeheersing worden afzonderlijk behandeld.

2.3.1 Airconditioning

De energie benodigd voor de airconditioning is voor dit onderzoek te complex om te berekenen met een bottom-up model. Vanzelfsprekend kost de airconditioning energie. Echter, treinen met airconditioning hebben geen ramen die geopend kunnen worden. Hierdoor is de trein aërodynamischer hetgeen de luchtweerstand vermindert. Dit heeft weer een energiebesparing tot gevolg. NS-Reizigers doet momenteel onderzoek naar de energiebesparing ten gevolge van het niet kunnen openen van de ramen om te bepalen in hoeverre dit het energiegebruik van de airconditioning compenseert.

2.3.2 Ventilatie

Het energiegebruik voor de ventilatie is onderdeel van het energiegebruik ter compensatie van de luchtweerstand (Lukaszewicz, 1995). Deze wordt impliciet meegerekend met het in de vorige paragraaf beschreven rekenmodel voor het berekenen van de energie voor de voortbeweging.

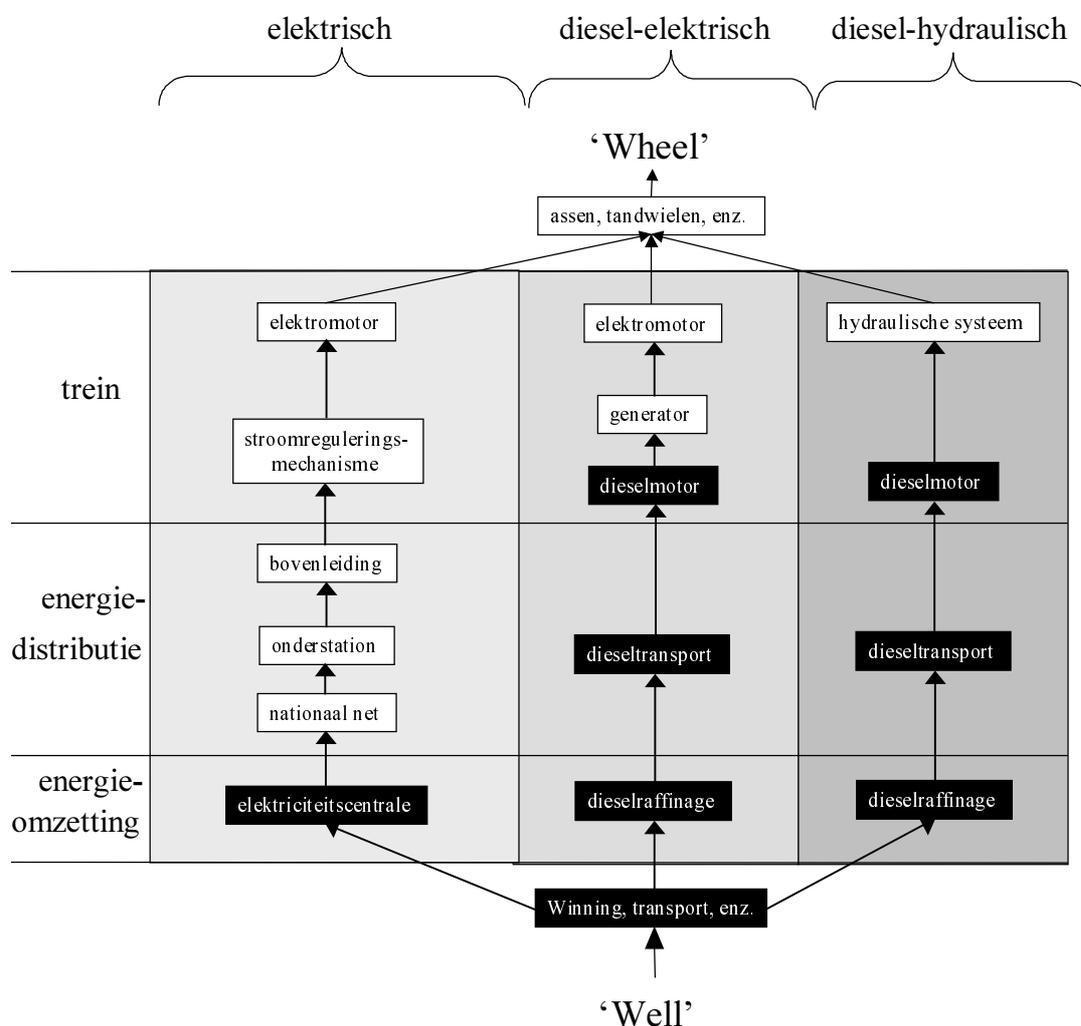
¹ Onder ventilatie-energie en verliezen verstaat de NS iets anders, namelijk de energie die nodig is om koude buitenlucht te verwarmen.

2.3.3 Verwarming

De totale energie benodigd voor de verwarming is afhankelijk van vele factoren, zoals:

- buitentemperatuur;
- wanddikte van de trein;
- isolatiewaarde van de trein;
- buitenoppervlak van de trein;
- wel of niet open staan van ramen en deuren;
- tijd dat een trein stil staat met open deuren.

Paragraaf 3.6 beschrijft een bottom-up methode om het energiegebruik ten behoeve van de verwarming van treinen te berekenen.



Figuur 2.4: 'Well-to-wheel'-ketenen voor de verschillende type treinen. De punten waar de emissies van luchtverontreinigende stoffen plaatsvinden zijn zwart gekleurd.

3. Berekening van aandrijfenergie

3.1 Inleiding

Voor het berekenen van het energiegebruik wordt in PRORIN onderscheid gemaakt tussen goederentreinen en personentreinen. Goederentreinen bestaan uit een locomotief met een aantal wagons. Wagons zijn er in vele soorten en maten. Tevens wordt er onderscheid gemaakt tussen goederentreinen die bestaan uit open wagons, goederentreinen die bestaan uit gesloten wagons en goederentreinen die bestaan uit een mix van deze twee. Personentreinen worden onderverdeeld in rijtuigen (locomotief met rijtuigen zonder eigen aandrijving), treinstellen (rijtuigen met eigen aandrijving) en HSL (HogeSnelheidLijn)-treinen.

Zoals vermeld in hoofdstuk 2 wordt het energiegebruik van de voortbeweging als volgt bepaald:

1. berekening van het verloop van de versnelling in de tijd.. Hiervoor zijn technische gegevens nodig als gewicht, motorvermogen en rol- en luchtweerstandscoefficienten maar ook operationale gegevens als beginversnelling en de maximale snelheid. Het resultaat wordt het *ritprofiel* van de trein genoemd;
2. berekening van de aandrijfkracht per tijdseenheid (vermogen) die door de motor moet worden geleverd om het ritprofiel te realiseren en om de maximale snelheid te handhaven. Het resultaat wordt het *vermogensprofiel* genoemd;
3. berekening van het energiegebruik aan de wielen door middel van integratie naar de tijd van het vermogensprofiel.
4. voor iedere energieomzetting of -distributie in de 'well-to-wheel'-keten wordt bepaald wat de energieverliezen (rendementen) zijn;
5. de deelrendementen worden met elkaar vermenigvuldigd hetgeen resulteert in een ketenrendement;
6. de berekende aandrijfenergie aan de wielen (punt 3) wordt gedeeld door het ketenrendement.

In dit hoofdstuk worden in paragraaf 3.2 eerst de natuurkundige basisprincipes van de krachten die op een trein werken besproken om enig inzicht te krijgen in de wisselwerking tussen snelheid en kracht. Vervolgens worden in paragraaf 3.3 de bewegingsvergelijkingen geïntroduceerd voor het berekenen van een ritprofiel. Paragraaf 3.4 gaat over de berekeningen van een vermogensprofiel en de totale energie. Paragraaf 3.5 behandelt de rendementen van de trein en de energiedistributie. De overige punten in de 'well-to-wheel'-analyse worden in hoofdstuk 4 en 5 besproken. Tenslotte zal paragraaf 3.6 gaan over het energiegebruik van de klimaatbeheersing.

3.2 Krachtenvergelijkingen

3.2.1 Weerstandskrachten

Bij treinen wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende weerstandscomponenten (Van Laar, 1993):

- loopweerstand (rolweerstand)
- luchtweerstand
- hellingsweerstand
- boogweerstand
- versnellingsweerstand

De loop- en de luchtweerstand worden samen de treinweerstand genoemd, de hellings- en de boogweerstand de baanweerstand. In deze paragraaf worden navolgend de loop-, lucht, hellings- en boogweerstand behandeld. Paragraaf 3.2.3 gaat over de versnellingsweerstand.

Loopweerstand

De loopweerstand bestaat uit twee componenten: de rol- en glijweerstand. De rolweerstand wordt veroorzaakt doordat het wiel weerstand ondervindt bij het rollen over de rail. De grootte van deze weerstand wordt berekend met de volgende vergelijking (Van Laar, 1993):

$$F_{rol} = N \cdot f_{rol}$$

Hierbij is N de normaalkracht in Newton en f_{rol} de rolweerstandscoefficient. De normaalkracht is het product van gewicht (in kg) en valversnelling ($9,81 \text{ m/s}^2$). De rolweerstandscoefficient is afhankelijk van het materiaal van wiel en rail, de temperatuur en de snelheid van het rollende wiel (Van Laar, 1993).

De glijweerstand van een trein wordt veroorzaakt door wrijving in de trein, zoals wrijving in de lagers, wrijving tussen de tandvlakken van de tandwielen enz. De glijweerstand kan berekend worden met de vergelijking:

$$F_{glij} = N \cdot f_{glij}$$

Hierbij is N de normaalkracht in Newton en f_{glij} de glijweerstandscoefficient. De glijweerstandscoefficient is afhankelijk van het soort wiellager dat wordt gebruikt, de temperatuur en de snelheid van het wiel (Van Laar, 1993).

De loopweerstand wordt nu gegeven als:

$$F_{loop} = N \cdot f_{loop}$$

Waarbij $f_{loop} = f_{glij} + f_{rol}$

De waarde van f_{loop} is dus afhankelijk van vele factoren. Het heeft volgens Lukaszewicz (1995) een constante en een snelheidsafhankelijke component. De loopweerstand kan dus worden uitgedrukt als:

$$F_{loop} = D + E \cdot v$$

Hierin zijn D en E constanten en is v de snelheid. D en E zijn experimenteel bepaald en kunnen worden berekend door de volgende formules (Lukaszewicz, 1995):

$$D = A + (a + b \cdot N) \cdot n_{ax}$$

$$E = c + d \cdot L$$

Hierin zijn A , a , b , c en d constanten, n_{ax} het aantal assen van de trein, L de lengte van de trein en N de normaalkracht per treinas. De waarden A , a , b , c en d verschillen per treinsoort (zie Tabel 3.1).

Tabel 3.1: Waarden van de loopweerstandskonstanten voor enkele treinsoorten

type trein	A	a	b	c	d
trein met open goederenwagons	2000	65	0,0006	0	0,3
trein met gesloten goederenwagons	2000	65	0,0006	-22	0,6
trein met gemixte goederenwagons	2000	65	0,0006	-22	0,6
trein bestaande uit locomotief + rijtuigen	2000	70	0	0	0,2
trein bestaande uit treinstellen ^{a)}	2000	70	0	0	0,2
HSL-trein ^{a)}	2000	70	0	0	0,2

a) waarde is gelijk verondersteld aan die voor locomotief met rijtuigen
bron: Lukaszewicz (1995)

De loopweerstandskonstanten voor een ‘trein bestaande uit treinstellen’ en de ‘HSL-trein’ zijn gelijk aan die van de ‘trein bestaande locomotief + rijtuigen’ gekozen, aangezien hier geen waarden voor zijn gevonden.

Het lineair-snelheidsafhankelijke deel van de loopweerstand is niet alleen afkomstig van de loopweerstand, maar bevat vermoedelijk ook een component van de luchtweerstand voor wat betreft de ventilatie van de trein (Lukaszewicz, 1995). Experimenteel kan het lineair-snelheidsafhankelijke deel echter niet worden opgesplitst in een loopweerstanddeel en een luchtweerstanddeel. Gekozen is om het gehele lineair-snelheidsafhankelijke deel van de twee weerstanden bij de loopweerstand te rekenen, aangezien het vermoeden bestaat dat de

loopweerstand ook een veel grotere lineair-snelheidsafhankelijk deel heeft dan de luchtweerstand.

Luchtweerstand

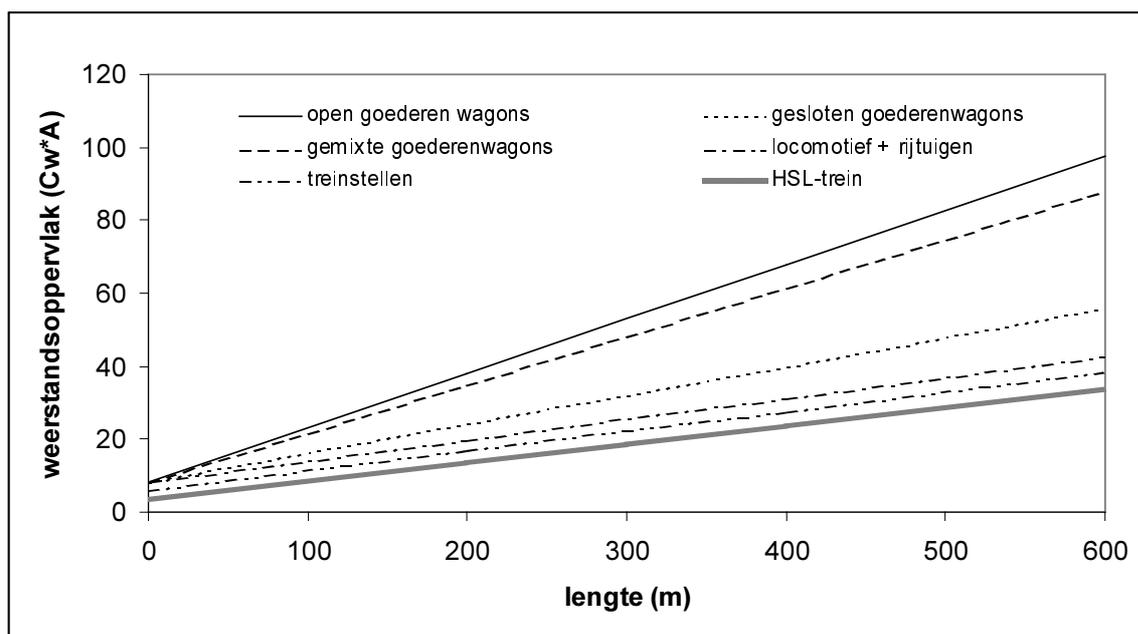
Ieder voorwerp dat zich beweegt door de lucht ondervindt luchtweerstand doordat luchtdeeltjes tegen het voorwerp botsen en door de wrijving tussen luchtdeeltjes en het voorwerp. De grootte van de luchtweerstand wordt gegeven met (Serway, 1992):

$$F_{lucht} = \frac{1}{2} \cdot C_w \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$$

Hierin is A het frontale oppervlak van de trein in m^2 , v de snelheid ten opzichte van de lucht in m/s , ρ de luchtdichtheid in kg/m^3 en C_w een dimensieloze constante, genaamd de luchtweerstandcoëfficiënt. De grootte van de luchtweerstandcoëfficiënt hangt af van vele factoren, zoals uitsteeksels, lengte van de trein, mate van stroomlijn, enz. (Van Laar, 1993).

De C_w -waarde wordt tevens bepaald door de vorm van de voorkant van de trein. Door deze afhankelijkheid van de C_w -waarde met het frontale oppervlak (de A -waarde), worden de C_w -waarde en A -waarde samen genomen tot de $C_w \cdot A$ -waarde. De $C_w \cdot A$ wordt dan het *weerstandsoppervlak* genoemd (Lukaszewicz, 1995).

In Zweden zijn metingen verricht aan de $C_w \cdot A$ -waarden van verschillende soorten treinen. Het resultaat van dit onderzoek staat weergegeven in Figuur 3.1. Uit deze figuur komt naar voren dat de lengte en de vorm van de trein een grote invloed hebben op het weerstandsoppervlak. Zo heeft een open goederentrein, die weinig aërodynamisch gevormd is, een veel groter weerstandsoppervlak dan een gestroomlijnde hogesnelheidstrein.



Figuur 3.1: $C_w \cdot A$ -waarden enkele verschillend vormgegeven treinen.

Bij bovenstaande lijnen horen de volgende formules (Tabel 3.2):

Tabel 3.2: Formules voor de $C_w \cdot A$ -waarde van enkele treintypen

type trein	formule
goederentrein (open goederenwagons)	$C_w A = 8,3 + 14,9 \cdot 10^{-2} \cdot lengte$
goederentrein (gesloten goederenwagons)	$C_w A = 8,3 + 7,9 \cdot 10^{-2} \cdot lengte$
goederentrein (gemixte goederenwagons)	$C_w A = 8,1 + 13,3 \cdot 10^{-2} \cdot lengte$
personentrein (locomotief + rijtuigen)	$C_w A = 8,3 + 5,7 \cdot 10^{-2} \cdot lengte$
personentrein (treinstellen)	$C_w A = 6,1 + 5,4 \cdot 10^{-2} \cdot lengte$
personentrein (HSL)	$C_w A = 3,8 + 5,0 \cdot 10^{-2} \cdot lengte$

bron: Lukaszewicz (1995)

De coëfficiënten in de formule voor het treintype ‘personentrein (treinstellen)’ is afgeleid door middel van interpolatie van ‘personentrein (locomotief + rijtuigen)’ en ‘personentrein (HSL)’. Dit omdat een treinstel in het algemeen beter gestroomlijnd is dan een locomotief met rijtuigen, maar minder gestroomlijnd dan een HSL-trein.

Hellingsweerstand

Hellingsweerstand ontstaat als de trein een helling op- of afrijdt. De hellingsweerstand moet gecompenseerd worden door de aandrijfkracht. Er is geen eenvoudige berekeningswijze van de hellingsweerstand omdat zelden de gehele trein zich op een helling bevindt. Voor dit onderzoek zal deze weerstand niet worden meegenomen, omdat de treinen net zoveel een helling op- als afrijden, waardoor de energie die nodig is om de hellingsweerstand te compenseren weer vrijkomt bij het naar beneden rijden van de helling. Bovendien is het spoorwegtracé in Nederland voornamelijk vlak.

Boogweerstand

Boogweerstand ontstaat wanneer de trein door de rail wordt gedwongen af te buigen van een rechte lijn (Van Laar, 1993). De boogweerstand zal in dit rapport niet worden meegenomen, enerzijds omdat goede informatie over de invloed van de boogweerstand op het energiegebruik ontbreekt en anderzijds omdat het vermoeden bestaat dat het aandeel van de boogweerstand op het energiegebruik bijzonder gering is.

3.2.2 Aandrijfkracht

De tractie-eigenschappen van een motor worden gekarakteriseerd met de zogenaamde aandrijfkracht-snelheid kromme. Deze geeft de aandrijfkracht ($F_{aandrijf}$) van de motor als functie van de snelheid (v) en dit is bij een constant vermogen een *hyperbolische* functie. In werkelijkheid zal het verloop niet altijd precies hyperbolisch zijn, maar dit meestal toch redelijk benaderen (Keizer en Wiersma, 1999). In de praktijk wordt de maximale aandrijfkracht echter begrensd doordat het wiel bij een te hoge aandrijfkracht zal gaan

slippen. De aandrijfkracht waarbij het wiel gaat slippen wordt de adhesiegrens genoemd (zie Figuur 3.2). De snelheid wordt begrensd door de eigenschappen van de motor, zoals het maximum toerental van het motorsysteem en het maximum toerental van andere onderdelen van het aandrijfsysteem.

Voor PRORIN wordt er vanuit gegaan dat de bovenleiding geen beperking vormt voor het te leveren vermogen. Dit is in de realiteit natuurlijk wel anders. Als een trein een motor heeft van 7000 kW, maar de 1500 V bovenleiding kan maar 4 kA geleiden, dan zal de motor nooit meer dan 6000 kW kunnen leveren. Hetzelfde principe geldt als er meerdere treinen op één traject rijden. In PRORIN wordt hier geen rekening mee gehouden.

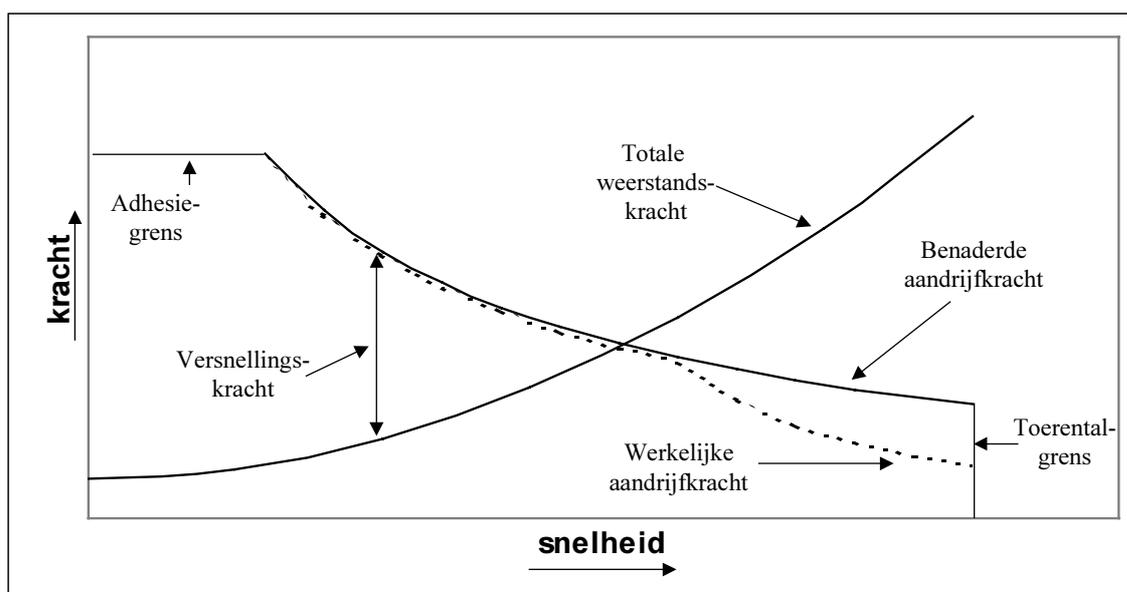
Voor dit onderzoek wordt de potentiële aandrijfkracht benaderd met de volgende formule:

$$F_{aandrijf} = \frac{P}{v}$$

Hierin is P het vermogen van de trein en v de snelheid.

In werkelijkheid is het maximaal te leveren vermogen van een motor niet constant, maar neemt vanaf een bepaald toerental af (zie paragraaf 0). In Figuur 3.2 is dit te zien aan de stippellijn.

In Figuur 3.2 staat schematisch het verloop van de aandrijfkracht en het verloop van de totale weerstandskracht (lucht- + loopweerstand) afgebeeld:



Figuur 3.2: Schematisch verloop van de aandrijf- en de weerstandskracht

Het verschil tussen de aandrijfkracht en de weerstandskracht is bepalend voor de beschikbare versnellingskracht.

3.2.3 Versnellingsweerstand

De mogelijke versnellingskracht die beschikbaar is, wordt nu berekend als:

$$F_{\text{versnelling}} = F_{\text{aandrijving}} - F_{\text{lucht}} - F_{\text{loop}}$$

Volgens de tweede wet van Newton moet dit gelijk zijn aan:

$$F_{\text{versnelling}} = m(1 + \alpha) \cdot a_{\text{netto}}$$

Hierin is a_{netto} de versnelling van de trein en α een toeslagfactor voor de roterende delen die ook moeten worden versneld (Keizer en Wiersma, 1999). Deze toeslagfactor kan variëren van enkele procenten voor een goederenwagon tot tientallen procenten voor een locomotief.

Voor de toeslagfactor voor roterende delen zijn de volgende waarden gevonden:

Tabel 3.3: *Toeslagfactor roterende delen*

type voertuig	waarde in literatuur	bron	waarde in PRORIN
locomotieven	0,15 – 0,25	Wiersma ¹ , Van Laar (1991)	0,2
rijtuigen	0,05 – 0,1	Wiersma	0,08
wagon	0,03	Van Laar	0,03
<i>treinstel</i>		<i>geschat</i>	0,2

Voor treinstellen wordt een waarde voor de toeslagfactor gekozen gelijk aan die van een locomotief, aangezien het in beide gevallen om een voertuig met eigen aandrijving gaat.

3.3 **Bewegingsvergelijkingen**

In PRORIN wordt het hele traject dat een trein rijdt, onderverdeeld in vier verschillende onderdelen:

- versnellen;
- rijden met constante snelheid;
- uitrijden;
- remmen.

De vier trajecten samen wordt een *ritprofiel* genoemd. Het onderdeel ‘uitrijden’ betreft de tijd tussen het ontkoppelen van de motor en het bedienen van de remmen. In het geval van ‘rijden met constante snelheid’ is de afgelegde afstand evenredig met de tijd. Voor het ‘remmen’ wordt een constante remvertraging verondersteld. De snelheid neemt dan lineair af met de

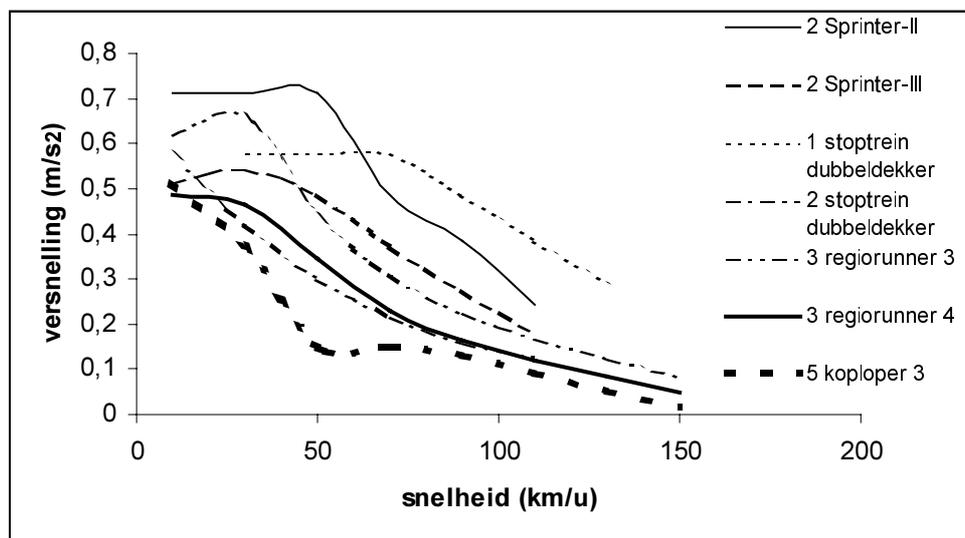
¹ Schriftelijke mededeling ir. P.K. Wiersma, Faculteit Ontwerp, Constructie en Productie, TU Delft, februari 2000

tijd. De bewegingsvergelijkingen die horen bij het ‘rijden met constante snelheid’ en ‘remmen’ worden in Bijlage 3 behandeld.

De bewegingsvergelijkingen die horen bij het ‘versnellen’ en het ‘uitrijden’ behoeven wat meer uitleg en zullen navolgend worden behandeld. Ter illustratie worden de berekeningen toegepast op een bekende Nederlandse trein. Voor de uitleg van de typen treinen die in Nederland worden gebruikt wordt verwezen naar hoofdstuk 6.

3.3.1 Versnellen

Zoals uit de vorige paragraaf is gebleken, zal een trein niet over het hele versnellingstraject dezelfde versnelling hebben. Het verschil tussen beschikbare aandrijfkracht en totale weerstandskracht is in principe bepalend voor de potentiële versnelling. Dit verschil, en daarmee de potentiële versnelling, wordt met toenemende snelheid steeds kleiner (zie Figuur 3.2). Metingen uit de praktijk levert voor enkele treinen het volgende beeld op (Figuur 3.3).



Figuur 3.3: Snelheid-versnellingsdiagram voor enkele treinen¹. Voor de nomenclatuur van treinen wordt naar hoofdstuk 6 verwezen

Een snelheid-versnelling diagram van een trein bestaat grofweg uit twee delen. Uit Figuur 3.2 blijkt, dat in theorie in het eerste deel de versnelling (licht) afneemt doordat de treinweerstand toeneemt (onder de aanname dat de aandrijfkracht constant blijft). De versnellingsafname is klein, aangezien de luchtweerstand bij lage snelheden nog niet zo groot is. In het tweede deel van het snelheid-versnelling diagram neemt de versnelling steeds sneller af doordat de treinweerstand toeneemt en omdat de aandrijfkracht van de motor afneemt. Het motorvermogen heeft immers zijn maximum waarde bereikt en een toename van het motortoerental zal gepaard gaan met een rechtevenredige afname van de aandrijfkracht.

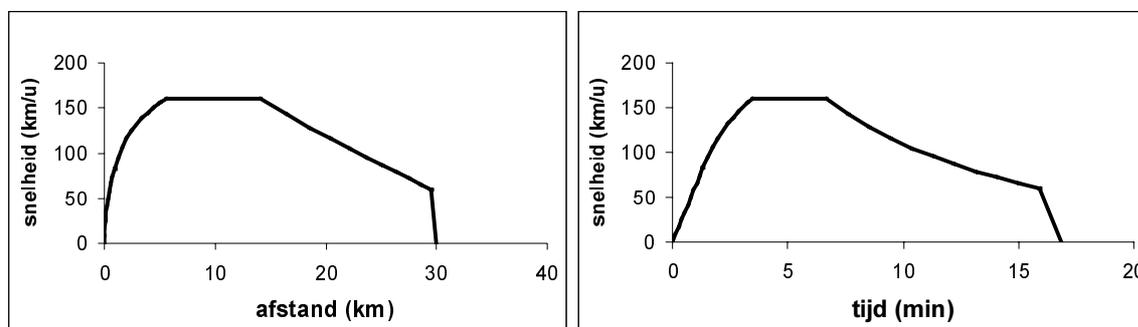
² Bron: Brief aan Centrum voor schone technologie en energiebesparing (CE), augustus 1998. De schrijver wenst anoniem te blijven.

Natuurkundig gezien is de versnelling de wiskundige afgeleide van de snelheid naar de tijd. Om de snelheidsfunctie te vinden moet de versnellingsfunctie dus worden geïntegreerd naar de tijd. Uit Bijlage 2 blijkt, dat de versnellingsfunctie erg gecompliceerd is en het zou voor dit onderzoek te tijdrovend zijn om deze functie te integreren. Vandaar dat voor dit onderzoek een lineaire afname van de versnelling met de snelheid in twee stappen wordt aangenomen. Bijlage 3 beschrijft de formules om het versnellingsprofiel te berekenen.

3.3.2 Uitrijden

Het uitrijden begint op het moment dat de machinist bij een bepaalde snelheid de motor uitschakelt. De trein rolt dan uit tot een bepaalde snelheid waarna wordt geremd tot stilstand. Wanneer een trein een bepaalde snelheid heeft en de aandrijfkraft van de motor wegvalt, dan zullen de lucht- en de loopweerstand de trein doen afremmen. De mate waarin dit afremmen gebeurt, is afhankelijk van de snelheid: de remmende kracht zal kleiner worden naarmate de trein langzamer rijdt omdat de luchtweerstand afhankelijk is van de snelheid. Voor de fysische formules waarmee voor het traject 'uitrijden' de snelheid en de afgelegde afstand tegen de tijd worden berekend, wordt verwezen naar Bijlage 3.

Ter illustratie geeft Figuur 3.4 voor een 'koploper 3' een berekend ritprofiel weer. De operationele parameters, zoals maximum snelheid en afgelegde afstand, zijn willekeurig gekozen.



Figuur 3.4: Theoretisch ritprofiel van een koploper 3

Figuur 3.4 laat zien dat er steeds langzamer wordt versneld naarmate de trein sneller rijdt. Ook wordt geïllustreerd dat tijdens het uitrijden de trein steeds langzamer vertraagt naarmate de snelheid lager is.

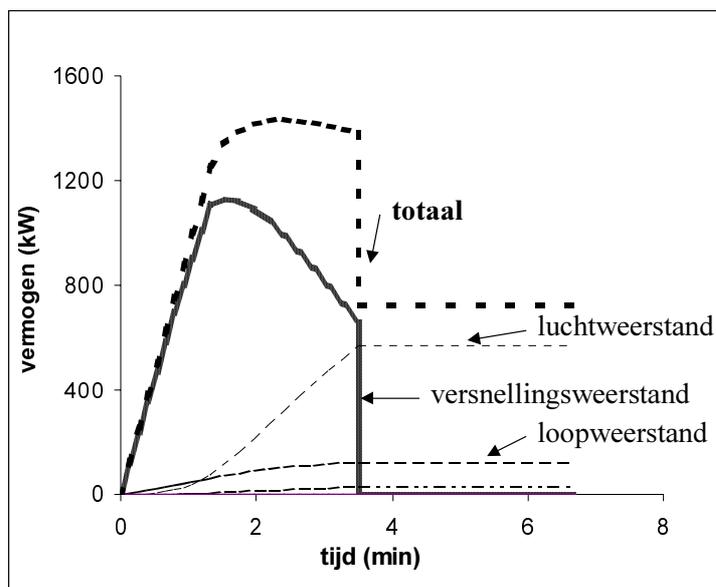
3.4 Energievergelijkingen.

Voor het berekenen van de hoeveelheid energie die aan het wiel van een trein geleverd moet worden om de in de vorige paragraaf berekende beweging te realiseren, wordt eerst het vermogensprofiel bepaald. Het vermogensprofiel wordt gedefinieerd als de hoeveelheid energie die *per tijdseenheid* door de motor moet worden geleverd om bepaalde krachten te compenseren. Deze wordt voor het geval van de treinen berekend als:

$$P_{\text{trein}} = \int F_{\text{versnel}} dv + \int F_{\text{lucht}} dv + \int F_{\text{loop}} dv$$

Hierin is P het vermogen in Watt, F de kracht in Newton en dv de snelheidsverandering in de richting van de kracht in m/s. Om de totale hoeveelheid energie aan de wielband te berekenen, moet bovenstaande vermogensfunctie geïntegreerd worden naar de tijd.

In Bijlage 4 worden voor ieder onderdeel waarin de motor tractie-energie levert (versnellen en constant rijden) de formules afgeleid om het energiegebruik aan het wiel te berekenen. Ter illustratie wordt voor de trein uit de vorige paragraaf (koploper 3) een vermogensprofiel gegeven (Figuur 3.5).



Figuur 3.5: Berekend vermogensprofiel voor een koploper 3

Door integratie van deze functies is voor dit voorbeeld de totale hoeveelheid energie berekend.

Een steeds meer besproken onderwerp is de mogelijkheid tot het terugwinnen van remenergie. Hierbij wordt de kinetische energie van de trein tijdens het remmen omgezet in elektriciteit. Deze elektriciteit kan door de trein zelf worden gebruikt of via de bovenleiding worden geleverd aan andere treinen.

Deze techniek kent nogal wat randvoorwaarden (Van den Haspel *et al*, 1991):

- Alleen op de aangedreven assen kan remenergie worden teruggewonnen, omdat de elektromotor bij het remmen fungeert als de generator.
- De opgewekte elektriciteit kan niet over een onderstation worden 'heen getild'¹.
- De opgewekte elektriciteit kan (nog) niet op een efficiënte manier worden opgeslagen. Er zal dus altijd een andere optrekkende trein in de buurt moeten zijn die de opgewekte elektriciteit direct weer opneemt.
- De bovenleiding is tamelijk zwak. Wanneer er elektriciteit wordt teruggeleverd, wordt de spanning in de bovenleiding hoger dan toelaatbaar. Zelfs al is er een optrekkende trein in de buurt, dan nog zal deze trein niet alle teruggeleverde elektriciteit kunnen gebruiken, aangezien treinen over het algemeen twee keer zo hard remmen als optrekken. Dit bezwaar geldt minder voor systemen met een hoge spanning.

Door al deze randvoorwaarden is ervoor gekozen om het terugwinnen van de remenergie niet in PRORIN op te nemen. Dit betekent echter niet dat dit in de praktijk niet gebeurt. De treintypen SM'90 (Railhopper), IRM (InterRegioMaterieel = Regiorunner) en mDDM (DubbelDeksMaterieel = stoptreindubbeldekker met motorrijtuig) leveren nu al, wanneer mogelijk, bij het remmen elektriciteit aan andere treinen. Ondanks dat terugwinning van remenergie niet expliciet gemodelleerd is kan met PRORIN wel de potentie van het terugwinnen van remenergie worden berekend. Dit kan door de beginversnelling gelijk te maken aan de eindvertraging en het veronderstellen van een zeer groot motorvermogen zodat de beginversnelling gedurende de gehele versnellingsfase constant blijft. Het energiegebruik ten gevolge van luchtweerstand en loopweerstand in de versnellingsfase is gelijk aan die in de remfase. Deze energie kan niet worden teruggewonnen en moet worden afgetrokken van de kinetische energie van de trein voorafgaand aan het remmen. De energie die overblijft kan theoretisch tijdens het remmen worden teruggewonnen.

3.5 Berekenen van de rendementen

In hoofdstuk 2 is voor elektrische, diesel-elektrische en diesel-hydraulische tractie een uiteenzetting gegeven van de 'well-to-wheel'-energieketen. Deze paragraaf behandelt de rendementen van deze drie tractietypen. Hierbij wordt dieper ingegaan op de rendementen van elektrische tractie dan op die van de andere twee typen tractiesystemen, aangezien elektrische tractie veruit het meest wordt toegepast. Verder wordt in deze paragraaf voor de elektrische tractie tevens het rendement van de elektriciteitsdistributie behandeld. Het rendement van de distributie van dieselbrandstof wordt in hoofdstuk 5 behandeld.

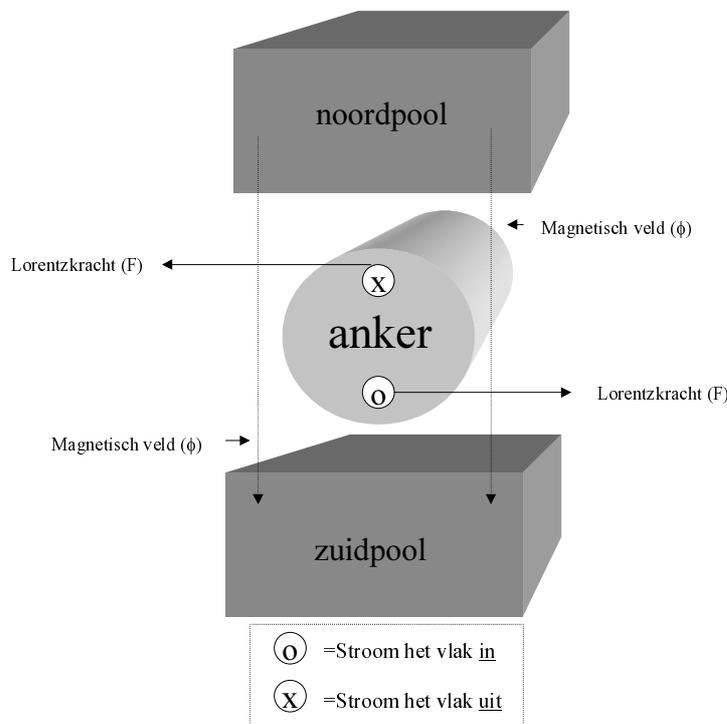
¹ Als gevolg van de instellingen van het materieel en de onderstations kan de gerecupereerde energie niet naar treinen aan de andere zijde van het onderstation vloeien. De open spanning (spanning bij nullast) van het onderstation is 1850 V. Bij de huidige instellingen van het recupererende materieel is de maximaal op te wekken spanning bij recuperatie beperkt tot 1800 V. De recupererende trein kan dus niet de het onderstation 'dicht drukken' en materieel "aan de andere zijde van het onderstation" van energie voorzien. De recupereerde energie kan dus niet aan het openbare net terug geleverd worden. Schriftelijke mededeling januari 2000 van ir. G.W. Fiechter, beleidsmedewerker energie & milieu, NS-Reizigers.

3.5.1 Elektrische tractie

Elektrische tractie vraagt vanwege de bovenleiding en de voedingsinstallaties hoge investeringen, maar heeft vooral vanwege de lage onderhoudskosten lage directe exploitatiekosten. Daarnaast zijn elektrische tractie-installaties compacter en gemakkelijker in voertuigen aan te brengen dan diesel-tractie-installaties (Wiersma, 1999). Deze paragraaf bespreekt de energieverliezen die optreden in de trein, in de bovenleiding en in het nationale elektriciteitsnet.

Werking van een elektromotor

Een elektromotor is een motor die elektrische energie omzet in mechanische energie. De werking ervan is omgekeerd aan die van een dynamo of generator. Door een elektrische stroom te laten lopen in een magnetisch veld, ontstaan er Lorentzkrachten (Serway, 1991) (Figuur 3.6). Deze Lorentzkrachten (ook wel koppel genoemd) zorgen ervoor dat er een draaiende beweging ontstaat. Het ronddraaiende deel wordt *anker* genoemd.



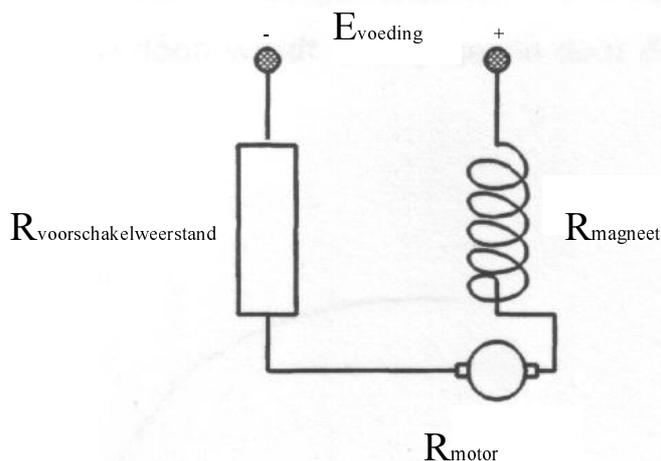
Figuur 3.6: Werking van een elektromotor

Het magnetisch veld wordt in elektromotoren opgewekt door elektromagneten. In een elektromagneet wordt elektrische energie omgezet in magnetische energie.

Er zijn verschillende soorten elektromotoren. In Nederland wordt er in treinen alleen gebruik gemaakt van seriegestroommotoren of draaistroommotoren. Daarom worden alleen deze motoren behandeld.

Seriegelykstroombmotor

De meest toegepaste type tractiemotor in Nederland is de seriegelykstroombmotor. De werking van deze motor zal kort worden behandeld om inzicht te krijgen in de energieverliezen van de motor. De seriegelykstroombmotor dankt zijn naam aan het feit dat het anker en de veldwikkelingen die het magneetveld opwekken, in serie geschakeld zijn. Om de grootte van de stroom te regelen, worden vaak weerstanden gebruikt. Eén en ander staat weergegeven in Figuur 3.7.



Figuur 3.7: Schema van seriegelykstroombmotor. R staat voor Ohmse weerstand.

Wanneer het anker onder invloed van de Lorentzkrachten gaat draaien, wordt er in het anker door het magnetische veld ook een spanning opgewekt, de zogenaamde *tegenspanning* (E_a). Deze spanning is tegengesteld gericht aan de voedingsspanning.

De stroom I die door een gelykstroombmotor loopt, wordt bepaald door:

$$I = \frac{E_{voeding} - E_a}{R_{motor} + R_{magneet} + R_{voorschakelweerstand}}$$

De grootte van stroom I (en daarmee het vermogen van de motor) kan volgens bovenstaande formule dus onder andere geregeld worden door de voorschakelweerstand aan of af te schakelen. Een trein heeft bij rijden vanuit stilstand bijvoorbeeld nog niet meteen al het beschikbare vermogen nodig. Door nu veel weerstanden voor te schakelen blijft I klein waardoor het vermogen over de motor ook klein blijft. Door nu de voorgeschakelde weerstanden één voor één af te schakelen, stijgt I waardoor ook het motorvermogen toeneemt. Het vermogen dat niet door de motor wordt gebruikt, wordt dan in de weerstanden omgezet in warmte.

Op het moment dat alle voorschakelweerstand zijn afgeschakeld, draait de motor op constant vermogen. Er moet dan voldaan worden aan de volgende vergelijking (Keizer en Wiersma, 1999):

$$P = \frac{E_a^2}{C\omega}$$

Hierin is E_a de tegenspanning, ω de hoeksnelheid van de motor en C een constante waarvan de grootte onder andere afhangt van de grootte van het magnetisch veld.

Bij een hoger toerental (en dus een hogere snelheid) zal volgens bovenstaande formule het vermogen en daarmee de aandrijfkracht van de motor dus afnemen, wat ongewenst is. Dit wordt in de praktijk gecompenseerd door de constante C te laten dalen. Aangezien C afhankelijk is van de veldsterkte van het magnetische veld, moet de veldsterkte van het magneetveld dus kleiner worden gemaakt om C te laten dalen. Dit wordt gedaan door een deel van de veldwikkelingen in de elektromagneet kort te sluiten of een deel van de stroom buiten de veldwikkelingen om te leiden. Dit wordt *veldverzwakking* genoemd.

Veldverzwakking kan maar in beperkte mate worden toegepast (slechts 25% tot 30% kan worden afgezwakt) en deze grens wordt meestal bereikt bij een lager toerental dan het maximum. Daarom wordt het laatste stukje van het toerengebied met de natuurlijke karakteristiek verlopen volgens bovenstaande formule. In dit laatste stuk neemt dus het motorvermogen af. (In Figuur 3.2 uit paragraaf 4.2.2 is dit de gestippelde lijn). Het vermogensverlies tijdens dit laatste stukje kan worden berekend met de formule¹:

$$P_{verlies} = P_{max} \cdot (\sqrt{q} - q)$$

Hierin is P_{max} het maximale vermogen van de motor en q het quotiënt van het maximale vermogen en het geleverd vermogen.

Het regelen met behulp van weerstanden brengt grote energieverliezen met zich mee. Dit kan worden beperkt door meerdere tractiemotoren zogenaamd ‘serie-parallel’ te schakelen, waardoor de energieverliezen ruwweg worden gehalveerd (Keizer en Wiersma, 1999).

Een modernere techniek om de stroomtoevoer te regelen, is de zogenaamde ‘chopper’-installatie. Met deze techniek wordt de hoeveelheid stroom met behulp van thyristoren gedoseerd afhankelijk van de vermogensvraag. Voordeel van deze techniek is dat er vrijwel geen energieverliezen in de weerstanden meer zijn. Nadeel is echter wel dat deze installatie duurder en ook zwaarder (dus meer aandrijfenergie!) is dan de conventionele weerstandsschakelingen (Keizer en Wiersma, 1999).

Draaistroommotor

Zoals de naam al doet vermoeden, werkt de draaistroommotor niet op gelijkspanning, maar op een draaistroom ofwel wisselspanning. Voor de uitleg van een draaistroommotor wordt verwezen naar (Van der Wal en Knol, 1990). De reden dat de werking van de draaistroommotor niet wordt behandeld, is dat dit buiten het doel van dit rapport valt.

¹ Schriftelijke mededeling mr. W. Wolf-Dieter, Siemens AG VT GT E, fabrikant van o.a. elektromotoren.

In een draaistroommotor vinden energieverliezen plaats doordat de gelijkstroom uit de bovenleiding omgezet moet worden in een draaistroom. Het voordeel van een draaistroommotor zit hem vooral in het feit dat ze niet alleen compacter, lichter en goedkoper zijn, maar ook onderhoudsruimer (Keizer en Wiersma, 1999).

Treinrendementen

Samengevat wordt in PRORIN voor de elektrische tractie onderscheid gemaakt tussen de volgende typen motoren:

- seriemotor met weerstandsschakelingen;
- seriemotor met chopper;
- draaistroommotor.

Het rendement van een trein bestaat uit het rendement van de elektromotor en uit het rendement van de 'route' die de elektriciteit in de trein moet afleggen om de elektromotor te bereiken (het stroomreguleringsmechanisme). Zoals hierboven beschreven is het stroomreguleringsmechanisme voor ieder van deze drie type treinen anders. In de literatuur is gevonden, dat het gemiddelde totale rendement van Nederlandse elektrische treinen ongeveer 87% is (Wolve, 1995).

Het rendement van een elektromotor is afhankelijk van de belasting. De belasting is een combinatie van aandrijfkraft en snelheid. In PRORIN wordt de rendementsvariatie van de motor niet meegenomen, maar wordt er een gemiddeld rendement voor de drie typen elektromotoren van 95% genomen (Weigel, 2000).

Bij tractie-installaties van het type 'seriemotor met chopper' en 'asynchrone draaistroommotor' is dan het gemiddelde rendement van het stroomreguleringsmechanisme eenvoudig te berekenen als $0,87/0,95 \cdot 100\% = 92\%$. Dit betekent dus dat er in de treinen van deze typen gemiddeld 8% energie verloren gaat, anders dan in de elektromotor (bv. in de thyristoren).

Voor treinen met weerstandsgeschakelde seriemotoren ligt de rendementsbepaling ingewikkelder. Er treden grote energieverliezen verliezen op in de weerstanden. Bijlage 5 beschrijft een methode om het treinrendement te berekenen van een trein met weerstandsgeschakelde seriemotoren.

Verliezen in de bovenleiding

Een significant deel van het totale rendement zijn de verliezen die in de bovenleiding optreden. Deze verliezen worden berekend volgens:

$$P_{\text{verlies}} = I^2 \cdot R$$

Hierin is I de stroomsterkte door de bovenleiding en R de weerstand van de bovenleiding. R is afhankelijk van onder andere de dikte van het materiaal, de afstand van de trein tot het onderstation en de temperatuur van de bovenleiding. I wordt groter naarmate er meer stroom door de bovenleiding loopt. Een trein die een groot vermogen vraagt, zal dus voor meer verliezen zorgen in de bovenleiding.

Bij elektrische tractie-installaties is een onderverdeling te maken in wissel- en gelijkspanningssystemen. Bij wisselspanningssystemen is de bovenleidingspanning hoog en de stroomsterkte laag. De spanning wordt in dergelijke systemen door een transformator in de trein op een voor de tractiemotoren bruikbaar niveau gebracht. Zo'n transformator is een relatief zwaar en omvangrijk apparaat (± 10 ton¹). Daarom wordt er dan ook vaak gekozen voor een gelijkspanningssysteem. De spanning op de bovenleiding is dan in een onderstation al op een bruikbaar niveau gebracht zodat de trein geen grote transformator meer nodig heeft. Bij gelijkspanningssystemen is de spanning laag en de stroomsterkte hoog. Nadeel is dan wel dat er bij gelijkspanningssystemen grote distributieverliezen in de bovenleidingen optreden door de grote stroomsterkte. Deze verliezen kunnen wel oplopen tot 30%, afhankelijk van de afstand van de trein tot het onderstation².

Voor dit onderzoek worden gemiddelde rendementen van de bovenleiding aangenomen. Voor het gelijkspanningssysteem is dit 89,6% en voor het wisselspanningssysteem is dit 96,7% (Wolve, 1995). In Nederland rijden de treinen voornamelijk op een gelijkspanning van 1500 V. Er wordt echter over gesproken om nieuw aan te leggen spoorlijnen te voorzien van wisselspanning van 25 kV, aangezien dit ook een Europese standaard gaat worden.

Verliezen in het nationale net

Voor de verliezen in het nationale elektriciteitsnet geldt dezelfde formule als voor de verliezen in de bovenleiding. De verliezen zijn relatief echter veel kleiner, omdat er met een veel grotere spanning (en dus veel lagere stroomsterkte) gewerkt wordt. Dit wordt echter deels weer gecompenseerd doordat de totale draadlengte veel langer is. In Nederland waren in 1998 de verliezen in het nationale net 4,2% (EnergiedNed, 1999). Voor dit onderzoek wordt dit getal gebruikt voor de verliezen in het nationale elektriciteitsnet. Het rendement van het nationale net wordt dan 95,8%.

3.5.2 Diesel-elektrische tractie

Bij deze vorm van tractie drijft een dieselmotor een elektrische generator aan die de elektriciteit levert voor de elektromotoren die op hun beurt de wielassen aandrijven. Door het ontbreken van mechanische verbindingen is er een grote vrijheid in de plaatsing van de motor-generator combinatie en kan zonder problemen een willekeurig aantal assen aangedreven worden. Daar staat tegenover dat de gehele installatie relatief zwaar en duur is

¹ Mondelinge mededeling juni 2000 van dr.ir. Leo A.M. van Dongen, hoofd materieel & infrabeleid NS-Reizigers.

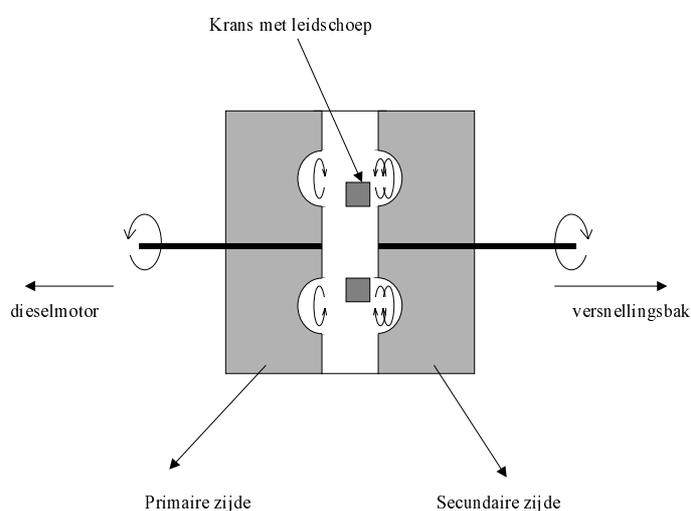
² Mondelinge mededeling W. Fiechter (NS-Reizigers)

omdat het vermogen in feite driemaal wordt geïnstalleerd: in de dieselmotor, in de generator en in de elektromotoren.

Het rendement van treinen met diesel-elektrische tractie kan opgesplitst worden in het rendement van de dieselmotor en het rendement van de elektromotor (inclusief generator). Deze rendementen zijn niet constant, maar variëren met de belasting van de motoren. Voor dit onderzoek wordt gerekend met gemiddelden. Het gemiddelde rendement van de dieselmotor wordt 38% verondersteld (Dings, 1995). Voor het rendement van de elektromotor (inclusief generator) wordt een waarde van 80% genomen (Dings, 1995; Keizer en Wiersma 1999).

3.5.3 Diesel-hydraulische tractie

Het meest toegepaste hydraulisch systeem is de zogenaamde vloeistofkoppeling. Deze koppeling bestaat uit een primair deel en een secundair deel (Figuur 3.8). Het primaire deel wordt aangedreven door een dieselmotor. Het secundaire deel geeft het koppel van het primaire deel door naar een versnellingsbak. Het koppel van de dieselmotor kan tussen het primaire en het secundaire deel doorgegeven worden doordat er op de olie tussen het primaire en het secundaire deel een grotere middelpuntvliegende kracht ontstaat bij het primaire deel dan bij het secundaire deel. Hierdoor wordt een circulatie van oliedeeltjes in stand gehouden. Oliedeeltjes die de primaire ruimte verlaten, botsen in het secundaire gedeelte op schotten zodat een kracht wordt overgebracht.



Figuur 3.8: Principe van een hydrodynamische vloeistofkoppeling

Het rendement van een hydraulische overbrenging ligt door de toepassing van meerdere koppelvormers rond de 80% (Keizer en Wiersma). Dat wil dus zeggen dat 80% van de mechanische energie die door de dieselmotor wordt geproduceerd, beschikbaar komt aan de assen van de trein. Voor dit onderzoek wordt ervan uitgegaan dat de dieselmotor eenzelfde gemiddeld rendement heeft als bij diesel-elektrische tractie. Deze is dan 38%.

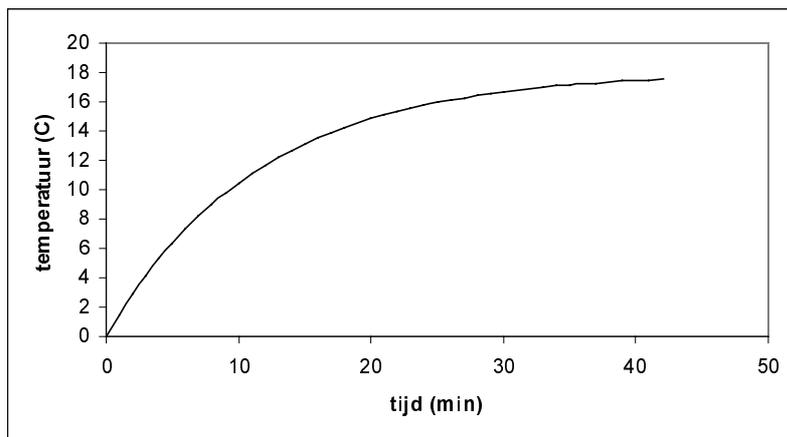
3.6 Energie voor de verwarming

Net als bij het energiegebruik van de voortbeweging, kan er voor het energiegebruik voor de verwarming ook een ‘well-to-wheel’ analyse gemaakt worden. Voor elektrische en diesel-elektrische tractie geldt, dat de weg die de energie volgt van de ‘well’ tot aan de trein hetzelfde is voor de verwarming als voor de voortbeweging. In de trein zal er elektriciteit naar de verwarming gaan, waar het wordt omgezet in warmte. Bijlage 6 omschrijft een methode om aan de hand van de afmetingen van de trein de hoeveelheid energie uit te rekenen die aan de lucht moet worden toegevoegd om een bepaalde temperatuur te bereiken.

Voor het elektriciteitsgebruik ten gevolge van het verwarmen van een trein geldt dan:

$$P_{\text{verwarm}} = (T_{\text{binnen}} - T_{\text{buiten}}) \cdot 2,0 \cdot A$$

Hierin is P_{verwarm} het vermogen dat de verwarming aan de lucht in de trein levert en A het totale oppervlakte van de trein. Figuur 3.9 geeft voor drie gekoppelde ‘Koploper-3’-treinstellen het (theoretische) temperatuursverloop weer, als wordt aangenomen dat de buitentemperatuur en de begintemperatuur 0°C zijn en de trein wordt verwarmd tot 18°C .



Figuur 3.9: Theoretisch temperatuursverloop van 3 koploper 3.

4. Milieubelasting van elektriciteitsproductie

4.1 Inleiding

Voor het bottom-up berekenen van de milieubelasting van elektrisch railvervoer moet bekend zijn wat de emissies zijn die vrijkomen bij het opwekken van de elektriciteit die door treinen wordt afgenomen. Tijdens het onderzoek werd duidelijk dat er geen goede emissiefactoren voor de Nederlandse elektriciteitsproductie beschikbaar zijn. Om deze reden is besloten om een apart onderzoek te wijden aan een analyse van de milieubelasting van het Nederlandse elektriciteitsaanbod. Voor de uitgebreide rapportage over dit onderzoek wordt verwezen naar Gijsen en Spakman (2001).

Nederland kent vier grote bedrijven die de productie van elektriciteit als kerntaak hebben. Deze vier bedrijven zijn verenigd in de Samenwerkende Elektriciteit Producenten (Sep)¹. De elektriciteit geproduceerd door de Sep wordt *de centrale productie* genoemd. Daarnaast zijn er ook tal van bedrijven die in hun eigen elektriciteitsvraag voorzien door de elektriciteit zelf op te wekken. De bedrijven die dit doen hebben bijvoorbeeld warmte nodig voor hun processen en produceren als bijproduct elektriciteit. Het deel van de elektriciteit dat die bedrijven niet gebruiken, wordt aan het openbare elektriciteitsnet geleverd. De *totale* elektriciteitsproductie die door bedrijven anders dan de Sep wordt geproduceerd, wordt aangeduid als de *decentrale productie*.

Een lange tijd had deze vorm van opwekking geen significant aandeel op de totale elektriciteitsproductie ten opzichte van de centrale opwekking, maar drie ontwikkelingen aan het einde van de jaren tachtig brachten daar verandering in. Ten eerste stegen door de energiecrisis de prijzen van fossiele brandstoffen, waardoor de energieprijzen omhoog gingen met als gevolg dat het aantrekkelijker werd om efficiënter met energie om te gaan. Ten tweede veranderde de organisatiestructuur van de centrale productiebedrijven waardoor er meer ruimte kwam voor decentrale opwekking. Als laatste werd er technologische vooruitgang geboekt op het gebied van gasturbines, zodat kleinschalige elektriciteitsopwekking toegankelijker werd (Van Engelen, 1992).

De milieuproblematiek aan het eind van de jaren tachtig zorgde dus voor een herwaardering van decentrale opwekking, aangezien met decentrale opwekking zowel elektriciteit als nuttige warmte wordt geproduceerd. In dit kader werd er door de overheid in 1987 een Stimuleringsprogramma Warmtekracht opgezet. Mede hierdoor stond er in 1992 voor 2700 MW aan decentraal vermogen. In 1995 was dit al gestegen tot 4200 MW (22% van het totale vermogen) en in 1998 bedroeg dit 6200 MW (27% van het totale vermogen). Het Milieuactieplan van de energiedistributiesector stelde zich in 1991 tot taak een nationaal

¹ Door de liberalisering van de energiemarkt bestaat de Sep niet meer. Met de Sep wordt in het verdere rapport dan ook de vier grote productiebedrijven bedoeld.

geïnstalleerd productievermogen van 4500 MW in het jaar 2000. Uit voorgaande cijfers blijkt dat dit ruim is overtroffen.

Een derde bron van elektriciteit naast de centrale en de decentrale productie is de *import*. Nederland staat op drie plaatsen in verbinding met het Belgische elektriciteitsnet en op drie plaatsen met het Duitse net. Door deze verbindingen worden ook de exporten uitgevoerd. De importen en exporten vinden voornamelijk plaats door de Sep¹.

In paragraaf 4.2 wordt de methode die is gebruikt in het rapport “DAMES: De macro-emissie van het Nederlandse elektriciteitsaanbod in 1995, 1998, 2010, 2020 en 2030” om de milieubelasting van de elektriciteitsproductie te bepalen. In paragraaf 4.3 worden de resultaten van dit onderzoek besproken.

4.2 Methode voor de berekeningen

Met DAMES zijn de emissies van CO₂, NO_x en SO₂ per geproduceerde kWh berekend. Dit wordt gedaan door het totale elektriciteitsaanbod *beschikbaar voor het Nederlandse territorium* te delen door de totale emissies die door dit totale elektriciteitsaanbod zijn veroorzaakt. Hierbij worden de volgende stappen gevolgd:

1. De totale hoeveelheid elektriciteit *beschikbaar voor Nederlands territorium* wordt bepaald door voor ieder installatietype (= manier van elektriciteitsopwekking) de productie te bepalen en dit te sommeren;
2. Vervolgens worden met behulp van emissiefactoren per installatietype de emissies per installatietype bepaald en gesommeerd;
3. Bij de elektriciteitsproductie en bij de emissies worden de geïmporteerde hoeveelheden opgeteld en de geëxporteerde hoeveelheden afgetrokken;
4. Als laatste wordt de totale hoeveelheid elektriciteit beschikbaar voor Nederland gedeeld op de totale emissies om de emissies per energie-eenheid (kWh) te berekenen.

DAMES berekent dus de gemiddelde emissies van de voor Nederland beschikbare kWh (binnenlandse productie + import – export). Met dit model wordt geen rekening gehouden met het feit dat een deel van de decentrale productie in de praktijk nooit beschikbaar komt voor het openbare net, maar direct wordt gebruikt door het bedrijf dat ze produceert. De emissies die hiermee gepaard gaan, worden echter wel meegerekend in de berekening van de gemiddelde emissies per kWh. Als DAMES wordt gebruikt voor specifieke elektriciteittoepassingen, zoals bijv. de emissies van elektrisch railvervoer, dan worden dus de emissies veroorzaakt door elektriciteit dat nooit het openbare net ingaat, ook meegerekend. Stel dat de zelfgebruikte elektriciteit hoge emissiefactoren zou hebben, dan zouden de emissies voor de toepassing (bijv. railvervoer) te hoog worden ingeschat.

In (Gijsen en Spakman, 2001) worden met bovenstaande methode de emissiefactoren per kWh berekend voor 1995 en voor 1998. Tevens worden voor de toekomstjaren 2010, 2020 en 2030 prognoses gemaakt. Hierbij is gebruik gemaakt van scenario's opgesteld door het Centraal Plan Bureau. Deze scenario's zijn *European Coördination* (EC) en *Global Competition* (GC) genaamd. Voor de uitleg van deze scenario's op hoofdlijnen wordt verwezen naar hoofdstuk 8. Voor de aannames die in deze scenario's zijn gemaakt voor wat betreft de elektriciteitsopwekking wordt naar Gijsen en Spakman (2001) verwezen.

Een belangrijke kanttekening is dat de emissiefactoren die op bovenstaande wijze worden berekend niet per definitie betrekking hebben op het Nederlandse railvervoer. Een spoorwegmaatschappij kan immers zelf bepalen bij welke (buitenlandse) energiemaatschappij het elektriciteit inkoopt. De Nederlandse Spoorwegen hebben bijvoorbeeld in 1999 5% 'groene stroom' ingekocht. Er gelden voor de elektriciteit die wordt gebruikt in het Nederlandse spoorvervoer zeer waarschijnlijk dus andere (lagere of hogere) emissiefactoren als die voor het gemiddelde Nederlandse elektriciteitsaanbod. Aangezien de herkomst van de in het Nederlandse spoorvervoer gebruikte elektriciteit van jaar tot jaar sterk kan verschillen, wordt in PRORIN verondersteld dat de emissiefactoren van de door de spoorvervoerders ingekochte elektriciteit gemiddeld gelijk zijn aan die van het Nederlandse elektriciteitsaanbod.

4.3 Resultaten berekeningen

In (Gijsen en Spakman, 2001) worden de volgende emissiefactoren van de elektriciteitsproductie gevonden.

Tabel 4.1: Emissiefactoren van de Nederlandse elektriciteitsproductie (per eenheid geproduceerde elektriciteit)

g/kWh _e	CO ₂	SO ₂	NO _x
1995	548	0,23	0,77
1998	526	0,18	0,67
EC 2010	304	0,07	0,25
EC 2020	267	0,05	0,20
EC 2030	262	0,02	0,18
GC 2010	356	0,09	0,27
GC 2020	291	0,03	0,17
GC 2030	270	0,01	0,16

bron: Gijsen en Spakman, 2001

4.3.1 Emissiefactoren inclusief winning en transport

Tijdens de winning en transport van grondstoffen voor de elektriciteitsproductie wordt ook energie gebruikt en komen emissies vrij. Voor een volledige "well-to-wheel" analyse van de milieubelasting door elektriciteitsgebruik, moeten deze zogenaamde indirecte emissies ook in

ogenschouw worden genomen. In dit onderzoek is de energieproductie verdeeld naar productie uit: steenkool, aardgas, uranium en overige energiedragers. De overige energiedragers bestaan uit hoogovengas, raffinaderijgas, biomassa, olie, afval, zon, wind en water. Deze energiedragers zijn in de post ‘overig’ opgenomen omdat ze óf geen emissies veroorzaken bij de ‘productie’ ervan (denk aan wind, zon, enz.) óf het aandeel zo klein is dat verder onderzoek niet zinvol werd geacht. De emissies die vrijkomen bij de bouw of de sloop van de installaties worden niet beschouwd, omdat hierover niet voldoende informatie is gevonden.

Voor de energiedragers die wel significante emissies veroorzaken, gelden de cijfers van Tabel 4.2 (Dwarshuis *et al.*, 1990). Deze cijfers betreffen de emissies ten gevolge van alle handelingen die plaatsvinden in de keten vanaf de winning van grondstoffen tot aan de elektriciteitscentrale. De emissies worden betrokken op de hoeveelheid (directe) energie die ‘aan de ingang’ van de elektriciteitscentrale wordt afgeleverd. De energiefactor is de totale hoeveelheid primaire energie die nodig is om één eenheid energie te leveren aan de ingang van de elektriciteitscentrale (Wilting *et al.*, 1994).

Tabel 4.2: Emissie- en energiefactoren winning en transport enkele energiedragers

energiedrager	CO ₂ -emissie	SO ₂ -emissie	NO _x -emissie	energiefactor
	kg/GJ	g/GJ	g/GJ	
aardgas	3,0	0,4	10,1	1,01
steenkool	2,9	6,3	7,6	1,10
uranium	1,9	19,1	5,7	1,007 a)
aardolieproducten				1,11

(a) Biesiot (1993) geeft als waarde voor de energiestromen vóór een 1 GWjr centrale voor de Nederlandse situatie 687 TJ. 1 GWjr komt overeen met 31500 TJ. Met een rendement van 31% wordt de energiefactor dus $687/31500/0,31 + 1 = 1,007$

Voor de verschillende jaren is berekend hoeveel indirecte energie er wordt gebruikt en hoeveel indirecte emissies er vrijkomen bij het Nederlandse elektriciteitsaanbod. Voor de emissie- en energiefactoren worden dan de volgende getallen gevonden (Tabel 4.3):

Tabel 4.3: Energie en emissiefactoren inclusief winning en transport

	CO ₂ (gram/kWh)		SO ₂ (mg/kWh)		NO _x (mg/kWh)		energiefactor
	direct	indirect	direct	indirect	direct	indirect	
1995	548	22	228	45	771	66	1,042
1998	526	22	182	38	666	63	1,038
EC 2010	304	14	71	8	250	44	1,023
EC 2020	267	12	46	5	202	41	1,015
EC 2030	262	13	22	2	178	43	1,008
GC 2010	356	14	89	10	274	45	1,028
GC 2020	291	14	34	5	168	46	1,016
GC 2030	270	8	10	1	159	26	1,005

5. De milieubelasting van dieselmotoren

5.1 Inleiding

Dieseltractie in railvervoer bestaat sinds ongeveer 1920 toen in Duitsland de *Fliegende Hamburger* ging rijden. Tegenwoordig worden in Europa dieseltreinen vooral ingezet op trajecten waar geen elektriciteit is omdat elektrificatie bijvoorbeeld niet rendabel wordt geacht. Op internationaal niveau is een groot voordeel van diesel-tractie, dat aan de grenzen van verschillende landen de locomotief van de trein niet verwisseld hoeft te worden, zoals bij elektrische tractie. Bij elektrische tractie is dit wel nodig omdat er tussen landen verschillende elektriciteitssystemen zijn zodat de locomotief vervangen moet worden om de trein in het volgende land te kunnen laten rijden.

Paragraaf 5.2 gaat in op de emissiefactoren van dieselmotoren en Paragraaf 5.3 behandelt de mogelijkheden voor emissiereductie. Paragraaf 5.4 bespreekt de milieubelasting van de winning, transport en raffinage van diesel.

5.2 Emissiefactoren van de dieselmotor

5.2.1 Inleiding

De werking van een dieselmotor is in grote lijnen hetzelfde als de werking van een gasmotor zoals beschreven in (Gijsen en Spakman, 2001).

Voor de uitstoot van schadelijke stoffen veroorzaakt door dieseltreinen bestaan, anders dan bij vele andere vervoermodaliteiten, geen wettelijke beperkingen. De koepelorganisatie voor spoorwegmaatschappijen UIC (Union Internationale des Chemins de fer) schrijft heeft wel emissierichtlijnen die weliswaar geen wettelijke status kennen maar wel worden nageleefd door de aangesloten maatschappijen (o.a. Nederlandse Spoorwegen). De emissienormen in deze richtlijn liggen echter nog op een dusdanig niveau dat er geen of weinig inspanning voor nodig is om dieselmotoren minder te laten emitteren dan de huidige norm. De UIC bereidt op dit moment wel stappen voor om de zichzelf opgelegde emissienormen aan te scherpen.

De reden dat de milieubelasting van dieseltreinen nooit echt in de politieke belangstelling heeft gestaan is dat de milieubelasting door dieseltreinen een zeer klein deel uitmaakt van de totale milieubelasting door verkeer en vervoer¹. In het kader van de vergelijking tussen vervoerwijzen komen de relatief hoge emissies door dieseltreinen steeds meer onder de aandacht.

¹ Mondelinge mededeling januari 2000 van drs. Harold Resida algemene en juridische zaken NS-Reizigers.

Er bestaat reeds wetgeving voor de emissies van schepen en wegvoertuigen, directe concurrenten van railvervoer (Brown, 2000):

- De IMO (United Nation's International Maritime Organisation) NO_x Technical Code;
- Europese wetgeving wat betreft de emissies van wegvoertuigen (Euro I t/m V);
- CCR (Centrale Commissie Rijnvaart) wetgeving wat betreft de emissies van binnenschepen.

Europese emissienormstelling voor nieuwe dieselmotoren zal vermoedelijk moeizaam tot stand kunnen komen. De wereldwijde markt voor deze dieselmotoren is klein en bovendien nogal gefragmenteerd. Met dit laatste wordt bedoeld dat de verschillende markten verschillende eisen aan dieselmotoren stellen. Door deze marktcondities zijn dieselmotoren voor treinen voor fabrikanten meestal een nevenproduct naast dieselmotoren voor schepen en vrachtwagens. Als er dus Europese emissiewetgeving zou worden geïntroduceerd dan zou dit kunnen leiden tot een nog verdergaande fragmentatie en tot een sterke toename van de productiekosten voor deze dieselmotoren.

5.2.2 Emissiefactor van CO₂

De emissiefactor van CO₂ (in g/kg brandstof) is alleen afhankelijk van de gebruikte brandstof. Voor de berekeningen wordt een vaste CO₂ emissiefactor van diesel van 73 kg/GJ genomen. Het CBS geeft voor diesel een onderste verbrandingswaarde van 35,9 MJ/liter. De NS geeft een waarde van 38,2 MJ/liter¹. Er wordt gerekend met deze NS-waarde. Als een dichtheid van diesel van 840 g/liter wordt aangenomen, dan wordt de stookwaarde van diesel 45,5 MJ/kg (CBS en RIVM: 42,7 MJ/kg).

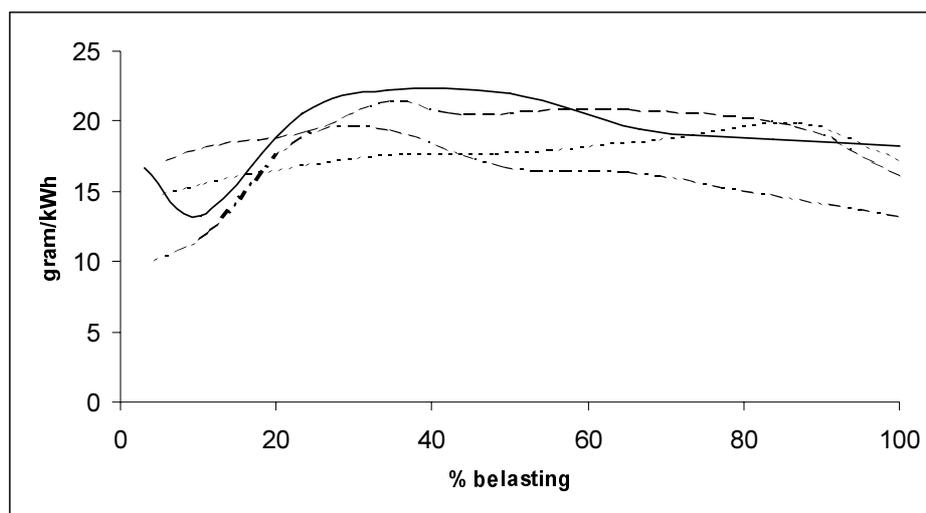
5.2.3 Emissiefactor van NO_x

De emissiefactor van NO_x bij de verbranding van diesel is afhankelijk van (zie ook hoofdstuk 4):

- de compressor-einddruk;
- de verbrandingstemperatuur;
- de zuurstofconcentratie in het reagerend mengsel;
- de verblijftijd van NO in de verbrandingskamer.

Bovenstaande factoren zijn niet constant maar veranderen met de belasting van de motor (belasting = percentage van het maximale motorvermogen dat wordt benut). Hierdoor verandert de emissiefactor van NO_x ook met de belasting. Van vier dieselmotoren die worden toegepast in dieseltreinen zijn gegevens bekend over de uitstoot van NO_x per eenheid door de motor geleverde energie (in kWh) als functie van de motorbelasting (Figuur 5.1).

¹ Schriftelijke mededeling juni 2000 van ir. G.W. Fiechter, beleidsmedewerker energie en milieu NS-Reizigers.



Figuur 5.1 : NO_x -uitstoot per kWh als functie van de motorbelasting [bron: Brown 2000]

In PRORIN is gerekend met het ongewogen gemiddelde van de curven in Figuur 5.1. Voor de vier motoren uit Figuur 5.1 voldoen aan de UIC-emissienorm voor NO_x van 16 g/kWh. Nieuwe motoren worden onderworpen aan een testcyclus (ISO 8178 cycle F) om vast te stellen of ze aan de op dat moment geldende normen voldoen. In deze testcyclus worden metingen uitgevoerd bij verschillende motorbelastingen, 0% (stationair draaiende motor), 50% en 100%. Het UIC gaat ervan uit dat dieselmotoren in treinen gemiddeld 60% van de tijd stationair draaien, 15% van de tijd op half vermogen en 25% van de tijd op vol vermogen. De emissie-metingen worden gewogen met deze percentages en vergeleken met de norm.

Per 1 januari 1997 heeft de UIC de norm verlaagd tot 12 gram/kWh. In de toekomst moeten deze waarden worden teruggebracht tot circa 10 g/kWh vanaf 2003 en 6 g/kWh vanaf 2008 (zie Tabel 5.1). In PRORIN is verondersteld dat NO_x -emissiefactor voor dieselmotoren van na 1 januari 1997 voor alle motorbelastingen circa 25% lager is dan voor de oudere dieselmotoren uit Figuur 5.1.

Tabel 5.1: UIC-emissienormstelling

	CO (g/kWh)	VOS (g/kWh)	NO_x (g/kWh)	PM_{10} (g/kWh)	Smoke ^{b)} (Bosch)
huidige normen ^{a)}	3,0	0,8	12,0	-	1,6
voorstel fase 2 (vanaf 1-1-2003)	2,5 – 3,0	0,6 – 0,8	6,0 – 9,9	0,25	-
voorstel fase 3 (vanaf 1-1-2008)	2,0	0,5	4,5 – 6,0	0,15 – 0,20	-

a) normen gelden voor F-cyclus van de ISO 8178 standaard waarin een relatief groot aandeel stationair draaien voorkomt (60%)

b) het zogenoemde Bosch Smoke number is niet eenduidig te vertalen naar deeltjesemissie omdat het Smoke number de uitkomst is van een zwartkleuringsproef.

bron: UIC (1999)

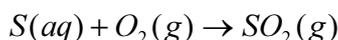
In PRORIN wordt onderscheid gemaakt naar vier klassen voor de motorbelasting. Voor iedere klasse is aan de hand van Figuur 5.1 de gemiddelde NO_x-emissie per kWh berekend. Vervolgens worden de gemiddelde NO_x-emissie per kWh berekend aan de hand van het aandelen in de tijd dat de motorbelasting zich in de vier motorbelastingklassen bevindt. De emissiefactoren per MJ diesel zijn berekend uitgaande van een rendement van de dieselmotor van 38% (zie hoofdstuk 3).

Tabel 5.2: NO_x-emissie-indeling naar vermogensbelasting

belasting (%)	gram/kWh		gram/MJ diesel	
	oude trein (<'97)	nieuwe trein (>'97)	oude trein (<'97)	nieuwe trein (>'97)
0-20	14,8	11,1	1,6	1,2
20-40	19,5	14,6	2,1	1,5
40-90	18,8	14,1	2,0	1,5
100	16,2	12,2	1,7	1,3

5.2.4 Emissiefactor van SO₂

Net als de emissiefactor van CO₂ is de emissiefactor van SO₂ afhankelijk van de gebruikte brandstof. Het zwavel (S) in dieselolie reageert tijdens de verbranding met zuurstof volgens de volgende reactievergelijking:



Er vormen zich echter ook vaste of vloeibare sulfaatdeeltjes (H₂SO₄). De moleculaire massa van zwavel is 32,06 u. Die van zuurstof is 32 u. De emissiefactor van SO₂ (in g/MJ brandstof) laat zich dan berekenen volgens:

$$Em = \frac{20 * y}{E_{verbrand}}$$

Hierin is *Em* de emissiefactor van SO₂ in g/MJ brandstof, *y* het massapercentage zwavel in de brandstof en *E_{verbrand}* de verbrandingswaarde van diesel in MJ/kg. Tabel 5.3 geeft de berekende emissiefactoren van enkele veel gebruikte brandstoffen. De zwavelgehalten en verbrandingswaarden zijn gebaseerd op cijfers van 1997.

Tabel 5.3: *Berekende emissiefactoren van SO₂ in 1998*

brandstof	zwavelgehalte [% gewicht]	verbrandingswaarde [MJ/kg]	SO ₂ -emissiefactor [mg/MJ]
diesel (wegverkeer)	0,05	45,5	22
diesel (niet-wegverkeer)	0,17	42,5	80
benzine (wegverkeer)	0,02	40,0	10
stookolie	2,70	41,0	1320

bron: CBS (1998)

5.3 Reductie van emissies

5.3.1 CO₂-reductie

De CO₂-emissie per voertuigkm kan worden beperkt door de benodigde aandrijfenergie te verminderen door bijvoorbeeld het verminderen van het voertuiggewicht, of door het verhogen van het rendement van de verbrandingsmotor. Deze rendementsverhoging kan op vele verschillende manieren worden gerealiseerd, onder andere door de verbrandingstemperatuur te verhogen. Een verhoging van de verbrandingstemperatuur gaat echter ceteris paribus gepaard met een toename van de NO_x-emissie doordat bij hogere temperaturen meer N₂ met O₂ tot NO reageert.

5.3.2 NO_x-reductie

De NO_x-uitstoot kan beperkt worden met de SCR-techniek zoals uitgelegd in Gijsen en Spakman (2001). Deze techniek is alleen geschikt bij hoge uitlaatgastemperaturen. Voor dieseltreinen zijn er echter een aantal technische beperkingen (Schreiner, 2000):

- Lage uitlaatgastemperaturen tijdens het stationair draaien en gemiddeld lage motorbelasting;
- De SCR-installatie is groot en zwaar;
- Bij lage omgevingstemperaturen kan het gebruikte ureum kristalliseren.

Tevens kan de NO_x-uitstoot worden gereduceerd door het verlagen van de verbrandingstemperatuur. Hierdoor neemt echter wel de brandstofefficiency af en daarmee neemt de CO₂-emissie toe.

5.3.3 SO₂-reductie

De uitstoot van SO₂ kan niet met een rookgasontzwavel-installatie, zoals uitgelegd in (Gijsen en Spakman, 2001), worden beperkt, aangezien deze installatie te omvangrijk en te zwaar is om in treinen te worden toegepast. De belangrijkste methode om emissies van SO₂ te beperken is het toepassen van laag-zwavelige brandstoffen.

5.4 Delving, raffinage en distributie van diesel

Er kunnen geen universele getallen worden gegeven voor de rendementen en de emissiefactoren van het hele traject van diesel voordat het bij de trein is. Hiervoor variëren de omstandigheden waarin diesel wordt geproduceerd te veel (IEA, 1999). Ruwe olie kan bijvoorbeeld op vele plaatsen gewonnen worden (Midden-Oosten, Noordzee), waardoor de wijze van het transport ook verschillend is. Ook zijn er verschillen in efficiency van raffinaderijen en kwaliteit van de geraffineerde aardolie. De in deze paragraaf gegeven getallen zijn wereldwijd gemiddelde waarden. Wanneer betrokken op de olieraffinage in een specifiek land moeten een grote onzekerheidsmarge in acht worden genomen.

De energieketen vanaf de oliebron ('well') tot aan de trein kan worden onderverdeeld in vier stappen:

1. Winning van de ruwe olie;
2. Transport van de ruwe olie;
3. Raffinage van de ruwe olie tot diesel;
4. Transport van de diesel.

5.4.1 Winning van de ruwe olie

Bij de winning van de ruwe olie wordt door het olieplatform energie gebruikt en komen er emissies vrij. Voor ruwe olie wordt deze energie, meestal in de vorm van aardgas of diesel, gebruikt voor de stabilisatie van de olie door het scheiden van LPG en andere gassen van de olie. Belangrijke energieverliezen treden op tijdens het affakkelen of het ontsnappen van overtollige gassen, die ook met de olie mee omhoog worden gepompt. Tijdens het affakkelen of ontsnappen van deze gassen treden energieverliezen op en komen de meeste emissies vrij (IEA, 1999).

5.4.2 Transport van de ruwe olie

Ruwe olie wordt vervoerd over zee of door pijpleidingen. Emissies komen dan vrij tijdens verliezen door verdamping tijdens het laden en lossen en door de emissies van de motor van het schip. De hoeveelheid hangt sterk af van de afstand die de olie tot de raffinaderij moet afleggen.

5.4.3 Raffinage van de ruwe olie tot dieselolie

Het verwerken van ruwe olie tot diesel kost energie (in de vorm van elektriciteit, brandstof en stoom). Dit energiegebruik laat historisch bekeken een stijgende trend zien omdat er steeds strengere eisen aan de kwaliteit van diesel, vooral met betrekking tot het zwavelgehalte, worden gesteld.

5.4.4 Transport van dieselolie

Diesel volgt de volgende route tot aan de trein: Van de raffinaderij gaat de diesel via schepen of pijpleidingen naar de plaats waar het in tankauto's wordt overgepompt. Deze vrachtwagens brengen de diesel naar de tankstations waar het vervolgens in de trein wordt overgepompt. Het energiegebruik en de emissies hangen voornamelijk samen met de afgelegde afstand en het soort vrachtwagens en/of schepen dat wordt ingezet voor distributie van dieselolie.

Tabel 5.4 geeft de emissiefactoren van bovenstaande punten. Deze zijn berekend uit (Rijkeboer *et al.*, 1992). Dit rapport gaat zeer gedetailleerd in op de het energiegebruik en emissies tussen het booreiland en het tankstation.

Tabel 5.4: *Energiegebruik en emissies tijdens de delving, transport en dieselraffinage*

	E-gebruik a)	rendement	CO ₂ a)	SO ₂ a)	NO _x a)
		%	kg/GJ diesel	g/GJ diesel	g/GJ diesel
	MJ/GJ olie				
winning ruwe olie	32,2	97	2,93	49,0	5,4
transport ruwe olie	15,1	99	1,18	25,8	14,8
	MJ/GJ diesel				
raffinage diesel	77,8	93	0,25	1,01	0,15
	MJ/GJ diesel				
transport diesel	1,8	99,8	0,005	0,002	0,067
TOTAAL		89	4,4	76,1	20,5

a) berekend uitgaande van een verbrandingswaarde van 45,5 MJ/kg
bron: Rijkeboer *et al.* (1992)

In Tabel 5.5 wordt een vergelijking gemaakt tussen de emissies aan de dieselmotor (directe emissies) en de emissies van de delving, transport en dieselraffinage (indirecte emissies). Hieruit wordt duidelijk dat vooral voor de SO₂-emissies de indirecte emissies een groot aandeel heeft in de totale emissies.

Tabel 5.5: *Vergelijking directe en indirecte emissies van dieseltractie*

direct				indirect			
CO ₂	SO ₂	NO _x	rendement	CO ₂	SO ₂	NO _x	rendement
(kg/GJ)	(g/GJ)	(kg/GJ)	(%)	(kg/GJ)	(g/GJ)	(kg/GJ)	(%)
73	22	0,6 – 2,1	38	4,4	76,1	0,02	89

6. Milieubelasting van het railvervoer in 1998

6.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft een toepassing van PRORIN. PRORIN is toegepast om het totale energiegebruik en de emissies van personen- en goederenvervoer per spoor op het Nederlandse territorium in 1998 te berekenen. Daarnaast wordt in dit hoofdstuk het energiegebruik en de emissies per vervoersprestatie berekend. In het personenvervoer wordt de vervoersprestatie uitgedrukt in reizigerskilometers en in het goederenvervoer in tonkilometers. Er is voor 1998 gekozen omdat tijdens het onderzoek het jaar 1998 het laatste jaar was waar voldoende gegevens over bekend waren.

In dit hoofdstuk wordt als eerste het energiegebruik, in de vorm van elektriciteit en dieselbrandstof, door het personen- en goederenvervoer per spoor berekend. Zoals uit hoofdstuk 3 is gebleken, is dit energiegebruik afhankelijk van zowel technische, operationele en logistieke factoren. De milieubelasting wordt vervolgens berekend door het elektriciteitsgebruik en het gebruik van dieselbrandstof te vermenigvuldigen met de emissiefactoren zoals gegeven in de hoofdstukken 4 en 5.

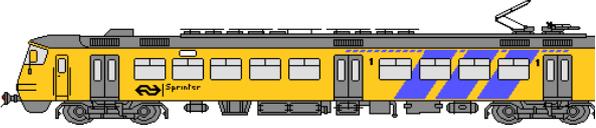
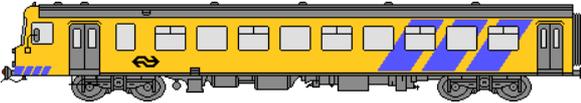
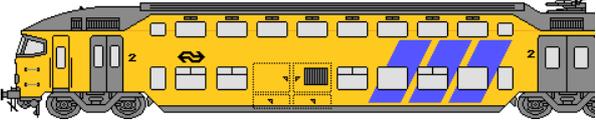
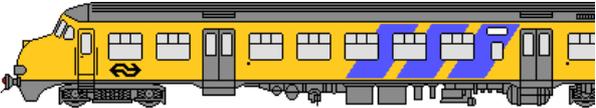
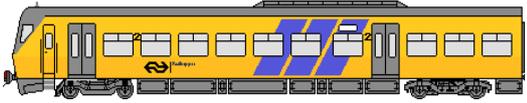
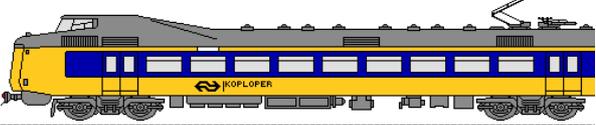
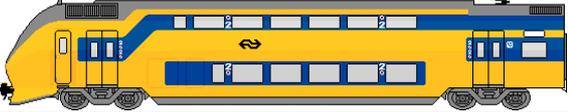
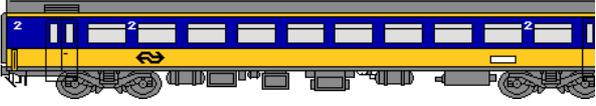
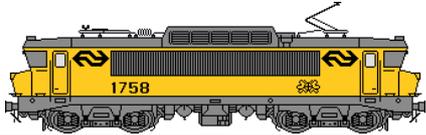
Paragraaf 6.2 gaat in op de wijze waarop de technische, operationele en logistieke factoren voor het personenvervoer zijn verkregen, paragraaf 6.4 doet dit voor het goederenvervoer. Paragraaf 6.3 en 6.5 geven de resultaten voor energiegebruik en emissies en vergelijken de resultaten met andere literatuurbronnen. Paragraaf 6.6 bevat een analyse van de gevoeligheid van de uitkomsten voor het variëren van enkele invoergegevens.

6.2 Invoerfactoren reizigersvervoer

6.2.1 Inleiding

Personentreinen worden onderverdeeld in treinstellen en rijtuigen. Het verschil tussen rijtuigen en treinstellen is, dat treinstellen bestaan uit bakken met een eigen aandrijving en rijtuigen uit bakken zonder eigen aandrijving. Een trein bestaande uit rijtuigen wordt getrokken door een locomotief of een speciaal daarvoor ontworpen motorrijtuig (= locomotief met zitplaatsen voor reizigers). Ze worden dan bestuurd vanuit de locomotief of, als de locomotief of een motorrijtuig moet duwen, vanuit het voorste rijtuig, het zogenaamde stuurstandsrijtuig. Treinstellen kunnen aan elkaar gekoppeld worden. Het aantal bakken van een treinstel wordt dan als volgt uitgedrukt: x -materieelnaam- y . Hierin is x het aantal gekoppelde treinen en y het aantal bakken per trein. Zo betekent de '2 Koploper 4' twee gekoppelde Koplopers, elk bestaande uit 4 bakken. Tabel 6.1 geeft voor het jaar 1998 het gebruikte materieel van NS-Reizigers. Voor een beschrijving van het materieel wordt verwezen naar (NS-Reizigers, 1998).

Tabel 6.1: Gebruikt materieel door NS-Reizigers 1998 voor reizigersvervoer in Nederland (E = elektrische tractie; D = dieseltractie)

materieeltype	categorie	aantal	afbeelding
Sprinter (E)			
tweewagenstel	stop-/snelrein	30	
driewagenstel	stop-/snelrein	60	
Wadloper (D)			
DH1 (éénwagenstel)	stop-/snelrein	19	
DH2 (tweewagenstel)	stop-/snelrein	31	
Stoptrein dubbeldekker			
1e/2e klas	stop-/snelrein	103	
2e klas	stop-/snelrein	138	
stuurstand	stop-/snelrein	92	
motorrijtuig (E)	stop-/snelrein	50	
Materieel '64 (E)			
plan V (tweewagenstel)	stop-/snelrein	242	
plan T (vierwagenstel)	stop-/snelrein	30	
plan U (driewagenstel)	stop-/snelrein	24	
Railhopper (E)			
SM'90	stop-/snelrein	9	
Buffel (D)			
DM'90	stop-/snelrein	53	
Koploper (E)			
driewagenstel	intercity	94	
vierwagenstel	intercity	50	
Regiorunner (E)			
driewagenstel	intercity	34	
vierwagenstel	intercity	47	
Intercity rijtuigen			
ICR 1e klas	intercity	72	
ICR 2e klas	intercity	126	
2e klas bagage/keuken	intercity	51	
Locomotieven (E) ^{a)}			
E 1700/1800	locomotief	102	
Hogesnelheidtreinen (E)			
Thalys	HSL	2	

a) locomotieven worden gebruikt voor ICR-rijtuigen en stoptreindubbeldekkers zonder motorrijtuig
bron: NS (1998)

Voor bovenstaande materieelsoorten moeten dus gegevens worden gevonden voor alle technische en operationele factoren. Paragraaf 6.2.2 en 6.2.3 beschrijven de wijze waarop de gegevens over deze factoren zijn verkregen.

6.2.2 Technische factoren

PRORIN gebruikt de volgende technische factoren per materieelsoort. Achter iedere factor is aangegeven waar de betreffende factor in PRORIN voor wordt gebruikt:

- treinmassa (loopweerstand, versnellingsweerstand)
- treinlengte (lucht- en loopweerstand, verwarmingsenergie)
- treinbreedte, treinhoogte (luchtweerstand, verwarmingsenergie)
- maximaal motorvermogen (aandrijfkracht)
- aantal assen (loopweerstand)
- C_w (vormgeving) (luchtweerstand)
- motortype (verliezen energie-omzetting)
- aantal zitplaatsen (energiegebruik per zitplaatskilometer)

Bovenstaande invoergegevens zijn ontleend uit NS-Reizigers (1998). Bijlage 8 vermeldt de waarden van deze factoren voor ieder materieeltype dat NS-reizigers in gebruik heeft.

Andere technische factoren in het model zijn:

- warmtegeleidingscoëfficiënt (verwarmingsenergie)
- toeslagfactor roterende delen (versnellingsweerstand)

Voor deze factoren is geen informatie per materieeltype gevonden en is een generieke waarde voor alle treinen gehanteerd, namelijk 2,0 voor de warmtegeleidingscoëfficiënt (zie ook paragraaf 3.6) en 0,2 voor de toeslagfactor voor roterende delen (zie paragraaf 3.2.3). Voor treinen bestaande uit een locomotief en rijtuigen is een toeslagfactor van 0,12 gehanteerd.

In PRORIN zijn niet alle materieelsoorten uit Tabel 6.1 afzonderlijk ondergebracht. In het geval van 'intercityrijtuigen' is een gemiddelde trein verondersteld voor 2/3 bestaande uit 2e klasse rijtuigen, voor 1/6 uit 1e klasse rijtuigen en voor 1/6 bestaande uit keuken/bagagerijtuigen. In het geval van 'stoptrein-dubbeldekker'-materieel is onderscheid gemaakt naar materieel dat zichzelf voortbeweegt (met motorwagons) en materieel dat door een locomotief (E1700/1800) wordt voortgetrokken. Zie voor de in PRORIN onderscheiden materieeltypen Bijlage 9.

6.2.3 Operationele factoren

PRORIN gebruikt de volgende operationele gegevens per materieelsoort:

- aantal treinkilometers per jaar
- aantal gekoppelde bakken (treinstellen/rijtuigen)
- beginversnelling
- remvertraging
- maximale snelheid
- uitrijnsnelheid
- gemiddelde afstand tussen stops
- bezettingsgraad
- buitentemperatuur

Operationele gegevens worden door de NS ‘uit concurrentie-overweging’ niet per materieeltype verstrekt. Er zijn (in het verleden) door de NS wel gegevens verstrekt op een hoger aggregatieniveau, zoals elektrische treinen of op het niveau van treindiensten (stoptreinen, intercity’s). In het vervolg van deze paragraaf worden bovenstaande operationele factoren afgeleid voor stoptreinen (waaronder sneltreinen), intercity’s en hogesnelheidstreinen. De afgelegde afstand wordt wel afgeleid per materieeltype omdat de verschillende materieeltypen binnen een treindienst te kunnen middelen. Bijlage 9 vermeldt de in PRORIN onderscheiden materieelsoorten met bijbehorende technische en operationele factoren.

Aantal treinkilometers per materieeltype

Het totaal aantal treinkilometers kan worden afgeleid uit het gemiddeld aantal zitplaatsen per trein en het aantal zitplaatskilometers zoals jaarlijks vermeld in het NS-Jaarverslag (NS, 2000). Voor 1998 komt dit neer op 120 miljoen treinkilometers. Hiervan werd 105 mln km met elektrische treinen gereden¹ en 15 mln met dieseltreinen.

Wordt echter dezelfde berekening gedaan met het totaal aantal reizigerskilometers en het gemiddeld aantal reizigers per trein dan is het resultaat 110 miljoen treinkilometers. Hieruit kan worden afgeleid dat 9% van de afgelegde treinkilometers ‘lege’ treinkilometers betreft². De bezettingsgraad (zie het eind van paragraaf 6.2.3) moet dus worden vermenigvuldigd met de beladingsgraad naar afstand, zijnde 91%. Er is aangenomen dat deze beladingsgraad naar afstand identiek is voor dieseltreinen en elektrische treinen.

Om het totaal aantal kilometers over de verschillende materieelsoorten te kunnen verdelen, is gebruik gemaakt van de aanname dat het aandeel van een treintype in het totaal aantal treinkilometers wordt bepaald door het aandeel van dit treintype in het totale aantal treinen en de gemiddelde snelheid van het treintype, ofwel:

$$\text{aantal treinkms treintype 1} = \frac{\text{aantal treinen type 1} * V_{\text{gem type 1}}}{\sum (\text{aantal treinen type X} * V_{\text{gem type X}})} * 120$$

Impliciet ligt hieraan de veronderstelling ten grondslag dat door de krapte in het beschikbare materieel in 1998 al het materieel altijd maximaal is ingezet. Voor alle materieelsoorten is de tijd dat de treinen niet reden door onderhoud of dienstwisseling gelijk verondersteld.

¹ Schriftelijke mededeling juni 2000 van ir. G.W. Fiechter, beleidsmedewerker Energie & Milieu NS-Reizigers.

² Het verschil kan ook berusten op een verschil in meetmethoden voor de zitplaatskm en reizigerskm. Echter, uit (NS, 2000) blijkt, dat als de totale hoeveelheid zitplaatskm gecorrigeerd wordt voor die 10 miljoen lege ritten door aan te nemen dat deze lege ritten dezelfde gemiddeld aantal zitplaatsen per trein hebben dan het totaal gemiddeld aantal zitplaatsen per trein, dan volgt daar een bezettingsgraad uit van 34%. Dit is dezelfde bezettingsgraad als wanneer het aantal reizigers per trein gedeeld wordt op het aantal zitplaatsen per trein, zoals gegeven in NS (2000).

De toegepaste methode voor de verdeling van het aantal treinkilometers over de verschillende materieelsoorten wordt hierna stapsgewijs toegelicht:

1. Als eerste is aan de hand van het *gemiddeld aantal rijtuigen of treinstellen* per materieelsoort, het *aantal treinen* per materieelsoort bepaald;
2. Vervolgens is per materieelsoort de gemiddelde snelheid bepaald;
3. Het aantal treinen per materieelsoort is vermenigvuldigd met de gemiddelde snelheid. Het totaal is gesommeerd;
4. Het totale aantal treinkilometers is verdeeld over de verschillende materieelsoorten naar het aandeel van het totaal uit punt 3.

Om bovenstaande methode toe te kunnen passen, zijn dus een aantal aanvullende gegevens nodig, namelijk:

- gemiddelde snelheid per materieelsoort;
- gemiddeld aantal rijtuigen per trein.

Gemiddelde snelheid

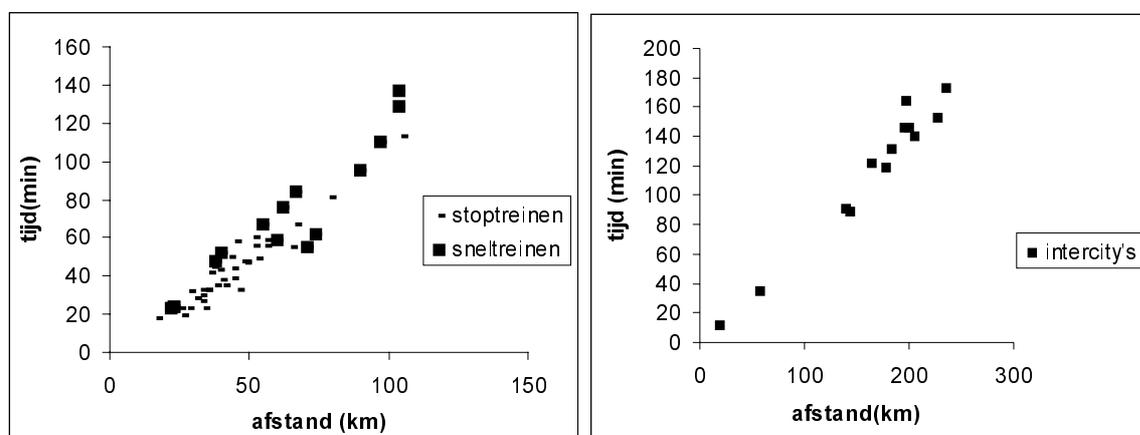
De gemiddelde snelheid per materieelsoort is afgeleid uit de dienstregeling in 1998. Omdat daarin slechts onderscheid gemaakt wordt naar treindienst, kon de gemiddelde snelheid niet worden bepaald per materieelsoort. De dienstregeling maakt onderscheid naar:

- stop- en sneltreinen;
- intercity's (inclusief internationaal);
- HSL-treinen;

De stop- en sneltreinen zijn samengenomen om twee redenen:

- voor stop- en sneltreindiensten wordt nagenoeg hetzelfde materieel gebruikt (NS, 1998).
- zoals hieronder blijkt vertonen de operationele kenmerken sterke overeenkomsten.

De gemiddelde snelheid per categorie is berekend uit een groot aantal ritten van de NS (zie Bijlage 7). Figuur 6.1 is een grafische weergave van de resultaten.



Figuur 6.1: Afstand-tijd diagram voor stop- en sneltreinen (links) en intercity's (rechts)

Van de HSL is geen aparte grafiek getoond, aangezien daar er in 1998 maar één dienst van reed (De Thalys van Amsterdam naar Parijs). De gemiddelde snelheid van intercity's is 90 km/u, voor stop- en sneltreinen 66 km/u en voor de HSL-trein op het Nederlandse traject 97 km/u (Tabel 6.2).

Tabel 6.2: Resultaten van de analyse van de dienstregeling van 1998

type dienst	gemiddelde snelheid (km/u)
intercity's en internationale treinen	90
stop- en sneltreinen	66
<i>waarvan stoptreinen</i>	62
<i>waarvan sneltreinen</i>	73
HSL-trein ^(a)	97

(a) Thalys van Amsterdam naar Parijs. De gemiddelde snelheid geldt alleen voor het Nederlandse traject waarop vooralsnog geen hogere snelheden dan 160 km/h zijn toegestaan.

Aantal rijtuigen per trein

Treinstellen, bestaande uit een combinatie van 2 tot 4 niet-afkoppelbare rijtuigen, of losse rijtuigen kunnen aan elkaar worden gekoppeld om zo langere treinen te vormen. In NS-jargon worden rijtuigen 'bakken' genoemd. Een treinstel kan bestaan uit één tot vier niet-afkoppelbare bakken. Het aantal bakken per trein hangt af van het traject waarop de trein rijdt en het moment van de dag (spits/dal). Uit metingen door Gijsen (2001) blijkt dat het aantal bakken als in Tabel 6.3. Het gemiddeld aantal bakken komt redelijk overeen met de opgave door de NS voor 1998, namelijk 4,9 (Van Dongen en Fiechter, 2000).

Tabel 6.3: Aantal bakken voor stoptreinen en intercity's in spits en dal

dienst	dal	spits	totaal
stoptrein	3.8	5.7	4.2
intercity	7.5	8.3	7.7
totaal	5.2	6.8	5.6

Met de gemiddelde snelheid per materieelsoort en het aantal rijtuigen per trein is het totaal aantal treinkilometers (110 mln) verdeeld over de materieelsoorten. Deze afstanden zijn vermeld in Bijlage 9.

Aantal stops per 100 km

Met behulp van de dienstregeling uit 1998 is de gemiddelde afstand tussen stops bepaald per treindienst. Tabel 6.4 geeft de resultaten (zie Bijlage 7).

Tabel 6.4: Gemiddeld afstand tussen stops voor verschillende treindiensten (km)

type dienst	afstand tussen stops (km)
intercity's en internationaal	26
stop- en sneltreinen	7
<i>waarvan stoptreinen</i>	6
<i>waarvan sneltreinen</i>	10
HSL-trein ^(a)	29

(a) Thalys van Amsterdam naar Parijs. De berekening geldt alleen voor het Nederlandse traject.

Maximale snelheid

De maximale baanvaknelheid op de meeste trajecten is in Nederland 140 km/u. Slechts op enkele trajecten (zoals op het traject Amersfoort-Zwolle) geldt een maximale snelheid van 160 km/u (Gijsen, 2001). NS-Reizigers (2000) vermeldt de technisch maximale snelheden van de verschillende materieelsoorten. Voor de treinen die maximaal 160 km/u kunnen rijden, is voor de berekeningen een waarde van 140 km/u aangenomen, aangezien dat de snelheid is die op de meeste trajecten is toegestaan.

Beginversnelling

In de literatuur zijn waarden voor de beginversnelling gevonden van 0,5-0,8 m/s² (Keizer en Wiersma, 1999) voor treinen met 25 tot 50% van de assen aangedreven en 1-1,5 m/s² voor treinen met 50 tot 100% van de assen aangedreven. Uit Figuur 3.3 uit hoofdstuk 4 blijkt echter dat metingen laten zien dat de acceleratie nooit zo hoog is. Metingen aan personentreinen door Gijsen (2001) tonen aan dat de gemiddelde beginversnelling van stop- en sneltreinen $0,60 \pm 0,15$ m/s² bedraagt en die voor intercity's $0,46 \pm 0,10$ m/s². De gemiddelde waarden zijn in PRORIN gebruikt.

Vooraf voor de beginversnelling geldt dat deze enorm variabel is. De beginversnelling is erg afhankelijk van de plaats waar de trein rijdt. Vanaf stations die zich in de binnenstad bevinden, moet heel langzaam worden weggereden omdat het weggrijden anders geluidsoverlast veroorzaakt. Ook moet de beginversnelling worden beperkt als er teveel treinen tegelijk optrekken, aangezien anders de bovenleidingspanning te laag wordt.

Remvertraging

De exacte grootte van de remvertraging is voor de energieberekeningen niet zo belangrijk, aangezien er in het remmende deel van het ritprofiel geen energie wordt gebruikt. De grootte van de remvertraging bepaald natuurlijk wel de afgelegde afstand in dit deel van het ritprofiel, en daarmee de afgelegde afstand (en het energiegebruik) in het constante snelheidsdeel van het ritprofiel. In de literatuur is een gemiddelde waarde van 0,7 m/s² gevonden (Keizer en Wiersma, 1999). Metingen door Gijsen (2001) tonen aan dat de gemiddelde remvertraging voor stoptreinen circa 0,7 tot 0,8 m/s² bedraagt en voor intercity's 0,5 m/s². De Nederlandse Spoorwegen gaan volgens Gijsen (2001) uit van 0,66 voor stoptreinen en 0,50 voor intercity's. Deze laatste waarden zijn in PRORIN overgenomen.

Uitrijnsnelheid

De gemiddelde uitrijnsnelheid van de verschillende materieelsoorten is niet in de literatuur te vinden. Uit ervaring blijkt echter wel dat machinisten gedurende enige tijd ‘gas loslaten’ voordat ze beginnen te remmen. In eerste instantie werd in PRORIN uitgegaan van een uitrijnsnelheid van 130 km/h. Deze was gebaseerd op enkele metingen waarbij werd vastgesteld dat de totale uitrij- en remtijd circa 2 minuten bedroeg. Metingen door Gijsen tonen echter aan dat de uitrijnsnelheid voor stoptreinen gemiddeld 117 km/h bedraagt, maar dat de spreiding groot is. Bovendien bleek dat de variatie met name samenhang met de ‘aangereden’ stations: rondom grote stations gelden lagere maximum snelheden doordat treinen over wissels moeten rijden, waardoor treinen eerder met uitrijden beginnen en, op de baanvakken met de lagere maximum snelheden, met een lage constante snelheid het station naderen. De uitrijnsnelheid voor intercity’s is volgens Gijsen (2001) gemiddeld 123 km/h. Deze laatste waarden zijn in PRORIN gehanteerd.

Temperatuursverschil

In 1998 was de gemiddelde buitentemperatuur 10,4°C (bron: www.knmi.nl, juli 2000). Tevens streeft de NS naar een binnentemperatuur van 22°C (Kouwenhoven, 1996).

Bezettingsgraad

De bezettingsgraad is afhankelijk van vele factoren, zoals het tijdstip van de treinrit (spits/dal) en het traject. Per treinrit zitten er dan ook enorme verschillen in de bezettingsgraad. Er is gerekend met gemiddelde bezettingsgraden voor de verschillende categorieën (intercity’s, stop- en sneltreinen, HSL).

In Van den Brink en Van Wee (1997) worden de gemiddelde bezettingsgraden in 1995 vermeld, onderscheiden naar spits/dal en treindienst. Voor stoptreinen wordt een waarde van 0,33 gegeven en voor intercity’s (inclusief sneltreinen) een waarde van 0,44. Aangezien de Nederlandse Spoorwegen voor 1998 geen informatie over bezettingsgraden per treindienst verstrekken is verondersteld dat de bezettingsgraden in 1998 gelijk zijn aan die in 1995 (zie tabel 6.5).

De bezettingsgraad van de HSL is aanzienlijk hoger omdat er voor deze trein gereserveerd moet worden. Op die manier kan de vervoerder beter op de vervoersvraag inspelen en zitten de HSL-treinen dus voller dan treinen waarvoor niet gereserveerd hoeft te worden.

Tabel 6.5: *Gemiddelde bezettingsgraad per categorie*

categorie	bezettingsgraad
Intercity’s	0,44
Stop- en sneltrein	0,33
HSL-trein	0,65 ^(a)

(a) bron: Van den Brink en Van Wee, 1997

6.3 Resultaten reizigersvervoer

6.3.1 Energiegebruik

De resultaten voor de energieberekeningen zijn weergegeven in Bijlage 10. Tabel 6.6 geeft een korte samenvatting van de uitkomst van de berekeningen.

Tabel 6.6: *Energiekentallen “well-to-wheel”-analyse reizigersvervoer 1998*

trein	aantal bakken	aantal zitpl.	MJ/ zitplkm	MJ/reizigerkm
<i>elektrische stoptreinen</i>	4,2		0,30	0,90
Sprinter 2	4 (2*2)	400	0,30	0,90
Sprinter 3	6 (2*3)	448	0,32	0,97
Plan V	4 (2*2)	284	0,32	0,96
Plan T	4 (1*4)	272	0,32	0,97
Railhopper	4 (2*2)	274	0,34	1,02
Stoptrein DD 1700	4	476	0,26	0,78
Stoptrein DD motor	4	396	0,27	0,83
<i>elektrische intercity's</i>	7,7		0,20	0,46
Koploper 3 (weerstand)	6 (2*3)	366	0,29	0,66
Koploper 3 (chopper)	9 (3*3)	549	0,22	0,49
Koploper 4	8 (2*4)	512	0,21	0,48
Regiorunner 3	9 (3*3)	825	0,15	0,35
Regiorunner 4	8 (2*4)	744	0,15	0,34
Intercity-rijtuigen	7	473	0,23	0,53
<i>HSL-trein</i>	10	377	0,25	0,38
<i>diesel stoptreinen</i>	4,5		0,39	1,19
Wadloper DH1	4 (4*1)	144	0,47	1,42
Wadloper DH2	4 (2*2)	200	0,33	1,01
Plan U	6 (2*3)	384	0,36	1,11
Buffel	4 (2*2)	234	0,44	1,33
TOTAAL	5,6		0,26	0,68

(a) Alleen het Nederlandse traject. De maximale snelheid is dus niet hoger dan 140 km/u

Tabel 6.6 moet niet worden gezien als hét energiegebruik van de verschillende soorten treinen, aangezien uit de vorige paragrafen is gebleken dat veel invoergegevens berusten op gemiddelden. Als in een bepaald geval een trein twee maal zo lang is dan gemiddeld, is het energiegebruik per treinkilometer van deze trein nagenoeg 100% hoger.

Uit Tabel 6.6 wordt duidelijk dat stoptreinen meer energie per zitplaatskm gebruiken dan intercity's. Dit wordt voornamelijk verklaard door het feit dat stoptreinen meer stoppen. Dieselstoptreinen hebben een hoger energiegebruik per zitplaatskilometer dan elektrische stoptreinen. Het energiegebruik per treinkilometer is voor beide ongeveer vergelijkbaar, echter dieseltreinen hebben relatief minder zitplaatsen omdat er veel ruimte verloren gaat

door de tractie-installatie die bij dieseltreinen veel groter is dan bij elektrische treinen. De lagere HSL-trein blijkt per zitplaatskilometer iets meer energie te gebruiken dan een gemiddelde intercity. De belangrijkste reden is het relatief lage aantal zitplaatsen per lengte-eenheid van de HSL-trein in vergelijking tot een intercity trein.

6.3.2 Emissies

In Bijlage 11 en 12 staan de emissies weergegeven van de verschillende materieelsoorten. Tabel 6.7 geeft de belangrijkste resultaten voor de directe emissies en voor de totale emissies (= directe emissies + emissies ten gevolge van winning, transport en raffinage van de grondstoffen).

Tabel 6.7: Emissies (direct + totaal) van reizigersvervoer 1998.

direct	totaal			per zitplaatskm			per reizigerkm		
	CO ₂ kton	SO ₂ ton	NO _x ton	CO ₂ g	SO ₂ mg	NO _x mg	CO ₂ g	SO ₂ mg	NO _x mg
elektrisch stoptrein	366	127	464	18	6	23	55	19	70
elektrisch intercity	265	92	336	13	4	16	28	10	36
HSL	5	2	6	15	5	19	23	8	29
diesel stoptrein	90	99	1810	26	28	513	78	85	1555
totaal	726	319	2615	16	7	58	42	18	151
direct + indirect	totaal			per zitplaatskm			per reizigerkm		
	CO ₂ kton	SO ₂ ton	NO _x ton	CO ₂ g	SO ₂ mg	NO _x mg	CO ₂ g	SO ₂ mg	NO _x mg
elektrisch stoptrein	385	154	519	19	8	26	58	23	78
elektrisch intercity	279	112	376	13	5	18	30	12	40
HSL	5	2	7	16	6	21	24	10	33
diesel stoptrein	96	192	1835	27	55	520	82	165	1577
totaal	765	460	2737	17	10	61	44	27	158

Opvallend is het grote verschil in NO_x-emissie tussen de elektrische- en de dieseltractie. Van de totale NO_x-emissies door het reizigersvervoer per spoor in Nederland in 1998 kwam circa 65% op het conto van dieseltreinen terwijl dieseltreinen maar een aandeel van ongeveer 5% in het totale reizigersvervoer per spoor hebben. Een vergelijkbare situatie geldt voor de SO₂-emissies: dieseltreinen hebben een aandeel van circa 40%. Dit wordt mede veroorzaakt door de indirecte emissies van SO₂ ten gevolge van de raffinage van dieselolie.

6.3.3 Vergelijking met NS-gegevens

NS-Reizigers geeft als waarde voor het elektriciteitsverbruik 1.286 mln kWh in 1998 op. De berekende elektriciteitsvraag in 1998 is ca. 1150 mln kWh¹. Deze 1.150 mln kWh is echter

¹ Er is een energievraag van 4.136 TJ aan het onderstation berekend (zie bijlage 10) Dit komt overeen met 1.149 mln kWh.

alleen gebaseerd op de treinritten volgens de dienstregeling (110 mln treinkilometers). Er is echter ook voor ongeveer 10% van de kilometers zonder passagiers gereden (zie paragraaf 6.2.3). Als wordt aangenomen dat een lege en een volle trein ongeveer evenveel energie gebruiken (wat uit berekeningen ook blijkt), dan wordt de elektriciteitsvraag aan het onderstation¹ ca. 1.265 mln kWh.

Tevens geeft de NS als totaal energiegebruik ongeveer 34 Wh/zitplaatskm op. Het energiegebruik is de energie-inhoud van elektriciteit ingekocht aan de onderstations en de energie-inhoud van de gebruikte diesel. Volgens de berekeningen is er voor ca. 4.200 TJ elektriciteit ingekocht en voor ca. 1.250 TJ aan diesel (zie Bijlage 10). Het aantal berekende zitplaatskm is 41.118 mln km (excl. lege ritten). Het energiegebruik per zitplaatskm wordt dan circa 35 Wh/zitplaatskm. Geconcludeerd kan worden dat de resultaten van PRORIN op hoog aggregatieniveau goed overeenkomen met de NS-gegevens voor 1998.

6.3.4 Vergelijking met de literatuur

In 1997 is een studie door het RIVM verricht naar het energiegebruik en emissies per vervoerswijze (Van den Brink en Van Wee, 1997). In deze studie werd een top-down methode gehanteerd (zie hoofdstuk 1). Het totale energiegebruik in het personenvervoer per spoor werd gedeeld door het totale aantal treinkilometers, beide conform opgave door de NS. De onderverdeling naar stoptreinen en intercity's is in deze studie gebaseerd op gegevens over het energiegebruik per treinkilometer van de NS (in: Van den Bossche *et al.*, 1996). Tabel 6.8 geeft een vergelijking tussen de resultaten in Van den Brink en Van Wee (1997) en de resultaten van PRORIN. De resultaten in Van den Brink en Van Wee (1997) hebben betrekking op 1995.

Tabel 6.8: Vergelijking primair energiegebruik per zitplaatskilometer van het reizigervervoer; top-down versus bottom-up methode

bron:	stoptreinen			intercity's elektrisch	totaal
	elektrisch	diesel	totaal		
Van den Brink en Van Wee (1997)	0,32	0,33	0,32	0,28	0,30
PRORIN	0,30	0,41	0,31	0,20	0,26

Het verschil tussen de top-down methode en de bottom-up methode voor de gemiddelde personentrein is circa 15%. Voor stoptreinen zijn de resultaten vergelijkbaar, voor intercitytreinen zijn de verschillen groter, namelijk circa 30%. Eén reden is dat Van den Brink en Van Wee hebben gerekend met een lager rendement van elektriciteitsopwekking (38% versus 42% in PRORIN). De verschillen in energiegebruik per reizigerkilometer zijn vergelijkbaar omdat in PRORIN de bezettingsgraden zijn overgenomen uit Van den Brink en Van Wee (1997).

¹ Een onderstation is een punt waar de NS de elektriciteit van het Nationale net afneemt.

6.4 Invoer voor de factoren van goederenvervoer

6.4.1 Inleiding

Door de goederenvervoerders werd in 1998 24,7 miljoen ton goederen over het NS-netwerk vervoerd. Dit is een stijging van 18,2% ten opzichte van 1995. Hiervan was 4,4 miljoen ton bestemd voor het binnenland en 20,3 miljoen ton voor de buitenlandse markt. De hoeveelheid tonkilometers op Nederlands grondgebied steeg met 22,0% naar 3.778 miljoen (NS, 2000). Het gemiddeld aantal kilometers dat een ton goederen aflegde op Nederlands grondgebied steeg dus van 148 km naar 153 km. Aangezien een goederentrein volgens de NS gemiddeld is beladen met 353 ton, neemt het goederenvervoer slechts 8% van het totale aantal treinkilometers op het Nederlandse tracé voor zijn rekening.

Goederentreinen bestaan uit een aantal wagons die worden getrokken of geduwd door een locomotief. Railion, een fusie tussen NS-Cargo en Deutsche Bahn en in 1998 de grootste railvervoerder, maakt gebruik van 2 soorten Nederlandse locomotieven (Tabel 6.9); de E1600/1800 (elektrisch) en de DE 6400 (diesel-elektrisch). De E1600/1800 is dezelfde locomotief als de E1700 van NS-Reizigers (enkele kleine verschillen daargelaten). Wagons zijn er in vele soorten en maten. Voor een onderverdeling naar functie en type wordt verwezen naar (Van Laar, 1993).

Paragraaf 6.4.2 gaat in op de technische karakteristieken van goederentreinen. Paragraaf 6.4.3 gaat in op de operationele factoren. Voor goederenvervoer is voor de meeste operationele factoren, zoals de beginversnelling, de uitrijnsnelheid en de gemiddelde afstand tussen stops, geen informatie gevonden. In paragraaf 6.5.4 wordt daarom een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om de invloed van deze operationele factoren op het gemiddelde energiegebruik per tonkilometer te bepalen.

6.4.2 Technische factoren goederenvervoer

In PRORIN zijn voor goederentreinen dezelfde technische factoren nodig als voor personentreinen, zoals gewicht, lengte, luchtweerstandscëfficiënt, etc. Aangezien goederentreinen kunnen bestaan uit een combinatie van een wisselend aantal en bovendien sterk van elkaar verschillende wagons¹ wordt in PRORIN uitgegaan van enerzijds goederentreinen met alleen open wagons en anderzijds alleen gesloten wagons. De eerste categorie geeft een indicatie voor de bovengrens van het energiegebruik per tonkilometer, de tweede categorie voor de ondergrens. De overige technische gegevens die zijn gebruikt voor de invoer staan weergegeven in Tabel 6.9 en Tabel 6.10.

¹ In Van Laar (1992) worden 28 verschillende wagons genoemd.

Tabel 6.9: Enkele technische gegevens goederenlocomotieven zoals gebruikt in 1998

type locomotief	E 1600/1800	DE 6400
aantal	37	120
gewicht (ton)	84	72
max. motorvermogen (kW)	4540	1180
lengte (m)	16,2	14,4
breedte (m)	3,3	3,3
hoogte (m)	3,3	3,3
maximum snelheid (km/h)	180	100
afbeelding		

bron: NS (1998)

Tabel 6.10: Enkele gegevens wagons

type wagon	aantal ^(a)	gemiddelde lengte (m) ^(b)	gemiddeld eigengewicht (ton) ^(b)
gesloten wagons	1909	13	18
open wagons	801	11	16
platte wagons	2100	15	17
speciale wagons	158	-	-
overig	1180	-	-

(a) bron: NS, 1994

(b) berekend uit (Van Laar, 1993)

6.4.3 Operationele factoren

Net als bij de reizigerstreinen moeten voor de berekeningen de volgende factoren bekend zijn:

- totaal aantal treinkilometers;
- gemiddelde afstand tussen stops;
- snelheid;
- beginversnelling/remvertraging;
- uitrijnsnelheid.

Om het energiegebruik en de milieubelasting per vervoersprestatie te berekenen, moet tevens de gemiddelde belading en het aantal lege treinkilometers bekend zijn. Bovenstaande punten zullen navolgend worden behandeld.

Totaal aantal treinkilometers

Er is geen informatie gevonden over beladingsgraden en benuttingsgraden in 1998. Dit omdat NS-Cargo (nu Railion) na de privatisering van de NS deze gegevens niet meer beschikbaar stelt. Het laatste jaar waarvoor nog wel gedetailleerde gegevens over het goederenvervoer in Nederland bekend zijn, is het jaar 1993. De volgende gegevens zijn gebruikt om het materieelinzet in dat jaar te benaderen:

Tabel 6.11: Enkele gegevens goederenvervoer 1993

aantal beladen wagons per dag:	1340	
gemiddelde hoeveelheid belading per trein:	353	ton
aantal wagons per trein:	22	
totaal vervoerde hoeveelheid:	16,7	miljoen ton
totaal tonkilometers:	2681	miljoen

bron: NS (1994)

Uitgaande van 7 dagen per week¹, komen 1.340 beladen wagons per dag overeen met circa 0,5 miljoen beladen wagons per jaar. Het totale aantal wagons (beladen + onbeladen) kan worden berekend uit de totale vervoersprestatie (16,7 miljoen ton), de gemiddelde belading per trein (353 ton) en het gemiddeld aantal wagons per trein (22) (zie Tabel 6.11). Het gemiddeld aantal beladen wagons in het jaar 1993 komt op circa 1 miljoen. Gemiddeld is 50% van de wagons onbeladen en 50% beladen met gemiddeld 32 ton. In PRORIN wordt gerekend met een degelijke gemiddelde goederentrein. Dit betekent niet dat in de praktijk geen volledig onbeladen of volledig beladen treinen voorkomen.

Volgens Railion is het percentage beladen treinen in 1998 flink gestegen ten opzichte van 1993². Aangezien concrete getallen niet worden verstrekt is het aantal treinkilometers in 1998 als volgt afgeleid. Op het NS-net werd 24,7 miljoen ton vervoerd. De totale hoeveelheid tonkilometers was 3.778 miljoen (NS, 2000). Als wordt aangenomen dat er nog steeds gemiddeld 353 ton per trein vervoerd wordt, dan zijn er dus 10,7 (3.778/353) mln treinkm gereden. Zoals eerder gesteld zijn deze getallen zijn slechts gemiddelden voor het Nederlandse goederenrailvervoer en kunnen individuele treinen hiervan sterk afwijken.

Naast de gemiddelde belading van goederentreinen moet de verdeling van de treinkilometers over diesel en elektrische locomotieven worden gevonden. In 1998 is er voor de dieseltractie 0,7 PJ diesel gebruikt (bron: CBS) en voor elektrische tractie circa 1,2 TJ³. Aangezien de ketenrendementen (well to wheel) van elektrische en diesel-elektrische tractie ongeveer gelijk zijn (Dings, 1995), is het totaal aantal goederentreinkilometers (10,7 mln) verdeeld over elektrische en diesel-elektrische treinen in dezelfde verhouding als het energiegebruik, dus circa 35% diesel-elektrische en circa 65% elektrisch.

Aantal stops

Een goederentrein rijdt gemiddeld 153 km op Nederlands grondgebied. Het meeste vervoer (83%) is bestemd voor het buitenland. Over de gemiddelde afstand tussen stops is geen informatie gevonden. Uit Railion (2000) blijkt, dat goederentreinen regelmatig moeten wachten op reizigerstreinen, aangezien in 1998 gold dat reizigerstreinen voorrang hadden op

¹ Punt van discussie was of dit reeël was en niet moest worden uitgegaan van 5 dagen per week. Echter, uit NS (1994) blijkt dat alle andere genoemde getallen, zoals aantal tonnen per dag en het aantal tonkm per dag ook berustten op 7 dagen.

² Schriftelijke mededeling René Holdert, woordvoerder Railion Benelux.

³ Totale energiegebruik NS was 1402 mln kWh. Hiervan was 1291 mln kWh van NS-Reizigers. Aangenomen is dat de overige 111 mln kWh voor goederenvervoer was. Omgerekend naar primaire energie is dit 1,2 TJ.

goederentreinen. Voor de berekeningen wordt als uitgangspunt 50 km verondersteld, maar omdat deze schatting een hoge mate van onzekerheid kent wordt deze factor later in dit hoofdstuk (paragraaf 6.5.4) gevarieerd om het effect op het energiegebruik per tonkilometer te bestuderen.

Maximale snelheid

Hoe harder een trein rijdt, hoe meer geluid hij maakt. Omdat goederentreinen door hun hoge gewicht toch al relatief veel geluidsoverlast veroorzaken, is de maximaal toegestane snelheid voor goederentreinen lager dan voor personentreinen. 's Avonds bedraagt deze toegestane snelheid 70 km/h, 's nachts 50 km/h en overdag 80 km/h (KPMG, 1998). Ongeveer 25% van de goederentreinen rijdt 's nachts, 27% rijdt 's avonds en 48% rijdt overdag (geschat uit Railion (2000)). De gewogen gemiddelde snelheid bedraagt daarmee 70 km/h.

Beginversnelling en remvertraging

Van Laar (19912) vermeldt een beginversnelling van 0,1 m/s² voor goederentreinen. Voor de remvertraging wordt, net als bij de personentreinen een remvertraging van 0,7 m/s² verondersteld.

Uitrijnsnelheid

Over de uitrijnsnelheid van goederentreinen is geen informatie gevonden. Door de grote massa die goederentreinen hebben, is het echter wel logisch te veronderstellen dat goederentreinen een relatief lange uitrijtijd hebben. Voor de berekeningen wordt als uitgangspunt een uitrijnsnelheid van 65 km/u verondersteld, maar aangezien deze waarde een hoge mate van onzekerheid kent wordt de gevoeligheid van het energiegebruik per tonkilometer voor de uitrijnsnelheid in paragraaf 6.5.4 bestudeerd.

6.5 Resultaten goederenvervoer

6.5.1 Energiegebruik

In Tabel 6.12 staan de resultaten vermeld van de berekeningen met PRORIN voor het goederenvervoer in 1998.

Tabel 6.12: Resultaten energieberekeningen goederenvervoer 1998

tractie:	TJ		MJ/tonkm	
	gesloten wagons	open wagons	gesloten wagons	open wagons
elektrisch	507	587	0,21	0,24
diesel	345	399	0,24	0,28
totaal	852	986	0,22	0,26

Dieseltreinen gebruiken relatief dus meer energie dan elektrische treinen. De reden hiervoor is dat het totale ketenrendement van elektrische treinen beter is. Verder valt op dat het

energiegebruik circa 15% hoger ligt als er met open wagons wordt gereden in plaats van met gesloten wagons.

6.5.2 Emissies

In Tabel 6.13 zijn de berekende emissies voor gesloten wagons vermeld. De emissies zijn opgesplitst naar 'direct' (emissies door de dieselmotor of elektriciteitscentrales) en 'totaal' (emissies door de dieselmotor + emissies van raffinage, transport en distributie van diesel of grondstoffen van de elektriciteitsproductie).

Tabel 6.13: Emissies per tonkilometer (direct + totaal) van het goederenvervoer per spoor in 1998, voor gesloten wagons

direct	CO ₂ (g)	SO ₂ (mg)	NO _x (mg)
elektrisch	13,0	4,5	16,4
diesel	15,7	4,2	286,5
totaal	14,0	4,4	117,2
totaal (direct + indirect)	CO ₂ (g)	SO ₂ (mg)	NO _x (mg)
elektrisch	13,6	5,5	18,4
diesel	16,6	20,6	290,8
totaal	14,8	11,1	120,1

6.5.3 Vergelijking andere rapporten

In paragraaf 6.5.1 is berekend, dat er 7 miljoen liter diesel en maximaal 51 mln kWh elektriciteit is gebruikt. De in de literatuur gevonden waarden liggen echter veel hoger, namelijk 15,5 miljoen liter diesel en 135,9 mln kWh (Dijkstra en Dings, 2000). Ook de top-down berekende waarde in Van den Brink en Van Wee (1997) geeft een waarde op van 0,6 MJ/tonkm, terwijl de door PRORIN berekende waarden tussen 0,2 tot 0,3 MJ/tonkm inliggen. Een andere studie waarin middels een bottom-up berekening het energiegebruik van volbeladen goederentreinen rijdend met constante snelheid van 80 km/h is berekend, komt op een nog lager energiegebruik in vergelijking tot PRORIN, namelijk circa 0,2 MJ/tonkm (Rutten, 1993). Dezelfde studie geeft voor het containervervoer over spoor aanzienlijk hogere waarden, minimaal 0,2 MJ/tonkm bij een hoge belading per container (24 ton) tot maximaal 0,6 MJ/tonkm bij een lage belading per container (6 ton).

Deze grote verschillen tussen de PRORIN-resultaten en de resultaten uit Van den Brink en Van Wee (1997) kunnen niet alleen worden verklaard uit een te gunstig gekozen invoer, want als een aanzienlijk ongunstiger situatie wordt gekozen (niet uitrijden, één stop per 10 km), dan komt het energiegebruik op ongeveer 0,4 MJ/tonkm, wat nog altijd aanzienlijk lager is dan de top-down verkregen waarden van Van den Brink en Van Wee (1997). Het vermoeden bestaat daarom dat én veel energie wordt gebruikt door het rangeren van wagons, hetgeen niet is gemodelleerd in PRORIN, én/of de beladingsgraad in de praktijk lager is dan op basis

van NS-gegevens is afgeleid. De resultaten uit Tabel 6.12 zijn zeer waarschijnlijk dus niet representatief voor de energie-efficiency in het goederenrailvervoer.

6.5.4 Variatie invoergegevens goederenvervoer

In deze paragraaf wordt nagegaan wat de gevoeligheid is van het berekende energiegebruik per tonkilometers voor de variatie van enkele operationele invoerparameters. Aan bod komen maximale snelheid, uitrijnsnelheid gemiddelde belading per trein en afstand tussen stops.

Maximale snelheid en uitrijnsnelheid

Verhoging van de gemiddelde maximale snelheid in het goederenrailvervoer van 70 km/h tot 80 km/h verhoogd het geschatte energiegebruik met ruim 10%, veronderstellend dat de uitrijnsnelheid gelijk blijft aan 65 km/h. Verhoging van de maximale snelheid tot gemiddeld 90 km/h leidt tot een toename van ruim 25%. Wordt daarenboven de uitrijnsnelheid gelijk verondersteld aan de maximale snelheid (= geen uitrijden) dan is het geschatte energiegebruik per tonkilometer zelfs 40% hoger.

Afstand tussen stops

Afname van de afstand tussen twee stops van 50 km tot 25 km verhoogd het geschatte energiegebruik met circa 10%. Vermindering van deze afstand tot 10 km leidt tot een energiegebruik dat 35% hoger ligt.

Gemiddelde belading per trein

In de berekeningen is verondersteld dat de gemiddelde belading per trein circa 350 ton bedraagt en dat ongeveer 50% van de wagons onbeladen is. De gemiddelde belading per wagon komt daarmee op ruim 30 ton. Dit lijkt erg hoog gezien het feit dat het maximale laadvermogen van 40-voets wagons ook ongeveer 30 ton bedraagt (Van Laar, 1993). Als wordt verondersteld dat goederentreinen, naast de eerder genoemde 10,7 miljoen kilometer afleggen met belading, ook 2 miljoen kilometer afleggen met alleen lege wagons, dan bedraagt het geschatte energiegebruik per tonkilometer circa 0,3 MJ/tonkm. Bij 5 miljoen lege treinkilometers komt het energiegebruik per tonkilometer op circa 0,4 MJ/tonkm.

Veronderstellend dat de gemiddelde maximale snelheid inderdaad 90 km/h bedraagt, er geen uitrijden plaatsvindt, de gemiddelde afstand tussen stops 10 km bedraagt en het aantal lege treinkilometers 5 miljoen, dan bedraagt het geschatte energiegebruik per tonkilometer circa 0,7 MJ/tonkm.

Uit bovenstaande gevoeligheidsanalyse blijkt dat de gevoeligheid van het energiegebruik voor de operationele invoerparameters zeer groot is. Bovendien blijkt dat wanneer de operationele parameters (voor energiegebruik) ongunstiger gekozen worden, het bottom-up berekende energiegebruik vergelijkbaar is met top-down berekende waarden. De belangrijkste aanbeveling die hieruit volgt is dat de operationele invoerparameters beter onderbouwd moeten worden, bijvoorbeeld met metingen in de praktijk. Met name de

gemiddelde belading van goederentreinen is een belangrijke operationele invoerparameter met grote invloed op het energiegebruik per tonkilometer.

7. Conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek

7.1 Conclusies

In dit hoofdstuk worden de conclusies die uit de resultaten van dit onderzoek naar een bottom-up berekeningsmethode voor het energiegebruik en de emissies naar railvervoer samengevat.

Als eerste kan worden geconcludeerd dat het mogelijk is gebleken om het energiegebruik en emissies van railvervoer met behulp van een bottom-up berekening te schatten. Met deze berekening kunnen niet alleen goede uitspraken worden gedaan over het totale energiegebruik en emissies, maar kan ook een goede vergelijking tussen de verschillende treindiensten als stoptreinen en intercity's worden gemaakt. De grote hoeveelheid invoerparameters, waarvoor in veel gevallen onderbouwde aannames moeten worden gedaan, verhoogt overigens de onzekerheid van de uitkomsten.

Voor het reizigersvervoer komen de resultaten van de bottom-up methode goed overeen met de resultaten van de eerder door het RIVM gehanteerde top-down methode en de waarden die NS-Reizigers zelf vermeld. Voor het goederenvervoer worden met de bottom-up methodiek veel lagere waarden gevonden dan met de top-down methodiek. Dit verschil wordt waarschijnlijk verklaard uit het feit dat de in dit rapport beschreven bottom-up berekeningen geen rekening houden met het energiegebruik en emissies tijdens het rangeren van de wagons en eventueel ook het stationair draaien van de motoren, terwijl beide mogelijk wel een groot deel van de totale energiegebruik en emissies in beslag nemen. Beide zijn wegens gebrek aan goede informatie niet meegenomen. Een mogelijk andere reden is dat de beladingsgraad van het goederenvervoer per spoor in de bottom-up berekeningen zou kunnen zijn overschat.

7.2 Aanbevelingen voor verder onderzoek

De aanbevelingen voor verder onderzoek concentreren zich met name op het onderbouwen van de invoerparameters waarvoor op dit moment aannames zijn gedaan of waarvoor informatie uit buitenlandse literatuur is gebruikt. Zo zijn de technische factoren zoals de loop- en de luchtweerstand bepaald aan de hand van metingen aan Zweedse treinen. Dit omdat deze meetgegevens voor Nederlandse treinen niet beschikbaar worden gesteld of misschien zelfs helemaal niet bestaan. Het verdient aanbeveling om voor de nauwkeurigheid van PRORIN metingen aan Nederlandse treinen te verrichten.

Voor de berekeningen is het ritprofiel van een trein in PRORIN geschematiseerd. In de praktijk is het ritprofiel echter veel grilliger en blijkt tevens veel variatie te zijn in de mate van uitrijden tussen treinen en tussen 'aangereden' stations. Voor goederentreinen geldt verder nog dat het ritprofiel in de praktijk sterk wordt bepaald door de interactie met personentreinen op het spoor: het wel of niet voorgaan van personentreinen op goederentreinen is van grote

invloed op het aantal stops door goederentreinen. Met name de mate van uitrijden van personentreinen en het gemiddeld aantal stops van goederentreinen in de praktijk zal nauwkeuriger in kaart moeten worden gebracht om de onzekerheid in de PRORIN-resultaten te verminderen.

Andere operationele factoren, zoals het percentage dieseltreinen in het personen- en goederenvervoer en de bezettings- en beladingsgraden zijn gebaseerd op verouderde NS-gegevens. De NS stelt actuelere gegevens voor deze invoerparameters uit concurrentieoverwegingen niet meer beschikbaar. Gezien het belang van betrouwbare resultaten voor de milieuprestatie van het personen- en goederenvervoer per spoor zou de NS bereid moeten worden gevonden actuele en gedetailleerde gegevens beschikbaar te stellen.

Literatuur

- Andersson, E. (1994) *Energy consumption and air pollution of electric rail traffic, the Swedish case*, Stockholm, Zweden: Royale institute of technology, department of vehicle engineering.
- Beukers, F. (1995) *Modellen en computers*, Utrecht: Rijks Universiteit Utrecht, vakgroep Wiskunde.
- Boose, J.J.E.C. (1993) *Mobiliteit, milieu en ruimte: Mag het ietsje minder zijn?* Nijmegen: Katholieke Universiteit Nijmegen, Faculteit der beleidswetenschappen.
- Bos, S. (1998) *Direction Indirect*, Groningen: Rijksuniversiteit Groningen.
- Bossche, M.A. van den, M.J.P.F. Gommers, R.J. Molemaker, M.Y. van Schijndel-Prong (1996) *De Milieufunctie van het Openbaar Vervoer in Stedelijke Gebieden: Op weg naar een Groene Toekomst*, Nederlands Economisch Instituut, Rotterdam
- Brink, R.M.M. van den (2000) *Verkeer en vervoer in de milieubalans 1999*. Bilthoven RIVM, maart 2000.
- Brink, R.M.M. van den, G.P van Wee (1997) *Energiegebruik en emissies per vervoerwijze*. Bilthoven, Utrecht: Rijks Instituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM). Rapport nr. 7732002007.
- Brown, W. (2000) *Exhaust emission values for large diesel engines*. American Engine Manufacturer Association, paper gepresenteerd op de UIC Energy Conference, mei 2000.
- CBS/RIVM (1999) *Milieucompodium 1999, het milieu in cijfers*. Den Haag: Offset Rijswijk.
- CPB (1997) *Economie en fysieke omgeving, beleidsopgaven en oplossingsrichtingen 1995-2020*, Centraal Plan Bureau, Den Haag: Sdu.
- Dijkstra, W.J., J.M.W. Dings (2000) *Milieubelasting van mobiele bronnen: 4 "vergeten" categorieën*. Delft: Centrum voor schone technologie en energiebesparing (CE), concept rapport.
- Dings, J.M.W. (1995) *Vergelijking milieu-effecten E- en DE tractie*, Delft: Centrum voor energiebesparing en schone technologie (CE).
- Dongen, L.A.M. van, G.W. Fiechter (2000) *Tractie-energiebesparing bij NS-Reizigers; NS-Reizigers-materieel*, paper gepresenteerd op het Colloquium Verkeer, Milieu en Techniek, 29 juni 2000, RIVM Bilthoven.
- Dwarshuis, K., W. Biesiot, R.M.J. Benders, A.J. Schilstra (1995) *Milieubelasting van de elektriciteitsvoorziening in Nederland en OECD-Europa in de periode 1990-2020*, Groningen, IVEM, onderzoeksrapport no.74.
- Energiened (1999) *Elektriciteit in Nederland 1998*, Arnhem.
- Engelen, E.W.L. (1992) *Elektriciteit in perspectief*, stichting toekomstbeeld en techniek, z.p.
- Feimann, P.F.L., K.T. Geurs, R.M.M. van den Brink, G.P. van Wee (2000) *Verkeer en Vervoer in de Nationale Milieuverkenningen 5*. Bilthoven: RIVM, concept.
- Gijzen, A. (2001), *Operationale invoerparameters PRORIN*, CE, Delft, juli 2001
- Gijzen, A, J. Spakman (2001) *DAMES, database of macro emissions by Dutch power plants between 1995 and 2030*, report nr. 773001 017, National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven, The Netherlands (in Dutch)
- Glasbergen, P. (1994) *Milieubeleid, een beleidswetenschappelijke inleiding*. Den Haag: VUGA
- Haspel, B. van den, K. Haverkorn, M. Elderman (1991) *Mogelijkheden CO₂-reductie door hergebruik van remenergie in de transportsector*, Delft: Centrum voor energiebesparing en schone technologie (CE).
- IEA (1999) *Automotive fuels for the future, the search for Alternatives*. Parijs: International Energy Agency

- Jager, H. de (2000a) *NS-Reizigers verwacht flinke vervoersgroei*. In 'Railmagazine', nr. 172, maart 2000.
- Jager, H. de (2000b). *Bouw DD-IRM binnenkort van start*. In 'Railmagazine', nr 173, april 2000.
- 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*; Delft: CE, RIVM, TNO Inro.
- Keizer, C.P., P.K. Wiersma (1999) *Railvoertuigtechniek*. Delft: Technische Universiteit Delft, faculteit ontwerp, constructie en productie.
- Kouwenhoven, C.J.L. (1996) *In (snel)treinvaart milieu bespaard?* Utrecht: NS-Reizigers.
- KPMG (1998) *Stillere treinen: een bron van besparingen, eindrapport*, Hoofddorp: KPMG (bureau voor economische argumentatie).
- Kreysig, E. (1993) *Advanced Engineering Mathematics*. VS, Ohio: Wiley. 1271 blz.
- Laar, van P.A. (1993) *Het specifiek energiegebruik van transportmodaliteiten*, TU Delft, Faculteit der werktuigbouwkunde en maritieme techniek, vakgroep Transporttechnologie
- Lukaszewicz, P. (1995) *Running resistance of passenger and freight trains, methodology and test results*. Stockholm, Zweden: Royal institute of technology, Railway Technology, departement of vehicle engineering.
- VROM (1999) *Uitvoeringsnota klimaatbeleid*. Den Haag: Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke ordening en Milieubeheer
- NS (1994) *Algemene bedrijfsgegevens 1993*. Utrecht: Nederlandse Spoorwegen N.V.
- NS (2000) *Jaarverslag NS*. Utrecht: Nederlandse Spoorwegen N.V.
- NS-Reizigers (1998) *Treinen, het rollend materieel van NS Reizigers*, Amsterdam: Pride PR & Publikation BV
- Railion (2000) *Geef Railion de ruimte!* Utrecht: Railion issue nr 1
- Rijkeboer, R.C., P. van Sloten, M. Elderman, B. van Haspel, P. Kroon (1992) *Wijziging brandstofmix, een studie naar de gevolgen voor energiegebruik en emissie van een drastische wijziging van de verdeling benzine-diesel-LPG bij personen en bestelwagens*. Delft: TNO, CE, ECN in opdracht van NOVEM.
- Ruiter, W. de. (1996) *Energie en milieu* Utrecht : Rijks Universiteit Utrecht, dictaat voor studie-onderdeel Integratiecursus "energie", studie natuurwetenschappen bedrijf & bestuur.
- Rutten, B.J.C.M. (1993) *Intermodaal vervoer beperkt CO₂-uitstoot* In: Energie Technologie, juli 1993.
- Schreiner, K. (2000) *Consideration on exhaust emission optimisation of diesel engines for rail traction*, Euromot, Duitsland, paper gepresenteerd op de UIC Energy Conference.
- Serway, R.A. (1992) *Physics for scientists and engineers*. Philadelphia: Saunders.
- V&W. 1999. *Perpectievennota verkeer en vervoer*, Den Haag: V&W, VROM, EZ, LNV, provincies, gemeenten, kaderwetgebieden
- V&W. 2000. *De spoorlijn Utrecht-Arnhem-Duitse grens (HSL-Oost) en het in de trajectnota-mer op te nemen standpunt.*. brief van Minister Netelenbos van V&W aan de Tweede Kamer, 30 juni.
- V&W.1996. *Transport in balans*, Den Haag: Broese.
- Verkerk, G., J.B.O. Broens, W. Krandonk, F.J. van der Puijl, J.L. Sikkema, C.W. Stam (1992) *BINAS*, Lutjebroek: NVON.
- Wal, G. van der, E.H. Knol (1979) *Elektrotechniek in kort bestek* z.p. Nijgh & Van Ditmar Educatief.

- Weigel, W.-D. (2000) *Reduction of energy consumption in traction systems with superconducting transformers*, Siemens AG VT GT E, paper gepresenteerd op de UIC Energy Conference in mei 2000.
- Wilting, H.C., W. Biesiot, H.C. Moll (1995) *Economische activiteiten vanuit energetisch perspectief*, Groningen: IVEM, onderzoeksrapport no.72.
- Wolve, M. (1995) *Vershil in energieverlies tussen het 1500V en het 25 kV systeem*. Utrecht: Holland Railconsult.

Bijlagen

BIJLAGE 1:	VERZENDLIJST.....	77
BIJLAGE 2:	MILIEUBELEID NEDERLANDSE SPOORWEGEN	81
BIJLAGE 3:	VERSNELLINGSVERLOOP TIJDENS HET VERSNELLEN	83
BIJLAGE 4:	BEWEGINGSVERGELIJKINGEN	87
BIJLAGE 5:	ENERGIEBEREKENINGEN AAN DE WIELBAND.....	91
BIJLAGE 6:	RENDEMENT SERIEGESCHAKELDE WEERSTANDS-MOTOREN	95
BIJLAGE 7:	BEREKENING VAN VERWARMINGSENERGIE	97
BIJLAGE 8:	GEMIDDELDE SNELHEID EN AANTAL STOPS	101
BIJLAGE 9:	TECHNISCHE GEGEVENS NEDERLANDS TREINMATERIEEL IN 1998.....	103
BIJLAGE 10:	TECHNISCHE EN OPERATIONELE INVOER PER TREINTYPE IN 1998	105
BIJLAGE 11:	ENERGIEGEBRUIK REIZIGERSVERVOER PER MATERIEELTYPE IN 1998	107
BIJLAGE 12:	DIRECTE EMISSIES REIZIGERSVERVOER PER MATERIEELTYPE IN 1998.....	109
BIJLAGE 13:	DIRECTE + INDIRECTE EMISSIES REIZIGERSVERVOER PER MATERIEELTYPE IN 1998.....	111

Bijlage 1: Verzendlijst

- 1 plv. Directeur-Generaal Milieubeheer, Dr Ir B.C.J. Zoeteman
- 2 DGM, Directie Strategische Planning

- 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 P.H.L. Bovy – Technische Universiteit Delft
- 8 Prof. Dr A.I.J.M. van der Hoorn – Universiteit van Amsterdam/ AVV
- 9 Prof. Dr F. le Clercq – Universiteit van Amsterdam/Twijnstra Gudde
- 10 Prof. Dr M. van Maarseveen – Technische Universiteit Twenthe
- 11 Prof. Ir F. Sanders – Technische Universiteit Delft
- 12 Prof. Dr Ir H. Priemus – Technische Universiteit Delft/OTB
- 13 Prof. Dr H.J. van Zuylen – Technische Universiteit Delft

- 14 Dr. C.M. Plug – VROM/DGM
- 15 Ir A.J. Baayen - VROM/DGM
- 16 Ir M. van den Berg - VROM/DGM
- 17 Drs. R. Bouman – VROM/DGM
- 18 Drs H.C.G.M. Brouwer – VROM/DGM
- 19 Dr C. Havenith – VROM/DGM
- 20 Ir B.J.F. Kortbeek – VROM/DGM
- 21 Ing. D. de Jong – VROM/DGM
- 22 Mr M.C. Kroon – VROM/DGM
- 23 Dhr. W.J. Lenstra – VROM/DGM
- 24 Drs. A.J. van Marlen – VROM/DGM
- 25 Drs. P. Hofmeijer – VROM/DGM
- 26 Drs H.E. ten Velden – RPD
- 27 Drs N.M. Beekman – V&W
- 28 Drs R. Braakenburg van Backum - V&W
- 29 Ir A.N. Bleijenberg – V&W
- 30 Drs J.G. Veldhuis – V&W/DLB
- 31 Ing. H. Flikkema – RWS-AVV
- 32 Dhr. H. Besseling - RWS-AVV
- 33 Mevr. M. van Wolters - RWS-AVV
- 34 Ir P.C.M. Polak - RWS-AVV
- 35 Drs J.M. Francke – RWS-AVV
- 36 Ir J. van der Waard – RWS-AVV
- 37 Mr Ir J.P. Jonges, RWS-AVV
- 38 Ir P. Jorritsma, RWS-AVV
- 39 Mevr. J. Veurman – RWS-AVV
- 40 Mevr. Drs E. Schol – RWS-AVV
- 41 Ing. J.A.P. Klein – CBS
- 42 Drs E.J. Dietz – CBS
- 43 Dhr. E. van Gelder – CBS
- 44 Dr. C. Koopmans – CPB
- 45 Drs. M.A. Koning – CPB

- 46 Drs. T.H. van Hoek – CPB
47 Dr M. Dijkstra – Universiteit Utrecht
48 Dr T.J.M. Spit – Universiteit Utrecht
49 Dr J. Floor, Universiteit Utrecht
50 Dr J.J. Harts, Universiteit Utrecht
51 Dr T. de Jong, Universiteit Utrecht
52 Dr S. Geertman, Universiteit Utrecht
53 Drs M. van Ham, Universiteit Utrecht
54 Ir J.J.E.A van Meel – NOVEM
55 Ing. A. Jansen – NOVEM
56 Dr J.J.J.M. Goumans – NOVEM
57 Dr G.J. van Oortmarssen – NOVEM
58 Ir P. Kroon – ECN
59 Drs A.T.J. Groot - ECN
60 Ir W. J. van Grondelle – SNM
61 Ir J.T.J. Fransen - SNM
62 Drs. J. Steijn – VNO/NCW
63 Ir P.H.R. Langeweg – ANWB
64 Ing. R. Hendriks – ANWB, redactie verkeerskunde
65 Dhr . W. Zijlstra – BOVAG
66 Dhr. R. Broekhuizen – MOBIL
67 Drs W. Korver – TNO-INRO
68 Ir E.J. Verroen – TNO-INRO
69 Ir F. de Roo – TPD-TNO
70 Ir R.C. Rijkeboer – TNO-WT
71 Dhr. R. Gense – TNO-WT
72 Ir J.H.J. Hulskotte – TNO-MEP
73 Dr. Ir. B.J.M. Rutten – CMG
74 Ing. F.M.C. Gommers - XTNT
75 Dr H.J. Meurs – MuConsult
76 Dr G.C. de Jong – HCG
77 Ing. P.M. Peeters – Peeters advies
78 Ir C. Harders – TRANSEK (Zweden)
79 Ing. K.L. van de Zande – AGV
80 Dhr. D.H.W.H. Hermans – Goudappel Coffeng
81 Dhr. J.T. Jetten – NEA
82 Drs. L. van der Velde – NEA
83 Ir J.M.W. Dings – CE
84 Ir P. Janse – CE
85 Ir B. Klimbie - CE
86 Drs U.Ph. Blom – B&A
87 Grontmij
88 Arcadis
89 Ir Th.J.H. Schoemaker – TUD
90 Ir P.M. Schrijnen – TUD
91 Drs C. Kuijpers – Katholieke Universiteit Leuven, Centrum voor Economische
Studies
92 Dr M. Bouwman – Interfacultaire Vakgroep Energie en Milieukunde (IVEM)
93 Dr ir. L.A.M. van Dongen – NS-Reizigers
94 Drs Harold Resida – NS-Reizigers
95 Ir G.W. Fiechter – NS-Reizigers

-
- 96 Depot van Nederlandse publikaties en Nederlandse bibliografie
- 97 Nederlands Instituut voor Wetenschappelijke Informatiediensten
- 98 Bibliotheek VU
- 99 Bibliotheek UvA
- 100 Bibliotheek Faculteit der Economische Wetenschappen en Econometrie – UvA
- 101 Bibliotheek SEO
- 102 Bibliotheek RPD
- 103 Bibliotheek V&W
- 104 Bibliotheek AVV
- 105 Bibliotheek TU Delft
- 106 Bibliotheek TU Eindhoven
- 107 Bibliotheek TU Twente
- 108 Bibliotheek RUU
- 109 Bibliotheek KUN
- 110 Bibliotheek NHTV
- 111 Connekt
-
- 112 Ir F. Langeweg
- 113 Dr. J.A. Hoekstra
- 114 Drs R.J.M. Maas
- 115 Dr Th.G. Aalbers
- 116 Prof. Dr G.P. van Wee
- 117 Drs J.A. Annema
- 118 Drs. ing. K.T. Geurs
- 119 Drs H. Nijland
- 120 Drs J.A. Oude Lohuis
- 121 Ir J. Spakman
- 122 Drs C.R. Vringer
- 123-124 Auteurs
- 125 Hoofd Bureau Voorlichting en Public Relations
- 126 Bibliotheek RIVM
- 127 Bureau Projecten- en rapportenregistratie
- 128-160 Reserve-exemplaren

Bijlage 2: Milieubeleid Nederlandse Spoorwegen

De NS streeft ernaar te voorzien in duurzame mobiliteit: mobiliteit die de milieubelasting minimaliseert en de relatieve milieuvoordelen optimaliseert, nu en in de toekomst. Het begrip duurzaamheid is binnen de NS opgesplitst in vijf thema's (Kouwenhoven, 1996):

- Energie;
- Geluidshinder;
- Ruimtegebruik;
- Bodemvervuiling;
- Milieubewust materiaalgebruik.

Als gevolg van de afbakening van het onderzoek wordt alleen het thema energie besproken. Energie is de meest kritische factor voor de duurzaamheid en de milieuvoorsprong van het railvervoer. Hogere energieprijzen, strengere maatschappelijke eisen en toenemende concurrentie maken energiebesparing tot een bedrijfseconomische noodzaak (Kouwenhoven 1996). Op 4 oktober 1999 heeft de NS een meerjarenafspraak energie-efficiency verbetering (energieconvenant) afgesloten met het ministerie van Economische Zaken. Hiermee heeft de NS een energiebesparing van 11% tot 2010 afgesproken. Verder bestaat het energieconvenant uit de afspraak dat 5% van de treinen op groene stroom zal rijden. Aan dit convenant nemen vijf bedrijfsonderdelen deel:

- NS-Reizigers;
- NS Railinfrabeheer;
- NS Stations;
- NS Vastgoed;
- NedTrain (voorheen NS Materieel)

NS-Reizigers heeft een aandeel in de totale energiegebruik van ongeveer 85%. Het besparingspercentage van NS-Reizigers telt dan ook het zwaarst mee. NS-Reizigers heeft zich gecommitteerd aan een energiebesparing van 10% in 2010. Concreet betekent dit dat het energiegebruik *per zitplaatskm* van NS Reizigers in 2010 10% lager moet zijn dan in 1997. Naast monitoring op basis van *zitplaatskm* is ook energiemonitoring afgesproken op basis van *reizigerskm*, *bakkm* en *treinkm* te volgen. Er wordt dus ook gemonitord of milieuvoordeel per *zitplaatskm* leidt tot milieuvoordeel per *reizigerskm*.

In de periode 1985-1998 is de energie-efficiency reeds met 20% verbeterd. Dit kwam doordat (Van Dongen en Fiechter, 2000):

- nieuw materieel per *zitplaats* lichter is dan oud materieel (dubbeldekkers);
- modern materieel uitgerust is met energiezuinige tractie-installaties;
- sinds 1985 de lengte van treinen toegenomen is, waardoor de luchtweerstand per *zitplaats* is afgenomen.
- vanaf 1988/1989 er extra aandacht is voor energie zuinig rijden (trein meer laten uitrollen).

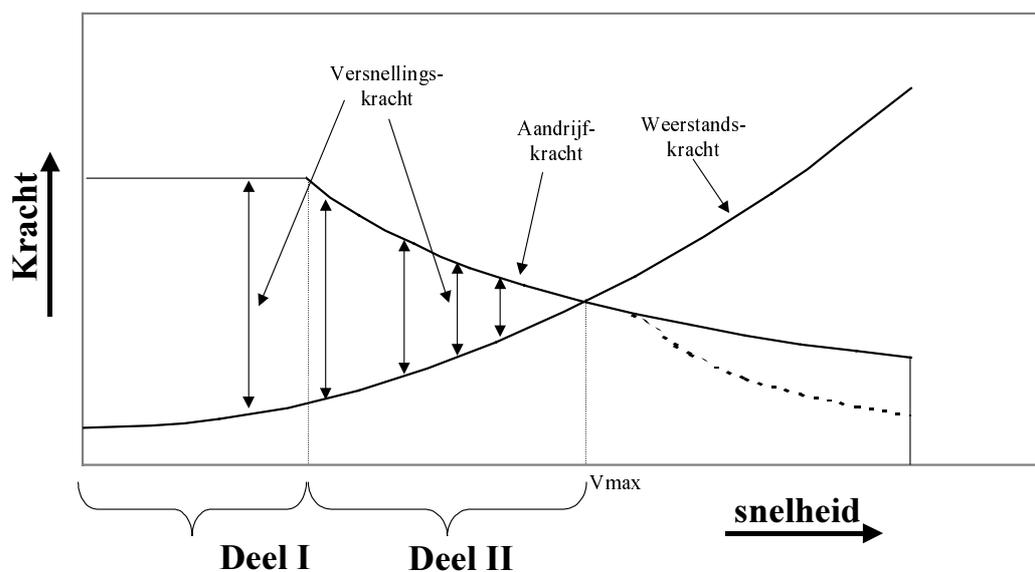
Om een verdere energie-efficiency verbetering van 10% in 2010 ten opzichte van 1997 te kunnen realiseren worden de volgende maatregelen genomen¹:

- instroom van verlengde en nieuwe dubbeldekreinen (dubbeldekreinen zijn per zitplaatskm energiezuiniger, zie hoofdstuk 6);
- invoering van de economymeter (systeem die de machinist adviseert over energiezuinig rijden);
- energiezuinige tractie-installaties voor Sprinter-treinstellen;
- massa besparen bij de nieuwbouw/revisie van treinen;
- aanpassen van temperatuur en ventilatieregeling in de trein.

¹ Overigens hoeft dit niet tot een milieuvoordeel te leiden. Als het aantal reizigers niet meegroeit met het aantal zitplaatsen dan hoeft een besparing *per zitplaatskm* niet te leiden tot een besparing *per reizigerkm*. Bij een te grote daling van de bezettingsgraad kan het milieuvoordeel zelfs negatief uitpakken.

Bijlage 3: Versnellingsverloop tijdens versnellen

Het verschil tussen beschikbare aandrijfkracht en totale weerstand is in principe bepalend voor de potentiële versnelling. Dit verschil, en daarmee de potentiële versnelling, zal met toenemende snelheid steeds kleiner worden (Figuur B3.1).



Figuur B3.1: Snelheid-kracht diagram

Een snelheid-versnelling diagram van een trein bestaat uit twee delen. In theorie neemt in het eerste deel de versnellingskracht (licht) af doordat de treinweerstand (loop- en luchtweerstand) toeneemt (onder de aanname dat de aandrijfkracht constant blijft). De versnellingsafname is klein, aangezien de luchtweerstand bij lage snelheden nog niet zo groot is. In het tweede deel van het snelheids-versnellings-diagram neemt de versnellingskracht steeds sneller af doordat de treinweerstand toeneemt en omdat de aandrijfkracht van de motor afneemt.

Tijdens het eerste deel van het versnellen wordt de versnelling als functie van de snelheid berekend als (voor deze berekeningen wordt de geringe snelheidsafhankelijkheid van f_{loop} verwaarloosd):

$$\begin{aligned}
 F_{versnelling} &= F_{aandrijf} - F_{lucht} - F_{loop} \\
 (1 + \alpha) \cdot m \cdot a_{netto} &= m \cdot a_{aandrijf} - C_1 \cdot v^2 - f_{loop} \cdot N \\
 a(v) &= \frac{a_{aandrijf}}{(1 + \alpha)} - \frac{C_1}{m \cdot (1 + \alpha)} \cdot v^2 - \frac{f_{loop} \cdot g}{(1 + \alpha)} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Hierin is $F_{aandrijf}$ de aandrijfkracht, $a_{aandrijf}$ de versnelling veroorzaakt door de aandrijfkracht en $C_1 = 1/2 C_w \rho A$. Er wordt aangenomen dat $a_{aandrijf}$ tijdens het eerste deel van het versnellen constant is. $a_{aandrijf}$ wordt berekend als: (bij $v=0$ is de beginversnelling a_0):

$$a_{aandrijf} = a_0 \cdot (1 + \alpha) + f_{loop} \cdot g \quad (2)$$

(1) invullen in (2):

$$a(v) = a_0 - \frac{C_1}{m \cdot (1 + \alpha)} \cdot v^2 \quad (3)$$

Bovenstaande formule geeft het snelheid-versnellingsdiagram van het eerste deel van het versnellen.

Tijdens het tweede deel van het versnellen neemt de aandrijfkracht bij toenemende snelheid af volgens de formule:

$$F_{aandrijf} = \frac{P}{v}$$

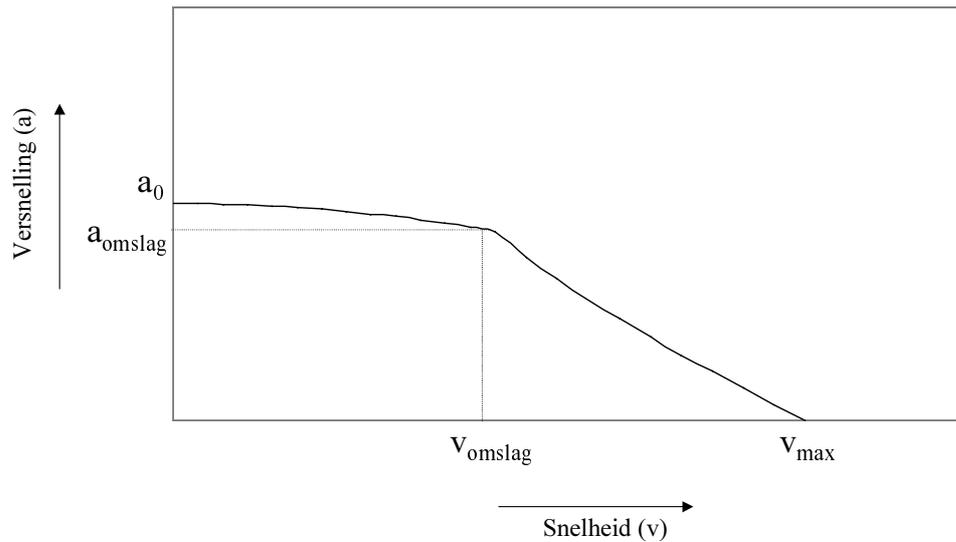
De versnelling als functie van de snelheid wordt dan:

$$a(v) = \frac{P}{v \cdot m \cdot (1 + \alpha)} - \frac{C_1}{m \cdot (1 + \alpha)} \cdot v^2 - \frac{f_{loop} \cdot g}{(1 + \alpha)} \quad (4)$$

De snelheid vanaf waar de aandrijfkracht van de motor zal afnemen (het omslagpunt), wordt berekend door (3) en (4) aan elkaar gelijk te stellen. Dit resulteert in:

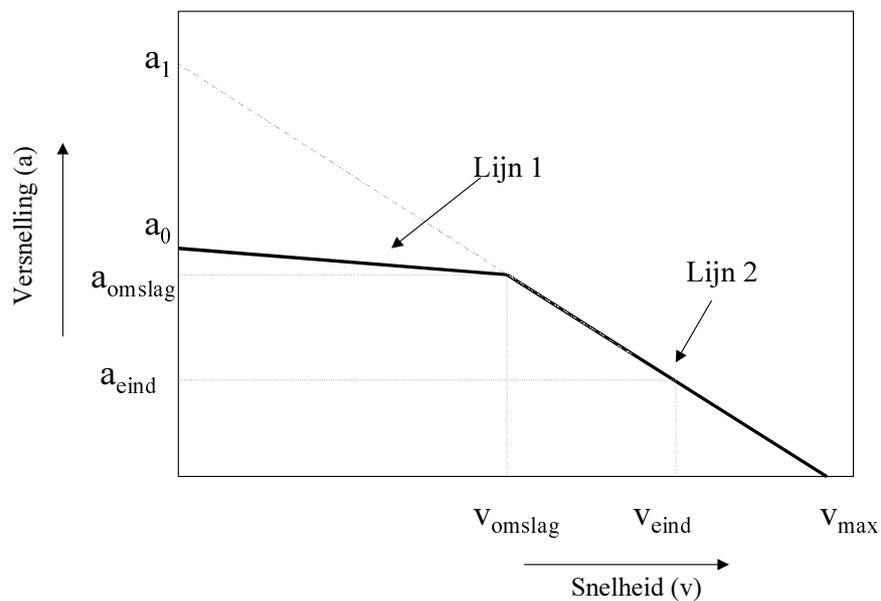
$$v_{omslag} = \frac{P}{m \cdot (a_0 \cdot (1 + \alpha) + f_{loop} \cdot g)} \quad (5)$$

De versnelling als functie van de snelheid zal er in theorie dus als volgt uitzien:



Figuur B3.2: Berekend snelheid-versnellingsdiagram

Deze 'theorie'-lijn moet worden geïntegreerd om de ritprofielen te verkrijgen (zie bijlage 3). Vergelijking (4) is echter voor dit onderzoek te complex om te integreren zodat hij lineair in twee stappen wordt benaderd (zie Figuur B3.3).



Figuur B3.3: Vereenvoudigd snelheids-versnellings diagram

Voor beide lijnen geldt dan de formule:

$$a(v) = a_0 - c_v v \quad (6)$$

De c_v -waarde wordt de versnellingscoëfficiënt genoemd. De 'benaderings'-lijn van het eerste deel wordt gevonden door de c_v -waarde als volgt te berekenen:

$$c_v = \frac{\Delta a}{\Delta v} = \frac{a_0 - a_{omslag}}{v_{omslag}} \quad (7)$$

Voor het tweede deel van het versnellen wordt de versnelling als functie van de snelheid benaderd met:

$$a(v) = a_1 - c_v v \quad (8)$$

Met als c_v waarde:

$$c_v = \frac{a_{omslag} - a_{eind}}{v_{eind} - v_{omslag}} \quad (9)$$

Bijlage 4: Bewegingsvergelijkingen

Eerste deel van het versnellen

De versnelling als functie van de snelheid (zie 0):

$$a = a_0 - c_v v \quad (1)$$

Hierin is a_0 de beginversnelling in m/s^2 en c_v de versnellingscoëfficiënt. Om de snelheidsfunctie te vinden, wordt vergelijking (1) geïntegreerd en geschreven als (Beukers, 1995):

$$\frac{dv}{dt} = a_0 - c_v v$$

$$t(v) = \frac{\ln(-c_v v(t) + a_0) - \ln(-c_v v_0 + a_0)}{-c_v} \quad (2)$$

oplossen voor v :

$$v(t) = \frac{a_0}{c_v} + \left(v_0 - \frac{a_0}{c_v} \right) \cdot e^{-c_v t} \quad (3)$$

Hierin is t de tijd in s en v_0 de beginversnelling. $a(0)/c_v$ zal vanaf nu als C_2 geschreven worden. En $v_0 - a_0/c_v$ als C_3 . Formule (3) wordt dan:

$$v(t) = C_2 + C_3 e^{-c_v t} \quad (4)$$

Voor de afgelegde afstand geldt dan ($v=ds/dt$):

$$\frac{ds}{dt} = C_2 + C_3 e^{-c_v t}$$

$$ds = (C_2 + C_3 e^{-c_v t}) \cdot dt \quad (5)$$

integreren :

$$s(t) = C_2 t - \frac{1}{c_v} C_3 e^{-c_v t} + \frac{C_3}{c_v} \quad (6)$$

Het tweede deel van het versnellen

Voor het tweede deel van het versnellen gelden dezelfde formules als voor het eerste deel van het versnellen, alleen met andere waarden voor c_v , a_0 , C_2 en C_3 (zie Bijlage 3).

Het rijden met constante snelheid

Tijdens het rijden met constante snelheid is de versnelling 0. Dit levert voor de verplaatsing:

$$s(t) = v_{\max} t \quad (7)$$

Uitrijden

Tijdens het uitrijden levert de motor geen energie. In dit onderdeel zal de trein dus van een beginsnelheid naar een lagere eindsnelheid gaan. De vertraging die een trein dan ondergaat wordt uitsluitend bepaald door de loop- en de luchtweerstand en wordt uitgerekend met de formule:

$$M \cdot a = F_{\text{lucht}} + F_{\text{loop}}$$

$$a(v) = \frac{C_1 \cdot v^2}{M} + \frac{D}{M} + \frac{Ev}{M} \quad (8)$$

Voor de uitleg van de constanten C_1 en M wordt naar Bijlage 3. De coëfficiënten D en E worden in de hoofdtekst in hoofdstuk 4 uitgelegd. Om te berekenen hoe lang een trein erover doet om van een beginsnelheid naar een eindsnelheid, moet formule (8) herschreven en geïntegreerd worden. Aangezien de vertraging in de tegenovergestelde richting wijst als de snelheid (het zijn beide vectoren), moet (8) nog met -1 vermenigvuldigd worden. Dit geeft ($a=dv/dt$):

$$dt = \frac{dv}{C_4 v^2 + C_5 v + C_6}$$

met :

$$C_4 = \frac{C_1}{M}, \quad C_5 = \frac{E}{M}, \quad C_6 = \frac{D}{M}$$

integreren :

$$t(v) = \frac{2}{Q} \left[\tan^{-1} \left(\frac{2C_4 v + C_5}{Q} \right) \right] - D \quad (9)$$

met :

$$Q = \sqrt{4C_4 C_6 - C_5^2}, \quad D = \frac{2}{Q} \tan^{-1} \left(\frac{2C_4 v_{\text{begin}} + C_5}{Q} \right)$$

Met formule (9) wordt de totale tijd berekend die nodig is om te vertragen tot een bepaalde snelheid. Om een bepaalde snelheid te berekenen bij een bekende tijd, moet (9) worden opgelost voor $v(t)$:

$$v(t) = \frac{-1}{2C_4} \left[-\tan \left(\frac{1}{2} Q t + \frac{1}{2} Q D \right) \cdot Q + C_5 \right] \quad (10)$$

Door deze snelheid te integreren over de tijd wordt bepaald wat de afgelegde afstand is. Dit geeft:

$$s(t) = \frac{1}{2C_4} \ln \left[1 + \tan \left(\frac{1}{2} Q t + \frac{1}{2} D Q \right)^2 \right] - \frac{C_5 t}{2C_4} - C_7 \quad (11)$$

met :

$$C_7 = \frac{1}{2C_4} \ln \left[1 + \tan \left(\frac{1}{2} D Q \right)^2 \right]$$

Remmen

Het remmen gebeurt met een constante vertraging. Voor de plaats als functie van de tijd en voor de snelheid als functie van de tijd geldt dan:

$$\begin{aligned} s(t) &= s_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \\ v(t) &= v_0 + a t \end{aligned} \quad (12)$$

Bijlage 5: Energieberekeningen aan de wielband

Eerste deel van het versnellen

Tijdens het versnellen zal de motor van de trein de luchtweerstand en loopweerstand moeten compenseren om een bepaalde snelheid te handhaven. Tevens is er energie nodig voor het versnellen van de trein. De energie die nodig is voor het compenseren van deze drie weerstanden nodig, moet uiteraard door de motor worden geleverd. De energie die per tijdseenheid geleverd moet worden (P) is:

$$P_{trein} = \int F_{versnel} dv + \int F_{lucht} dv + \int F_{loop} dv \quad (1)$$

De totale energie (W) wordt berekend met:

$$W_{trein} = \int F_{versnel} ds + \int F_{lucht} ds + \int F_{loop} ds \quad (2)$$

Hierin is ds de verplaatsing in de richting van de kracht. Verder geldt:

$$dW_{trein} = P_{trein} \cdot dt \quad (3)$$

Luchtweerstandenergie

De luchtweerstand wordt op een bepaald tijdstip berekend met de volgende formule:

$$F_{lucht} = \frac{1}{2} \cdot C_w \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$$

formule (4) uit bijlage 3 invullen :

$$F_{lucht} = \frac{1}{2} \cdot C_w \cdot \rho \cdot A \cdot (C_2 + C_3 e^{-c_v t})^2 \quad (4)$$

$\frac{1}{2}C_w\rho A$ wordt geschreven als C_1

De hoeveelheid energie nodig om de luchtweerstand te compenseren, wordt dan:

$$dW_{lucht} = \int_{s_i}^{s_f} C_1 \cdot (C_2 + C_3 \cdot e^{-c_v t})^2 ds$$

formule (5) uit bijlage invullen :

$$dW_{lucht} = \int C_1 \cdot (C_2 + C_3 e^{-c_v t})^3 dt$$

$$dW_{lucht} = \int C_1 \cdot (C_2^3 + 3C_2^2 C_3 e^{-c_v t} + 3C_2 C_3^2 e^{-2c_v t} + C_3^3 e^{-3c_v t}) dt \quad (5)$$

integreren :

$$W_{lucht}(t) = C_1 \cdot \left(C_2^3 t - \frac{3}{c_v} C_2^2 C_3 e^{-c_v t} - \frac{3}{2c_v} C_2 C_3^2 e^{-2c_v t} - \frac{1}{3c_v} C_3^3 e^{-3c_v t} + Q \right) \quad (6)$$

met :

$$Q = \frac{1}{c_v} \cdot \left(3C_2^2 C_3 + \frac{3}{2} C_2 C_3^2 + \frac{1}{3} C_3^3 \right)$$

Formule (5) geeft het benodigde vermogen op een bepaald tijdstip. Formule (6) geeft de totale energie nodig om de luchtweerstand te compenseren als functie van de tijd. De t komt voort uit formule (2) uit Bijlage 3, waar de gewenste begin- en eindsnelheden worden ingevuld.

Versnellingsenergie

De kracht die nodig is om te versnellen is :

$$F_{versnel} = m(1 + \alpha) \cdot a \quad (7)$$

Hierin is a de versnelling, m de massa in kg en α een toeslagfactor voor roterende delen. $m(1 + \alpha)$ wordt geschreven als M . Voor het geval van de lineair afnemende versnelling geldt dan:

$$F_{versnel} = M \cdot (a_0 - c_v v)$$

(4) uit bijlage 2 invullen :

$$F_{versnel} = M \cdot (a_0 - c_v (C_2 + C_3 e^{-c_v t}))$$

De hoeveelheid energie wordt dan (C_2 invullen) :

$$dW_{versnel} = \int M \cdot (-c_v C_3 e^{-c_v t}) \cdot ds$$

(5) uit bijlage 3 invullen :

$$dW_{versnel} = \int M \cdot (-c_v C_3 e^{-c_v t} (C_2 + C_3 e^{-c_v t})) \cdot dt \quad (8)$$

integreren :

$$W_{versnel}(t) = MC_3 \left(C_2 e^{-c_v t} + \frac{1}{2} C_3 e^{-2c_v t} - C_2 - \frac{1}{2} C_3 \right) \quad (9)$$

De versnellingsenergie wordt ook wel berekend met formule (10). Deze lijkt handiger door zijn elegantere vorm, echter vergelijking (9) drukt beter het tijdsverloop van de versnellingsenergie uit.

$$W_{\text{versnel}} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot v^2 \quad (10)$$

Hierin is W de benodigde energie, m de massa en v de eindsnelheid.

Loopweerstandenergie

De loopweerstand wordt gegeven door:

$$F_{\text{loop}} = A + (a + b \cdot N) \cdot n_{ax} + (c + d \cdot L) \cdot v$$

Dit wordt geschreven als:

$$F_{\text{loop}} = D + E \cdot v \quad (11)$$

waarin $D=A+(a+bN)n_{ax}$ en $E=(c+dL)$.

Voor de berekeningen wordt de loopweerstand verdeeld in een snelheidsonafhankelijk deel (D) en een snelheidsafhankelijk deel (Ev)

Voor het snelheidsonafhankelijk deel geldt:

$$dW_{\text{loop}} = \int D \cdot ds$$

(5) uit bijlage 3 invullen :

$$dW_{\text{loop}} = \int D \cdot (C_2 + C_3 e^{-c_v t}) \cdot dt \quad (12)$$

$$W_{\text{loop}}(t) = D \cdot \left(C_2 t - \frac{C_3}{c_v} (e^{-c_v t} - 1) \right) \quad (13)$$

En voor het snelheidsafhankelijke deel geldt:

$$dW_{loop} = \int Ev \cdot ds$$

Formule (5) uit bijlage 3 invullen :

$$dW_{loop} = \int E \cdot (C_2 + C_3 e^{-c_v t})^2 \cdot dt \quad (14)$$

integreren :

$$W_{loop}(t) = E \cdot \left(C_2^2 t - \frac{2}{c_v} C_2 C_3 e^{-c_v t} - \frac{1}{2c_v} C_3^2 e^{-2c_v t} + C_{10} \right) \quad (15)$$

$$C_{10} = \frac{C_3}{c_v} \cdot \left(2C_2 + \frac{1}{2} C_3 \right)$$

Tweede deel van het versnellen

Tijdens het tweede deel van het versnellen rijdt de trein in principe op constant vermogen. De totale hoeveelheid gebruikte hoeveelheid energie wordt dan berekend met dezelfde formules als voor het eerste deel van het versnellen, echter met andere waarden voor c_v , a_0 en $v(0)$.

Rijden met constante snelheid

Tijdens het rijden met constante snelheid is er alleen energie nodig om de trein op constante snelheid te houden. De energie benodigd voor versnellen speelt dus geen rol. De energie die de motor moet leveren is dus de energie die nodig is om de loop- en de luchtweerstand te compenseren.

Loopweerstandsenergie

In het geval van rijden met constante snelheid wordt de energie benodigd om de loopweerstand te compenseren berekend met de volgende formule:

$$W_{loop} = D \cdot s + E \cdot v \cdot s \quad (16)$$

Luchtweerstandsenergie

Tijdens het rijden met constante snelheid is de snelheid onafhankelijk van de tijd. Voor de berekening van de hoeveelheid energie benodigd voor het compenseren van de luchtweerstand, kan dus voldaan worden met:

$$W_{lucht} = C_1 \cdot v^2 \cdot s \quad (17)$$

v is hierin de snelheid en s de afgelegde afstand.

Bijlage 6: Rendement seriegeschakelde weerstandsmotoren

Het rendement van een elektrische trein met seriegeschakelde weerstanden (zoals Koploper III, Sprinter en Plan V en Plan T) wordt onderverdeeld in:

- het rendement van het stroomreguleringsmechanisme;
- het motorrendement.

Bij treinen die rijden met een weerstandsgeschakelde seriemotor bestaat het stroomreguleringsmechanisme uit voorgeschakelde weerstanden.

Rendement tijdens het versnellen

Tijdens het versnellen gaat een deel van de energie dat niet nodig is voor de tractie, in de weerstanden verloren. Dit geldt dus alleen tijdens het eerste deel van het versnellen, totdat de elektromotor het constante (maximale) vermogenpunt heeft bereikt. De snelheid waarbij dit punt wordt bereikt, wordt berekend als:

$$v_{\text{omslag}} = \frac{P}{m(a_0(1 + \alpha) + f_l g)} \quad (1)$$

Na het bereiken van deze snelheid zijn er geen weerstanden meer voorgeschakeld en wordt er dus ook geen energie gedissipeert.

De hoeveelheid energie die in de weerstanden verloren gaat tijdens het eerste deel van het versnellen, wordt nu berekend als het verschil tussen de energie die de trein ingaat minus de energie die de motor nodig heeft. In formulevorm:

$$E_{\text{verlies}} = P \cdot t - \frac{E_{\text{tractie}}}{\eta_{\text{motor}}} \quad (2)$$

Hierin is E_{tractie} de energie nodig aan de wielband. Door de toepassing van meerdere parallelschakelingen kan het energieverlies verminderd worden (Keizer, Wiersma 1999). Tijdens het versnellen geldt dan voor de *verliezen* in de trein:

$$E_{\text{verlies}} = \frac{1}{a} \cdot \left(P \cdot t - \frac{E_{\text{tractie}}}{\eta_{\text{motor}}} \right) \quad (3)$$

Hierin is a de factor waarmee het energieverlies verminderd wordt. Voor het rendement geldt dan:

$$\eta_{\text{weerstand}} = \frac{E_{\text{tractie}}}{E_{\text{tractie}} + E_{\text{verlies}}} \quad (4)$$

Rendement tijdens rijden met constante snelheid

Voor het rijden met constante snelheid wordt aangenomen dat de motor draait met het toerental waarop geen veldverzwakking meer mogelijk is (zie hoofdstuk 4.5.1). Het vermogensverlies van de motor wordt berekend als:

$$P_{\text{verlies}} = P_{\text{max}} \cdot (\sqrt{t} - t) \quad (5)$$

Hierin is P_{max} het maximale vermogen van de motor en t het quotiënt van het geleverd vermogen en het maximaal vermogen.

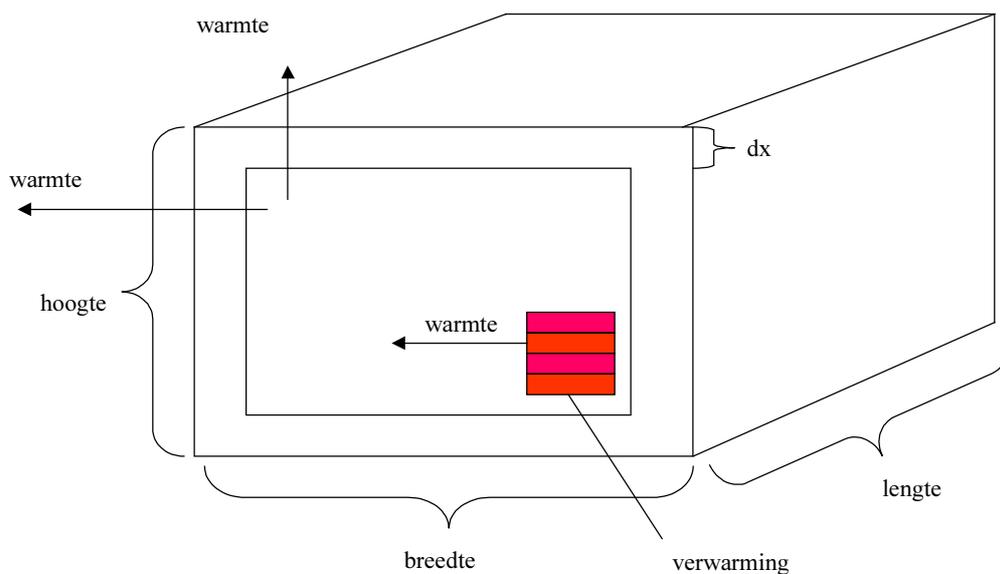
Het rendement wordt dan berekend als:

$$\eta_{\text{weerstand}} = \frac{P_{\text{tractie}}}{P_{\text{tractie}} + P_{\text{verlies}}} \quad (6)$$

Hierin is P_{tractie} het vermogen dat nodig is aan de wielband.

Bijlage 7: Berekening van verwarmingsenergie

Wanneer de verwarming in een trein aanstaat, zal deze energie in de vorm van warmte toevoegen aan de lucht in de trein. Tegelijkertijd zal er warmte aan de trein ontsnappen door de wanden van de trein (Figuur B7.1).



Figuur B7.1: Schematische dwarsdoorsnede trein.

In formulevorm geeft dit:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{k \cdot A \cdot dT}{dx} - P \quad (1)$$

Hierin is dW/dt de hoeveelheid warmte die per tijdseenheid **netto** aan de lucht in de trein wordt toegevoegd, k de warmtegeleidingscoëfficiënt in W/m/K, A de oppervlakten van de wanden waardoor de warmte ontsnapt in m, dx de wanddikte in m, P het vermogen van de verwarming in J/s is en dT het temperatuurverschil tussen binnen en buiten de trein. De constante k is afhankelijk van het gebruikte materiaal.

De binnentemperatuur zal door de twee processen van warmtetoevoer via de verwarming en warmteafvoer via de wanden veranderen. De energie nodig voor een temperatuursverandering komt tot uitdrukking in de formule:

$$W = -m \cdot c \cdot dT_{\text{binnen}} \quad (2)$$

Hierin is m de massa van de lucht, c de soortelijk warmte in J/kg/C en dT de binnentemperatuursverandering. Formule (1) en (2) samenvoegen en integreren levert de volgende vergelijking op:

$$\frac{dT_{binnen}}{dt} = \frac{P}{mc} - \frac{k \cdot A \cdot dT}{m \cdot c \cdot dx}$$

integreren :

$$T_{binnen} = \left(T_{begin} + \frac{C_{11}}{C_{10}} \right) \cdot e^{C_{10}t} - \frac{C_{11}}{C_{10}} \quad (3)$$

met :

$$C_{10} = -\frac{kA}{m \cdot c \cdot dx}$$

$$C_{11} = \frac{P}{mc} - C_{10}T_{buiten}$$

Hierin is t de tijd in s, T_{binnen} de binnentemperatuur en T_{begin} de temperatuur van de trein op $t=0$.

Om te bepalen hoeveel vermogen er nodig is om binnen een bepaalde tijd een eindtemperatuur te krijgen, moet formule (3) omgeschreven worden en dat geeft:

$$P = \left(\frac{T_{binnen} - T_{begin} e^{C_{10}t}}{e^{C_{10}t} - 1} + T_{buiten} \right) \cdot (mcC_{10}) \quad (4)$$

Om uit te rekenen hoeveel vermogen er nodig is om een trein op temperatuur te houden, dan is $T_{begin} = T_{binnen}$. Dit geeft:

$$P = \left(\frac{-T_{binnen} (e^{C_{10}t} - 1)}{e^{C_{10}t} - 1} + T_{buiten} \right) \cdot (mcC_{10}) \quad (5)$$

$$P = (T_{binnen} - T_{buiten}) \cdot \frac{kA}{dx}$$

Dit had ook afgeleid kunnen worden uit formule (1), door het vermogen van de verwarming gelijk te stellen aan de energie die door de wanden de trein verlaat.

De NS verstrekt de volgende gegevens: in 1997 en 1998 was het gemiddelde elektriciteitsverbruik per graaddag door de verwarming van de gehele treinenvloot $1,9 \cdot 10^2$ GJ (Van Dongen en Fiechter, 2000). Een graaddag is een maat voor de hoeveelheid 'koude' in een periode. Bij de NS is het referentieniveau $18 \text{ }^\circ\text{C}$. Zo geeft een dag met een gemiddelde temperatuur van $17 \text{ }^\circ\text{C}$ één graaddag en een dag met een gemiddelde temperatuur van $0 \text{ }^\circ\text{C}$ achttien graaddagen. Om op een dag een hoeveelheid energie van $1,9 \cdot 10^2$ GJ te leveren moet, rekening houdend met 10% bovenleidingverliezen, een gemiddeld vermogen van $0,9 \cdot 1,9 \cdot 10^{11} / (60 \cdot 60 \cdot 24) = 1979$ kW geïnstalleerd zijn in alle treinen. Het rendement van een

elektrische verwarming is ongeveer 90%. De oppervlakten van alle treinen samen is ongeveer $8,9 \cdot 10^5 \text{ m}^2$ (Berekend uit gegevens in Bijlage 9). Deze getallen invullen in (5) geeft:

$$P = (T_{binnen} - T_{buiten}) \cdot \frac{kA}{dx}$$

$$0,9 \cdot 20 \cdot 10^5 = (18 - 17) \cdot \frac{k}{dx} \cdot 8,9 \cdot 10^5 \quad (6)$$

$$\frac{k}{dx} = 2,0$$

De constante k wordt bepaald door enerzijds het materiaal waarvan een trein is gemaakt, anderzijds door het openstaan van ramen en de frequentie waarmee de deuren worden geopend en gesloten. Door op bovenstaande manier de k/dx-waarde te berekenen, wordt een gemiddelde waarde gevonden voor de k/dx-waarde en wordt dus gecorrigeerd voor de warmte die door de ramen en de deuren ontsnapt.

Voor een trein bestaande uit x gekoppelde trein met frontaal oppervlak O in m^2 , wordt nu de formule voor het geleverde vermogen voor de verwarming:

$$P_{\text{verwarm}} = (T_{binnen} - T_{buiten}) \cdot 2,0 \cdot ((x + 1) \cdot O + 2 \cdot (\text{hoogte} + \text{breedte}) \cdot \text{lengte}) \quad (7)$$

Het elektriciteitsgebruik aan de bovenleiding wordt nu gevonden door dit vermogen te delen door het rendement van de verwarming.

Met formule (7) kan ook de vermogenselasticiteit van de binnentemperatuur worden berekend:

$$e = \frac{T_{binnen}}{P_{\text{verwarm}}} \cdot \frac{dP_{\text{verwarm}}}{dT_{binnen}}$$

$$e = \frac{T_{binnen}}{(T_{binnen} - T_{buiten}) \cdot \frac{kA}{dx}} \cdot \frac{kA}{dx} \quad (8)$$

$$e = \frac{T_{binnen}}{(T_{binnen} - T_{buiten})}$$

Bijlage 8: Gemiddelde snelheid en aantal stops

stoptrein-diensten	afstand (km)	totale reistijd (min)	aantal stops excl.eindstop	gemiddelde snelheid (km/h)
Den Haag-Roosendaal	81	79	15	65
Haarlem-Alkmaar	35	41	11	55
Leiden-Utrecht	50	43	5	75
Leiden-Gouda	33	35	5	60
Den Haag-Rotterdam	23	28	6	60
Hoek van Holland-Rotterdam	28	31	7	54
Dordrecht-Geldermalsen	49	53	7	61
Lelystad-Enkhuizen	113	105	17	68
Amsterdam-Zandvoort	27	33	4	62
Utrecht-Den Bosch	48	49	5	59
Den Bosch-Eindhoven	32	29	4	69
Kerkrade-Maastricht	33	46	10	47
Tilburg-West	59	59	9	66
Venray-Roermond	23	25	3	55
Nijmegen-Venray	35	38	4	55
Breukelen-Rotterdam	59	56	7	68
Weesp-Utrecht	33	35	8	58
Utrecht-Arnhem	58	45	7	77
Utrecht-Rhemen	42	36	5	70
Schiphol-Hilversum	39	44	8	57
Utrecht-Ede-Wageningen	55	65	8	56
Utrecht-Baarn	23	34	6	43
Rotterdam-Utrecht	56	52	8	71
Den Haag-Utrecht	60	52	7	73
Groningen-Delfzijl	38	40	7	57
Groningen-Nieuweschans	47	49	7	59
Arnhem-Doetinchem	30	33	6	55
Nijmegen-DenBosch	43	39	7	66
Zwolle-Enschede	67	67	9	65
Tiel-Arnhem	44	44	6	60
Doetinchem-Winterswijk	33	33	3	60
Almelo-Marienberg	19	26	4	44
Zutphen-Winterswijk	45	37	4	73
Apeldoorn-Zutphen	18	17	1	64
Zutphen-Oldezaal	56	56	5	65
Zutphen-Nijmegen	48	48	9	61

vervolg tabel

sneltrein-diensten	afstand (km)	totale reistijd (min)	aantal stops excl.eindstop	gemiddelde snelheid (km/h)
Haarlem Hoorn	59	60	9	62
Den Haag-Rotterdam	23	22	2	77
Uitgeest-Utrecht	62	74	14	56
Lelystad-Hoorn	95	90	5	75
Heerlen-Maastricht	24	23	3	63
Eindhoven-Venlo	52	40	6	80
Nijmegen-Roermond	84	67	4	81
Amsterdam-Lelystad	48	38	2	76
Naarden-Bussum-Utrecht	24	23	1	65
Schiphol-amersfoort	55	71	9	58
Den Haag-Nijmegen	137	104	7	88
Arnhem-Roosendaal	129	104	6	77
Zwolle-Arnhem	76	62	5	79
Den Bosch-Roosendaal	67	55	6	74
Nijmegen-Roosendaal	110	97	10	70
intercity-diensten	afstand (km)	totale reistijd (min)	aantal stops excl.eindstop	gemiddelde snelheid (km/h)
Amsterdam-Roosendaal	144	89	4	103
Den Haag-Venlo	183	131	8	86
Den Helder-Nijmegen	197	164	15	78
Utrecht-Maastricht	178	119	5	96
Maastricht-Haarlem	236	173	9	84
Dordrecht-Venlo	140	91	4	100
Utrecht-Arnhem	58	35	2	102
Amsterdam -Enschede	164	122	4	85
Schiphol-Groningen	227	153	3	95
Amsterdam-Leeuwarden	206	140	3	92
Den Haag-Enschede	200	146	6	90
Rotterdam-Enschede	196	146	6	88
Arnhem-Nijmegen	19	12	0	95
HSL-dienst	afstand (km)	totale reistijd (min)	aantal stops excl.eindstop	gemiddelde snelheid (km/h)
Amsterdam-Rotterdam	86	57	2	97

Invoerparameters PRORIN

	totale afstand (km)	totale reistijd (min)	totale stoptijd (min)	totaal aantal stops ^{a)}	gemiddelde trajectnelheid (km/u)	afstand tussen twee stops
stoptrein	1582	1602	79	280	62	6
sneltrein	1045	930	71	104	73	10
stop- en sneltrein	2627	2532	150	384	66	7
intercity's	2148	1521	86	82	90	26
HSL	86	57	4	3	97	29

a) inclusief eindstop

Bijlage 9: Technische gegevens nederlands treinstmaterieel in 1998

trein	vormgeving	aantal	aantal rijtuigen	type motor	assen	massa (ton)	vermogen (kWatt)	breedte (m)	hoogte (m)	lengte (m)	zitplaatsen 1e klas	zitplaatsen 2e klas
Sprinter												
tweewagenstel	treinstel	30	2	weerstandgeschakelde seriemotor	8	191	1320	2,8	4,0	52,2	120	80
driewagenstel	treinstel	60	3	weerstandgeschakelde seriemotor	12	143	1320	2,8	4,0	78,7	40	184
Wadloper												
DH1	treinstel	19	1	diesel-hydraulisch	4	36	212	2,8	4,0	22,3	-	36
DH2	treinstel	31	2	diesel-hydraulisch	8	71	424	2,8	4,0	43,5	-	100
Stoptrein dubbeldekker												
1e/2e klas	rijtuig	103	1		4	44		3,0	4,7	26,4	64	48
2e klas	rijtuig	138	1		4	45		3,0	4,7	26,4	-	128
stuurstand	rijtuig	92	1		4	52		3,0	4,7	26,9	-	108
motorrijtuig	locomotief	50	1	chopper seriemotor	6	80	2340	3,0	4,7	21,4	16	32
Materieel '64												
Plan V (tweewagenstel)	treinstel	242	2	weerstandgeschakelde seriemotor	8	87	552	2,8	4,0	52,1	24	104/118
Plan T (vierwagenstel)	treinstel	30	4	weerstandgeschakelde seriemotor	16	169	1016	2,8	4,0	102,0	42	230
Plan U (driewagenstel)	treinstel	24	3	diesel-hydraulisch	12	136	920	2,8	4,0	74,4	24	168
Railhopper												
SM'90	treinstel	9	2	asynchrone draaistroommotor	8	94	1200	3,2	4,1	52,0	24	113
Buffel												
DM'90	treinstel	53	2	diesel-hydraulisch	8	94	642	3,2	4,1	52,0	12	105
Lint 41 (vanaf 2001)												
	treinstel	11)	2	diesel-mechanisch	8	64	630	2,8	4,3	41,0	-	137
Koploper												
driewagenstel	treinstel	50	3	weerstandgeschakelde seriemotor	12	144	1248	2,8	4,5	80,6	35	148
driewagenstel	treinstel	44	3	chopper seriemotor	12	144	1248	2,8	4,5	80,6	35	148
vierwagenstel	treinstel	50	4	chopper seriemotor	16	192	1872	2,8	4,5	107,1	59	197
Regiorunner												
driewagenstel	treinstel	34	3	asynchrone draaistroommotor	12	163	1608	3,0	4,7	81,0	47	228
vierwagenstel	treinstel	47	4	asynchrone draaistroommotor	16	209	1608	3,0	4,7	108,0	47	228
Intercityrijtuigen												
ICR 1e klas	rijtuig	72	1	n.v.t.	4	41		2,8	4,1	26,4	59	-
ICR 2e klas	rijtuig	126	1	n.v.t.	4	40		2,8	4,1	26,4	-	80
2e klas bagage/keuken	rijtuig	51	1	n.v.t.	4	41		2,8	4,1	26,4	-	49
Locomotieven												
1700/1800	locomotief	102	-	chopper seriemotor	4	84	4540	3,3	3,3	16,2	-	-
1600	locomotief	37	-	chopper seriemotor	4	84	4540	3,3	3,3	16,2	-	-
DE 6400	locomotief	120	-	diesel-elektrisch	4	72	1180	3,3	3,3	14,4	-	-
Benelux rijtuigen												
1e klas	rijtuig	10	1	n.v.t.	4	41		2,8	4,1	41,0	59	-
2e klas	rijtuig	26	1	n.v.t.	4	41		2,8	4,1	41,0	-	80
1e/2e klas	rijtuig	10	1	n.v.t.	4	41		2,8	4,1	41,0	23	48
stuurstand	rijtuig	11	1	n.v.t.	4	42		2,8	4,1	42,0	-	64
2e klas bagage/keuken	rijtuig	10	1	n.v.t.	4	41		2,8	4,1	41,0	-	45
ICE 3	HSL	4	10	asynchrone draaistroommotor	32	420	8800	2,9	4,1	200,0	130	268
Thalys	HSL	2	10	asynchrone draaistroommotor	26	385	8000	2,9	4,1	200,0	120	257

Bijlage 10: Technische en operationele invoer per treintype in 1998

elektrische treinen

	stop- en sneltreinen						intercity's				Thalys			
	Sprinter II	Sprinter III	Plan V	Plan T	Railhopper	Stoptrein DD 1700	Stoptrein DD motor	Koploper III	Koploper 3	Koploper 4		Regiorunner 3	Regiorunner 4	Intercity-rijtuigen
technisch														
type trein	treinstel	treinstel	treinstel	treinstel	treinstel	treinstel	loc + rijtuig	loc + rijtuig	treinstel	treinstel	treinstel	treinstel	loc + rijtuig	HSL
massa trein (ton)	219	286	174	169	189	189	270	221	288	432	488	418	371	385
lengte (m)	104,4	157,4	104,3	102,0	104,0	104,0	122,3	101,1	161,2	241,8	243,0	216,0	200,8	200,0
breedte (m)	2,8	2,8	2,8	2,8	3,2	3,2	3,0	3,0	2,8	2,8	3,0	3,0	2,8	2,9
hoogte (m)	4,0	4,0	4,0	4,0	4,1	4,1	4,7	4,7	4,5	4,5	4,7	4,7	4,1	4,1
vermogen (kW)	2640	2640	1104	1016	2400	2400	4540	2340	2496	3744	4824	3216	4540	8800
toeslagfactor	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,12	0,12	0,2	0,2	0,2	0,2	0,12	0,2
chopper-installatie	nee	nee	nee	nee	ja	ja	ja	ja	nee	ja	ja	ja	ja	ja
aantal assen	16	24	16	16	16	16	20	18	24	24	24	32	28	26
operationeel														
beginversnelling (m/s ²)	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
remvertraging (m/s ²)	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
maximale snelheid (km/h)	125	125	130	130	130	130	130	130	140	140	140	140	140	140
uitrij-snelheid (km/u)	115	115	115	115	115	115	115	115	125	125	125	125	125	125
aantal rijtuigen per trein	4	6	4	4	4	4	4	4	6	9	9	8	7	10
totaal aantal treinen	15	36	121	30	5	5	42	50	22	16	14	25	45	3
afstand tussen stops (km)	7	7	7	7	7	7	7	7	26	26	26	26	26	29
aantal zitplaatsen	400	448	284	272	274	274	476	396	366	549	825	744	473	377
bezetting (%)	33	33	33	33	33	33	33	33	44	44	44	44	44	65

dieseltreinen¹

	materieel:			
	DH1	DH2	Plan U	Buffel
technisch				
type trein	treinstel	treinstel	treinstel	treinstel
massa trein (ton)	144	142	272	188
lengte (m)	89,2	86,9	148,8	104,0
breedte (m)	2,8	2,8	2,8	3,2
hoogte (m)	4,0	4,0	4,0	4,1
vermogen (kW)	848	848	1840	1284
toeslagfactor	0,20	0,20	0,20	0,20
aantal assen	16	16	24	16
operationeel				
beginversnelling (m/s ²)	0,60	0,60	0,60	0,60
remvertraging (m/s ²)	0,66	0,66	0,66	0,66
maximale snelheid (km/h)	100	100	130	130
uitrij-snelheid (km/u)	100	100	115	115
aantal rijtuigen per trein	4	4	6	4
totaal aantal treinen	5	16	14	27
afstand tussen stops (km)	7	7	7	7
aantal zitplaatsen	144	200	384	234
bezetting (%)	33	33	33	33

¹ Aangenomen is een zwavelpercentage van 0,045%. Dit geeft 20 mggram/MJ SO₂-emissies. Deze waarde wordt ook in (Dings, 1995) aangenomen.

Bijlage 11: Energiegebruik reizigersvervoer per materieeltype in 1998

elektrisch	wiel			onder station			centrale			well			zitpl- reiziger-			trein-			
	TJ	MJ/km	kj/zit plkm	kj/reiz km	136	48	119	362	323	113	284	860	337	119	296	898	1,1	0,4	2,8
materieel:																			
stoptreinen																			
Sprinter II	90	32	79	240	136	48	119	362	323	113	284	860	337	119	296	898	1,1	0,4	2,8
Sprinter III	278	41	91	275	394	58	129	391	938	137	307	930	980	144	321	971	3,1	1,0	6,8
Plan V	629	27	97	293	827	36	127	385	1966	86	302	915	2055	90	315	956	6,5	2,1	22,9
Plan T	152	27	99	299	199	35	129	391	474	83	306	929	495	87	320	970	1,5	0,5	5,7
Railhopper	28	29	107	323	35	37	136	411	84	88	322	976	87	92	337	1020	0,3	0,1	0,9
Stoptrein DD 1700	303	38	80	243	386	48	102	308	917	115	242	733	958	120	253	766	3,8	1,3	8,0
Stoptrein DD motor	308	32	82	249	391	41	104	316	931	98	248	752	972	103	259	785	3,8	1,2	9,5
totaal			89	270											293	889			
intercity's																			
Koploper III	157	28	75	171	244	43	117	266	580	102	279	633	606	107	291	662	2,1	0,9	5,7
Koploper 3	156	38	69	156	198	48	87	198	471	114	207	471	492	119	217	492	2,3	1,0	4,1
Koploper 4	240	34	67	153	304	44	85	204	723	104	202	460	756	108	212	481	3,6	1,6	7,0
Regiorunner 3	144	40	48	110	182	50	61	139	434	120	145	330	453	125	152	345	3,0	1,3	3,6
Regiorunner 4	230	36	48	109	292	45	61	138	694	107	144	328	726	112	151	343	4,8	2,1	6,5
Intercity-rijtuigen	406	35	74	168	516	44	94	213	1226	105	223	506	1281	110	233	529	5,5	2,4	11,6
totaal			63	143											203	462			
HSL																			
Thalys	25	29	78	120	31	37	99	152	74	89	235	361	77	93	245	378	0,3	0,2	0,8
totaal elektrisch	3146	33	76	195	4136	43	99	256	9832	102	236	609	10275	107	247	636	41,6	16,2	96,0
diesel																			
materieel:																			
stoptreinen																			
DH1	21	18	127	384					68	60	417	1265	76	68	469	1421	0,2	0,1	1,1
DH2	65	18	91	274					215	60	298	903	242	67	335	1014	0,7	0,2	3,6
Plan U	120	38	99	299					394	125	325	984	443	140	365	1105	1,2	0,4	3,2
Buffel	170	28	119	361					559	92	392	1188	628	103	440	1335	1,4	0,5	6,1
totaal diesel	376	27	107	323					1236	88	351	1063	1389	99	394	1194	3,5	1,2	14,0
totaal stoptreinen			92	278											308	935			
TOTAAL	3521	32	78	203					11069	101	245	639	11664	106	259	673	45,1	17,3	110,0

Bijlage 12: Directe emissies reizigersvervoer per materieeltype in 1998

elektrisch materieel:	CO ₂ kton	SO ₂ ton	NO _x ton	CO ₂ kg/treinkm	SO ₂ g/treinkm	NO _x g/treinkm	CO ₂ g/zitplkm	SO ₂ mg/zitplkm	NO _x mg/zitplkm	CO ₂ g/reizkm	SO ₂ mg/reizkm	NO _x mg/reizkm
<u>stoptreinen</u>												
Sprinter II	21	7	26	7,3	2,5	9,2	18	6	23	55	19	70
Sprinter III	60	21	76	8,8	3,1	11,2	20	7	25	60	21	76
Plan V	126	44	160	5,5	1,9	7,0	19	7	25	59	20	74
Plan T	30	11	39	5,4	1,9	6,8	20	7	25	60	21	76
Railhopper	5	2	7	5,7	2,0	7,2	21	7	26	63	22	79
Stoptrein DD 1700	59	20	75	7,4	2,6	9,4	16	5	20	47	16	60
Stoptrein DD motor	60	21	76	6,3	2,2	8,0	16	6	20	48	17	61
totaal							18	6	23	55	19	69
<u>intercity's</u>												
Koploper III	37	13	47	6,6	2,3	8,3	18	6	23	41	14	52
Koploper 3	30	10	38	7,3	2,5	9,3	13	5	17	30	10	38
Koploper 4	46	16	59	6,7	2,3	8,4	13	5	16	30	10	37
Regiorunner 3	28	10	35	7,7	2,7	9,8	9	3	12	21	7	27
Regiorunner 4	45	15	57	6,9	2,4	8,7	9	3	12	21	7	27
Intercity-rijtuigen	79	27	100	6,8	2,3	8,6	14	5	18	33	11	41
totaal							13	4	16	28	10	36
<u>HSL</u>												
Thalys	5	2	6	5,7	2,0	7,2	15	5	19	23	8	29
totaal elektrisch	632	219	800	6,6	2,3	8,3	15	5	19	39	14	50
diesel												
<u>materieel:</u>	CO ₂ kton	SO ₂ ton	NO _x ton	CO ₂ kg/treinkm	SO ₂ g/treinkm	NO _x g/treinkm	CO ₂ g/zitplkm	SO ₂ mg/zitplkm	NO _x mg/zitplkm	CO ₂ g/reizkm	SO ₂ mg/reizkm	NO _x mg/reizkm
<u>stoptreinen</u>												
DH1	5	5	119	4	5	106	30	33	733	92	101	2222
DH2	16	17	380	4	5	105	22	24	526	66	72	1593
Plan U	29	31	659	9	10	208	24	26	543	72	78	1644
Buffel	41	45	652	7	7	107	29	31	457	87	95	1385
totaal	90	98	1810	6	7	129	26	28	513	78	85	1555
totaal stoptreinen							19	9	96	58	29	292
TOTAAL	722	317	2610	7	3	24	16	7	58	42	18	151

Bijlage 13: Directe + indirecte emissies reizigersvervoer per materieeltype in 1998

elektrisch materieel:	CO ₂ kton	SO ₂ ton	NO _x ton	CO ₂ kg/treinkm	SO ₂ g/treinkm	NO _x g/treinkm	CO ₂ g/zitplkm	SO ₂ mg/zitplkm	NO _x mg/zitplkm	CO ₂ g/reizkm	SO ₂ mg/reizkm	NO _x mg/reizkm
<u>stoptreinen</u>												
Sprinter II	22	9	29	8	3	10	19	8	26	58	23	78
Sprinter III	63	25	85	9	4	13	21	8	28	63	25	85
Plan V	133	53	179	6	2	8	20	8	28	62	25	83
Plan T	32	13	43	6	2	8	21	8	28	63	25	85
Railhopper	6	2	8	6	2	8	22	9	29	66	26	89
Stoptrein DD 1700	62	25	84	8	3	11	16	7	22	50	20	67
Stoptrein DD motor	63	25	85	7	3	9	17	7	23	51	20	69
totaal							19	8	26	58	23	78
<u>intercity's</u>												
Koploper III	39	16	53	7	3	9	19	8	25	43	17	58
Koploper 3	32	13	43	8	3	10	14	6	19	32	13	43
Koploper 4	49	20	66	7	3	9	14	5	18	31	12	42
Regionrunner 3	29	12	40	8	3	11	10	4	13	22	9	30
Regionrunner 4	47	19	63	7	3	10	10	4	13	22	9	30
Intercity-rijtuigen	83	33	112	7	3	10	15	6	20	34	14	46
totaal							13	5	18	30	12	40
<u>HSL</u>												
Thalys	5	2	7	6	2	8	16	6	21	24	10	33
totaal elektrisch	665	266	896	7	3	9	16	6	22	41	16	55
diesel												
<u>materieel:</u>	CO ₂ kton	SO ₂ ton	NO _x ton	CO ₂ kg/treinkm	SO ₂ g/treinkm	NO _x g/treinkm	CO ₂ g/zitplkm	SO ₂ mg/zitplkm	NO _x mg/zitplkm	CO ₂ g/reizkm	SO ₂ mg/reizkm	NO _x mg/reizkm
<u>stoptreinen</u>												
DH1	5	11	121	5	9	107	32	65	742	98	197	2248
DH2	17	33	384	5	9	106	23	46	532	70	140	1611
Plan U	30	61	667	10	19	211	25	51	549	76	153	1664
Bufjel	43	87	663	7	14	109	30	61	465	92	185	1409
totaal	96	192	1834	7	14	131	27	55	520	82	165	1577
totaal stoptreinen							20	15	100	61	44	302
TOTAAL	760	458	2731	7	4	25	17	10	61	44	26	158

