

Globale schets gasolieverbruik binnenvaartschepen

Opgesteld door: Erik Backer van Ommeren

Inhoudsopgave

1. Doel van deze globale schets.....	1
2. Begrenzungen van deze globale schets.....	1
3. Invloedsfactoren op het specifiek gasolieverbruik.....	1
4. Aanpak.....	2
5. Resultaten.....	2
6. Indicaties van invloedsfactoren.....	2
6.1. Invloed afmeting van de vaarweg.....	2
6.2. Invloed type schip in samenhang met snelheid door het water.....	3
6.3. Voortvarend optimaliseren.....	3
6.4. Invloed onderbelading en laag water.....	3
7. Tot slot als toegift: Voorbeeld reisberekening met stroom.....	4

1. Doel van deze globale schets

Dit rapport strekt tot het presenteren van een globale indicatie van het specifiek gasolieverbruik [ml/ton-km] van binnenvaartschepen om als hulpmiddel te dienen bij het schatten van het gasolieverbruik van binnenvaartreizen.

Indicatief voorbeeld van een reis op stilstaand water

Stel dat de reis bestaat uit:

- 75 km leegvaart naar de laadplaats met een specifiek gasolieverbruik van circa 4.5 mL/ton-km
- 200 km beladen vaart naar de losplaats met een specifiek gasolieverbruik van circa 6.5 mL/ton-km

Het geschatte totale gasolieverbruik van deze reis is dan:

$$Q_{\text{reis}} = (75 \times 4.5 + 200 \times 6.5) / 1000 = 0.3 + 1.3 = 1.6 \text{ Liter per ton met deze reis vervoerde lading.}$$

2. Begrenzungen van deze globale schets

Beklemtoond wordt dat in dit rapport het accent ligt op de hiervoor genoemde formuleringen "globaal", "schets" en "schatten", wat dus niet duidt op het nastreven van "nauwkeurig". Want dat laatste zou onrecht doen aan beroepsgroepen als hydrodynamische onderzoekers, ontwerpers van rompen en delen van de voortstuwingsinstallatie (motor, transmissie, schroef) en zeker ook schippers (vaarsnelheid door het water).

Uitgegaan wordt van bulkclading, overwegend droge bulk.

Containervaart is buiten beschouwing gelaten gezien de onzekerheden bij het omrekenen van het gewicht van een mix van volle en lege containers naar het totaal ladinggewicht.

3. Invloedsfactoren op het specifiek gasolieverbruik

- Dwarsdoorsnede van de vaarweg, met name de diepte: Grote invloed (zie § 6)
- Afmetingen van het schip: Grote invloed (zie § 6.2)
- Met de reis vervoerde lading: Van invloed (zie § 6.4)
- Snelheid van het schip door het water: Grote invloed (zie § 6.2 en 6.3)
- Stroom: Grote invloed (zie § 7)
- Vorm en gladheid van de romp: Beperkte invloed (zie bijlage 5, § 4.3)
- Rendement van de motor, transmissie en schroef: Beperkte invloed (zie bijlage 5, § 4.3)

4. Aanpak

- Er zijn een aantal praktijkgegevens verzameld: (zie bijlage 1):
 - *Voordeel*: authentiek;
 - *Nadeel*: er ontbreken gegevens over de vaarweg en stroom.
- Voorts zijn een aantal theoretische studies verzameld: (zie bijlagen 2 en 4):
 - *Voordeel*: er kunnen eenvoudig varianten worden berekend om met elkaar te vergelijken;
 - *Nadeel*: berekeningsmodellen¹ hebben een beperkt werkingsgebied, wat niet altijd wordt vermeld.
- Vervolgens zijn de verzamelde gegevens samengevat. (zie bijlage 3).
- Tot slot zijn puntjes die wellicht handig zijn om te weten verwoord. (zie bijlage 5). (inclusief emissiefactoren)

5. Resultaten

De in bijlage 3 samengevatte verzamelde gegevens vormen geen representatieve steekproef, wellicht met uitzondering van de telefonische enquête in 2003 van Rijkswaterstaat-AVV onder 110 schippers. Wel lijkt het volgende globaal beeld zich af te tekenen voor de vaart op stilstaand water:²

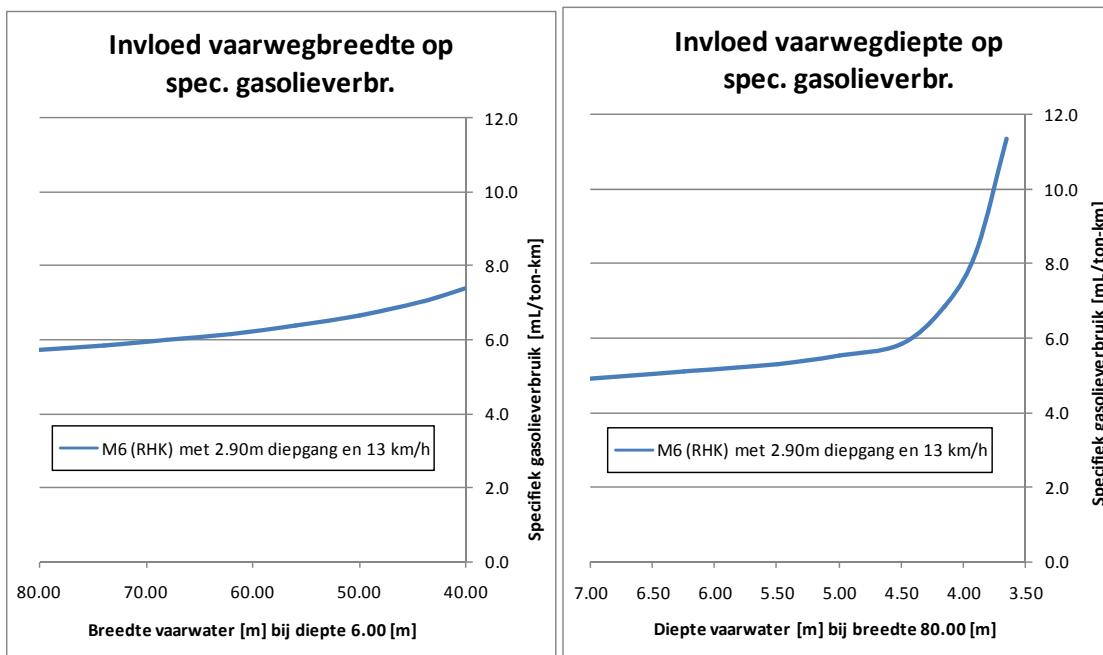
Op groot vaarwater	Specifiek gasolieverbruik		Kleinere scheeps- typen op geëigend kanaal	Specifiek gasolieverbruik	
	Beladen [mL/ton-km]	Leeg [mL/ton-km]		Beladen [mL/ton-km]	Leeg [mL/ton-km]
M1 - M3 (350 - 999 ton)	6.0 - 7.0	4.0 - 5.0	M1 - M3 (350 - 999 ton)	9.0 - 12.0	7.0 - 9.5
M4 - M6 (1000 - 1500 ton)	5.5 - 7.0	4.0 - 5.0	M4 - M6 (1000 - 1500 ton)	7.0 - 10.0	5.5 - 6.5
M7 - M8 (> 1500 ton)	4.0 - 6.0	3.5 - 4.5			
Koppelverbanden	4.0 - 6.0	3.5 - 4.5			
Duw stellen	3.0 - 4.0	1.5 - 2.5			

Het specifiek gasolieverbruik "Leeg" is betrokken op het tonnage dat bij "Beladen" vervoerd wordt.

6. Indicaties van invloedsfactoren

6.1. Invloed afmeting van de vaarweg

De invloed van de afmetingen van het vaarwater op het specifiek gasolieverbruik worden geïllustreerd met onderstaande resultaten van enige berekeningen met het Rijkswaterstaat-AVV model:



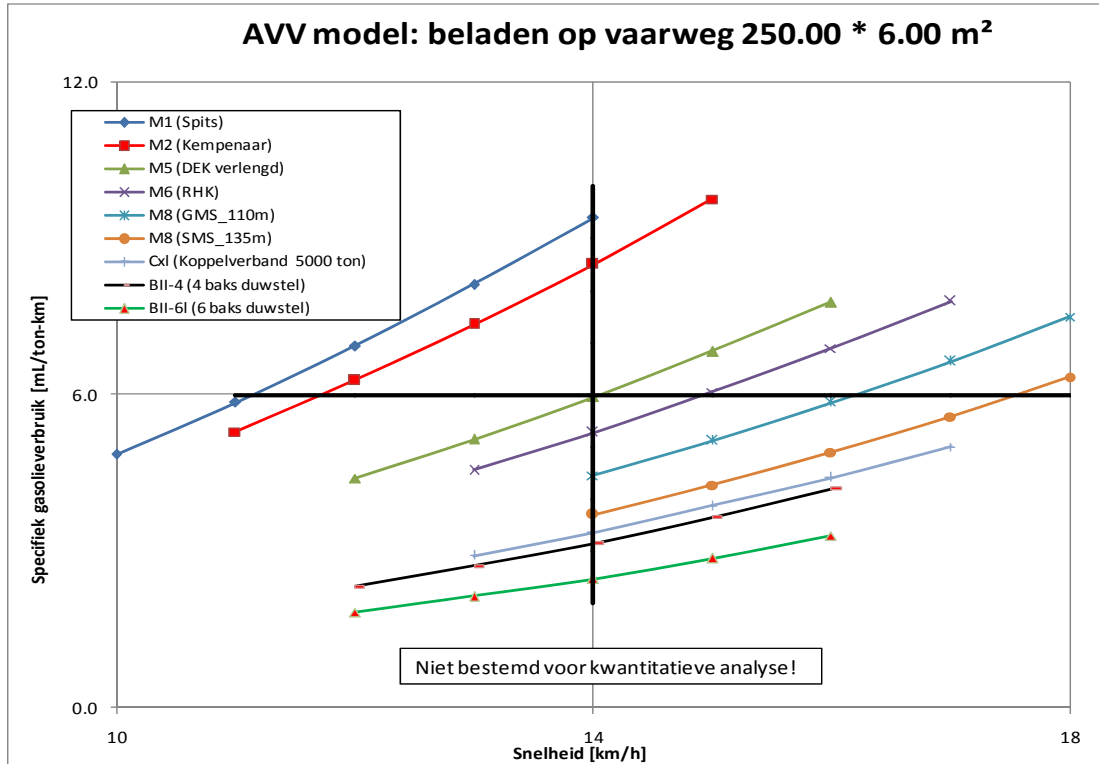
¹ Berekeningsmodellen zijn gebaseerd op hydrodynamische grondregels en proeven in sleeptanks. Met coëfficiënten wordt de uitkomst hiervan "getuned" op een passende resultaat voor een gegeven vaarweg, schip en snelheid. Extrapolatie naar hiervan sterk afwijkende varianten kan dan ook tot onjuiste resultaten leiden.

² Hierbij is ook op individueel voorbeeld niveau gekeken waarom sommige voorbeelden erg afwijken van vergelijkbare andere.

6.2. Invloed type schip in samenhang met snelheid door het water

De gevonden resultaten liggen niet zo heel ver uiteen, doordat schippers in de praktijk hun snelheid aanpassen aan de vaarweg en de grootte van het schip. In studies wordt hierop hooguit in enige mate gevarieerd.

De invloed van het type schip en de snelheid op het specifiek gasolieverbruik worden geïllustreerd met onderstaande resultaten van enige berekeningen met het Rijkswaterstaat-AVV model:



De verschillen tussen de scheepstypen blijken duidelijk als gekeken wordt langs de zwarte strepen:

- Verticaal: (bij gelijke snelheid) → bandbreedte in specifiek gasolieverbruik;
- Horizontaal: (bij gelijk specifiek gasolieverbruik) → bandbreedte in snelheid.

6.3. Voortvarend optimaliseren

In de binnenvaart gelden - soms onzekere - logistieke randvoorwaarden:

- laadhaven: op het afgesproken tijdstip laadgereed zijn;
- stroom op de rivier;
- tijdstippen van schuttingen en brugopeningen en plaats van overnachtingligplaatsen;
- loshaven: afspraken / verwachte situatie;
- afspraken voor komende reizen.

Verwacht kan worden dat de schipper / barge operator binnen deze randvoorwaarden de vaarsnelheid optimaliseert:

- meerkosten van het op enig moment sneller varen *versus*:
- tijdwinst x verwachte netto opbrengst per uur van komende reizen^{3 4}

De optimale vaarsnelheid is dus afhankelijk van:

- de actuele situatie van het betreffende schip;
- de actuele binnenvaart- en gasoliemarkt.

6.4. Invloed onderbelading en laag water

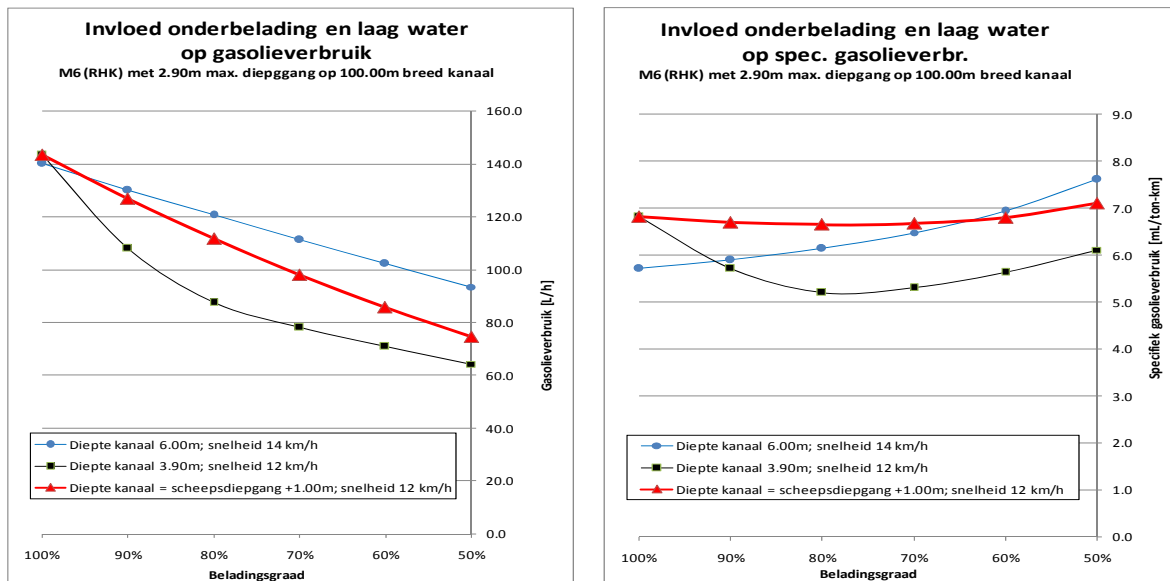
Onderbelading kan diverse oorzaken hebben:

- te weinig of te lichte lading ter vervoer aangeboden;
- te groot schip ingezet voor de vervoersvraag;
- laagwater.

³ C.q. minder kosten door langzamer te varen versus tijdverlies x gemiste verwachte netto opbrengst per uur.

⁴ Netto opbrengst per uur = (vrachtsom - brandstofkosten) / reisduur

De invloed van onderbelading op het (specifiek) gasolieverbruik worden geïllustreerd met onderstaande resultaten van enige berekeningen met het Rijkswaterstaat-AVV model:



Uit het linker grafiek blijkt - naar te verwachten is- dat in alle gevallen het gasolieverbruik [L/h] afneemt door onderbelading. Maar uit het belangrijker rechter grafiek blijkt het volgende:

- *Dunne lijnen.* Op een diepe vaarweg (*blauwe lijn met bolletjes*) heeft onderbelading een ongunstige invloed op het specifiek gasolieverbruik. Maar op een ondiepe vaarweg (*zwarte lijn met blokjes*) heeft een beperkte onderbelading een gunstige invloed op het specifiek gasolieverbruik ("geluk bij een ongeluk" dat ook blijkt uit bijlage 4 § 8). Deze resultaten liggen in lijn met de verwachting. De relevantie van deze dunne lijnen is dat onderbelading meestal het gevolg is van een diepgang beperking op een deel van de reis, zodat op de rest van de reis onderbeladen gevaren wordt op vaarwegen met meer vaardiepte;
- *Vette rode lijn met driehoekjes.* Deze lijn betreft het deel van de reis waar de voor de onderbelading maatgevende geringe vaarwegdiepte aan de orde is: de beladingsgraad is afgestemd op deze vaarwegdiepte⁵. Enigszins verrassend blijkt dat volgens het (niet erg verfijnde) Rijkswaterstaat-AVV model het specifiek gasolieverbruik dan maar weinig afhankelijk is van de beladingsgraad.

7. Tot slot als toegift: Voorbeeld reisberekening met stroom

Stel dat de reis bestaat uit:

- 75 km leegvaart naar de laadplaats met een specifiek gasolieverbruik van circa 4.5 mL/ton-km bij een snelheid van 17 km/h door het water;
- 200 km beladen vaart naar de losplaats met een specifiek gasolieverbruik van circa 6.5 mL/ton-km bij een snelheid van 15 km/h door het water.

Voor 3 situaties wordt het geschatte totale gasolieverbruik van de reis Q_{reis} berekend in Liter per ton met deze reis vervoerde lading. Op stroom moet de snelheid door het water omgerekend worden naar de snelheid over de grond (zie bijlage 5 § 3.2).

Situatie 1: hele reis op stilstaand water:

$$Q_{\text{reis1}} = (75 \times 4.5 + 200 \times 6.5) / 1000 = 0.34 + 1.30 = 1.64 \text{ L/ton}$$

Situatie 2: leeg 5 km/h stroom tegen en beladen 5 km/h stroom mee:

$$Q_{\text{reis2}} = \left(75 \times 4.5 \times \frac{17}{17-5} + 200 \times 6.5 \times \frac{15}{15+5} \right) / 1000 = 0.48 + 0.98 = 1.45 \text{ L/ton}$$

Situatie 3: leeg 5km/h stroom mee en beladen 5 km/h stroom tegen:

$$Q_{\text{reis3}} = \left(75 \times 4.5 \times \frac{17}{17+5} + 200 \times 6.5 \times \frac{15}{15-5} \right) / 1000 = 0.26 + 1.95 = 2.21 \text{ L/ton}$$

Merk op dat het gemiddelde van situaties 2 en 3 $(1.45 + 2.21) / 2 = 1.83 \text{ L/ton}$ groter is dan situatie 1 (zie bijlage 5 § 3.4).

⁵ Ten einde "Beladingsgraad" langs de x-as uit te kunnen zetten is in de grafieken uitgegaan van "vaarwegdiepte afgestemd op de beladingsgraad", wat per saldo hetzelfde effect heeft.

Bijlage 1: Gegevens uit de praktijk

Inhoudsopgave

1. AVV (Rijkswaterstaat; 2003)	2
2. Praktijkdeskundige 1 (september 2008).....	2
3. Praktijkdeskundige 2 (september 2008).....	2
4. Brochure VoortVarend Besparen (voorjaar 2008).....	3
5. NEA/ VZ&G 2010	3
6. Magazine Binnenvaart (mei 2000)	3

Vermelde snelheden betreffende de snelheid door het water. Zie bijlage 5 voor de omrekening naar de vaart op stromend water.

Het specifiek gasolieverbruik_{leeg} is betrokken op de lading_{beladen}.

1. AVV (Rijkswaterstaat; 2003)

Bron: Bolt, E., 2003, *Schatting energieverbruik binnenvaartschepen*, pagina 7; opgesteld t.b.v. Emissie Registratie en Monitoring Scheepsvaart

Resultaten van een telefonische enquête:

Bron	Vaarwater	Aantal opgaven ¹⁾	Schip	Laadvermogen [ton]:	Geladen			Leeg		
					Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]	Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]
AVV_enq_01	?	24	M1 (Spits)	353	11.4	29	7.1	15.2	26	4.9
AVV_enq_02	?	19	M2 (Kempenaar)	546	13.6	51	6.9	17.3	48	5.1
AVV_enq_03	?	9	M3 (Hagenaar)	700	13.9	58	6.0	16.9	56	4.7
AVV_enq_04	?	10	M4 (DEK)	963	14.7	83	5.9	17.2	78	4.7
AVV_enq_05	?	9	M5 (DEK verl.)	1 181	15.8	115	6.2	19.1	96	4.2
AVV_enq_06	?	21	M6 (RHK)	1 475	15.6	154	6.7	18.3	118	4.4
AVV_enq_07	?	1	M7 (RHK verl.) ²⁾							
AVV_enq_08	?	17	M8 (GMS)	2 711	16.5	189	4.2	18.5	145	2.9

110

¹⁾ Niet vermeld is hoe bij het bepalen van het gemiddelde is rekening gehouden met het -globaal derdemachtsverband- tussen verbruik en snelheid.

²⁾ Past met 84.84*9.50*3.20 niet in de diepte definitie van RHK

2. Praktijkdeskundige 1 (september 2008)

Bron	Vaarweg	Schip	Lading [ton]:	Geladen			Leeg		
				Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]	Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]
Desk1_01	?	~Kempenaar	625	14.0	60	6.9	16.0	50	5.0
Desk1_02	?	~RHK	1 250	16.0	120	6.0	18.0	110	4.9
Desk1_03	?	GMS_110m	2 500	18.0	200	4.4	20.0	180	3.6

Geladen is de motorinzet circa 90%; leeg circa 80%.

3. Praktijkdeskundige 2 (september 2008)

Bron	Vaarwater	Schip	Lading [ton]:	Geladen			Leeg		
				Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton/km]	Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton/km]
Desk2_01	?	GMS_110m	3 000	19.7	340	5.8	22.9	340	4.9
Desk2_02	?	GMS_110m	3 000	19.3	320	5.5	22.0	300	4.5
Desk2_03	?	GMS_110m	3 000	15.0	195	4.3	17.5	190	3.6

In de 1e variant is de motorinzet 100% (geladen en leeg).

In de 2^e variant is dit circa 95%

In de 3^e variant is dit circa 55% (economisch varen)

4. Brochure VoortVarend Besparen (voorjaar 2008)

Bron	Vaarweg	Schip	Lading [ton]:	Geladen			Leeg		
				Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]	Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]
VB_01	R'dam - Ben. Rijn	GMS_110m	2 257	19.6	287	6.5	22.4	143	2.8

Het in deze brochure beschreven rondje beladen Rotterdam Wesseling Godorf en leeg terug is omgerekend naar stilstaand water onder aanname van een motorrendement van 0.200 kg / kWh en een gemiddelde stroom van 5 km/h.

5. NEA/ VZ&G 2010

Quispel, M., Dasburg-Tromp, N.J, (NEA), 2011, *Kostenstructuur zand- en grindvaart 2010*, i.o.v. CBRB

Bron	Vaarweg	Schip	Lading [ton]:	Geladen			Leeg		
				Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]	Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]
NEA_11	Kanaal	Kempenaar	380	7.3	45	16.2	7.4	40	14.2
NEA_12	Deels kanaal	~DEK	750	13.2	81	8.2	10.4	63	8.1
NEA_13	Kanaal, rivier	~DEK	1 000	10.0	84	8.4	10.9	60	5.5
NEA_14	Rivier, IJmeer	~DEK	1 000	15.5	95	6.1	20.1	90	4.5
NEA_15	IJmeer, kanaal	~DEK verl	1 250	13.8	75	4.3	13.8	70	4.1
NEA_16	Rivier	~RHK	1 500	15.8	120	5.1	16.8	100	4.0
NEA_17	Rivier, AR kanaal	GMS	2 500	17.3	270	6.3	23.0	270	4.7

De voorbeelden 11 en 12 hebben betrekking op onderbelading i.v.m. diepgangbeperking op een deel van het traject.

De voorbeelden 14 en 16 zijn omgerekend naar stilstaan water (zie bijlage 5), uitgaande van een gemiddelde stroomsnelheid van 3 km/h resp. 5 km/h.

6. Magazine Binnenvaart (mei 2000)

Veldman, J. , 2000, *Gasolietoeslag, wat is redelijk?*

Bron	Vaarweg	Schip	Lading [ton]:	Geladen (indicatie op stilstaand water)			GELADEN TE BERG c.f. artikel		
				Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]	Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]
MB_01	R'dam-Rijn/ Moese	Kempenaar	600	14.0	58	6.9	?	?	10.8
MB_02	R'dam-Rijn/ Moese	RHK	1 200	16.0	127	6.6	?	?	9.6
MB_03	R'dam-Rijn/ Moese	GMS_110m	2 500	19.0	297	6.3	?	?	8.5
MB_04	R'dam-Rijn/ Moese	GMS_110m_bep.	2 200	19.0	287	6.9	?	?	9.3

In dit artikel wordt voor bovenvermelde schepen/ladingen het totaal brandstofverbruik gepresenteerd van de beladen reizen van Rotterdam naar Neuss, Thionville, Mannheim en Basel.

Deze totale brandstofverbruiken zijn omgerekend naar specifiek verbruiken [mL/ton-km]. Per schip/lading liggen deze berekende waarden niet ver uiteen, zodat het verantwoord verder uit te gaan van de hierboven in het rechter blok getoonde mediaan van deze waarden.

Vervolgens zijn deze medianen indicatief omgerekend naar stilstaand water (zie bijlage 5; veronderstelde stroom 5 km/h; snelheid door het water als boven aangegeven).

De resulterend verbruiken zijn gecontroleerd met een analytisch motorberekening.

Voorbeeld 04 betreft het zelfde schip als voorbeeld 03, maar heeft een diepgangbeperking.

Bijlage 2: Gegevens ontleend aan studies

Inhoudsopgave

1. AVV (Rijkswaterstaat; 2003)	2
1.1. Alle scheepstypen op de "Waal" zonder stroom.....	2
1.2. Kleinere scheepstypen op geëigend kanaal.....	2
2. Royal HaskKoning.....	3
3. VBD	3
3.1. Breed en diep vaarwater.....	3
3.2. Diep kanaal.....	4
3.3. Brede en ondiepe vaarweg (diepgang beperkt tot 2.00m)	4
4. DTU	4
4.1. Alle scheepstypen op groot vaarwater	4
4.2. Kleinere scheepstypen op geëigend kanaal.....	5
5. EcoTransIT	5
6. IFO 1996.....	5

Vermelde snelheden betreffende de snelheid door het water. Zie bijlage 5 voor de omrekening naar de vaart op stromend water.

Het specifiek gasolieverbruik_{leeg} is betrokken op de lading_{beladen}.

1. AVV (Rijkswaterstaat; 2003)

Bron: Bolt, E., 2003, *Schatting energieverbruik binnenvaartschepen*, pagina 7.

T.b.v. Emissie Registratie en Monitoring Scheepsvaart is een rekenmodel opgesteld (zie bovengenoemd rapport) en zijn waarden bepaald voor de afmetingen van vaarwegen, scheepsmaten en voor ieder combinatie van vaarweg/type schip de snelheden (beladen en leeg).

1.1. Alle scheepstypen op de "Waal" zonder stroom

Bron	Vaarweg	Schip	Lading [ton]:	Geladen			Leeg		
				Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]	Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]
BvO/AVV_20	Waal	M1 (Spits)	360	12.0	31	7.1	15.0	22	4.0
BvO/AVV_21	Waal	M2 (Kempenaar)	585	14.0	73	8.9	16.0	44	4.7
BvO/AVV_22	Waal	M5 (DEK verl)	1 125	15.0	122	7.2	17.0	81	4.2
BvO/AVV_23	Waal	M6 (RHK)	1 575	15.5	175	7.2	18.0	122	4.3
BvO/AVV_24	Waal	M8 (GMS_110m)	2 700	15.5	343	8.2	17.5	148	3.1
BvO/AVV_25	Waal	M8_(SMS_135m)	5 400	16.0	694	8.0	17.5	278	2.9
BvO/AVV_26	Waal	CxI (koppelverb)	4 500	15.5	447	6.4	15.5	143	2.1
BvO/AVV_27	Waal	BII-4 (4 baks duw)	10 800	14.0	1 176	7.8	16.0	262	1.5

1.2. Kleinere scheepstypen op geëigend kanaal

Bron	Vaarweg	Schip	Lading [ton]:	Geladen			Leeg		
				Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]	Snelheid [km/h]	Verbruik [[L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]
BvO/AVV_00	CEMT I	M1 (Spits)	360	10.0	40	11.1	16.0	38	6.6
BvO/AVV_01	CEMT II	M2 (Kempenaar)	585	10.0	59	10.1	16.0	65	7.0
BvO/AVV_02	CEMT IV	M5 (DEK verl)	1 125	13.0	146	10.0	17.0	108	5.6
BvO/AVV_03	CEMT IV	M6 (RHK)	1 575	12.5	185	9.4	17.0	152	5.7

Snelheid van de geladen Spits: AVV gebruikt hier 12 km/h, maar 10 km/h ligt op een CEMT I kanaal meer voor de hand..

2. Royal HasKoning

Bron: Schilperoord, H.A. , 2004, *Environmental Performance of Inland Shipping*, appendix 2.

Dit rapport is door Royal HasKoning opgesteld in opdracht van CBRB en Schuttevaer.

Het berekeningsmodel is op enkele punten na gelijk aan het AVV model (zie HS 1)

Bron	Vaarweg [m ²]	Schip	Lading [ton]:	Geladen			Leeg		
				Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]	Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]
HasKo_01	50 * 5.00	M1 (Spits)	333	13.6	50	11.1	17.3	54	9.5
HasKo_02	50 * 5.00	M2 (Kempenaar)	523	13.9	88	12.1	16.9	91	10.3
HasKo_03	50 * 5.00	M6 (RHK)	1 283	15.8	209	10.3	19.1	212	8.6
HasKo_04	100 *7.50	Cxl (Koppelverb 5	4 840	13.5	241	3.7	18.0	344	4.0
HasKo_05	100 *7.50	M8 (GMS_110m)	3 185	16.5	315	6.0	18.5	266	4.5
HasKo_06	100 *7.50	M8 (SMS_135m)	5 220	16.5	529	6.1	18.5	429	4.4
HasKo_07	100 *7.50	Bl-4 (4 baks duw s	11 113	13.0	418	2.9	17.0	347	1.8

Deze resultaten wijken wat af van de uitkomsten van het AVV model voor dezelfde gegevens.

De dieptes van de vaarwegen is groter dan waarvan Rijkswaterstaat-AVV uitgaat (zie bijlage 5, HS1), wat gunstig is voor het gasolieverbruik.

Opvallend is dat in voorbeeld 04 (en in mindere mate in de voorbeelden 01 - 03) de motorinzet (verbruik) "leeg" hoger is dan "beladen".

3. VBD

Bronnen:

. Renner, V., Wolfgang Bialonski, W., 2004, *Technische und wirtschaftliche Konzepte für flußangepaßte Binnenschiffe*.

. Brandt, A. , Schulz, T. , 2001, *Materialien Nr. 56 Emissionen luftverunreinigender Stoffe durch den Schiffsverkehr in Nordrhein-Westfalen, Ein Modell zur Berechnung der Schadstoffverteilung auf Wasserstraßen, in Schleusen und Häfen*.

Deze rapporten zijn opgesteld door het VBD in opdracht van de Bundesminister für Verkehr resp. Bau- und Wohnungswesen Landesumweltamtes NRW.

"VBD" staat voor "Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V., Duisburg". Inmiddels is het aandachtsgebied van dit instituut verruimd en de naam is nu:

Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V. (DST). DST is onderdeel van de Universität Duisburg - Essen. DST heeft 3 sleeptanks.

3.1. Breed en diep vaarwater

Bron	Vaarweg [m ²]	Schip	Lading [ton]:	Geladen			Leeg		
				Snelheid [km/h]	Verbruik [[L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]	Snelheid [km/h]	Verbruik [[L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]
VBD_00	∞ * 5.00	Gustav Koenigs (	1 100	16.0	144	8.2	18.0	126	6.4
VBD_01	∞ * 5.00	Johann Welker (v	1 500	17.0	173	6.8	20.0	151	5.0
VBD_02	∞ * 5.00	GMS-110m	3 000	18.0	211	3.9	20.0	184	3.1
VBD_03	∞ * 5.00	Schubverb. 2*Eur	3 700	15.0	192	3.5	18.0	168	2.5

3.2. Diep kanaal

Bron	Vaarweg [m ²]	Schip	Lading [ton]:	Geladen			Leeg		
				Snelheid [km/h]	Verbruik [[L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]	Snelheid [km/h]	Verbruik [[L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]
VBD_20	Kanaal ? * 5.00	Gustav Koenigs (	1 100	11.0	72	5.9	11.0	36	3.0
VBD_21	Kanaal ? * 5.00	Johann Welker (v	1 500	11.0	86	5.2	11.0	43	2.6
VBD_22	Kanaal ? * 5.00	GMS-110m	3 000	11.0	105	3.2	11.0	53	1.6
VBD_23	Kanaal ? * 5.00	Schubverb. 2*Eur	3 700	11.0	96	2.4	11.0	48	1.2

3.3. Brede en ondiepe vaarweg (diepgang beperkt tot 2.00m)

Bron	Vaarweg [m ²]	Schip	Lading [ton]:	Geladen			Leeg		
				Snelheid [km/h]	Verbruik [[L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]	Snelheid [km/h]	Verbruik [[L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]
VBD_10	∞ * 2.50	Gustav Koenigs (	800	9.0	184	25.6			
VBD_11	∞ * 2.50	Johann Welker (v	950	9.0	173	20.2			
VBD_12	∞ * 2.50	GMS-110m	1 200	9.0	162	15.0			
VBD_13	∞ * 2.50	Schubverb. 2*Eur	2 400	9.0	144	6.7			

4. DTU

Bron: Georgakaki, A, Sorenson, S.C., 2004, *Report on collected data and resulting methodology for inland shipping*.

Dit rapport is door de Danmarks Tekniske Universitet opgesteld in het kader van het EU project Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems.

Er is een gedetailleerd model ontwikkeld dat gevalideerd is met theoretische en praktijk gegeven, o.a. van VBD.

In de navolgende paragrafen zijn enige resultaten van deze studie in tabelvorm weergegeven; in bijlage 4 staan meer resultaten in grafiekvorm. Dit rapport geeft geen informatie over leegvaart.

4.1. Alle scheepstypen op groot vaarwater

Bron	Vaarweg [m ²]	Schip	Lading [ton]:	Geladen			Geladen (!)		
				Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]	Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]
DTU_00	400.00 * 5.00	Spits	364	12.0	17	3.9	14.0	36	7.1
DTU_01	400.00 * 5.00	O.Teubert	550	12.0	24	3.7	14.0	48	6.2
DTU_02	400.00 * 5.00	Gustav Koenigs	968	13.0	43	3.4	16.0	127	8.2
DTU_03	400.00 * 5.00	Johann Welker	1 378	13.0	56	3.1	16.0	148	6.7
DTU_04	400.00 * 5.00	GMS_105m	2 160	13.0	92	3.3	16.0	247	7.2
DTU_05	400.00 * 5.00	GMS_110m tanker	3 000	13.0	108	2.8	16.0	305	6.3
DTU_06	200.00 * 5.00	GSM_koppelv.	4 000	13.0	201	3.9	16.0	387	6.1
DTU_07	350.00 * 5.00	4 baks duw stel	7 700	13.0	289	2.9	16.0	471	3.8
DTU_08	350.00 * 5.00	6 baks duw stel	11 500	13.0	566	3.8	16.0	1 017	5.5

4.2. Kleinere scheepstypen op geëigend kanaal

Bron	Vaarweg [m ²]	Schip	Lading [ton]:	Geladen			Geladen (!)		
				Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]	Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]
DTU_10	40.00 * 3.50	Spits	364	12.0	35	8.0	13.0	62	13.0
DTU_11	50.00 * 4.00	O.Teubert	550	12.0	40	6.0	14.0	103	13.4
DTU_12	100.00 * 4.00	Johann Welker	1 378	13.0	87	4.8	14.0	130	6.7

5. EcoTRANSIT

Bron: 2010, *Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports, Methodology and Data*

Dit rapport is door IFEU Heidelberg, Öko-Institut, IVE en RMCON opgesteld in opdracht van DB_Schenker_Deutschland en UIC (International Union of Railways), als achtergrond document van het gratis te gebruiken on-line tool om de emissie van goederenvervoer per reis te berekenen voor allerlei modaliteiten (world wide). (www.ecotransit.org)¹

Bron	Vaarweg	Schip	Lading [ton]:	Geladen			Leeg		
				Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]	Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]
EcoT_01	?	≤ klasse IV	< 1500			7.6			4.6
EcoT_02	?	> kl. IV	> 1500			5.4			3.2

6. IFO 1996

bron: http://www.lbst.de/publications/books_d/co2/Inhaltsverzeichnis.html

Dit rapport is in 1996 opgesteld door een groep Duitse deskundigen naar aanleiding van het voornemen van de Duitse overheid om voor vervoer een CO2 belasting in te voeren. Het hoofdstuk over binnenvaart is gebaseerd op informatie van VBD (zie HS 3).

Bron	Vaarweg [m ²]	Schip	Lading [ton]:	Geladen			Leeg		
				Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]	Snelheid [km/h]	Verbruik [L/h]	Spec. verbr. [mL/ton-km]
IFO1996_01	? * 7.50	GMS_110m	3 000	18.3	247	4.5	22.2	219	3.3
IFO1996_02	? * 7.50	GMS_110m	1 500	20.2	235	7.8			

¹ De afstanden over de Rijn worden iets tekort berekend en ook zijn de vaartrajecten soms onrealistisch. Dus niet bruikbaar als een routeplanner.

Bijlage 3: Samenvatting van de verzamelde gegevens

Inhoudsopgave

1. Wijze van presentatie	1
2. Op groot vaarwater	2
3. Kleinere scheepstypen op geëigend kanaal	3

1. Wijze van presentatie

De in de bijlagen 1 en 2 gepresenteerde gegevens zijn in 2 groepen ingedeeld:

- Groot vaarwater, v.w.b. de scheepsgrootte onderverdeeld is de subgroepen volgend de RWS indeling¹ :
 - M1 - M3 (circa 350 - 999 ton)
 - M4 - M6 (circa 1000 - 1500 ton)
 - M7 - M8 (> circa 1500 ton)
 - Koppelverbanden
 - Duwstellen
- Kleinere scheepstypen op geëigend kanaal, v.w.b. de scheepsgrootte onderverdeeld in de subgroepen:
 - M1 - M3 (circa 350 - 999 ton)
 - M4 - M6 (circa 1000 - 1500 ton)

Per subgroep zijn van het specifiek gasolieverbruik [ml/ton-km] bepaald²:

- De mediaan: even veel voorbeelden liggen boven en onder deze waarde;
- De 12.5% percentiel ("ondergrens"): 12.5% van de voorbeelden liggen onder deze waarde;
- De 87.5% percentiel ("bovengrens"): 87.5% van de voorbeelden liggen onder deze waarde;
- (dus 75% van de voorbeelden liggen tussen deze onder- en bovengrens.

PM

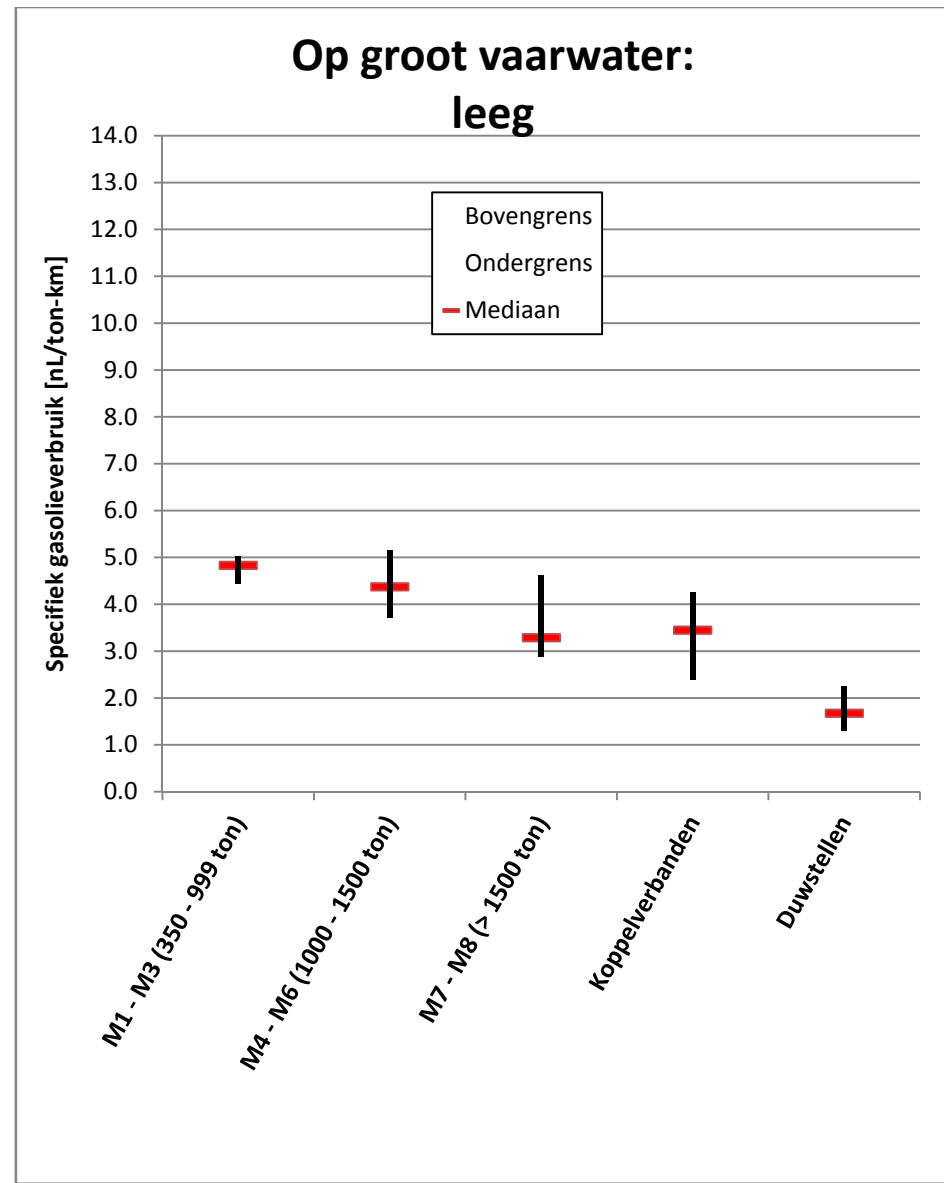
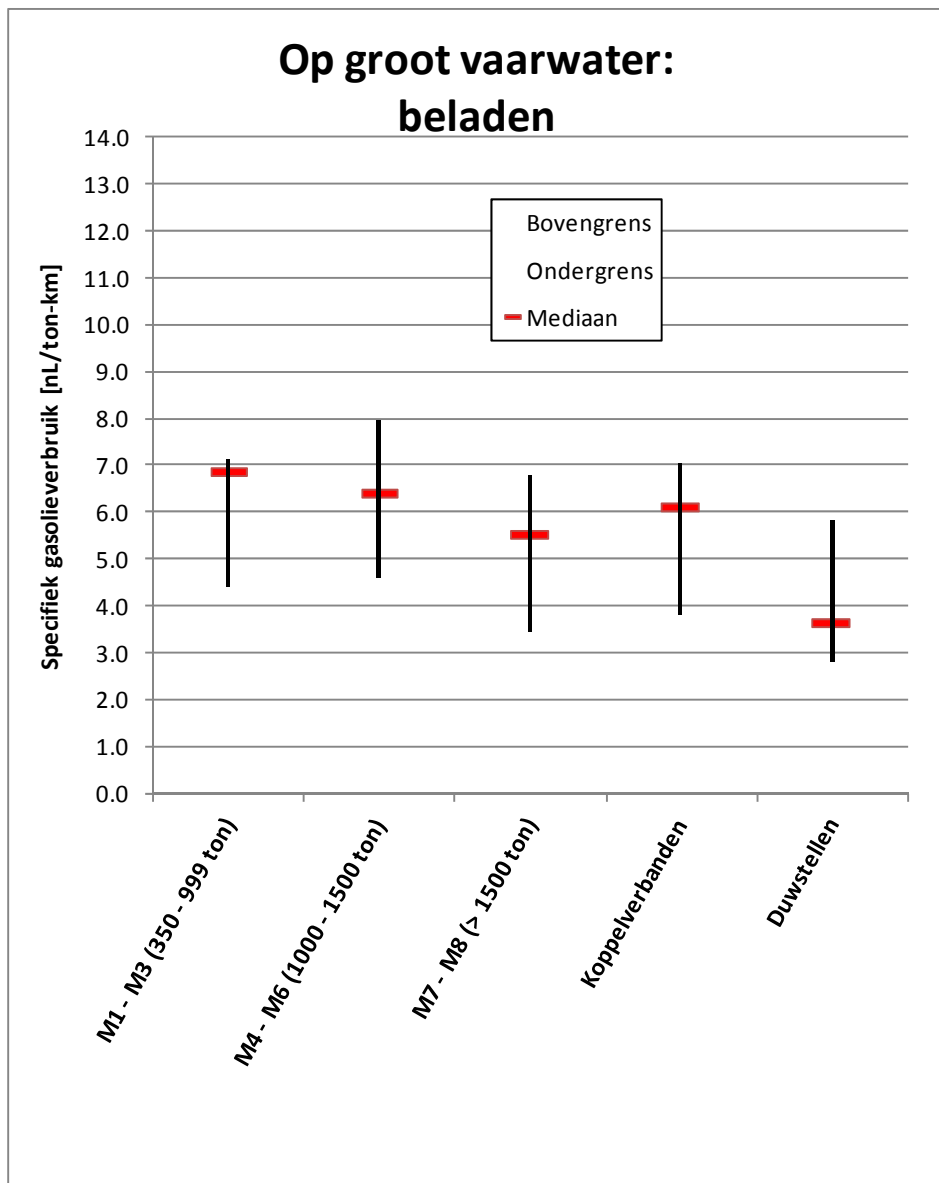
Verondersteld is dat het brandstofverbruik van hulpmotoren (boegschroef, generator etc.) in de gegevens uit de praktijk is inbegrepen. In de modelberekeningen is met dit extra verbruik enigszins rekening gehouden door uit te gaan van een wat slechter motorrendement. In voetnoot³ wordt geschat dat dit extra verbruik circa 13% van het verbruik van de hoofdmotor is, met een grote onzekerheidsmarge.

¹ Voorbeelden met onderbelading zijn hierbij niet meegenomen.

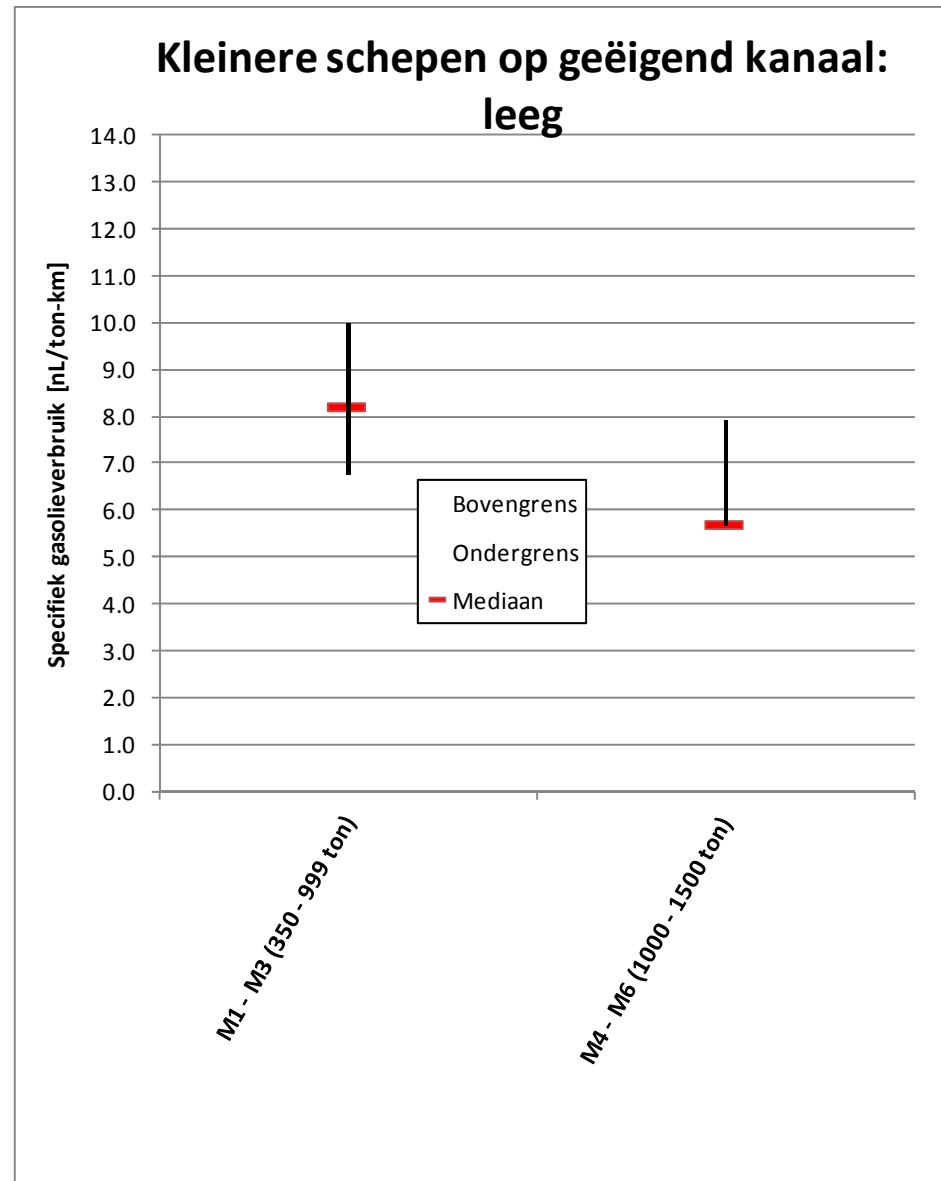
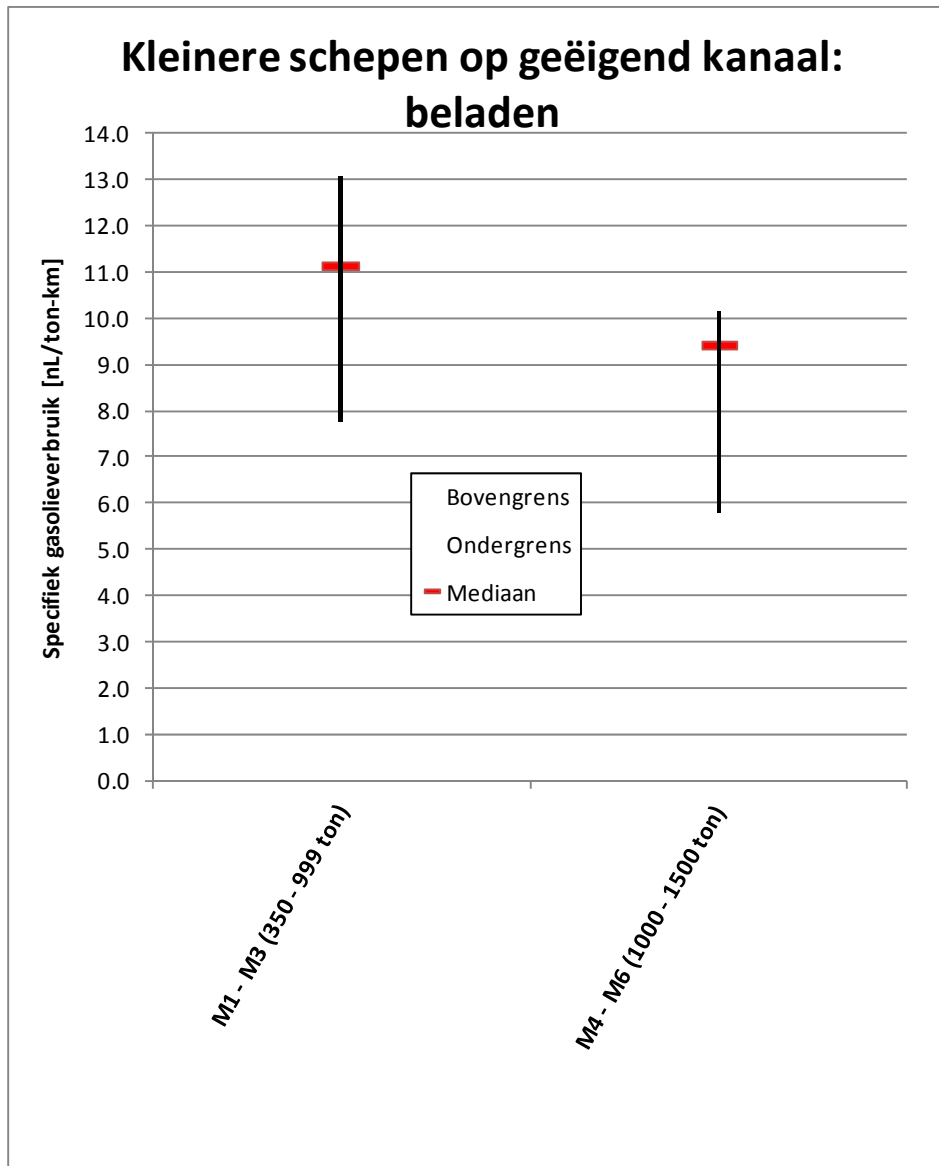
² Bij een klein aantal "waarnemingen" geven mediaan en percentielen een representatiever beeld dan gemiddelde en spreiding omdat ze minder gevoelig zijn voor uitbijters"; zie: http://nl.wikipedia.org/wiki/Mediaan_%28statistiek%29

³ Hulsokotte, J, Bolt, E, Broekhuizen, D, 2003, EMS-protocol Emissies door Binnenvaart: Verbrandingsmotoren

2. Op groot vaarwater



3. Kleinere schepenstypen op geëigend kanaal



Bijlage 4: Resultaten DTU modelberekeningen in grafiekvorm

Inhoudsopgave

1. Motorschepen op groot vaarwater (400.00 x 5.00 m ²).....	2
2. Spits (38.70*5.05*2.50)	3
3. O. Teubert (53.00*6.30*2.50)	4
4. Johann Welker (80.00*9.50*2.50)	5
5. GMS tanker (110.00*11.40*3.50).....	6
6. GMS_105m + Europa II Koppelverband (185.00*11.40*2.50).....	7
7. Duwstellen	8
8. Johann Welker (80.00*9.50*2.50) in 100m brede vaarweg en diverse vaarwegdieptes en beladingsgraden	9

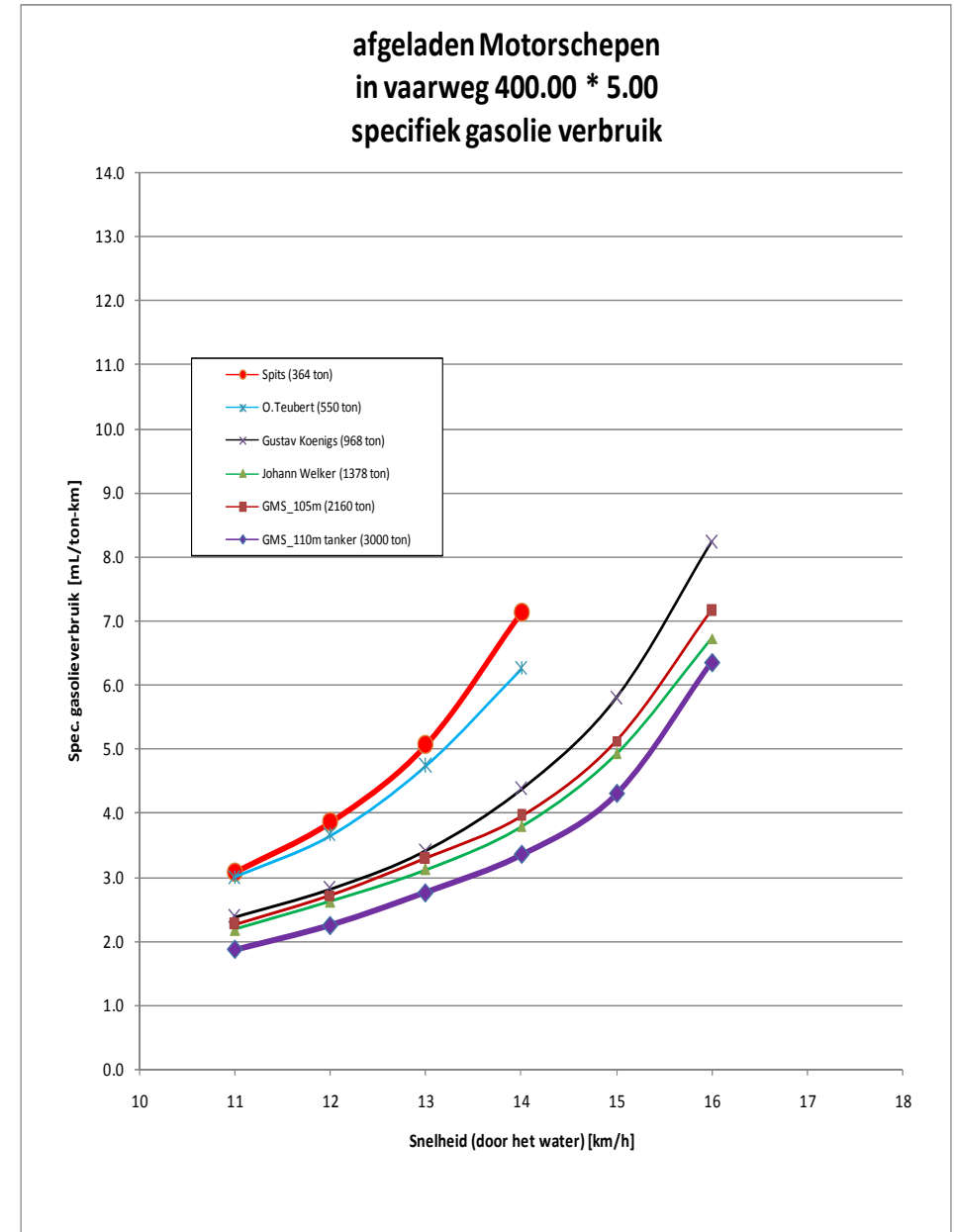
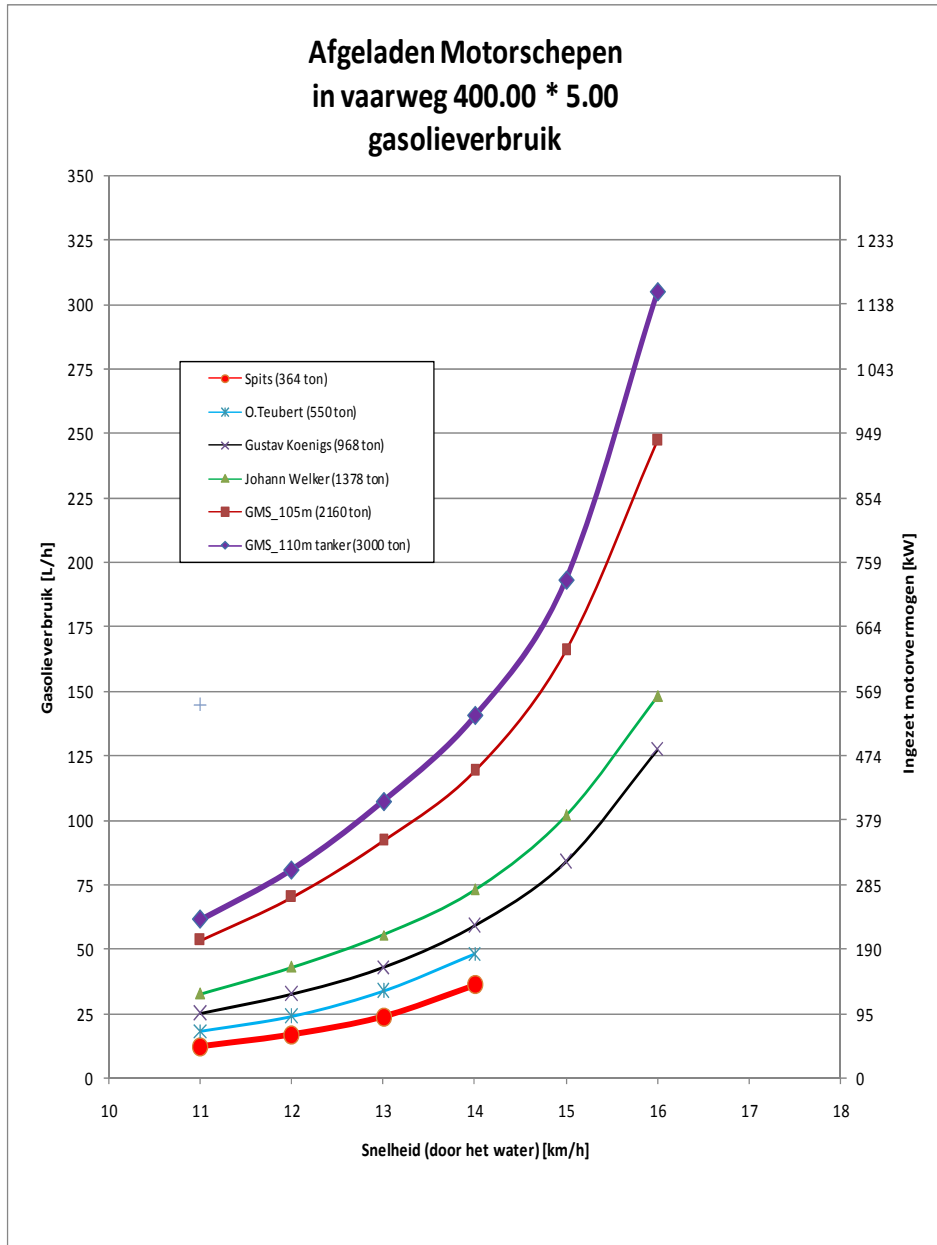
Bron: Georgakaki, A, Sorenson, S.C., 2004, *Report on collected data and resulting methodology for inland shipping*.

Dit rapport is door de Danmarks Tekniske Universitet opgesteld in het kader van het EU project Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems.

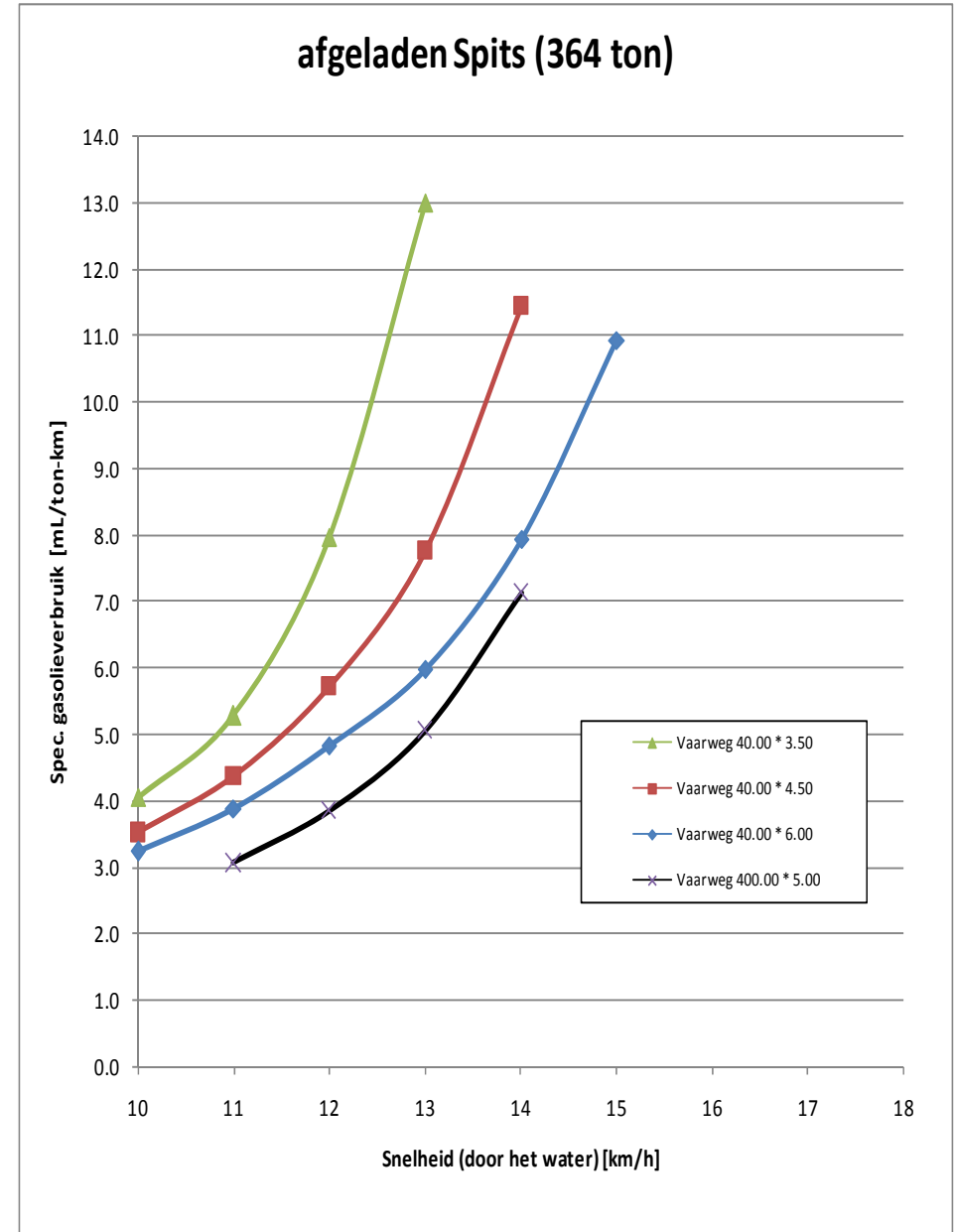
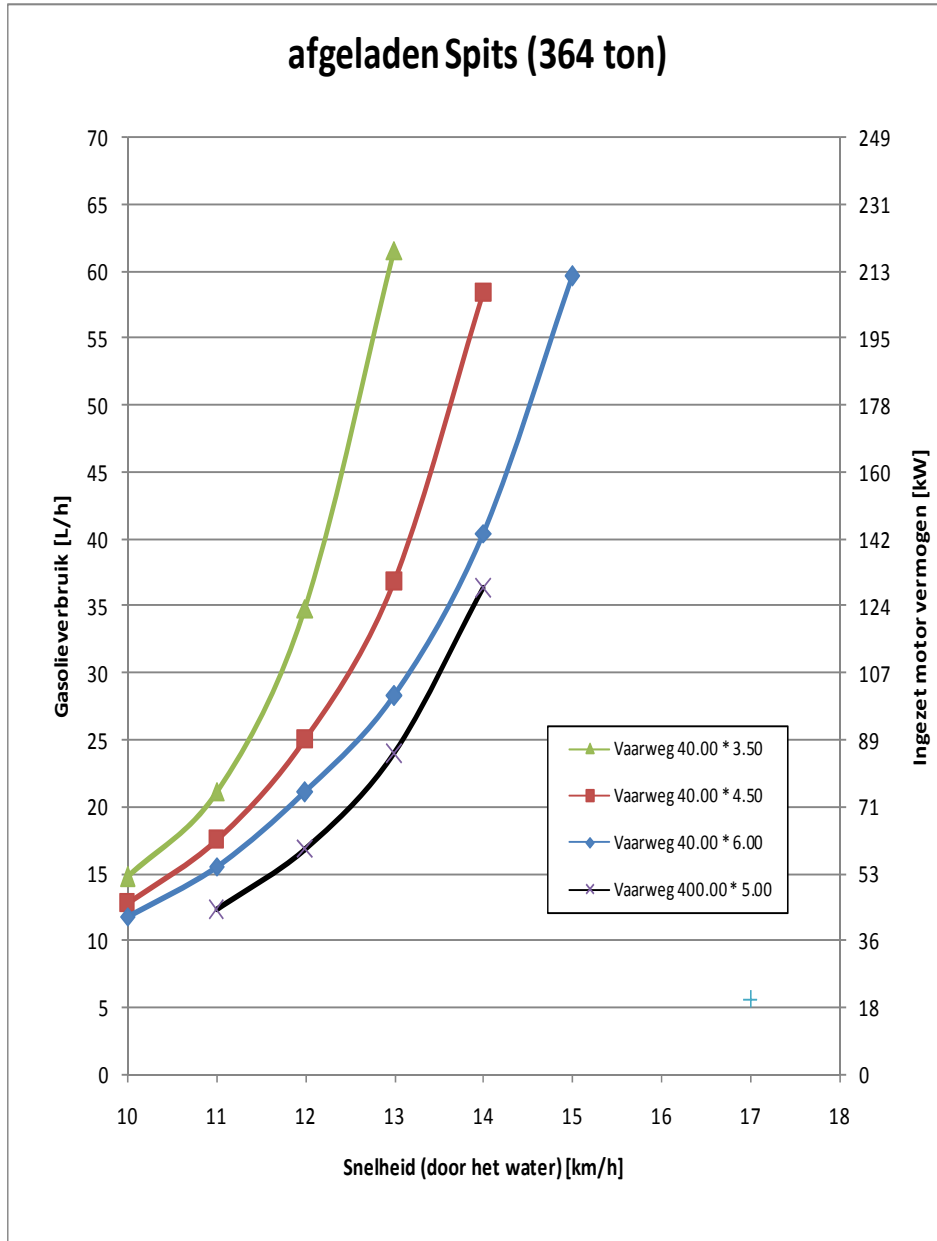
Er is een gedetailleerd model ontwikkeld dat gevalideerd is met theoretische en praktijk gegeven, o.a. van VBD.

Vermelde snelheden betreffende de snelheid door het water. Zie bijlage 5 voor de omrekening naar de vaart op stromend water.

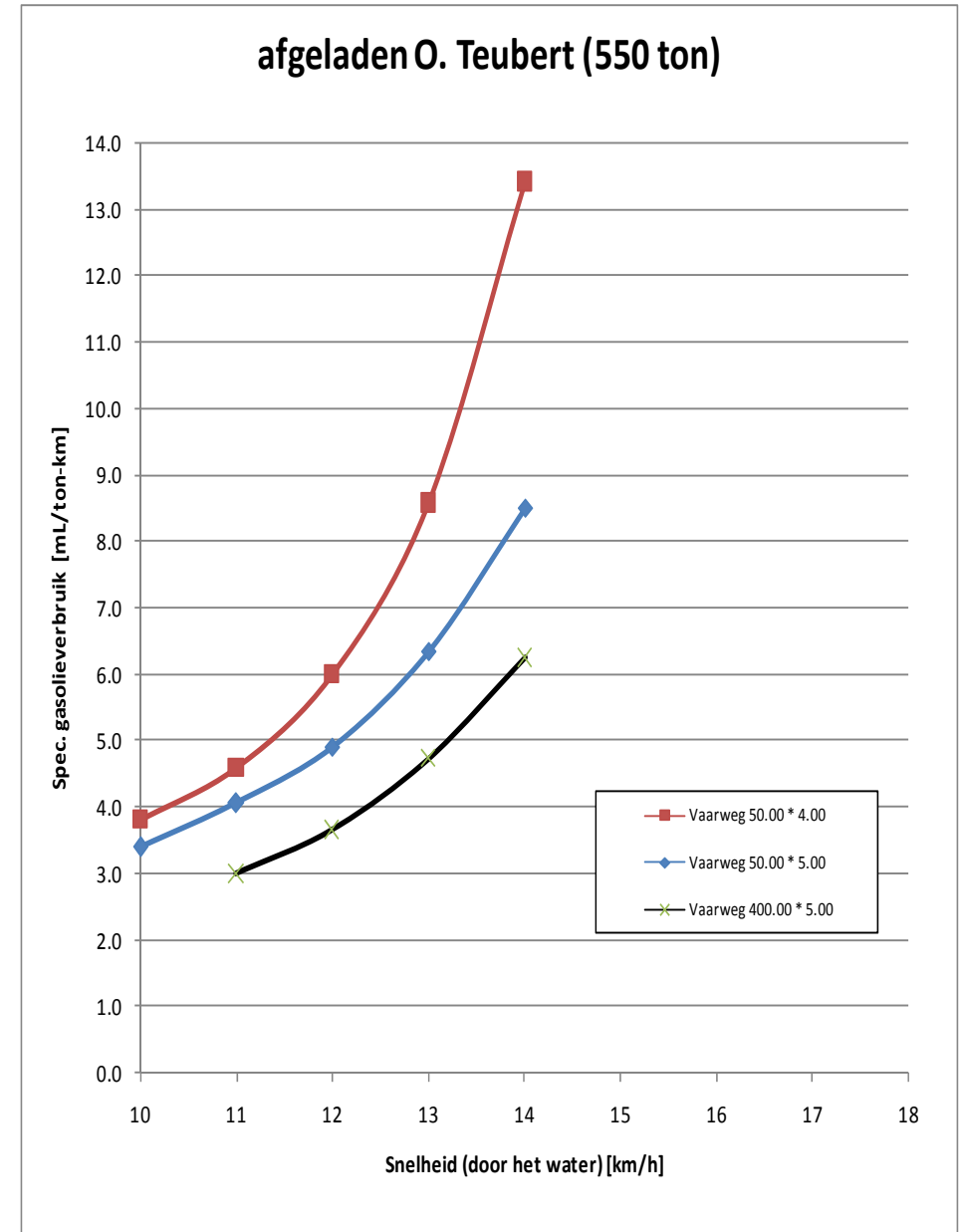
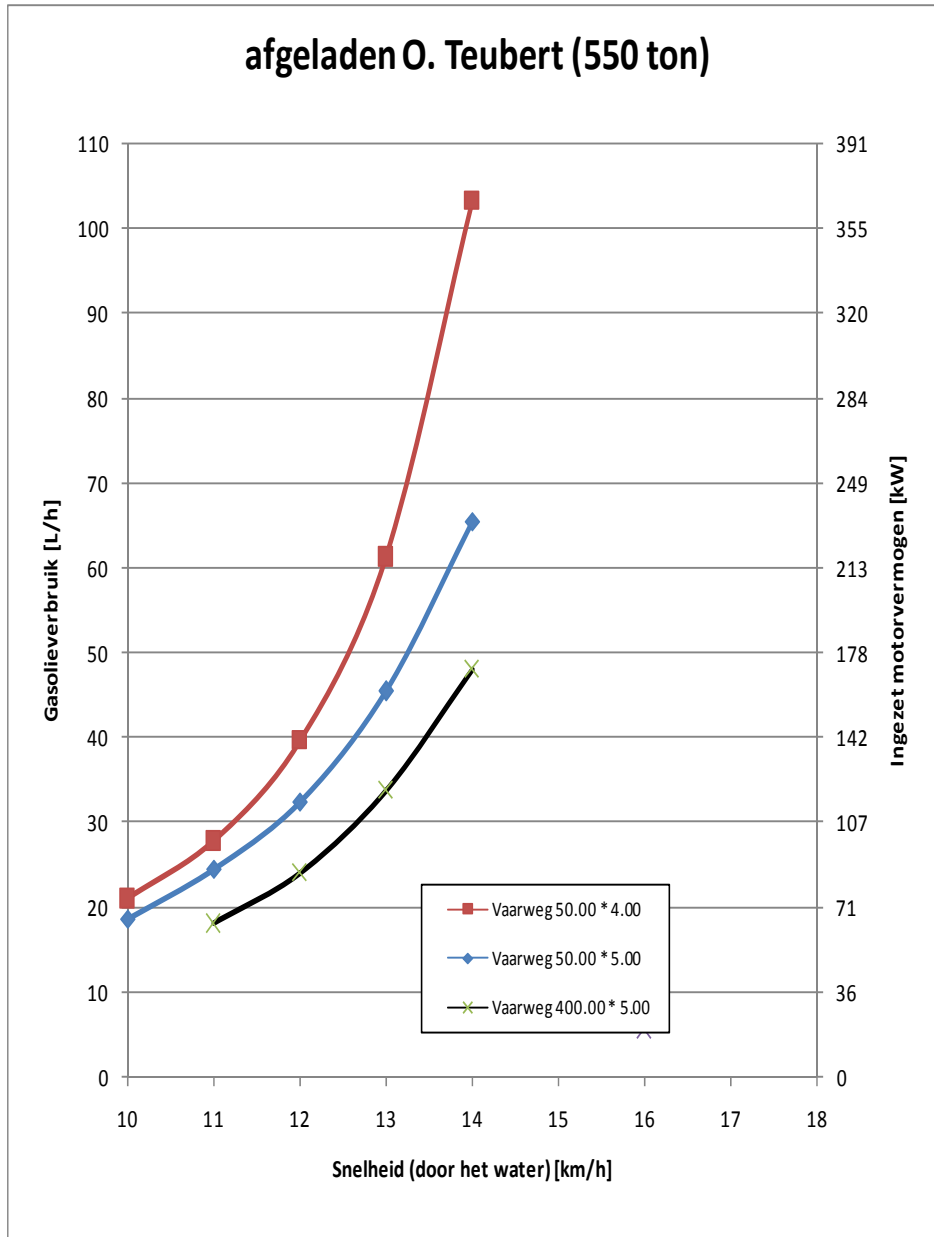
1. Motorschepen op groot vaarwater (400.00 x 5.00 m²)



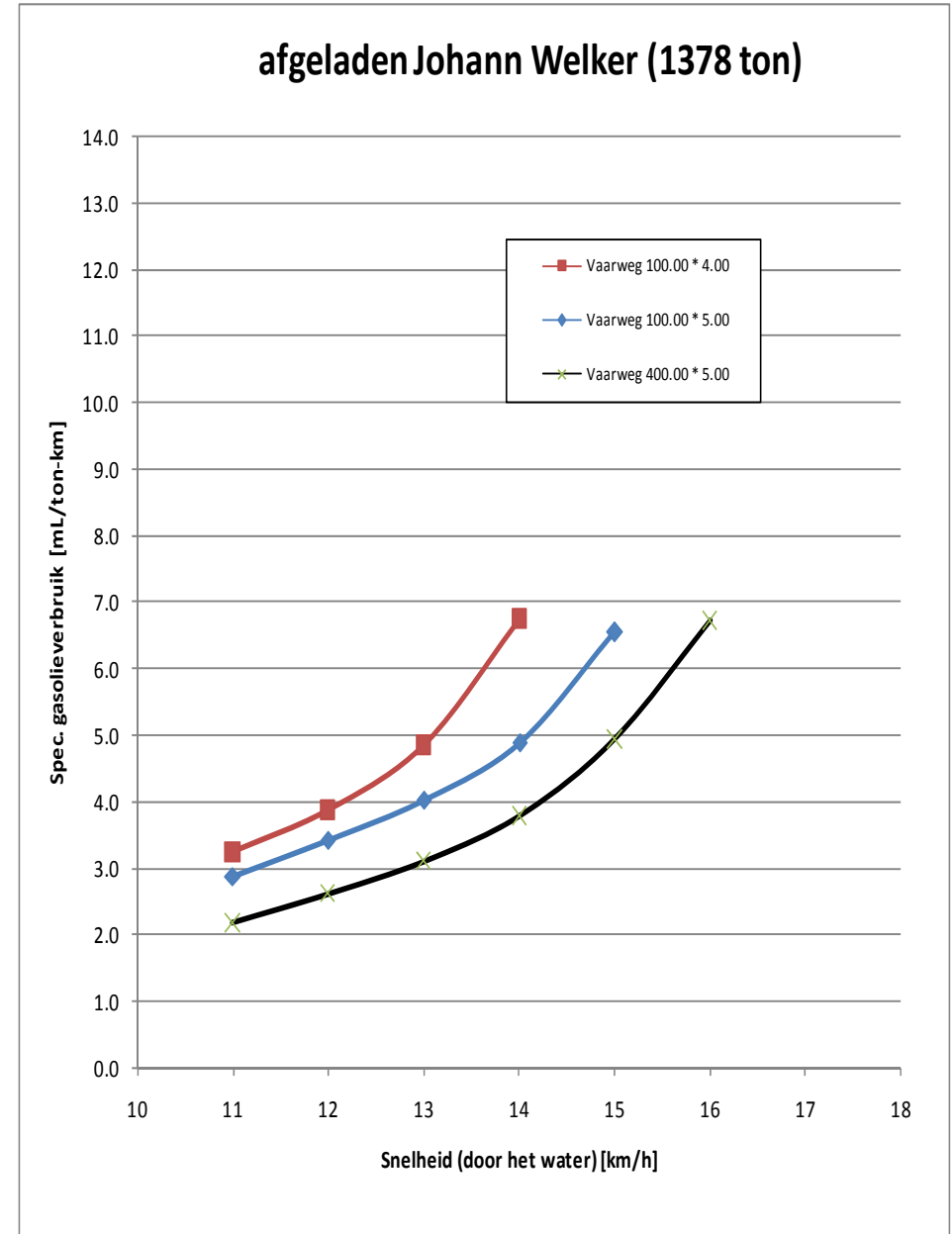
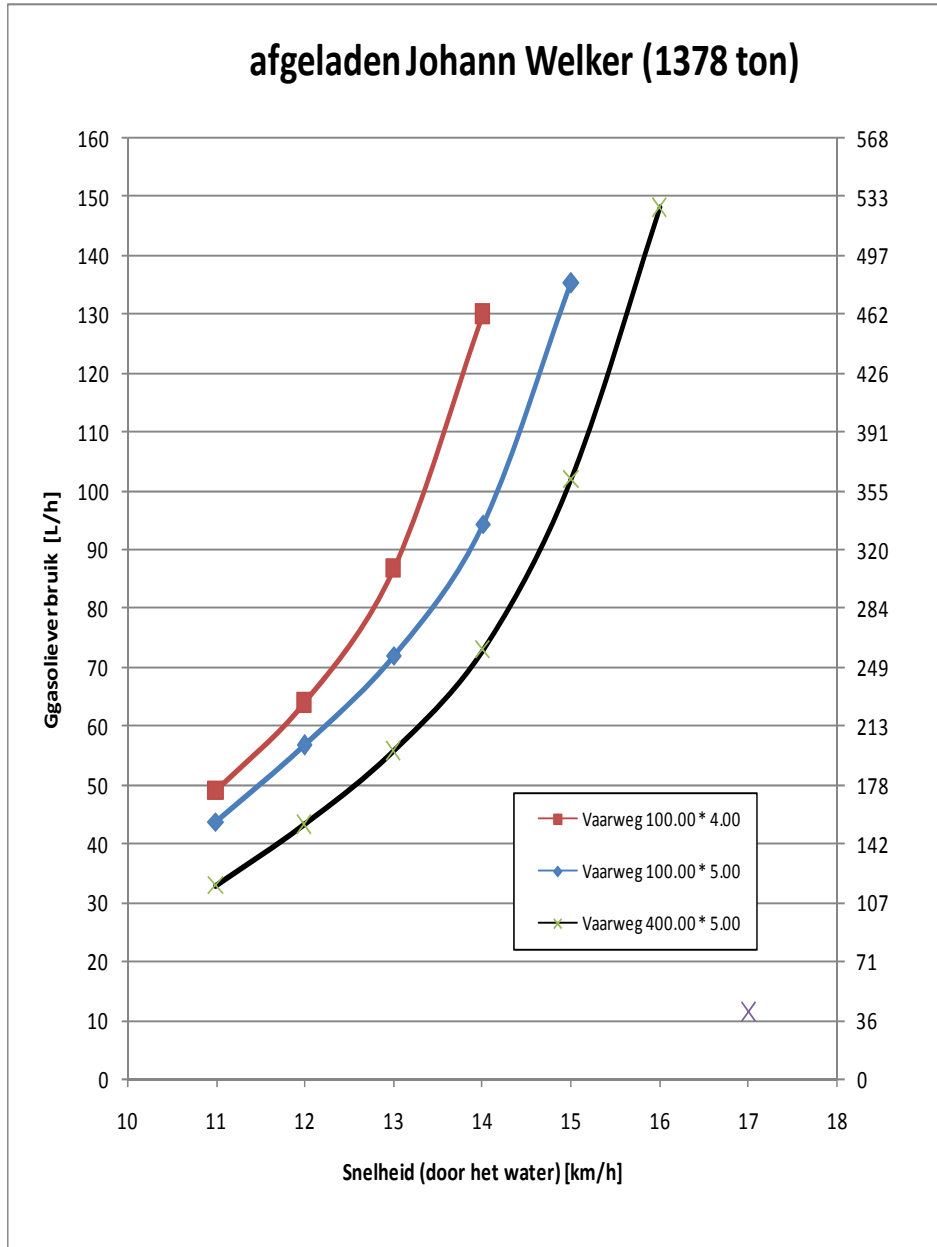
2. Spits (38.70*5.05*2.50)



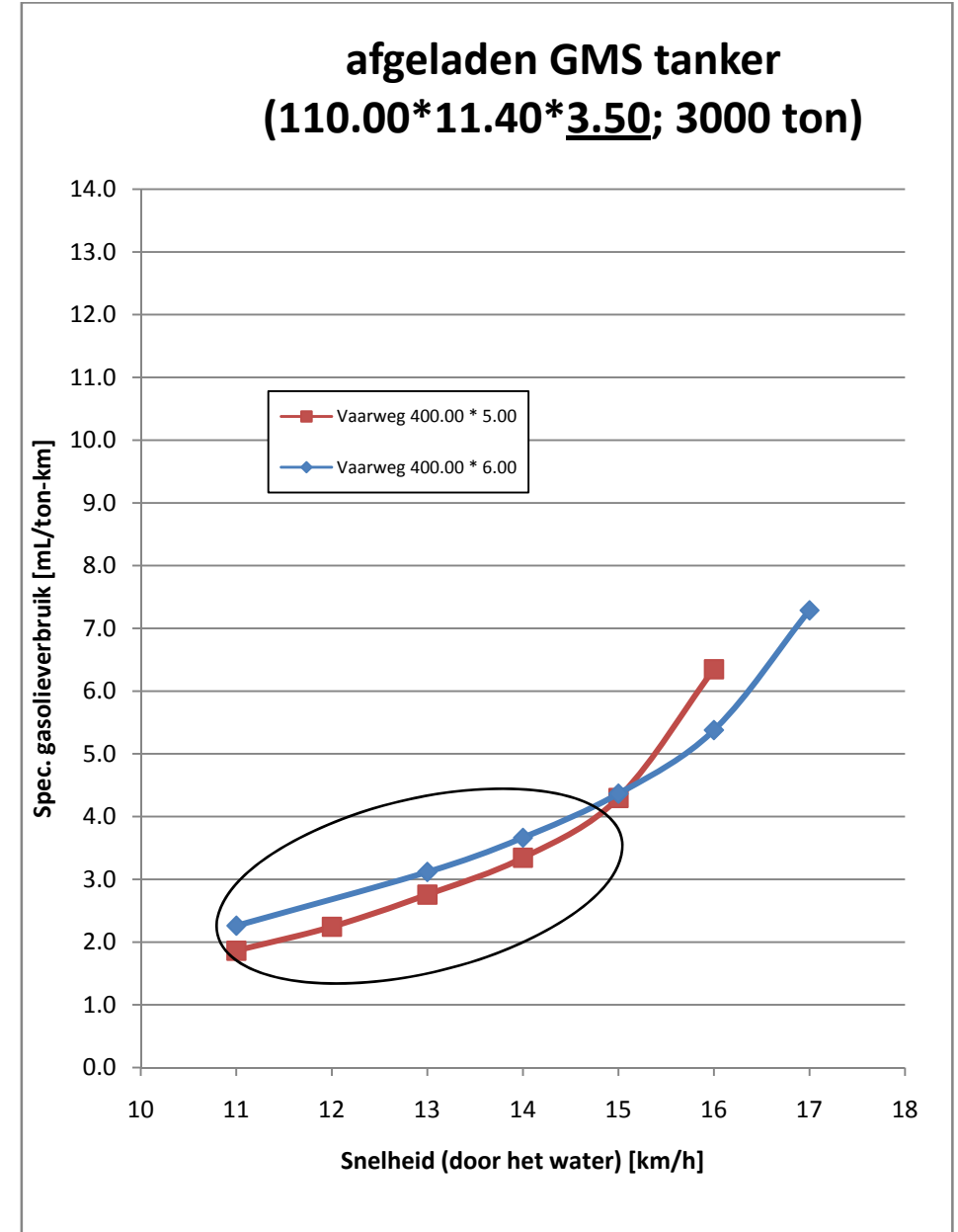
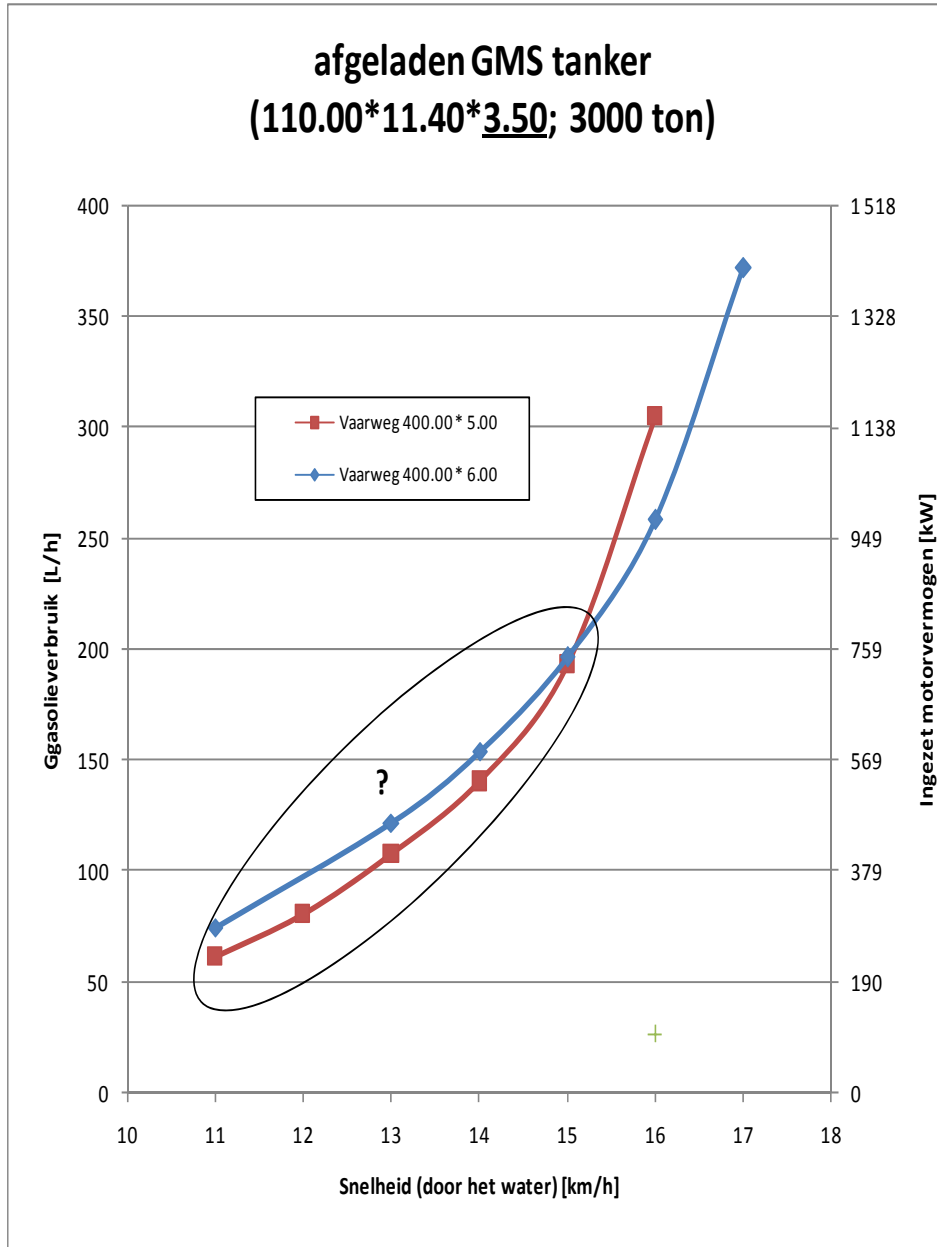
3. O. Teubert (53.00*6.30*2.50)



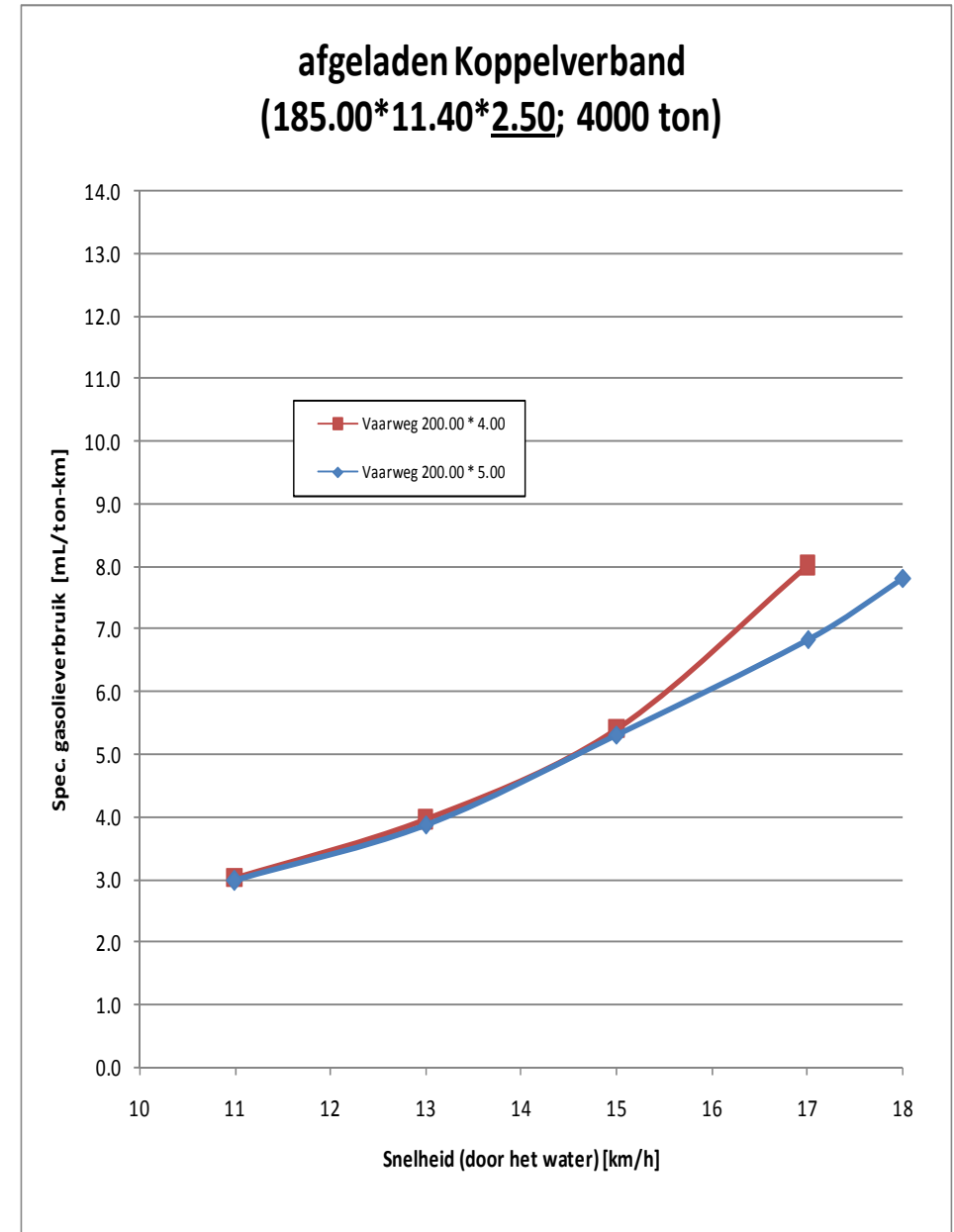
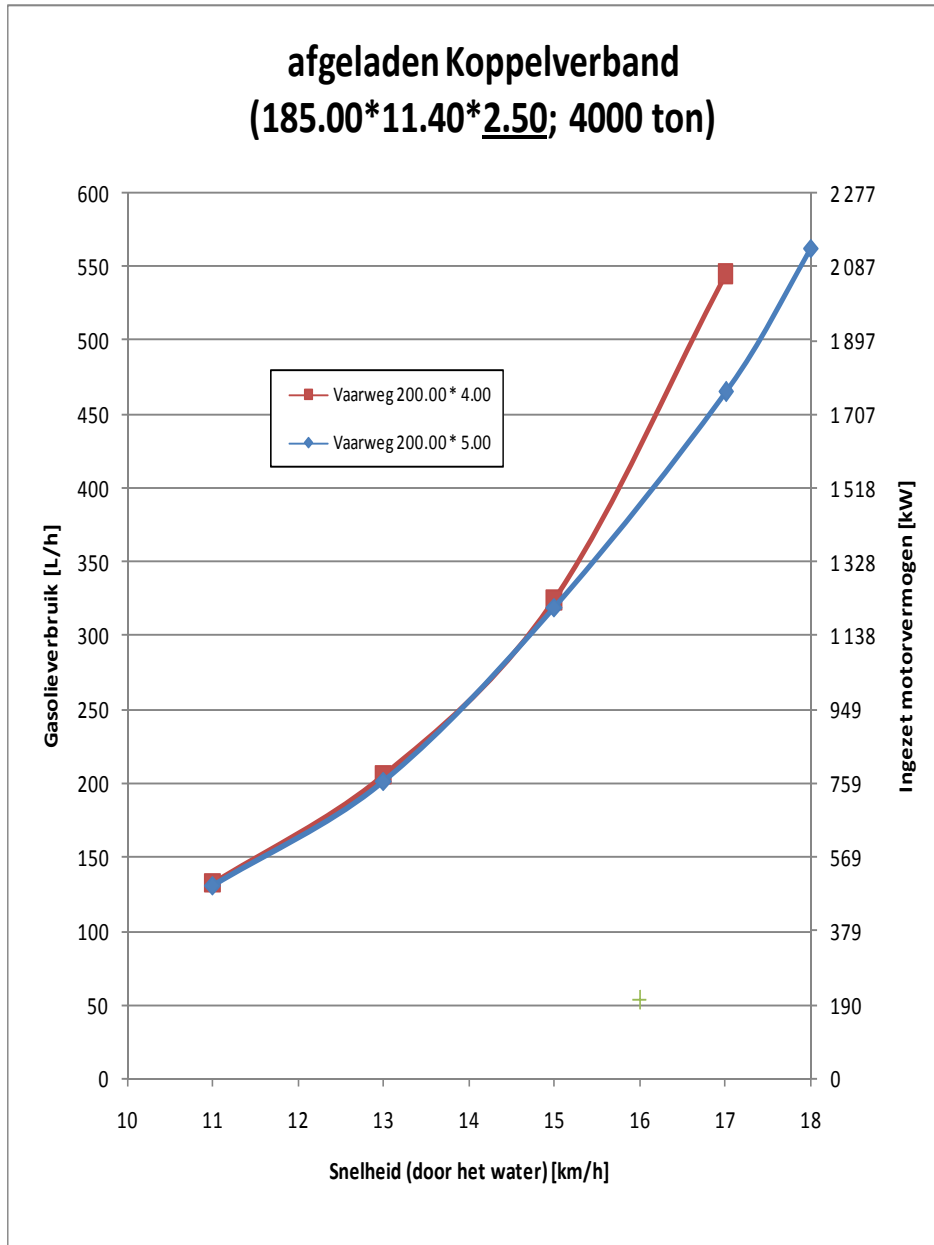
4. Johann Welker (80.00*9.50*2.50)



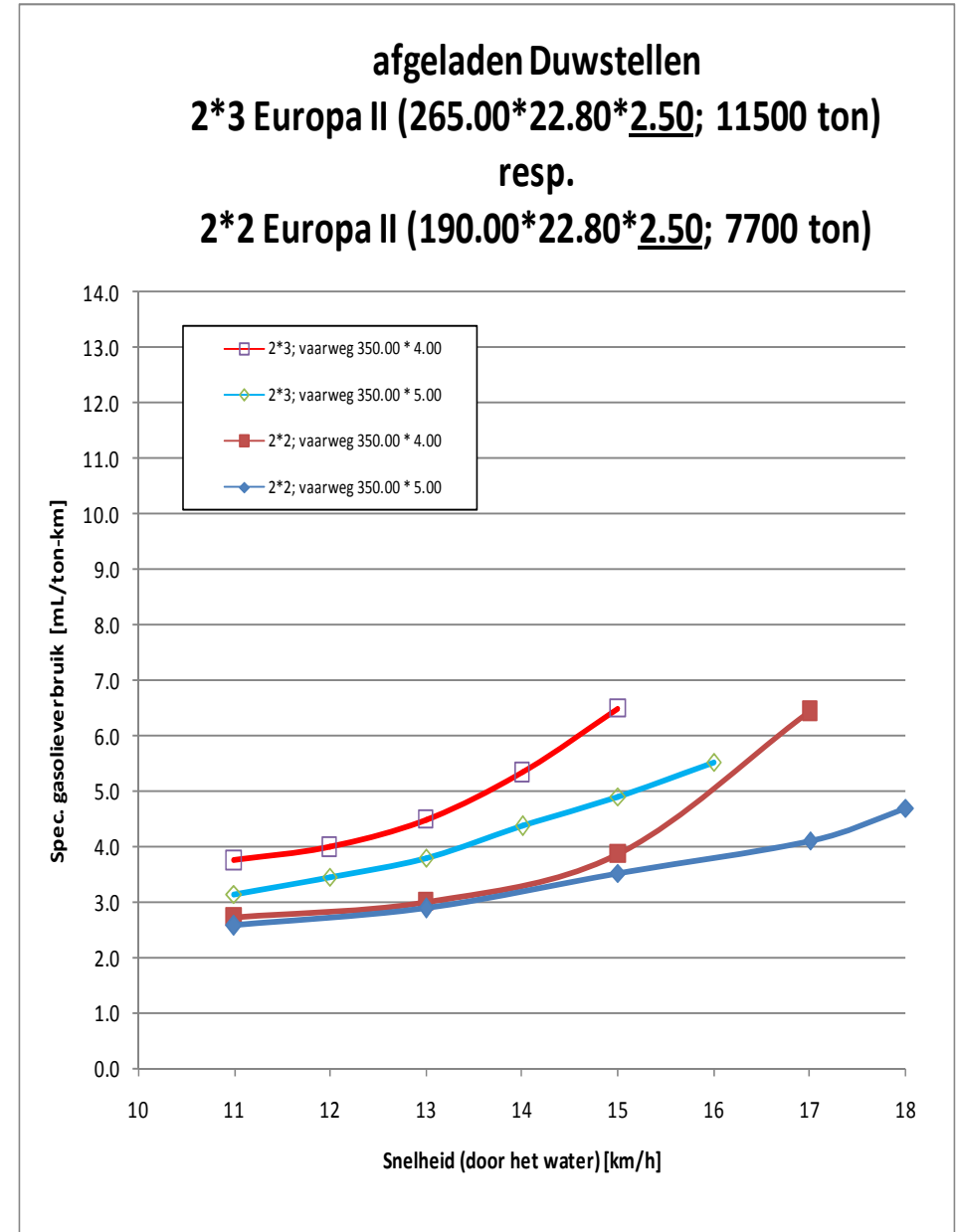
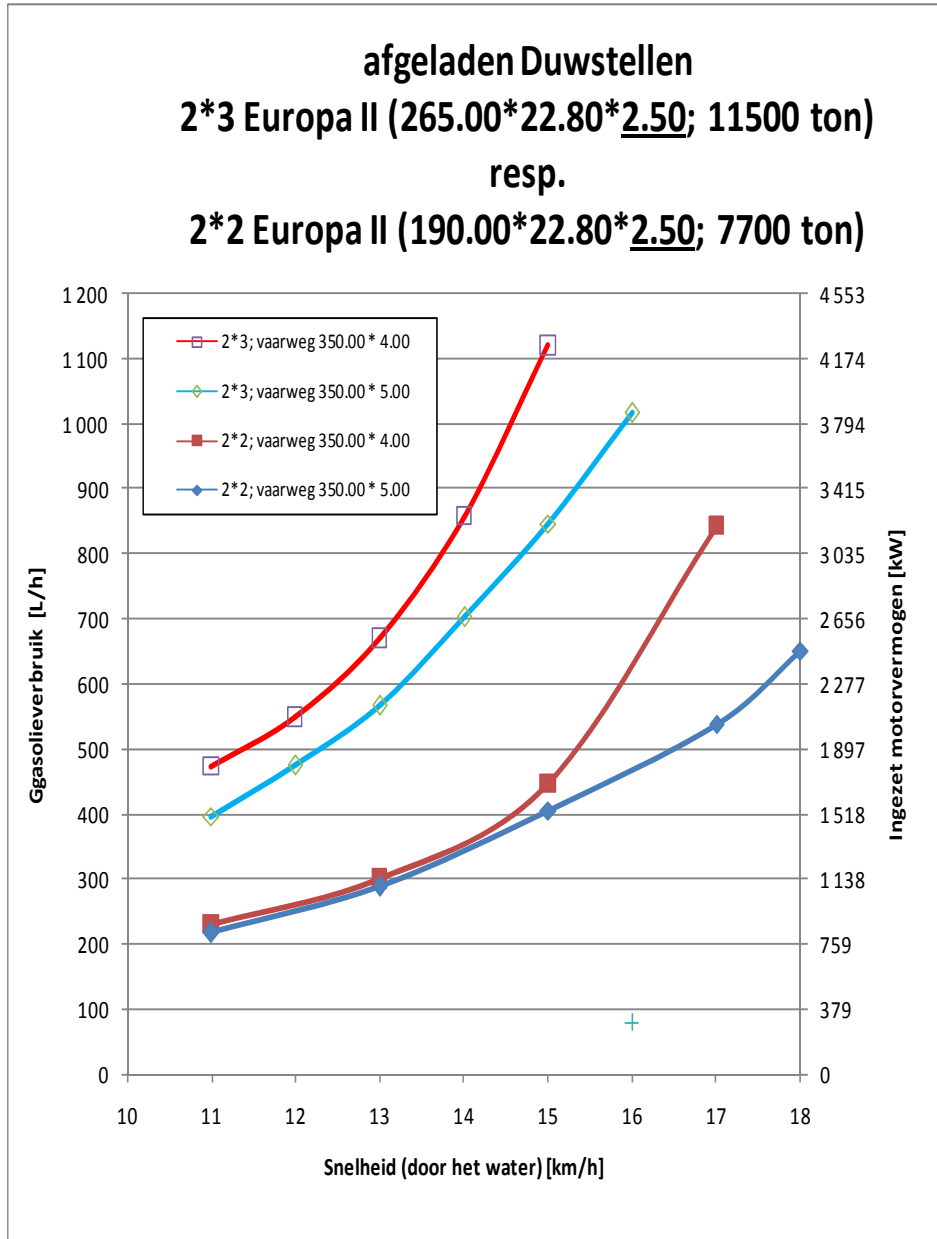
5. **GMS tanker (110.00*11.40*3.50)**



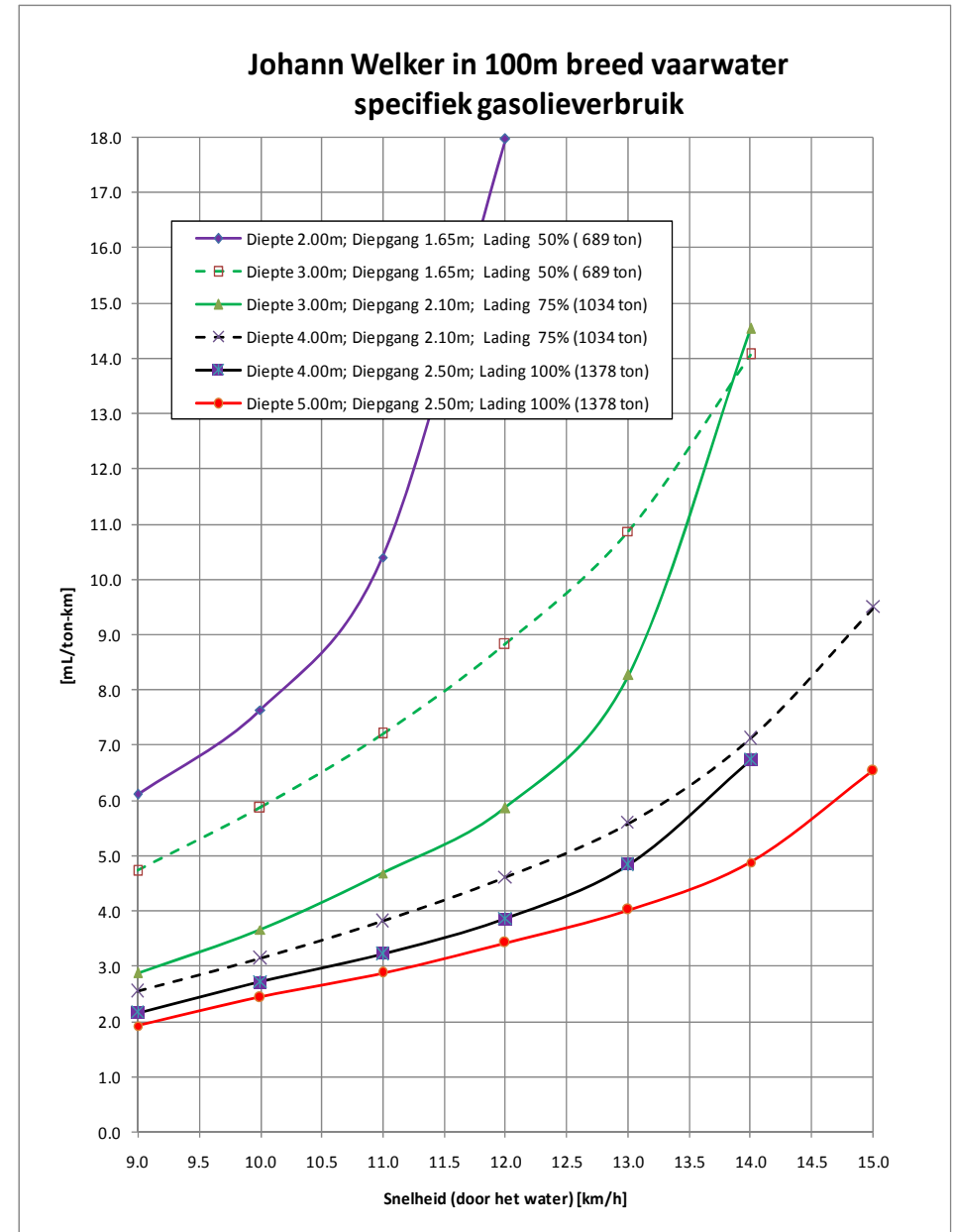
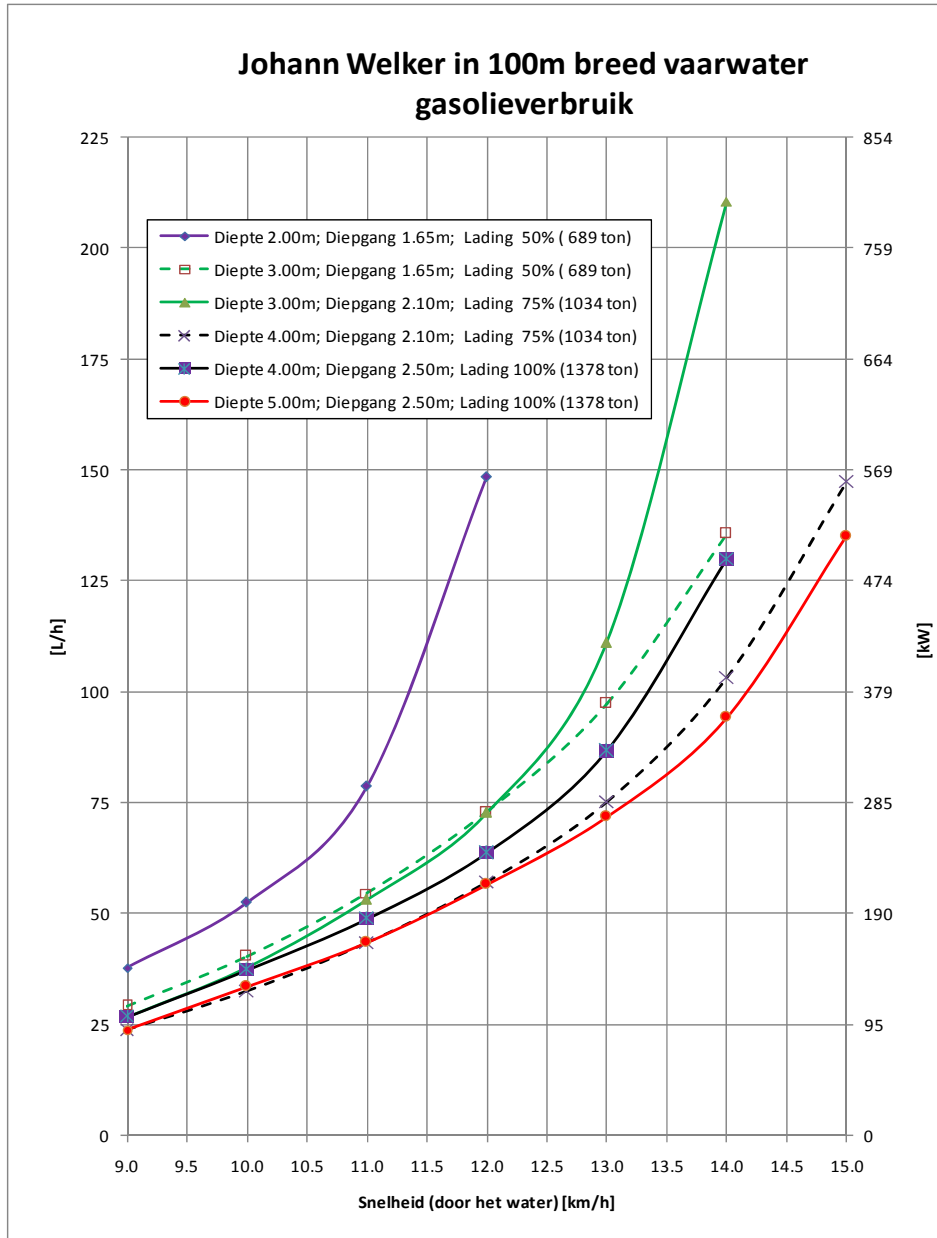
6. GMS_105m + Europa II Koppilverband (185.00*11.40*2.50)



7. Duwstellen



8. **Johann Welker (80.00*9.50*2.50) in 100m brede vaarweg en diverse vaarwegdieptes en beladingsgraden**



Bijlage 5: Wat soms handige kan zijn om te weten

Inhoudsopgave

1. Motortechniek	1
2. Vaarweg in het perspectief van scheepsweerstand	2
3. Stroom	2
3.1. Met hoeveel stroom op de rivieren rekening houden?	2
3.2. Omrekening van "op stilstaand water" naar "op stroom"	3
3.3. Omrekening van "op stroom" naar "op stilstaand water"	3
3.4. Intermezzo: een "quiz vraag" over het varen op stroom	3
4. Overige omrekeningen	4
4.1. Omrekenen naar een andere snelheid door het water	4
4.2. Omrekening naar een andere motorinzet	4
4.3. Omrekenen naar een ander verbruik bij gelijke snelheid	4
4.4. Omrekenen naar een andere vaarweg of een andere lading	4
5. Tot slot, voor de "fijnproevers", wat hydrodynamische zijpaden	5
5.1. Wat is golfweerstand?	5
5.2. Golfweerstand op zeer diep vaarwater	5
5.3. Golfweerstand op ondiep vaarwater	5
5.4. "Squat" en "blockage"	5

1. Motortechniek

Gasolie				Platts en ICE (ter info):					
Stookwaarde	[MJ/kg]	42.70		0.845					
Soortelijke massa	[kg/L]	0.835		1.184					
Soortelijk volume	[L/kg]	1.198							
CO ₂ emissie ¹	[g/L]	2613							
SO ₂ emissie ¹	[g/L]	0.017							
(uitgaande van zw avelgehalte 10 ppm)									
(tot ultimo 2010 was het zw avelgehalte 0.1% -> 1.7 [g/L])									
Vermogen									
1 PK / 1 kW	[PK/kW]	0.736							
Motor	Rendement				Emissie per liter verbruikte gasolie ¹				
Bouwjaar	%	[MJ/kWh]	[g/kWh]	[mL/kWh]	[mL/PKh]	NO _x [g/L]	PM [g/L]	CO [g/L]	VOS [g/L]
< 1974	35.9%	10.0	235	282	207	36	2.1	16.0	4.3
1985 - 1989	38.3%	9.4	220	264	194	61	1.9	9.9	2.3
≥ 2002	42.2%	8.5	200	240	176	33	1.3	6.3	1.3
Gasolie verbruik									
Rendement [g/kWh]	Vermogen		Verbruik [L/h]						
	[kW]	[PK]							
235	1 000	1 359	282						
220	1 000	1 359	264						
200	1 000	1 359	240						
235	736	1 000	207						
220	736	1 000	194						
200	736	1 000	176						
235	355	483	100						
220	379	516	100						
200	417	567	100						

¹ Afgeleid uit: Hulskotte, J. (TNO MEP), Bolt, E. (AVV), Broekhuizen, D. (AVV), 2003, *EMS-protocol Emissie door Binnenvaart: Verbrandingsmotoren (versie 3)*, waarbij het zw avelgehalte van gasolie is verlaagd van 0.17% naar 10 ppm "Emissie" is exclusief "well to tank".

2. Vaarweg in het perspectief van scheepsweerstand

M.b.t. de scheepsweerstand zijn de belangrijkste kenmerken van de vaarweg:

- de diepte [m]
- de dwarsdoorsnee [m²]

Door taluds onderwater is het quotiënt $\frac{\text{dwarsdoorsnede}}{\text{diepte}}$ veelal kleiner dan de vaarwegbreedte ¹:

Vaarweg	Doorsnede A _c [m ²]	Breedte b [m]	A _c / h = b' [m]	Diepte h [m]
CEMT I	67	46	22	3.10
CEMT II	83	50	24	3.50
CEMT III	112	53	32	3.50
CEMT IV	150	70	38	3.90
CEMT Va	196	79	40	4.90
CEMT Vb	232	75	41	5.60
CEMT VI	600	100	100	6.00
Waal	1125	250	250	4.50
IJssel	320	100	100	3.20
Lek	750	150	150	5.00

Opmerkingen

- Vermoed kan worden dat in sommige studies (impliciet) wordt uitgegaan van vaarwegen met een rechthoekige doorsnede. Als hierbij onder "breedte" waarden worden gehanteerd die min of meer overeenkomen met b' is dat rekentechnisch niet verkeerd.
- Op kanalen geldt een diepgangbeperking en (soms alleen voor beladen schepen) een snelheidsbeperking, beide om schade aan de kanaalinfrastructuur te voorkomen.
V_{max} = 9, 11 à 12, of 18 km/h is hierbij niet ongebruikelijk.
- Op de Duitse Rijn wordt geëist dat een schip minimaal 13 km/h over het water moet (kunnen) varen.

3. Stroom

3.1. Met hoeveel stroom op de rivieren rekening houden?

Hoeveel stroom er op enig moment staat hangt af van de actuele rivierafvoer.

Een indicatie voor de stroom bij gemiddelde rivierafvoer is:

Indicatie stroom bij een gemiddelde rivierafvoer	[km/h]
Voor de Rijn wordt in Duitse studies meestal uitgegaan van gemiddeld: Plaatselijk kan het natuurlijk meer of minder zijn.	6
Ook op de gestuwde riviervlakken staat stroom, b.v. de Rijn boven Iffezheim (km 334) ² :	3 - 5
Moezel en Saar (afgezien van na abnormaal zware regenval) ²	1½ - 2
Koblenz - Gorinchem ²	5
IJsselkop - Deventer (daarna afnemend) ²	4
Maas (bij gestuwde rivier) ²	1½ - 2

¹ Gegevens die in 2003 zijn gebruikt in het project Emissieregistratie en Monitoring Scheepvaart (EMS)

² ANWB gegevens; praktijk info van Jan Veldman

3.2. Omrekening van "op stilstaand water" naar "op stroom"

Stel:

V	[km/h]	snelheid van het schip op stilstaand water
S	[km/h]	stroomsnelheid (mee +, tegen -)
$spec_verbr_0$	[ml/ton-km]	specifiek gasolie verbruik bij snelheid V op stilstaand water
$spec_verbr_1$	[ml/ton-km]	idem, maar nu op stromend water

Bij ongewijzigde motor inzet (en dus gelijk gasolieverbruik [L/h]) geldt exact:

$$spec_verbr_1 = spec_verbr_0 \times \frac{V}{V+S} \left(= spec_verbr_0 \times \frac{1}{1+S/V} \right)$$

Voorbeelden:

$V = 16.0, S = +6.0, spec_verbr_0 = 7.0 \rightarrow spec_verbr_1 = 7.0 \times 0.73 = 5.1 \text{ mL/ton-km}$

$V = 16.0, S = -6.0, spec_verbr_0 = 7.0 \rightarrow spec_verbr_1 = 7.0 \times 1.60 = 11.2 \text{ mL/ton-km}$

$V = 12.0, S = -6.0, spec_verbr_0 = 7.0 \rightarrow spec_verbr_1 = 7.0 \times 2.00 = 14.0 \text{ mL/ton-km}$

Uit de formule tussen haakjes en de voorbeelden blijkt dat m.b.t. $spec_verbr_1$ schepen met een lage scheepssnelheden veel gevoeliger zijn voor stroom dan schepen met een hoge scheepssnelheid.

3.3. Omrekening van "op stroom" naar "op stilstaand water"

Onder dezelfde definities als in § 3.2 en bij ongewijzigde motor inzet geldt exact:

$$spec_verbr_0 = spec_verbr_1 \times \frac{V+S}{V} = \left(spec_verbr_1 \times \left(1 + \frac{S}{V} \right) \right)$$

3.4. Intermezzo: een "quiz vraag" over het varen op stroom

Stel:

- Situatie a: Een schip vaart beladen te berg met snelheid V door het water en na lossen en opnieuw laden te daal met dezelfde snelheid door het water terug;
- Situatie b: Idem, maar nu heen en terug met dezelfde snelheid V op stilstaand water.

De "quiz vraag": is in deze beide situaties het totaal gasolieverbruik GT [L/ton] gelijk?

Het juiste antwoord is: NEE.

Dat komt doordat *in tijd gerekend* in de opvaart het schip langer de tegenstroom moet verduren dan in de dalvaart het genoeg van de stroom mee wordt genoten.

Met de formule in § 3.2 van deze bijlage is dit eenvoudig aan te tonen:

Stel dat de enkele reis traject-lengte een $\frac{1}{2}$ km is, dan geldt:

$$GT_a - GT_b = \frac{1}{2} \times spec_verbr_0 \times \frac{V}{V-S} + \frac{1}{2} \times spec_verbr_0 \times \frac{V}{V+S} - \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right) \times spec_verbr_0$$

$$GT_a - GT_b = spec_verbr_0 \times \frac{1}{(V/S)^2 - 1} \quad \text{en dat is } > 0 \text{ als } V > S, \text{ waaraan altijd wordt voldaan!}$$

Voorbeelden:

$V = 16.0, S = 6.0, spec_verbr_0 = 7.0 \rightarrow GT_a - GT_b = 7.0 \times 0.16 = 1.1 \text{ [mL/ton]}$

$V = 12.0, S = 6.0, spec_verbr_0 = 7.0 \rightarrow GT_a - GT_b = 7.0 \times 0.33 = 2.3 \text{ [mL/ton]}$

Ook in deze "quiz" blijkt het langzame schip veel gevoeliger voor stroom dan het snelle ³.

³ In EcoTransit, 2010, *Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports, Methodology and Data*, pagina 64 wordt hieraan voorbij gegaan.

4. Overige omrekeningen

4.1. Omrekenen naar een andere snelheid door het water

Stel dat bekend is:

V_0	[km/h]	snelheid van het schip door stilstaand water
$verbr_0$	[L/h]	gasolieverbruik bij V_0 door stilstaan water
$spec_verbr_0$	[ml/ton-km]	specifiek gasolieverbruik bij snelheid V_0 op stilstaand water

En noem deze parameters voor een te berekenen variant: V_1 , $verbr_1$ en $spec_verbr_1$.

Als in een snelheidsvariant V_1 procentueel niet veel afwijkt van V_0 , dan geldt bij benadering:

$$verbr_1 = verbr_0 \times \left(\frac{V_1}{V_0}\right)^3$$

⁴

$$spec_verbr_1 = spec_verbr_0 \times \left(\frac{V_1}{V_0}\right)^2$$

Voorbeelden:

$$\begin{aligned} verbr_0 &= 80, V_0 = 14.0, V_1 = 1.10 \times 14.0 = 15.4 \rightarrow verbr_1 = 80 \times 1.49 = 106 \text{ L/h} \\ spec_verbr_0 &= 7.0, V_0 = 14.0, V_1 = 1.10 \times 14.0 = 15.4 \rightarrow spec_verbr_1 = 7.0 \times 1.31 = 8.5 \text{ mL/ton-km} \end{aligned}$$

4.2. Omrekening naar een andere motorinzet

Als in een motorinzet variant, (onder dezelfde definities als in § 4.1) $verbr_1$ procentueel niet veel afwijkt van $verbr_0$, dan geldt bij benadering:

$$V_1 = V_0 \times \sqrt[3]{\frac{verbr_1}{verbr_0}}$$

$$spec_verbr_1 = spec_verbr_0 \times \sqrt[2]{\frac{verbr_1}{verbr_0}}$$

Voorbeelden:

$$\begin{aligned} V_0 &= 14.0, verbr_0 = 80, verbr_1 = 1.10 \times 80 = 88 \rightarrow V_1 = 14.0 \times 1.03 = 14.5 \text{ km/h} \\ spec_verbr_0 &= 7.0, verbr_0 = 80, verbr_1 = 1.10 \times 80 = 88 \rightarrow spec_verbr_1 = 7.0 \times 1.05 = 7.3 \text{ mL/ton-km} \end{aligned}$$

4.3. Omrekenen naar een ander verbruik bij gelijke snelheid

De nu voorliggende vraag is wat het effect is van een verandering van het motor- of schroefrendement, of de wrijving van de romp etc.

Stel:

$verbr_0$	[L/h]	gasolieverbruik	<u>voor</u> de verandering
$verbr_1$	[L/h]	gasolieverbruik	<u>na</u> de verandering
$spec_verbr_0$	[ml/ton/km]	specifiek gasolieverbruik	<u>voor</u> de verandering
$spec_verbr_1$	[ml/ton/km]	specifiek gasolieverbruik	<u>na</u> de verandering

Als de snelheid van het schip voor en na bovenbedoelde verandering gelijk is, dan geldt:

$$spec_verbr_1 = spec_verbr_0 \times \frac{verbr_1}{verbr_0}$$

Voorbeeld:

$$spec_verbr_0 = 7.0, verbr_0 = 80, verbr_1 = 0.90 \times 80 = 72 \rightarrow spec_verbr_1 = 7.0 \times 0.90 = 6.3 \text{ mL/ton-km}$$

Dat gaat dus minder geprononceerd dan het effect van een snelheidsverandering.

4.4. Omrekenen naar een andere vaarweg of een andere lading

Hiervoor zijn geen eenvoudige omrekeningen mogelijk.

⁴ Op klein vaarwater (in verhouding tot het schip) kunnen deze machten oplopen tot 5 resp. 4.

5. Tot slot, voor de "fijnproevers", wat hydrodynamische zijpaden

5.1. Wat is golfweerstand?

Dit is de weerstand die het schip ondervindt door het golfpatroon dat het varend zelf veroorzaakt.

In berekeningsmodellen m.b.t. de scheepsweerstand van binnenvaart vrachtschepen wordt meestal geen rekening gehouden met deze golfweerstand. Uit de volgende twee paragrafen blijken de limieten die daardoor gelden voor de toepasbaarheid van dergelijke modellen.

5.2. Golfweerstand op zeer diep vaarwater

Als het "Froude-lengte-getal" groter is dan circa 0.2 (zie: ⁵). is de golfweerstand niet meer verwaarloosbaar. Dit is het geval als:

$$V > 3.6 \times 0.2 \times \sqrt{9.81 \times L}$$

waarin V de snelheid van het schip door het water is [km/h]
en L de lengte van de waterlijn van het schip [m].

Voorbeelden:

$$L = 110 \text{ (GMS)} \quad \rightarrow V > 23.7 \text{ km/h}$$

$$L = 38 \text{ (Spits)} \quad \rightarrow V > 14.2 \text{ km/h}$$

$$L = 15 \text{ (sleepboot zonder sleep)} \rightarrow V > 8.7 \text{ km/h (vandaar die grote "snor" als ze wat harder varen)}$$

5.3. Golfweerstand op ondiep vaarwater

In ondiep vaarwater veroorzaakt het varend schip een ander golfpatroon dan op diep vaarwater, te vergelijken met zeegolven die bij het strand aangekomen steeds korter en hoger worden (en dus steiler). Dat effect wordt merkbaar als het "Froude-diepte-getal" groter is dan circa 0.5 (zie ⁶); boven 0.7 wordt deze weerstand zo groot dat harder varen niet meer economisch verantwoord is (zie: ⁷).

Dit is het geval als:

$$V > 3.6 \times 0.7 \times \sqrt{9.81 \times h}$$

waarin V de snelheid van het schip door het water is [km/h]
en h de diepte van de vaarweg [m].

Voorbeelden:

$$h = 6.00 \text{ (CEMT VI)} \quad \rightarrow V > 19.3 \text{ km/h (onafhankelijk van de afmetingen van het schip !)}$$

$$h = 3.50 \text{ (CEMT II)} \quad \rightarrow V > 14.8 \text{ km/h (idem)}$$

5.4. "Squat" en "blockage"

Onder een varend schip stroom water terug. Dit heeft tot gevolg dat:

- het schip schijnbaar in een tegenstroom vaart, waardoor het meer wrijvingsweerstand ondervindt;
- een plaatselijke waterspiegel daling ("squat") optreedt, waardoor het schip:
 - . t.o.v. zijn wat verdere omgeving dieper komt te liggen (minder kielspeling!; minder kruiphoogte);
 - . meer vertrimt;
 - . een extra drukweerstand ondervindt.

Deze verschijnsels:

- nemen meer dan evenredig toe met de vaarsnelheid;
- doen zich in verhoogde mate gelden op vaarwegen van beperkte afmetingen t.g.v. "blockage" ⁸, want de retourstroom is sterker t.g.v. de beperkte vrije ruimte.

Bij beladen binnenvaartschepen zijn deze verschijnselen merkbaar tot sterk, maar bij lege schepen is alleen het vertrimmen wellicht niet geheel verwaarloosbaar.

Gedetailleerde berekeningsmodellen als ontwikkeld door RWS-AVV en DTU houden rekening met "squat" en "blockage", maar kunnen in extreme situaties in deze tot onjuiste resultaten leiden.

⁵ US Army Corps of Engineers, 2006 *Hydraulic design of deep-draft navigation projects*, pagina 38

⁶ Krueger, Stevan (TUHH), 2006, *Zusatzwiderstaende*, pagina 7

⁷ ITTC87, 1987, *Report of Resistance and Flow Committee*, pagina 79

⁸ (diepgang * breedte) / dwarsdoorsnede van de vaarweg; sommige bronnen gaan uit van diepgang / diepte vaarweg.