

Energie-intensiteit van personen- en goederenvervoer

Maarten Messagie, Tom van Lier, Surendraprabu Rangajaru, Joeri Van Mierlo

Onderzoeksgroep MOBI, Vrije Universiteit Brussel

**Rapport uitgevoerd in opdracht van MIRA,
Milieurapport Vlaanderen**

December 2014

Vlaamse overheid



Documentbeschrijving

Titel

Energie-intensiteit van personen- en goederenvervoer

Dit rapport verschijnt in de reeks MIRA Ondersteunend Onderzoek Indicatoren van de Vlaamse Milieumaatschappij. Deze reeks is gericht op de wetenschappelijke onderbouwing van het Milieurapport Vlaanderen. Dit rapport is ook beschikbaar via www.milieurapport.be.

Samenstellers

Maarten Messagie, Tom van Lier, Surendraprabu Rangajaru, Joeri Van Mierlo
Onderzoeksgroep MOBI, Vrije Universiteit Brussel

Wijze van refereren

Messagie M. et al. (2014) Energie-intensiteit van personen- en goederenvervoer, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, Vrije Universiteit Brussel.

Vragen in verband met dit rapport

Vlaamse Milieumaatschappij
Milieurapportering (MIRA)
Van Benedenlaan 34
2800 Mechelen
tel. 015 45 14 61
mira@vmm.be

Inhoudstafel

1 Inleiding	5
2 Personenvervoer	5
2.1 Energie-efficiëntie van verschillende modi van personenvervoer	5
2.2 Energie-efficiëntie van verschillende brandstoffen en aandrijvingen van personenvoertuigen	7
3 Energie-efficiëntie van verschillende modi van goederenvervoer	9
3.1 Inleiding	9
3.2 Wegvervoer	10
3.3 Spoorvervoer	12
3.4 Binnenvaart.....	13
3.5 Maritiem vervoer	14
3.6 Luchtvracht	15
3.7 Ondergronds goederentransport	16
3.8 Laden en lossen	18
3.9 Indicatieve vergelijking.....	18
3.10 Vergelijking unimodaal-intermodaal	19
Referenties	20
Lijst met afkortingen	20

Lijst figuren

Figuur 1: Energie-intensiteit van verschillende transportmodi voor stedelijk personenvervoer en personenvervoer over lange afstand.....	6
Figuur 2: Energie-intensiteit van verschillende brandstoffen en aandrijvingen van personenvoertuigen	8
Figuur 3: Invloed van marktvariabiliteit op de energie-intensiteit van personenwagens.....	9
Figuur 4: Energie-intensiteit (WTW) voor zwaar wegvervoer (2009)	11
Figuur 5: Energie-intensiteit (WTW) voor licht wegvervoer (2009)	11
Figuur 6: Energie-intensiteit (WTW) voor spoorvervoer (2009)	13
Figuur 7: Energie-intensiteit (WTW) voor binnenvaart (2009).....	14
Figuur 8: Energie-intensiteit (WTW) voor maritiem containervervoer (2009).....	15
Figuur 9: Energie-intensiteit (WTW) voor maritiem vervoer van bulk en algemene cargo (2009)	15
Figuur 10: Energie-intensiteit (WTW) van luchtvracht via vrachtvliegtuigen in functie van afstand (2006)	16
Figuur 11: Energie-intensiteit (TTW) van pijpleidingen en ondergronds goederentransport (2002)	17
Figuur 12: Energie-intensiteit (WTW) van een selectie van verschillende transportmodi (2006, 2009) 18	

Lijst tabellen

Tabel 1: Brandstofverbruik en bezettingsgraad van de verschillende voertuigen.....	6
Tabel 2: Brandstofverbruik van de verschillende voertuigtechnologieën	8
Tabel 3: Energiegebruik voor goederenvervoer (100 ton) over een aantal typetrajecten met verschillende transportmodi	19

1 Inleiding

In dit document wordt de energie-intensiteit geanalyseerd van het personen- en goederenvervoer. De energie-efficiëntie van verschillende modi van personenvervoer wordt berekend, rekening houdend met de capaciteit (de bezettingsgraad) van de verschillende modi. De energie-efficiëntie van verschillende brandstoffen (diesel, benzine, LPG, CNG, biobrandstof en waterstof) en aandrijvingen (hybride, plug-in hybride en batterij elektrische voertuigen) van personenvervoertuigen wordt tevens weergegeven. Tot slot wordt de energie-intensiteit van verschillende modi van goederenvervoer berekend voor vrachtvervoer op de weg, per spoor, en via water (binnenwateren en maritiem) en lucht. Ook vervoer per pijpleiding wordt meegenomen in de analyse.

2 Personenvervoer

2.1 Energie-efficiëntie van verschillende modi van personenvervoer

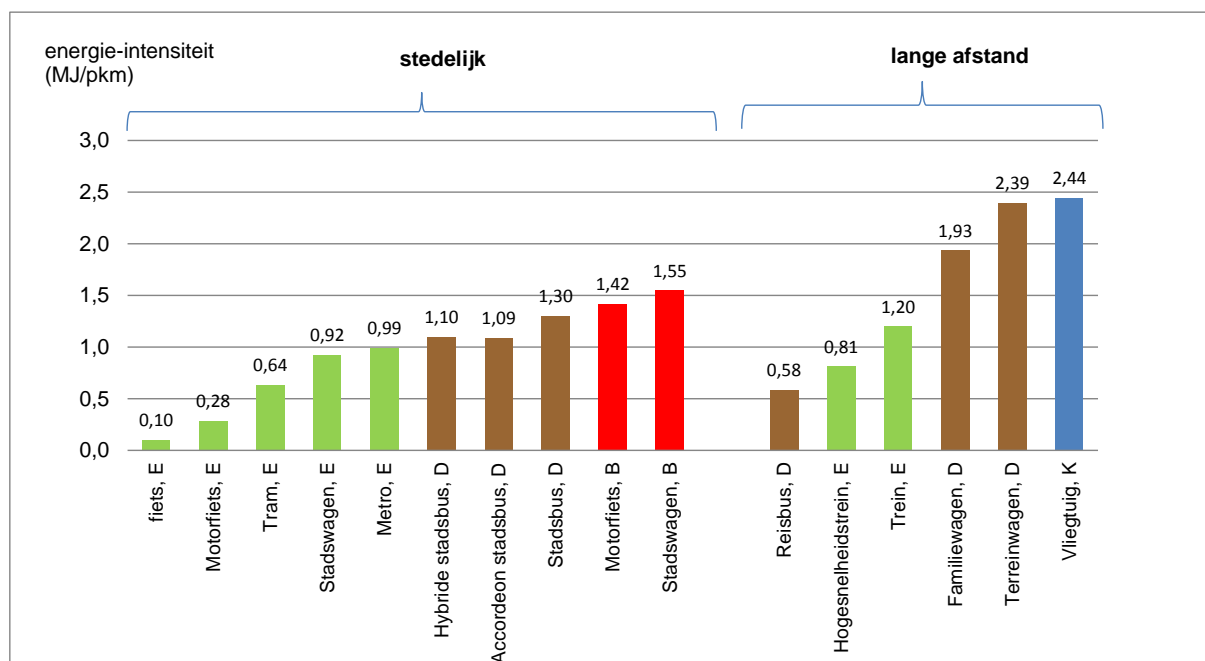
Hoe verhouden voertuigen met alternatieve brandstoffen en aandrijvingen zich ten opzichte van voertuigen met conventionele brandstoffen? Om de energie-efficiëntie van transportsystemen te vergelijken moet men gebruik maken van een 'Well-to-Wheel'-benadering (WTW). In een 'Well-to-Wheel'-benadering wordt zowel het energiegebruik bij de brandstofproductie of 'Well-to-Tank' (WTT) als bij het voertuiggebruik 'Tank-to-Wheel' (TTW) in rekening gebracht.

Figuur 1 geeft de energie-efficiëntie van verschillende transportmodi weer met een onderscheid tussen stedelijk vervoer en vervoer over lange afstand. De energie-efficiëntie van verschillende modi van personenvervoer wordt berekend, rekening houdend met de capaciteit (de bezettingsgraad) van de verschillende modi. Volgende modi worden weergegeven: fiets, motorfiets, auto, tram, bus (zowel stadsbus als reisbus), trein, metro en vliegtuig. De focus ligt op het personenvervoer in België. Om de vergelijking van de verschillende modi op een eenduidige wijze te implementeren wordt gekozen om de energie-efficiëntie te vergelijken per personenkilometer. De bezettingsgraden van de verschillende modi zijn weergegeven in Tabel 1.

Voor het stedelijk vervoer wordt zowel een stadswagen op elektriciteit als op benzine bekeken. De familiewagen en de terreinwagen bij het vervoer over lange afstand zijn dieselveertuigen. Het energiegebruik tijdens de productie van benzine en diesel is afkomstig uit (Dones et al, 2007), het energiegebruik voor de productie van elektriciteit in België in 2011 is afkomstig uit (Messagie et al., 2014a). De gebruikte data en de bronnen zijn samengevat in Tabel 1.

Voertuigen met een grotere capaciteit zijn vaak energiezuiniger in vergelijking met individueel transport maar toch zijn de elektrische fiets en elektrische motorfiets de meest energiezuinige transportmiddelen voor stedelijk vervoer, gevolgd door de tram. Voorts blijkt uit Figuur 1 dat ook de andere elektrisch aangedreven transportmodi, de elektrische stadswagen en de metro, behoorlijk goed scoren qua energie-efficiëntie per vervoerde personenkilometer. Ook bij de elektrische modi worden zowel het energiegebruik door het voertuig zelf als bij de productie van elektriciteit in rekening gebracht. Het energiegebruik van de stadsbussen op diesel is hoger dan van de metro, de hybride en accordeon stadsbussen scoren daarbij beter dan de gewone stadsbussen. De benzine motorfiets is zuiniger dan de benzine stadswagen. De stadswagen behoort duidelijk tot de minder zuinige vervoermiddelen, maar de energie-efficiëntie is sterk afhankelijk van de gebruikte technologie en brandstof. Dieselwagens zijn zuiniger in vergelijking met benzinewagens. Voor vervoer over lange afstand scoort naast de reisbus ook de hogesnelheidstrein (HST) gevolgd door de elektrische trein goed op het vlak van energie-efficiëntie. De familiewagen verbruikt meer dan dubbel zoveel energie per pkm als de HST, het vliegtuig en de terreinwagen drie keer zoveel als de HST.

Figuur 1: Energie-intensiteit van verschillende transportmodi voor stedelijk personenvervoer en personenvervoer over lange afstand



E: elektrisch, D: diesel, B: benzine, K: kerosine

Bron: eigen berekeningen VUB-MOBI (2014)

Tabel 1: Brandstofverbruik en bezettingsgraad van de verschillende voertuigen

voertuig	energiegebruik	bezettingsgraad (pers./voertuig)
stadswagen, B	5 l/100 km (gemiddeld brandstofverbruik benzine stadswagen: www.ecoscore.be)	1,39 (Federale Overheidsdienst Mobiliteit en Vervoer, 2013)
motorfiets, B	3,3 l/100 km (Spielmann M., 2007)	1,02 (VMM, 2010)
stadsbus, D	40 l/100 km (De Lijn, 2014)	14 (De Lijn, 2014)
reisbus, D	30,35 l/100 km (Spielmann M., 2007)	23,7 (VMM, 2010)
tram, E	4 kWh/km (De Lijn, 2014)	60 (De Lijn, 2014)
metro, E	15,2 kWh/km (persoonlijke communicatie met MIVB)	149 (persoonlijke communicatie met MIVB)
trein, E	0,125 kWh/pkm (Spielmann M., 2007)	-
hogesnelheidstrein, E	25,05 kWh/km (Spielmann M., 2007)	309 (Spielmann M., 2007)
vliegtuig, K	0,0453 kg/pkm (Spielmann M., 2007)	65 (Spielmann M., 2007)
familiewagen, D	5,9 l/100 km (gemiddeld brandstofverbruik diesel familiewagen: www.ecoscore.be)	1,39 (Federale Overheidsdienst Mobiliteit en Vervoer, 2013)
terreinwagen, D	7,3 l/100 km (gemiddeld brandstofverbruik diesel terreinwagen: www.ecoscore.be)	1,39 (Federale Overheidsdienst Mobiliteit en Vervoer, 2013)
stadswagen, E	13,4 kWh/km (gemiddeld brandstofverbruik elektrische stadswagen: www.ecoscore.be)	1,39 (Federale Overheidsdienst Mobiliteit en Vervoer, 2013)
hybride stadsbus, D	33,66 l/100 km (De Lijn, 2014)	14 (De Lijn, 2014)
accordeon stadsbus, D	50 l/100 km (De Lijn, 2014)	21 (De Lijn, 2014)
motorfiets, E	3 kWh/100 km (Spielmann M., 2007)	1,02 (VMM, 2010)
fiets, E	1,04 kWh/100 km (Timmermans J., 2009)	1 (eigen assumptie)

2.2 Energie-efficiëntie van verschillende brandstoffen en aandrijvingen van personenvoertuigen

De energie-efficiëntie van personenvoertuigen is sterk afhankelijk van de aandrijftechnologie en de gebruikte brandstof. De energie-efficiëntie van verschillende brandstoffen (diesel, benzine, LPG, CNG, biobrandstof en waterstof) en aandrijvingen (hybride, plug-in hybride en batterij elektrische voertuigen) van personenvoertuigen wordt weergegeven in .

Figuur 2 op een 'Well-to-Wheel'-basis. Vergelijkbare voertuigen worden opgenomen voor de verschillende brandstoffen en aandrijvingen. De voertuigen zijn vergelijkbaar in grootte, hebben een vergelijkbare motorisatie en zijn representatief voor de specifieke brandstofgroep, het TTW-energiegebruik van de wagens is gebaseerd op (Edwards et al., 2014). Het energieverbruik voor de productie van de verschillende brandstoffen is afkomstig uit (Dones R., 2007), het energiegebruik tijdens de productie van elektriciteit werd afzonderlijk in detail berekend in (Messagie M., 2014a).

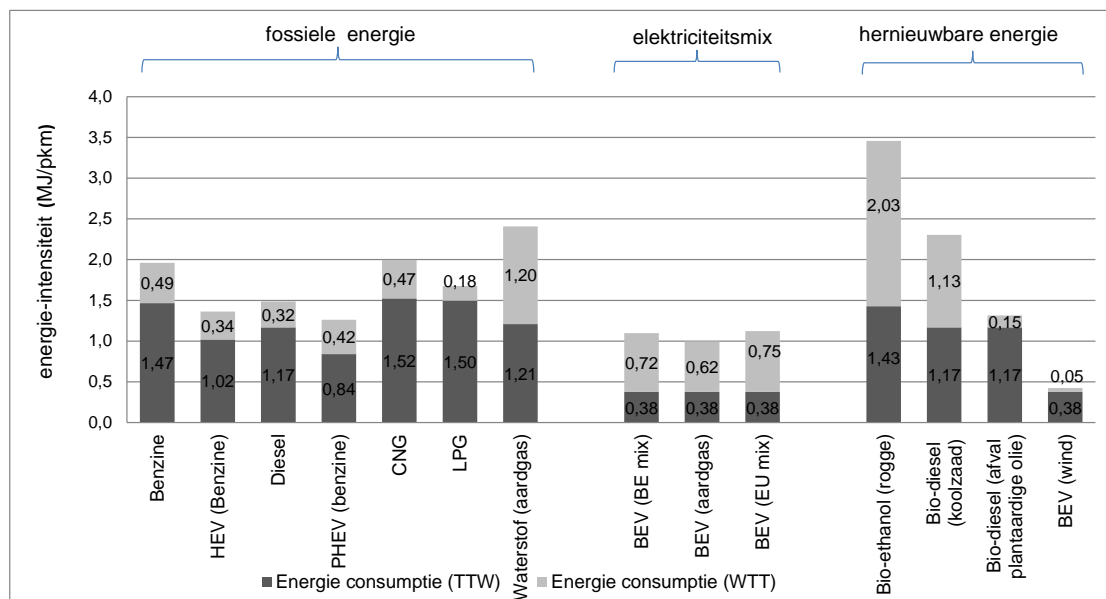
Uit de figuur blijkt het voordeel van de hybride voertuigen ten opzichte van conventionele voertuigen. Dankzij de aanwezigheid van een elektromotor kan de verbrandingsmotor in zijn meest efficiënte werkingpunt gebruikt worden. Het plug-in hybride voertuig is daarbij efficiënter dan het hybride voertuig. Het dieselveertuig is iets minder efficiënt dan het hybride voertuig, daarna volgt het LPG-voertuig. De voertuigen op benzine en op aardgas (CNG) hebben een vergelijkbaar energiegebruik. De waterstofwagen verbruikt het meest fossiele energie, de aanname is dat waterstof vervaardigd wordt uit aardgas en dat de wagen over een verbrandingsmotor beschikt.

De batterij elektrische voertuigen (BEV) hebben het laagste energiegebruik. Dat verbruik hangt bovendien sterk af van de manier waarop de elektriciteit wordt opgewekt (Belgische mix, aardgascentrale, windturbine, Europese mix). De hoogste energie-efficiëntie wordt bekomen door een BEV die rijdt op elektriciteit opgewekt via windenergie.

De eerste generatie biobrandstoffen uit voedselgewassen, bio-ethanol (rogge) en biodiesel (koolzaad) vergen meer energie tijdens het productieproces in vergelijking met conventionele benzine en diesel. Echter, hier dient opgemerkt te worden dat de gewassen hernieuwbare energiebronnen zijn die niet leiden tot uitputting van fossiele energiebronnen.

De wagen op biodiesel vervaardigd uit afval van plantaardige olie (tweede generatie biodiesel) scoort op energetisch vlak beter dan een conventionele dieselveagen. Tweede generatie biobrandstoffen komen uit afvalstromen. Er wordt geen energie toegekend aan het vervaardigen van die afvalstoffen, de energie nodig tijdens de initiële productie wordt toegekend aan het initieel product. Het indirect energiegebruik bestaat dus uit de energie nodig voor het transport en de opwaardering van de plantaardige olie. Het directe energiegebruik is hetzelfde als voor de conventionele diesel.

Figuur 2: Energie-intensiteit van verschillende brandstoffen en aandrijvingen van personenvoertuigen



HEV: hybride elektrisch voertuig, PHEV: plug-in hybride elektrisch voertuig, CNG: compressed natural gas, LPG: liquidified petroleum gas, BEV: batterij elektrisch voertuig

Bron: eigen berekening VUB-MOBI (2014) gebaseerd op Edwards et al. (2014)

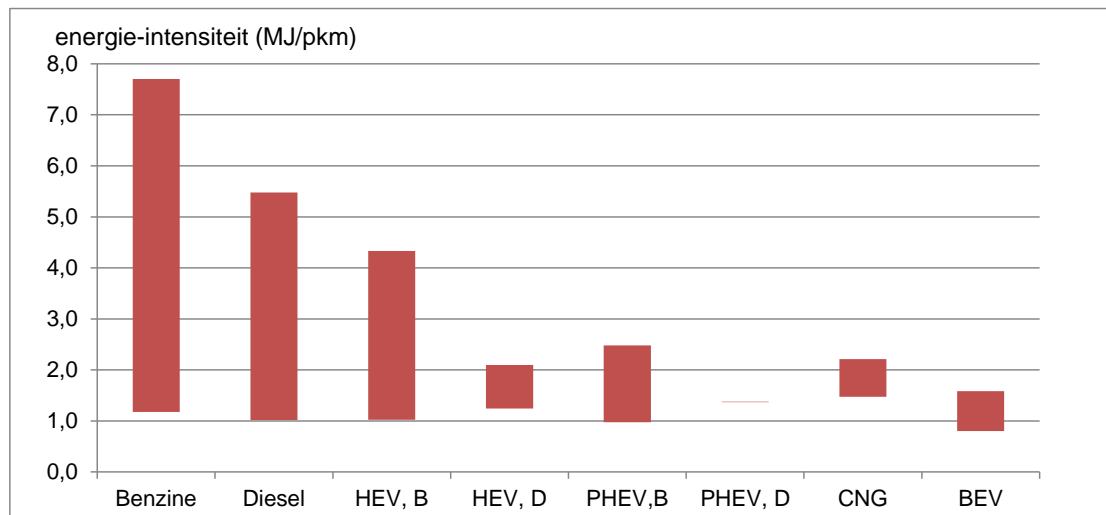
Tabel 2: Brandstofverbruik van de verschillende voertuigtechnologieën

	brandstofverbruik (TTW)
benzine	6,3 l/100km
HEV (benzine)	4,4 l/100km
PHEV (benzine)	3,2 l/100km 4,1 kWh/100km
diesel	4,5 l/100km
CNG	4,7 kg/100km
LPG	4,5 kg/100km
waterstof (aardgas)	0,6 kg/100km
BEV (BE mix)	14,5 kWh/100km
BEV (aardgas)	14,5 kWh/100km
BEV (EU mix)	14,5 kWh/100km
bio-ethanol (rogge)	8,7 l/100km
biodiesel (koolzaad)	4,9 l/100km
biodiesel (afval plantaardige olie)	4,9 l/100km
BEV (wind)	14,5 kWh/100km

Bron: Edwards et al. (2014)

Figuur 3 toont de invloed van de marktvariabiliteit op de energie-efficiëntie (direct en indirect) van alle wagens die momenteel op de Belgische markt verkrijgbaar zijn. De grote spreiding is te verklaren door de grote verschillen tussen de wagenklassen. De figuur houdt rekening met kleine stadswagens, maar ook met grote familiewagens en sportwagens. Figuur 3 geeft de spreiding met een minimum- en maximumwaarde voor de energie-efficiëntie per voertuigtechnologie van wagens die courant op de markt aanwezig zijn, gebaseerd op de achtergronddata voor energiegebruik van (Messagie et al., 2014b) en de voertuigendatabank gebruikt voor de berekening van de ecoscore (Ecoscore, 2014).

Figuur 3: Invloed van marktvariabiliteit op de energie-intensiteit van personenwagens



HEV: hybride-elektrisch voertuig, PHEV: plugin hybride-elektrisch voertuig, CNG: compressed natural gas, BEV: batterij elektrisch voertuig, B: benzine, D: diesel

Bron: eigen berekeningen VUB-MOBI (2014) op basis van Ecoscore (2014)

3 Energie-efficiëntie van verschillende modi van goederenvervoer

3.1 Inleiding

Indicatoren voor het meten van de energie-efficiëntie van goederenvervoer kunnen op drie niveaus bekeken worden: sectoraal, per transportmodus en per voertuigtype. In een recent rapport van het International Energy Agency (IEA, 2014) wordt het gebrek aan beschikbare data voor energieconsumptie en gerelateerde activiteitsdata voor goederentransport duidelijk. Op basis van geaggregeerde data wordt door IEA een vergelijking van het energiegebruik per tonkilometer per transportmodus opgesteld, evenwel zonder duidelijke opgave van assumpties en onderliggende databronnen. Uit deze studie blijkt dat gemiddeld het energiegebruik van vrachtwagens hoger ligt dan dat van spoor- en watervervoer, waarbij evenwel dient opgemerkt te worden dat vanuit een systeemperspectief spoor- en waterverbindingen enkel deze hoge efficiëntie kunnen halen op het gedeelte tussen de knooppunten en er aan begin- en eindpunt doorgaans wegverbindingen nodig zijn.

Een dergelijke vergelijking tussen gemiddelde waarden per transportmodus toont aan dat door de hogere energie-intensiteit van wegvervoer een toename van vrachtvervoer over de weg een grotere impact zal hebben op energieconsumptie dan een toename van vrachtvervoer over spoor of water. Daarnaast zal een verbetering in energie-efficiëntie in wegvervoer resulteren in hogere energiebesparingen dan verbeterde energie-efficiëntie in spoor- en watervervoer. Ook een modal shift van weg naar spoor of water is veel energie-efficiënter dan een modal shift tussen water en spoor onderling.

Een dergelijke algemene vergelijking tussen transportmodi zonder duidelijke opgave van onderliggende assumpties en activiteitsdata kan evenwel belangrijke verschillen in energiegebruik tussen voertuigtypes binnen een bepaalde categorie van transportmodus verbergen en dient daarom voorzichtig geïnterpreteerd te worden. Om de verschillende transportmodi correcter in detail met elkaar te kunnen vergelijken is het daarom aangewezen om het energiegebruik per tonkilometer weer te geven opgedeeld naar voertuigtype. Logistieke data zoals beladingsgraad en leegrijden zijn daarbij belangrijke elementen om dit te berekenen.

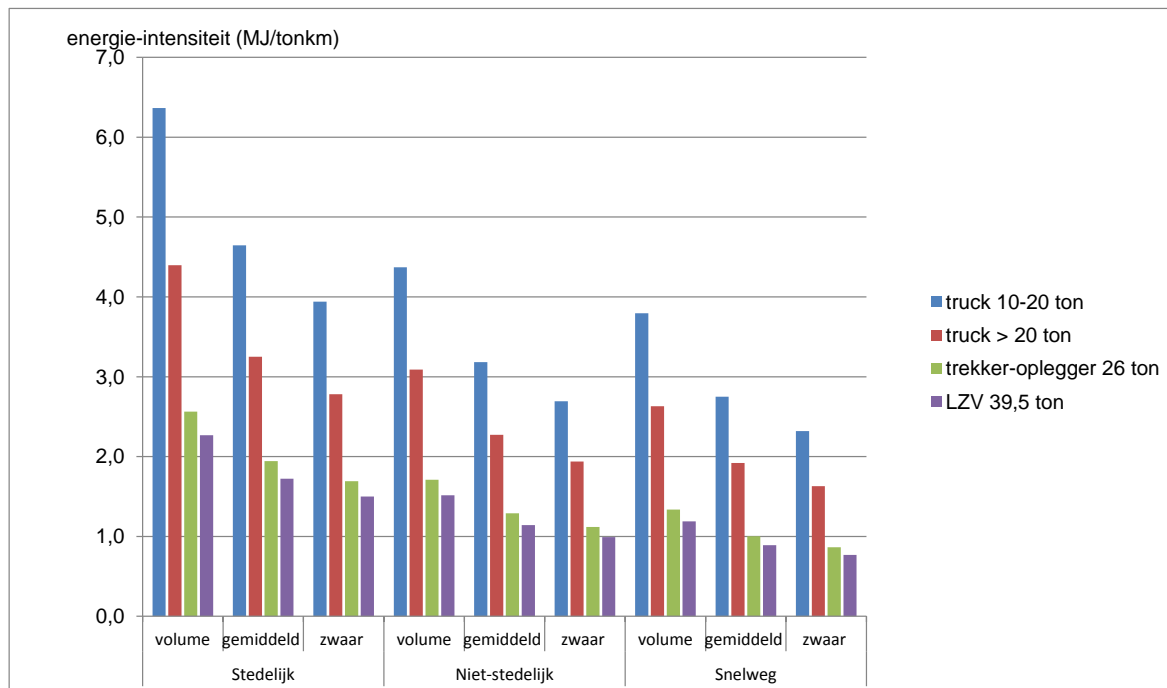
Eenzijds wordt het energiegebruik van de goederenvervoersmodi bepaald door het TTW-energiegebruik rechtstreeks gelinkt aan voertuiggebruik tijdens de geleverde vervoersprestatie. Maar er wordt ook energie gebruikt bij andere processen, zoals bij de productie van brandstof (WTT) en de constructie en het onderhoud van infrastructuur en voertuigen (de zogenaamde up- en downstreamprocessen). De verhouding tussen het rechtstreekse en het onrechtstreekse energiegebruik varieert sterk tussen verschillende transportmodi. Indicatief geven Spielmann & Scholz (2005) aan dat voor goederenvervoer over de weg het totale energiegebruik gemiddeld voor 75 % uit

TTW-energiegebruik en voor 11 % uit brandstofproductiegerelateerde WTT-energiegebruik bestaat. De overige 14 % wordt verdeeld tussen energiegebruik gerelateerd aan de voertuigvloot (vervaardigen, onderhoud en sloop) en energiegebruik gerelateerd aan de infrastructuur (vervaardigen, onderhoud en sloop) voor respectievelijk 6 % en 8 %. Voor spoorvervoer geven Spielmann & Scholz voor Europa volgende gemiddelde energiegebruiksverhoudingen: TTW-energiegebruik 19 %, WTT-energiegebruik 50 %, voertuigvloot 12 % en infrastructuur 19 %. Voor binnenvaart geven van Lier & Macharis (2014) voor een M4-schip op een CEMT VI-kanaal volgende energiegebruikverhoudingen: TTW-energiegebruik 67 %, WTT-energiegebruik 20 %, voertuigvloot 2 %, infrastructuur 11 %. Deze indicatieve waarden dienen evenwel met enige voorzichtigheid gehanteerd te worden daar ze afhankelijk zijn van specifieke assumpties met betrekking tot de up- en downstreamprocessen. In de hierna volgende WTW-berekeningen hanteren we in het kader van dieselverbruik de door Edwards et al. (2014) berekende energieverhouding tussen WTW en TTW van 1,27. Met andere woorden, voor dieselaangedreven goederentransport ligt de WTW energie-intensiteit 27 % hoger dan de TTW energie-intensiteit. Voor elektriciteit is deze verhouding voor de gemiddelde electriciteitsmix in België (BE mix) 2,67 (Messagie et al., 2014a).

3.2 Wegvervoer

Voor wegvervoer wordt de energie-efficiëntie bepaald door de laadcapaciteit, de beladingsgraad, het aandeel leegrijden, het type goederen (volumegoederen (<0,4 kg/liter), gemiddelde goederen (0,5-1,2 kg/liter) of zware goederen (>1,3 kg/liter)) en het netwerk waarop gereden wordt (stedelijk, niet-stedelijk of snelweg). Figuur 4 geeft de energie-intensiteit van wegvervoer (WTW) voor vier verschillende vrachtwagentypes (waaronder LZV's of langere en zwaardere Voertuigen) voor de drie netwerktypes, opgedeeld naar type cargo (volume, gemiddeld en zwaar) voor 2009. De laadcapaciteit van de verschillende vrachtwagentypes is respectievelijk 8 ton voor een truck 10-20 ton, 16 ton voor een truck >20 ton, 26 ton voor een trekker-oplegger en 39,5 ton voor een LZV. Voor volumegoederen wordt een gemiddelde beladingsgraad van 32 % verondersteld, voor gemiddelde goederen 45 % en voor zware goederen 54 % (den Boer et al., 2011), dit rekening houdende met leegrijden. Voor containertransport wordt de benuttingsgraad van de TEU-capaciteit en het aandeel van beladen containers gelijk verondersteld voor de verschillende marktsegmenten (volume, gemiddeld en zwaar) omdat lichte en zware containers doorgaans gelijktijdig verscheept worden. Voor wegvervoer wordt uitgegaan van een 85 % ladingsfactor bij beladen ritten en een 75 % aandeel beladen ritten (den Boer et al., 2011). Uit Figuur 4 blijkt dat vervoer van zware cargo doorgaans energie-efficiënter is dan vervoer van volumegoederen, uitgedrukt in MJ per tonkilometer. Hoe groter de voertuigcategorie, hoe energie-efficiënter de goederen vervoerd kunnen worden, mits de beladingsgraad voldoende hoog is. Stedelijk vervoer is door het veelvuldige starten en stoppen energie-intensiever dan niet-stedelijk vervoer en snelwegvervoer. Vergeleken met snelwegvervoer is stedelijk vervoer voor de zwaardere categorieën 68 tot 96 % energie-intensiever. Lange-afstandvervoer over snelwegen met vrachtwagens die begrensd zijn tot 90 km/u (sinds 1 juni 2006 zijn in België voertuigen met een MTM van meer dan 3,5 ton verplicht om uitgerust te zijn met een snelheidsbegrenzer) is gemiddeld genomen 13 tot 23 % energie-efficiënter dan lokaal niet-stedelijk vervoer met meerdere stops (zowel stops door laden en/of lossen als verkeersgebonden stops).

Figuur 4: Energie-intensiteit (WTW) voor zwaar wegvervoer (2009)

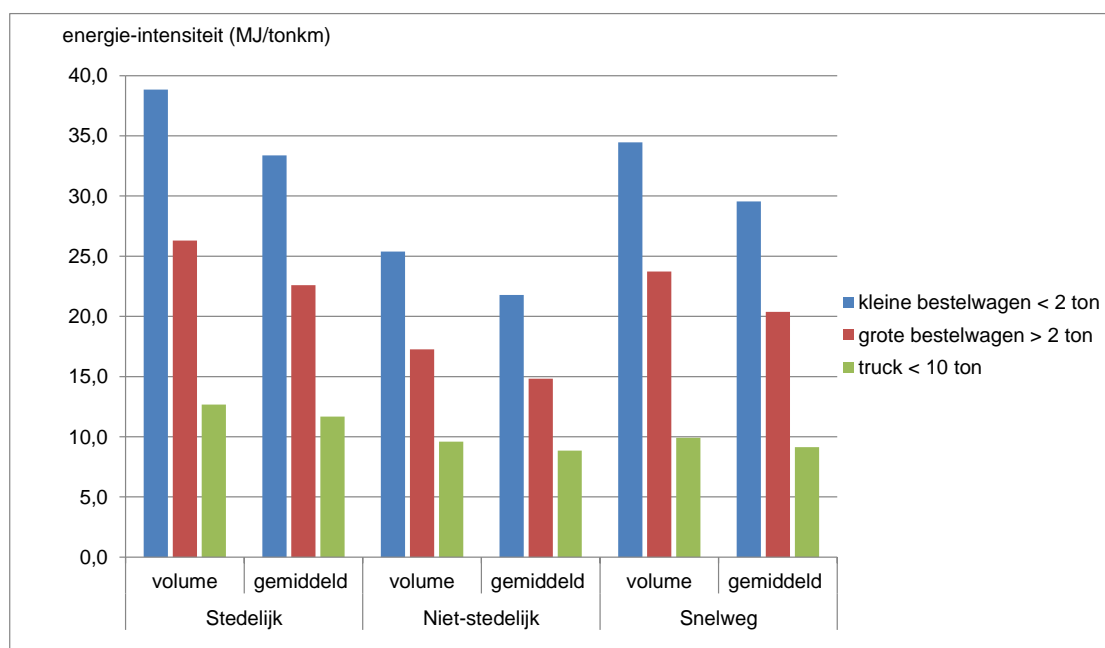


Per voertuigcategorie wordt in de legende de laadcapaciteit weergegeven. Het vervoerde tonnage wordt per cargotype bepaald door de gemiddelde beladingsgraad.

Bron: VUB-MOBI (2014) op basis van den Boer et al. (2011)

Figuur 5 herhaalt deze oefening voor drie types lichtere vrachtwagens en bestelwagens: kleine van <2 ton, grote van >2 ton en kleine truck <10 ton. De laadcapaciteit voor deze categorieën is respectievelijk 0,7 ton, 1,2 ton en 3 ton. Deze voertuigen worden doorgaans enkel voor het transport van gemiddelde en lichte goederen gebruikt, en hebben typisch lagere beladingsgraden (tussen de 18 en 23 % voor volumegoederen en tussen de 21 en 25 % voor gemiddelde goederen) (den Boer et al., 2011). Deze voertuigen scoren dan ook aanzienlijk slechter op vlak van energiegebruik dan de zwaardere categorieën.

Figuur 5: Energie-intensiteit (WTW) voor licht wegvervoer (2009)



Bron: VUB-MOBI (2014) op basis van den Boer et al. (2011)

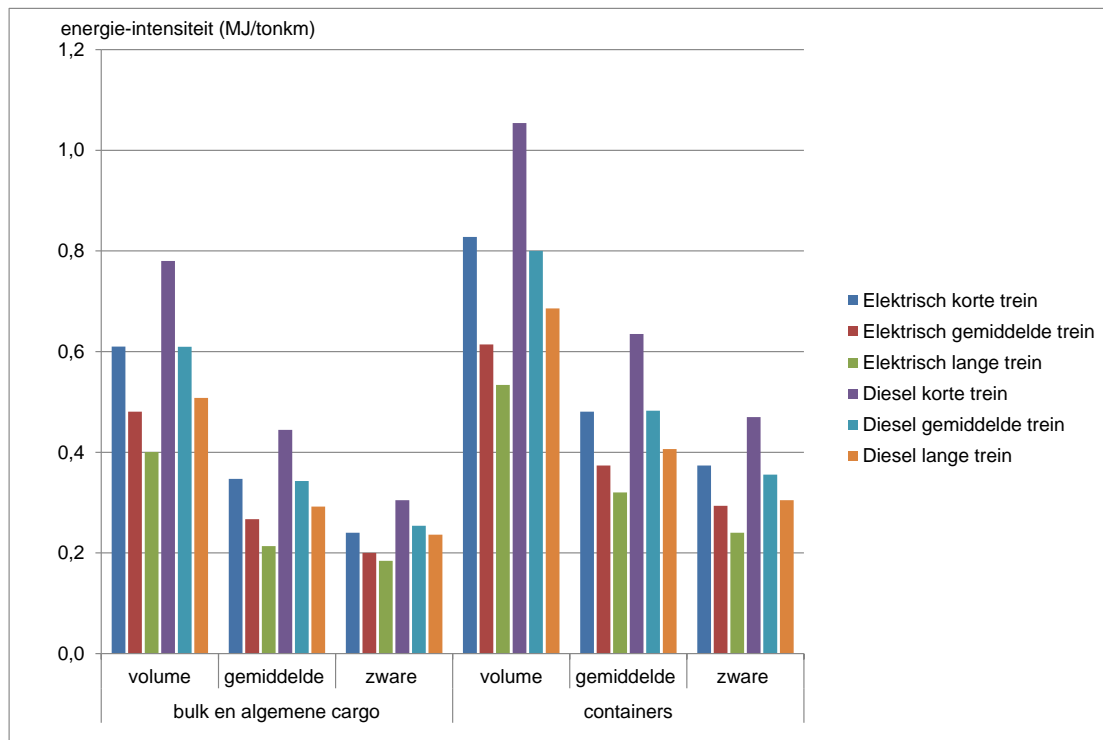
Aangezien lichte vrachtvoertuigen met een MTM <3,5 ton niet begrensd worden op maximaal 90 km/u is hun energiegebruik op autosnelwegen gemiddeld genomen relatief minder efficiënt dan het energiegebruik van de begrensde vrachtwagentypes die tegen een lagere en efficiëntere snelheid opereren. De snelheidsvarianties van deze lichtere voertuigen vertonen bovendien duidelijk een veel grilliger patroon vergeleken met vrachtwagens met MTM >3,5 ton. Dit heeft te maken met het andere verkeer, en dan vooral met de begrensde vrachtwagens die frequent ingehaald dienen te worden (De Vlioger et al., 2005). Dit maakt dat de bestelwagens slechter scoren op de snelweg dan op niet-stedelijke wegen.

3.3 Spoorvervoer

Voor spoorvervoer wordt, naast een opdeling tussen diesel en elektrisch, onderscheid gemaakt naar de aard van de lading (bulk en algemene cargo versus containers), de dichtheid (kg/l) van de goederen en de lengte van de trein (korte trein met 22 wagons of 45 TEU, gemiddelde trein met 33 wagons of 70 TEU en lange trein met 44 wagons of 90 TEU). Figuur 6 geeft de energie-intensiteit voor goederentreinen voor verschillende types cargo voor 2009, rekening houdende met lege ritten en beladingsgraden. Voor volumegoederen is de benuttingsfactor 33 % (40 % ladingsfactor beladen ritten en 83 % aandeel beladen ritten), voor gemiddelde goederen 44 % (80 % ladingsfactor beladen ritten en 55 % aandeel beladen ritten) en voor zware goederen 54 % (98 % ladingsfactor beladen ritten en 55 % aandeel beladen ritten) (den Boer et al., 2011). Voor bulk en algemene cargo varieert de gemiddelde lading (rekening houdende met gemiddelde beladingsgraad en lege ritten) hierdoor tussen de 197 ton (korte trein met volumecargo) en 1 438 ton (lange trein met zware cargo). Voor containertransport wordt de benuttingsgraad van de TEU-capaciteit en het aandeel van beladen containers opnieuw gelijk verondersteld voor de verschillende marktsegmenten (85 % ladingsfactor beladen ritten en 65 % aandeel beladen ritten) (den Boer et al., 2011). Het gewicht van een beladen container (inclusief tarra) is voor volumegoederen gelijk aan 7,9 ton/TEU, voor gemiddelde cargo 12,45 ton/TEU en voor zware cargo 16,5 ton/TEU. Voor elektrische treinen wordt de elektrische energie opgegeven, voor dieseltreinen de energiewaarde van de verbruikte diesel. De data voor de TTW-energieconsumptie voor treinvervoer in den Boer et al. (2011) zijn hoofdzakelijk gebaseerd op een dataset van 200 000 treinritten die gebruikt werden bij de opbouw van de EcoTransIT-tool (Knörr et al., 2011). Voor elektrische treinen wordt hiervoor de elektrische energie gebruikt (MJ-electric), voor dieseltreinen de energie-inhoud van de gebruikte diesel (MJ-diesel), waarbij de efficiëntie van een elektrische aandrijving veel groter is daar de belangrijkste energieverliezen in de keten van de elektriciteitsproductie zitten, daar waar bij een dieselmotor de belangrijkste verliezen in de motor zelf zitten. Om tot WTW-waarden te komen gebruiken we voor dieselverbruik de door ecoinvent berekende energieverhouding tussen WTW en TTW van 1,27 (Dones et al., 2007). Voor de BE-electriciteitsmix gebruiken we een verhouding van 2,67 (Messagie et al., 2014a).

Uit de figuur blijkt dat elektrische treinen energie-efficiënter zijn dan dieseltreinen (rond de 22 % efficiënter voor de meeste combinaties). Hoe langer de trein en hoe zwaarder de cargo, hoe efficiënter het vervoer is, uitgedrukt in MJ per tonkilometer. Voor containervervoer dient opgemerkt te worden dat spoor relatief meer gebruikt wordt dan wegvervoer voor het herpositioneren van lege containers, waardoor de gemiddelde container (vol en leeg) in spoor minder cargo bevat dan bij wegvervoer. Dit hogere aandeel lege trips verklaart het relatief hogere energiegebruik bij containervervoer per spoor. Dit herpositioneren van lege containers (vooral naar de zeehavens) heeft evenwel een belangrijke economische functie, die niet tot uiting komt in een berekening van energiegebruik per tonkilometer. Dit zou eventueel opgevangen kunnen worden door voor containers een berekening per TEU-km te hanteren.

Figuur 6: Energie-intensiteit (WTW) voor spoorvervoer (2009)

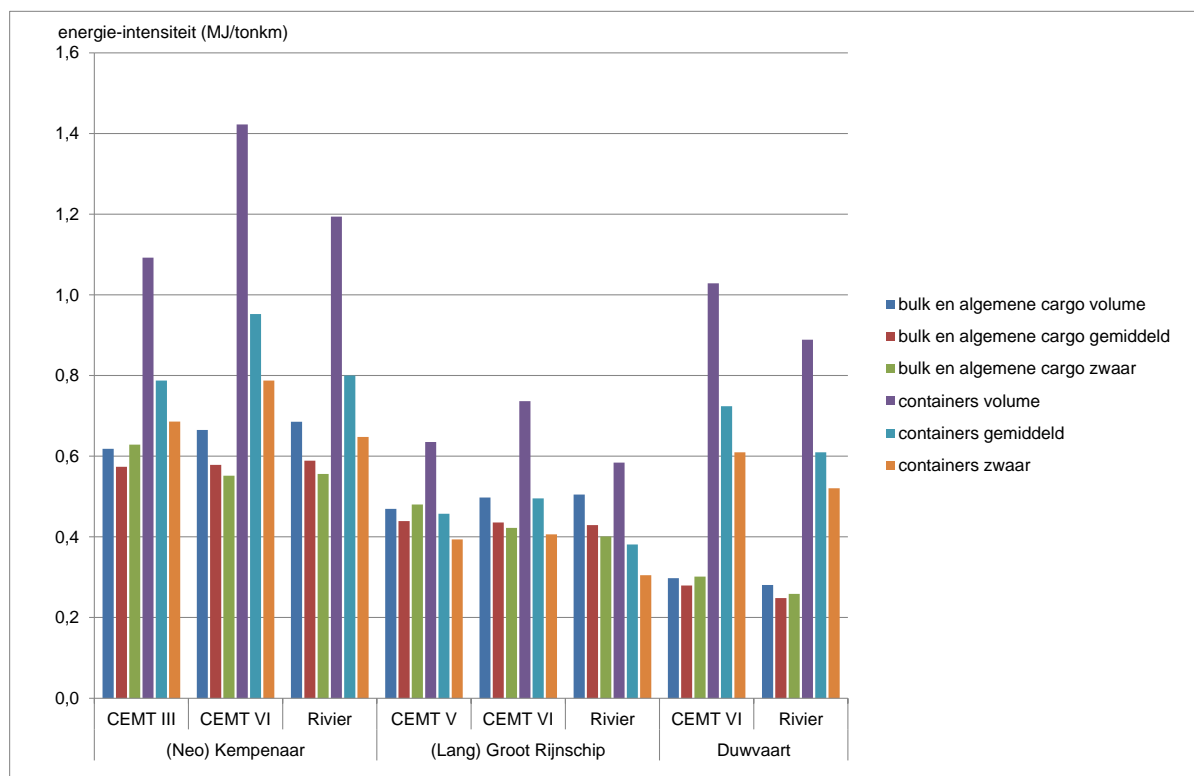


Bron: VUB-MOBI (2014) op basis van den Boer et al. (2011)

3.4 Binnenvaart

Voor binnenvaart is er een grote verscheidenheid aan schepen. Scheepskenmerken hebben een belangrijke invloed op het te leveren vermogen. Daarenboven is het energiegebruik nog eens verschillend naargelang de eigenschappen van de waterweg waarop gevaren wordt (maximaal toegelaten snelheid, diepte van het kanaal) en het type cargo dat vervoerd wordt (beladingsgraad). De weerstand van een schip wordt over het algemeen gesplitst in een wrijvingsweerstand, een golfweerstand en een restweerstand, waar bijvoorbeeld de drukweerstand ten gevolge van niet-ideale stroming in zit (Bolt, 2003). Figuur 7 toont de WTW energie-intensiteit van drie scheepstypes (Kempenaar met laadcapaciteit van 55 ton, Groot Rijnschip met laadcapaciteit van 3 000 ton en duwvaart met laadcapaciteit van 12 000 ton) voor verschillende ladingstypes voor 2009, rekening houdende met lege trips en beladingsgraden. Voor volumegoederen is de benuttingsfactor tussen de 34 % (voor Kempenaar en Rijnschip) en 37 % (voor duwvaart) (43 % ladingsfactor beladen trips en 80-85 % aandeel beladen trips). Voor gemiddelde goederen is dit tussen de 45 % (voor Kempenaar en Rijnschip) en 52 % (voor duwvaart) (60-65 % ladingsfactor beladen trips en 75-80 % aandeel beladen trips) en voor zware goederen tussen de 54 % (voor Kempenaar en Rijnschip) en 59 % (voor duwvaart) (90 % ladingsfactor beladen trips en 60-65 % aandeel beladen trips) (den Boer et al., 2011). Voor containertransport wordt naar analogie met weg- en spoorvervoer de benuttingsgraad van de TEU-capaciteit en het aandeel van beladen containers opnieuw gelijk verondersteld voor de verschillende marktsegmenten (85 % ladingsfactor beladen trips en 55 % aandeel beladen trips) (den Boer et al., 2011). Hierbij dient opgemerkt te worden dat meer nog dan spoor vooral binnenvaart relatief veel gebruikt worden voor het herpositioneren van lege containers, waardoor de gemiddelde container (vol en leeg) minder cargo bevat dan bij wegvervoer. Dit hogere aandeel lege trips verklaart het relatief hogere energiegebruik bij containervervoer vergeleken met algemene cargo en bulk.

Figuur 7: Energie-intensiteit (WTW) voor binnenvaart (2009)



Bron: VUB-MOBI, 2014 op basis van den Boer et al. (2011) en Bolt (2003)

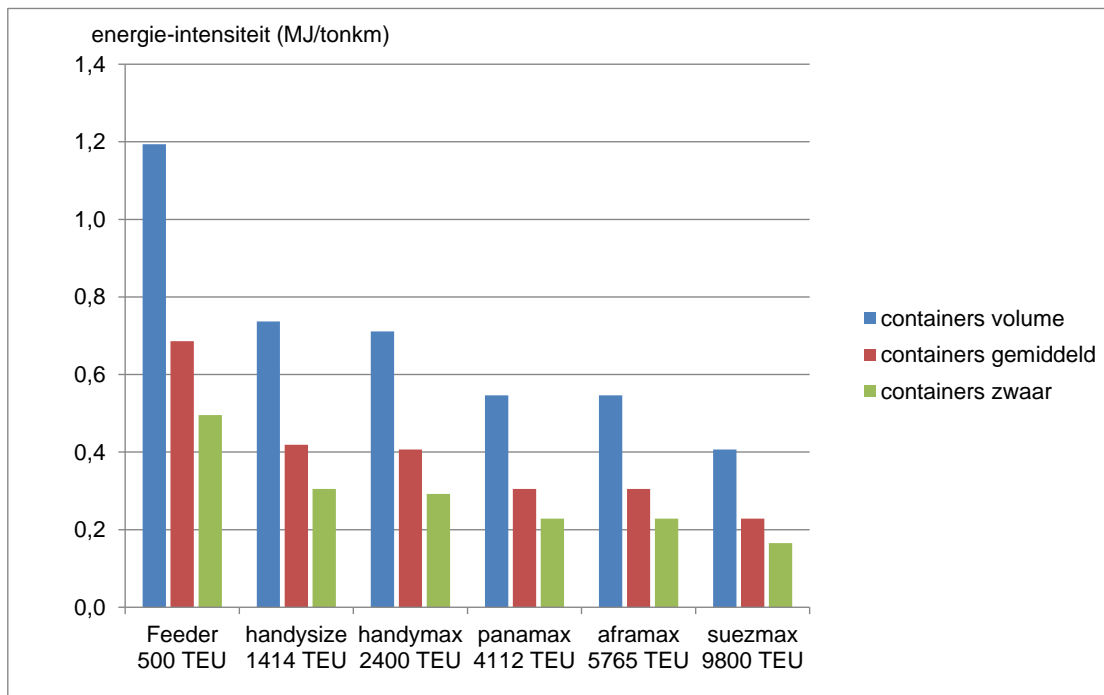
In Figuur 7 wordt onderscheid gemaakt naar verschillende types waterwegen opgesplitst naar CEMT-klasse. Hoe hoger het nummer van de CEMT-klasse van waterwegen, hoe breder de waterweg is en hoe hoger de tonnages die kunnen vervoerd worden door grotere sloopstypes. De categorie rivier betreft hier een rivier van klasse CEMT VIc. Hoe groter het sloopstype en hoe zwaarder de lading, hoe energie-efficiënter het vervoer per binnenschip gemiddeld zal kunnen verlopen uitgedrukt in MJ per tonkilometer. Meestal vergt containervervoer meer energie dan vervoer van bulk/algemene cargo, maar dat is niet steeds het geval bijvoorbeeld voor gemiddelde tot zware goederen vervoerd op rivieren met een Groot Rijschip. Dit komt omdat schaalgrootte, beladingsgraad en aandeel leegvaart verschillen per type schip en type waterweg. Bij volumegoederen is het gemiddelde aantal vervoerde tonnages (geladen en leeg) relatief laag, zeker bij containers. Bij zware goederen is dit gemiddelde tonnage veel hoger, maar bij duwvaart zal door het relatief grote aandeel onbeladen trips (45 %), het energiegebruik bij containers minder goed scoren. Dit alles maakt dat algemene conclusies met betrekking tot energiegebruik bij binnenvaart met enige voorzichtigheid geformuleerd dienen te worden.

3.5 Maritiem vervoer

Figuur 8 en Figuur 9 geven respectievelijk de WTW energie-intensiteit van maritiem containervervoer en maritiem vervoer van bulk en algemene cargo voor een aantal sloopstypes (met aanduiding van laadcapaciteit). Voor volumegoederen (algemene cargo) is de benuttingsgraad 29 %. Voor gemiddelde goederen schommelt de benuttingsgraad tussen de 45 % en 48 % voor tankers en tussen de 55 % en 60 % voor algemene cargo en bulk carriers. Voor zware goederen is de gemiddelde benuttingsgraad tussen de 65 % en 70 % voor algemene cargo en bulk carriers (den Boer et al., 2011). Tankers vervoeren enkel gemiddelde goederen. Bij maritiem containervervoer wordt uitgegaan van een 70 % ladingsfactor bij beladen ritten en een 60 % aandeel beladen ritten (den Boer et al., 2011).

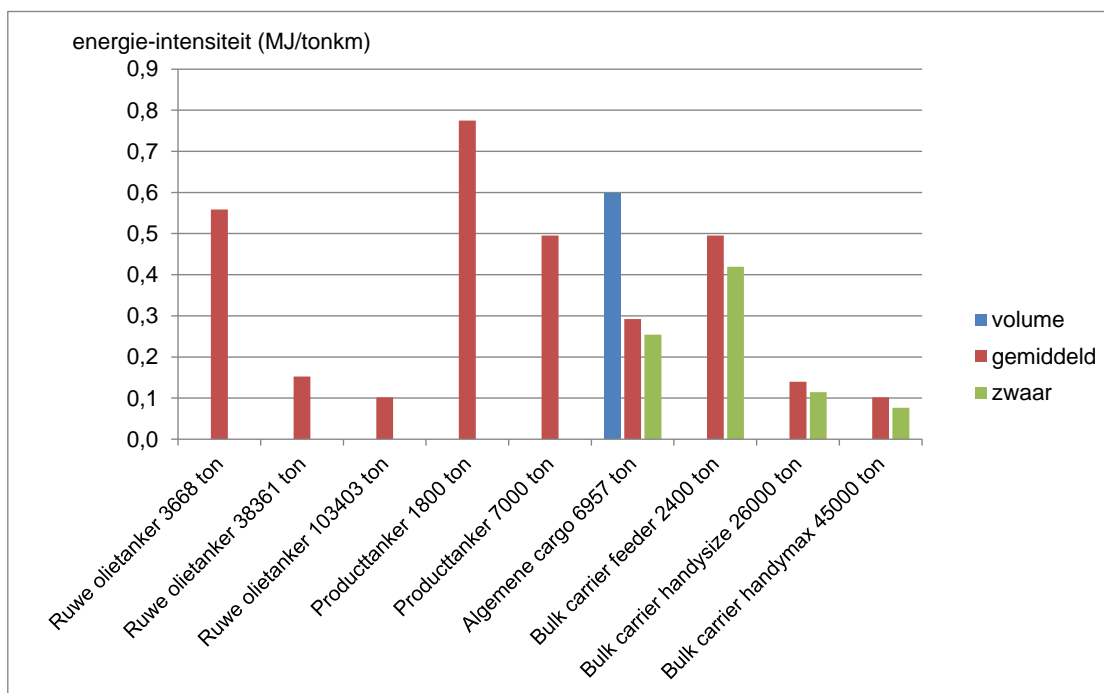
Ook hier heeft sloopgrootte en aard van de lading een impact op de energie-efficiëntie. Hoe groter het schip en hoe zwaarder de vervoerde goederen, hoe energie-efficiënter het transport per tonkm.

Figuur 8: Energie-intensiteit (WTW) voor maritiem containervervoer (2009)



Bron: VUB-MOBI (2014) op basis van den Boer et al. (2011) en Buhaug et al. (2009)

Figuur 9: Energie-intensiteit (WTW) voor maritiem vervoer van bulk en algemene cargo (2009)



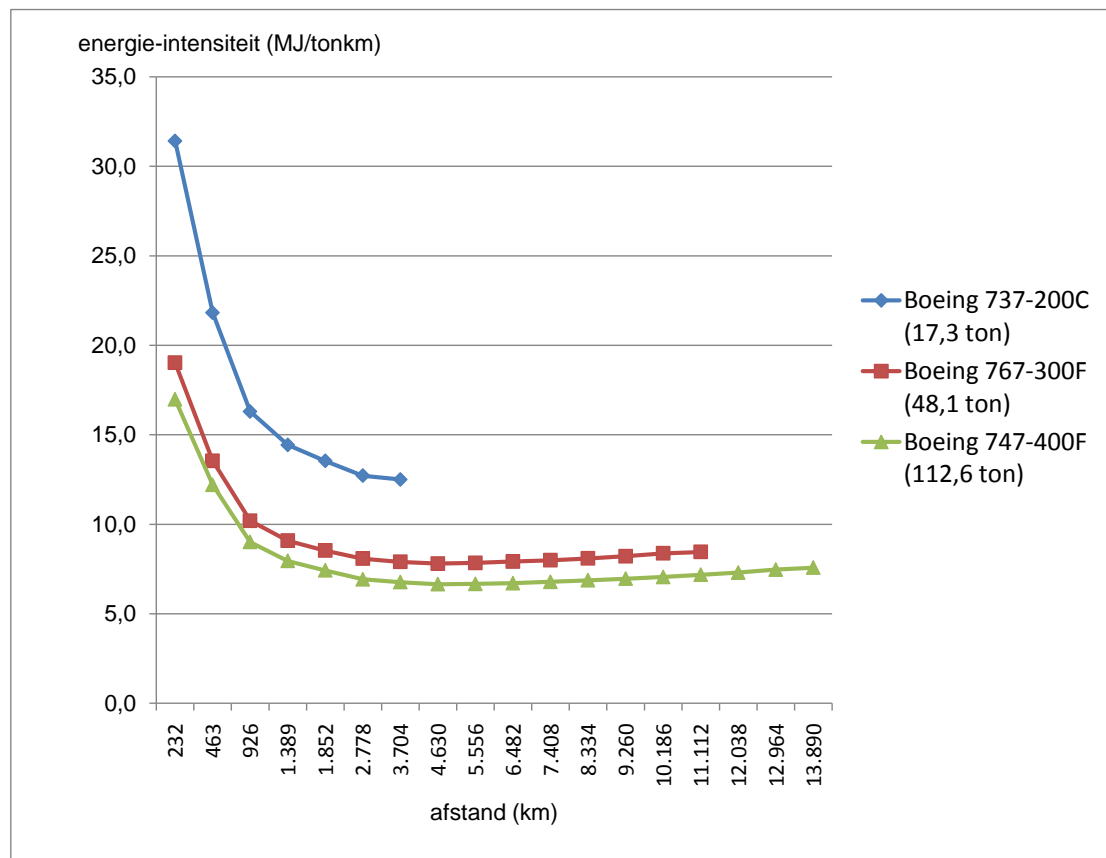
Bron: VUB-MOBI (2014) op basis van den Boer et al. (2011) en Buhaug et al. (2009)

3.6 Luchtvracht

Voor luchttransport hangt het energiegebruik, naast het type vliegtuig en de beladingsgraad, ook af van de lengte van de vlucht, en dit vanwege de verschillende energienoden tijdens verschillende fasen van de vlucht. Bij het opstijgen is de energievraag het grootst, dit heeft dan ook een grotere impact op kortere vluchten. Daarnaast is er ook een groot verschil in energie-efficiëntie per tonkilometer tussen vracht vervoerd op vrachtvliegtuigen ('dedicated freighters') of vracht die meegaat

in de buik van passagiersvliegtuigen ('belly freight'). De energie-intensiteit van cargo op passagiersvliegtuigen is doorgaans hoger dan deze van cargo op vrachtvliegtuigen. Gemiddeld zou de energie-intensiteit van luchtvracht rond 1,92 kWh/tonkilometer schommelen (Davis et al., 2014). Figuur 10 toont de WTW energie-intensiteit in functie van de afstand voor drie types vrachtvliegtuigen (met aanduiding van de maximale laadcapaciteit). Er wordt uitgegaan van een beladingsgraad van 65 %. De data zijn gebaseerd op gemiddelde vlootwaarden en de berekende waarden kunnen 10 % boven of onder de werkelijke waarden liggen op specifieke vluchten. Ook bij deze vervoersmodus heeft de schaalgrootte een belangrijke impact op de energie-efficiëntie, maar vooral de hoge waarden op relatief kortere vluchtafstanden zijn opvallend, door het relatief grote aandeel van opstijgen en landen in de vlucht. Bovendien blijken oudere en kleinere toestellen zoals de Boeing 737-200C zeer slecht te scoren op vlak van energie-efficiëntie.

Figuur 10: Energie-intensiteit (WTW) van luchtvracht via vrachtvliegtuigen in functie van afstand (2006)



Bron: VUB-MOBI (2014) op basis van Knörr et al. (2011) en CORINAIR Emission inventory Guidebook (EEA, 2006)

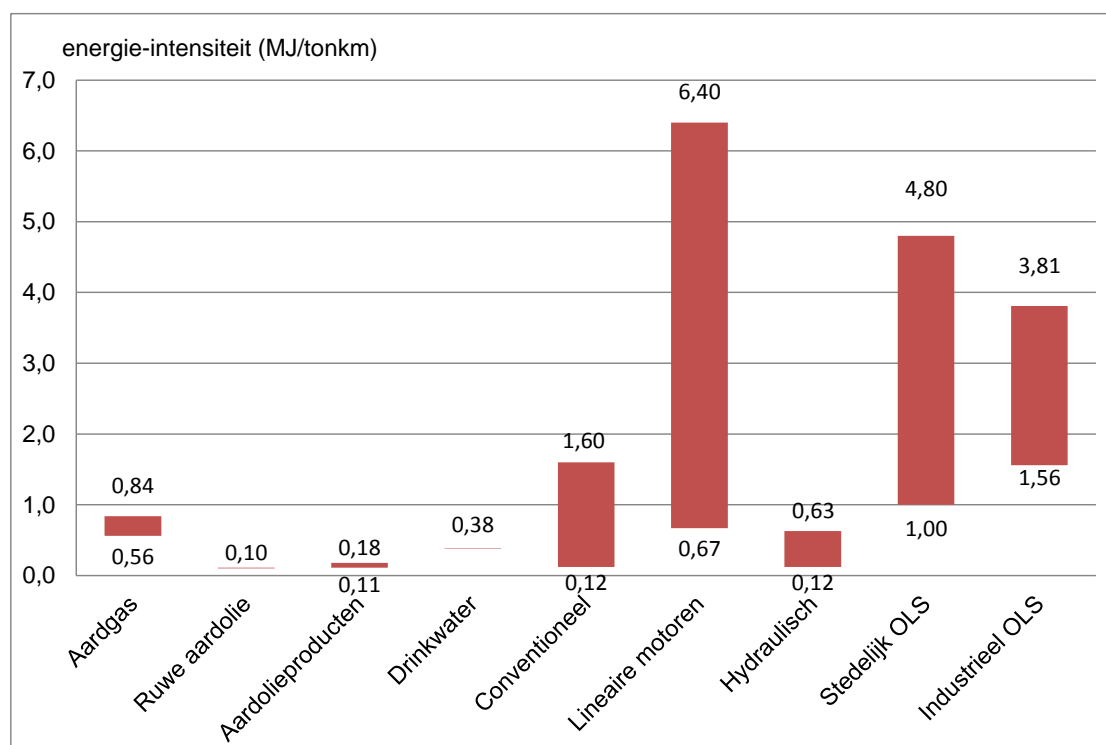
3.7 Ondergronds goederentransport

MIRA rapporteert het energiegebruik van ondergronds goederentransport niet bij de sector transport maar bij de sector energie (voornamelijk transport en distributie van aardgas). Maar voor de volledigheid van dit overzicht wordt het hier toch behandeld.

Ondergronds goederentransport kan worden onderverdeeld in drie categorieën (Willigers, 2001). De eerste categorie is het traditionele pijpleidingtransport en omvat het transport per pijpleiding van vloeistoffen en gassen zoals aardgas, aardolie, petrochemische producten, evenals het transport van drinkwater door waterleidingen. Figuur 11 geeft voor de verschillende soorten van ondergronds goederentransport het directe energiegebruik (TTW), dit is het energiegebruik dat direct afhankelijk is van de geleverde vervoersprestatie. Traditionele pijpleidingen hebben een lage energie-intensiteit. Dit geldt vooral voor pijpleidingen die vloeistoffen vervoeren. De energie-intensiteit van pijpleidingen die gassen vervoeren is duidelijk hoger. Voor transport van vloeistoffen via pijpleidingen zijn de energie-

intensiteiten sterk afhankelijk van de diameter van de buis, van de door de pijpleiding vervoerde hoeveelheid vloeistof en van de viscositeit van de vloeistof. De invloed van de aandrijfmethode (elektrisch of diesel) is daarentegen veel kleiner. De tweede categorie ondergronds goederentransport is het capsule-pijpleidingstransport voor het transport van bulkgoederen zoals steenkool, ertsen en vuilnis. Hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen voortstuwing van capsules door luchtdruk (conventioneel of met lineaire motoren) en voortstuwing door vloeistofdruk (hydraulisch). Conventionele pneumatische capsule-pijpleidingen met luchtpompen hebben een lage directe energie-intensiteit voor kleine diameter pijpleidingen maar deze neemt sterk toe bij toenemende diameter. Door lineaire motoren aangedreven systemen hebben een uiteenlopende energie-intensiteit afhankelijk van het type lineaire motor. Bij een lineaire inductiemotor vindt aandrijving plaats zonder dat daarvoor een roterende beweging in de motor nodig is. Daardoor wordt de wrijvingsweerstand gereduceerd. Hydraulische capsule-pijpleidingen waarbij capsules door middel van vloeistofstroming door de pijpleiding worden getransporteerd hebben op hun beurt een laag energiegebruik (gemiddeld ongeveer slechts 10 % tot 30 % hoger dan pijpleidingstransport van alleen water) maar zijn voorlopig nog enkel conceptueel. Als derde categorie ondergrondse transportmethoden zijn er de systemen die gebruik maken van voertuigen zonder dat daarbij pneumatische aandrijving (met luchtdruk) plaatsvindt. Systemen met automatisch geleide voertuigen worden vaak aangeduid als ondergrondse of ongehinderde logistieke systemen (OLS) (Willigers, 2001). Voorbeelden van dergelijke systemen zijn ondergrondse stadsdistributie, foodtubes voor voeding en vervoer van tijdkritische goederen zoals tussen de luchthaven van Schiphol en de bloemenveiling in Aalsmeer. Dergelijke projecten zijn nog in ontwikkelingsfase (Van Nieuwenhuysse et al., 2011).

Figuur 11: Energie-intensiteit (TTW) van pijpleidingen en ondergronds goederentransport (2002)



Bron: VUB-MOBI (2014) op basis van Willigers (2001)

De energie-efficiëntie van dergelijke ondergrondse transportsystemen is erg verschillend. Voor het traditionele pijpleidingstransport worden waarden behaald die vergelijkbaar zijn met maritiem transport, maar voor de andere systemen is het moeilijker om uitspraken te doen. Daarbij dient opgemerkt te worden dat de onrechtsreeksse energie-intensiteit van OLS-systemen sterk afhankelijk is van het gebruikte systeem en in sommige gevallen kan oplopen tot 50 MJ/tonkm. De voornaamste processen die het indirecte energiegebruik veroorzaken zijn de constructie van infrastructuur en voertuigen, onderhoudswerkzaamheden aan het systeem, en verlichting en klimaatregeling in de terminals (Willigers, 2001).

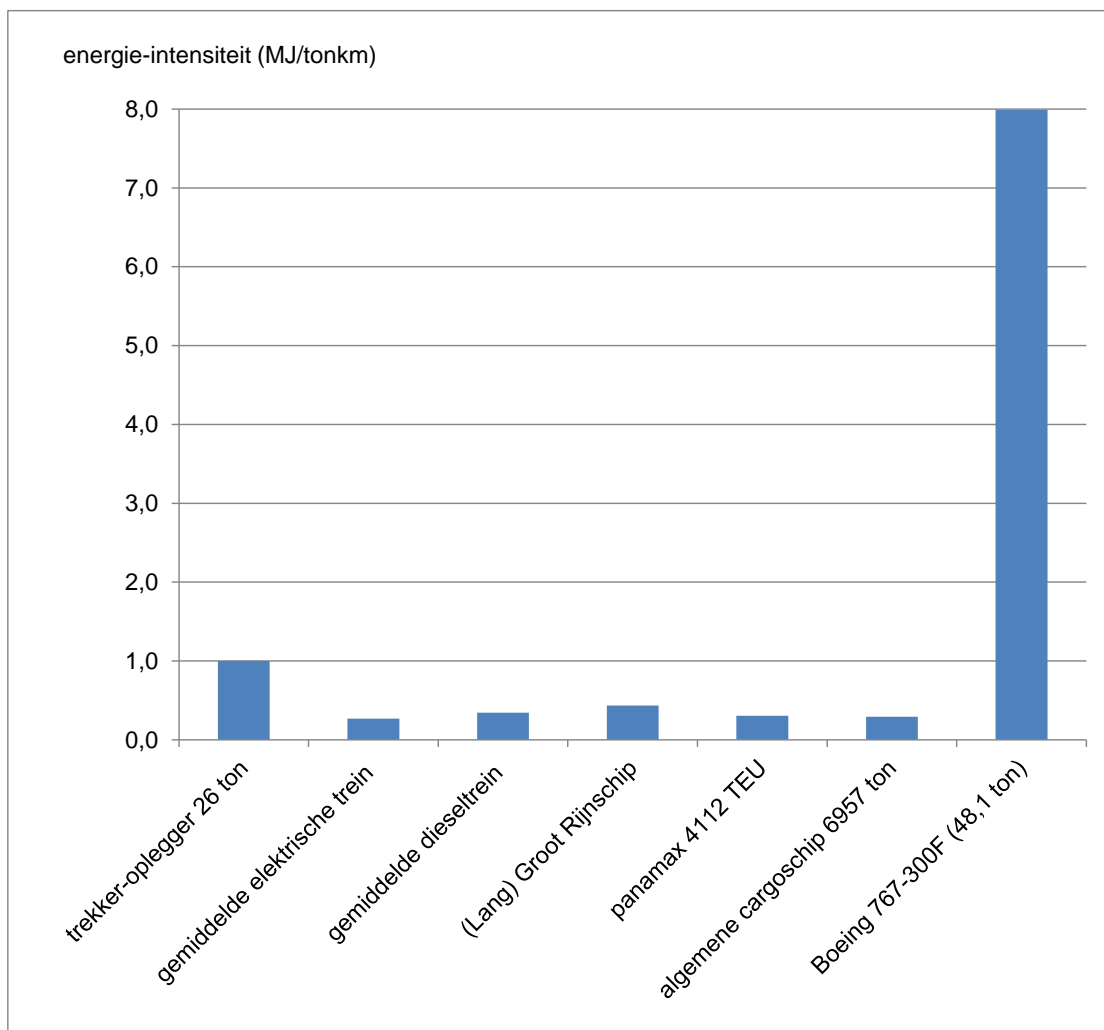
3.8 Laden en lossen

Cijfers voor het energiegebruik van overslag (laden en lossen) spelen vooral een rol bij intermodaal transport, aangezien daar bijkomende overslag vereist is tussen de verschillende transportmodi. Voor containers geeft den Boer et al. (2011) op basis van Knörr et al. (2011) een waarde van 8,8 KWh per processtap. Uitgaande van een gemiddelde van 1,7 TEU per container, stemt dit overeen met 4,6 KWh per TEU. Voor vloeibare cargo is het energiegebruik bij overslag 0,4 KWh/ton, voor bulk cargo 1,3 KWh/ton en voor andere cargo 0,6 KWh/ton.

3.9 Indicatieve vergelijking

Zoals reeds aangehaald dient een vergelijking van de energie-intensiteit van verschillende transportmodi met enige voorzichtigheid te gebeuren. Binnen een bepaalde transportmodus kunnen de waarden sterk variëren naargelang voertuigtype, beladingsgraad, aandeel leeg ... Om toch een indicatieve vergelijking van de grootte-orde tussen de modi te geven, wordt in Figuur 12 de energie-intensiteit (WTW) gegeven per transportmodus, waarbij per modus een tussenliggend type geselecteerd wordt. De geselecteerde transportmiddelen zijn een trekker-oplegger met gemiddelde goederen op de snelweg, een elektrische gemiddelde trein met gemiddelde bulk en algemene cargo, idem voor dieseltrein, een Lang Groot Rijnschip met gemiddelde bulk of algemene cargo op een CEMT VI-vaarweg, een panamax met gemiddelde containers, een algemeen cargoschip met gemiddelde goederen en tot slot een Boeing 767-300F met een vluchtafstand rond 7 000 km.

Figuur 12: Energie-intensiteit (WTW) van een selectie van verschillende transportmodi (2006, 2009)



Bron: VUB-MOBI (2014)

Uit de figuur blijkt duidelijk dat luchtvracht slecht scoort op vlak van energie-efficiëntie. Bij de landmodi heeft wegvervoer de hoogste energie-intensiteit en scoort elektrisch treinvervoer het beste. Het vervoer over water scoort beter dan het wegvervoer.

Belangrijk is op te merken dat lichte vrachtwagens niet werden opgenomen in deze vergelijking, maar in verhouding zeer slecht scoren. Zo zal een grote bestelwagen (>2 ton) met gemiddelde goederen op snelweg met een energie-intensiteit van 20,4 MJ/tonkm zelfs aanzienlijk slechter scoren dan luchtvracht. Dit komt, naast een niet optimaal energiegebruik zonder snelheidsbegrenzer op de snelwegen, hoofdzakelijk door de gemiddeld lage tonnages die met bestelwagens vervoerd worden (lage beladingsgraden) en het relatief grote tarra gewicht. Dit maakt het vervoer met lichte vrachtwagens zeer energie-inefficiënt.

3.10 Vergelijking unimodaal-intermodaal

De cijfers van het energiegebruik uitgedrukt in MJ per tonkilometer per transportmodus zoals in Figuur 12 mogen evenwel niet zomaar tegen mekaar afgewogen worden. Om bijvoorbeeld unimodaal wegvervoer met intermodaal spoor- of binnenvaartvervoer te vergelijken dient immers, naast de logistieke karakteristieken, ook rekening gehouden te worden met energiegebruik tijdens omrijden, voor- en natransport en overslaghandelingen. De af te leggen afstand kan bijvoorbeeld vaak aanzienlijk langer zijn per spoor en zeker per waterweg dan via de weg.

Tabel 3 toont voor verschillende transportmodi het verschil in totaal energiegebruik (WTW) voor het vervoer van 100 ton goederen (gemiddelde bulk & algemene cargo) over een aantal typetrajecten, gebruik makend van de hoger gegeven energie-intensiteiten inclusief lege trips en onderbenutting van de maximale vervoercapaciteit (in massa). De vrachtwagen die in beschouwing genomen wordt is een trekker-oplegger op snelwegtraject. De beschouwde treinen zijn gemiddelde dieseltreinen of elektrische goederentreinen met een laadcapaciteit van 1 400 ton. Voor de binnenvaart wordt er een schip van het type 'Groot Rijnschip' verondersteld met een maximaal laadvermogen van 3 000 ton. Wanneer het voor- en/of natransport van en naar de intermodale terminals kleiner dan 10 km is, wordt het buiten beschouwing gelaten. In de andere gevallen is het vervat in de weergegeven cijfers.

Tabel 3: Energiegebruik voor goederenvervoer (100 ton) over een aantal typetrajecten met verschillende transportmodi

GJ (km)	vrachtwagen	trein elektrisch	trein diesel	binnenschip	zeeschip	vliegtuig
Antwerpen-Hamburg	54,54 (545)	15,51 (581)	19,92 (581)	36,08 (794+15)	22,49 (705+19)	756,50 (557+21)
Brussel-Parijs	30,62 (306)	11,40 (352+20)	14,07 (352+20)	17,11 (370+10)	35,06 (515+200)	485,17 (356+30)
Antwerpen-Boedapest	134,11 (1 340)	37,89 (1 419)	48,66 (1 419)	82,53 (1 849+20)	..	1 132,52 (1 243+30)
Brussel-Napels	163,93 (1 638)	46,22 (1 731)	59,36 (1 731)	..	133,94 (4 349+69)	1 230,71 (1 440+24)

De waarde tussen haakjes is een richtwaarde voor de afgelegde afstand, de onderlijnde waarde geeft het voor- en natransport met een vrachtwagen weer.

Bron: eigen berekeningen VUB-MOBI (2014)

Deze tabel toont dat het verschil in energiegebruik tussen de verschillende modi afhankelijk is van het typetraject dat afgelegd werd. Op het traject Brussel-Parijs ligt het energiegebruik van de vrachtwagen een factor 2,2 hoger dan het energiegebruik op het intermodale traject met dieseltrein. Voor het traject Brussel-Napels ligt deze verhouding nog een kwart hoger op 2,8 door twee redenen: een relatief kleinere omrijafstand voor het spoortraject ten opzichte van het wegtraject en de afwezigheid van een voor- en natraject met vrachtwagen op het intermodale traject. Algemeen valt het voordeel op van het spoor, elektrisch in meerdere mate dan diesel, en de scheepvaart ten opzichte van de andere modi op het vlak van energie-efficiëntie. Vooral het transport van goederen via de luchtvaart is zeer energie-inefficiënt.

Referenties

- Bolt E. (2003) Energiegebruik binnenvaartschepen Versie 3. Rotterdam : Rijkswaterstaat Adviesdienst Verkeer en Vervoer (AVV).
- Buhaug, Ø., Corbett, J., Endresen, Ø. Eyring, V., Faber, J., Hanayama, S. Lee, D. Lee, H. Lindstad, A.Z. Markowska, A. Mjelde, D. Nelissen, J. Nilsen, C. Pålsson, J.J. Winebrake, W. Wu, K. Yoshida (2009) Second IMO GHG Study 2009. London : International Maritime Organization (IMO).
- Davis S., Diegel S., Boundy R & Moore S. (2014) 2013 Vehicle Technologies Market Report. US Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory.
- De Lijn (2014) CO₂ uitstoot voertuigen. Online beschikbaar op:
<http://www.delijn.be/nl/overdelijn/organisatie/zorgzaam-ondernemen/milieu/co2-uitstoot-voertuigen.html>.
- De Vlieter I., Schrooten L., Pelkmans L. & Int Paris L. (2005) 80 km/h maatregel voor vrachtwagens. Wetenschappelijke screening van het effect op de uitstoot van CO₂ en schadelijke emissies. Eindrapport 2005/IMS/R/252, VITO.
- den Boer L.C., Otten M. & van Essen H. (2011) STREAM International Freight 2011. Comparison of various transport modes on a EU scale with the STREAM database, Delft, The Netherlands: CE Delft.
- Dones R., Bauer C., Bollinger R., Burger B., Faist Emmenegger M., Frischknecht R., Heck T., Jungbluth N., Röder A. & Tuchs Schmid M. (2007) Life Cycle Inventories of Energy Systems: Results for current systems in Switzerland and other UCTE Countries. Ecoinvent report No. 5. Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- Ecoscore (2014) Online: www.ecoscore.be
- Edwards R., Hass H., Larivé J., Lonza L., Maas H. & Rickeard D. (2014) Well-To-Wheels Analysis Of Future Automotive Fuels And Powertrains In The European Context. Joint Research Centre.
- EEA (2006) EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook- 2007. Air Traffic. Kopenhagen.
- Federale Overheidsdienst Mobiliteit en Vervoer (2013) Tabel B3, Reizigerskm per wegennet, gewest en jaar tot 2012, http://www.mobilit.belgium.be/nl/binaries/TabB3_pkmN_2012_tcm466-216420.pdf.
- IEA (2014) Energy efficiency indicators: essentials for policy making (residential, services, industry, transport), International Energy Agency, Parijs.
- Knörr W., Seum S., Schmied M., Kutzner F. & Anthes R. (2011) Ecotransit; Ecological transport information tool for worldwide transports. Methodology and data update. IFEU Heidelberg, Öko-Institut & IVE/RMCON, Berlijn.
- Messagie M., Mertens J., Oliveira L., Rangaraju S., Sanfelix J., Coosemans T., Van Mierlo J. & Macharis C. (2014a) The hourly life cycle carbon footprint of electricity generation in Belgium, bringing a temporal resolution in life cycle assessment. Applied Energy Volume: 134C, pp. 469-476. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.08.071.
- Messagie M., Boureima F., Coosemans T., Macharis C. & Van Mierlo J. (2014b) A Range-Based Vehicle Life Cycle Assessment Incorporating Variability in the Environmental Assessment of Different Vehicle Technologies and Fuels. Energies Volume: 7 Issue: 3 Pages: 1467-1482.
- Spielmann M. & Scholz R.W. (2005) Services - Life cycle inventories of transport services: background data for freight transport. International Journal of Life Cycle Assessment, 10(1), 85-94.
- Spielmann M., Bauer C., Dones R. & Tuchs Schmid M. (2007) Transport Services. Ecoinvent report no. 14. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- van Lier T. & Macharis C. (2014) Assessing the environmental impact of inland waterway transport using a life-cycle assessment approach: the case of Flanders, Research in Transportation Business and Management, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rtbm.2014.08.003>.
- Van Nieuwenhuysse B., Van Breedam A., Lyen K. & Debisschop K. (2011) Ongehinderde goederenlogistiek in Vlaanderen – in opdracht van het Instituut Samenleving & Technologie (IST), Vlaams Parlement.
- VMM (2010) Milieurapport Vlaanderen, MIRA, Achtergronddocument Transport. Online beschikbaar op:
<http://www.milieurapport.be/nl/feitencijfers/sectoren/transport/>.
- Willigers J. (2001) Milieu-effecten van ondergronds goederentransport. Huidige situatie en toekomstige ontwikkelingen. RIVM rapport 773002020/2001, Bilthoven, Nederland.

Lijst met afkortingen

B: benzine

BEV: batterij elektrisch voertuig

CEMT: Conférence Européenne des Ministres de Transport

CNG: compressed natural gas

D: diesel

E: elektrisch

EEA: European Environment Agency

HEV: hybride elektrisch voertuig

K: kerosine

LPG: liquefied petroleum gas

MTM: maximaal toegelaten massa

PHEV: plug-in hybride elektrisch voertuig

pkm: personenkilometer

TEU: twenty feet equivalent unit

tonkm: tonkilometer

TTW: Tank-to-Wheel

WTT: Well-to-Tank

WTW: Well-to-Wheel