

Monitoring Proeftuin waterstof -
Elektrisch Binnenvaart Bouwtransport (PEBB)

Batterij-elektrisch geschikte aandrijving voor binnenstedelijk bouwtransport over water

TNO 2023 R11726 – 3 oktober 2023

Batterij-elektrisch geschikte aandrijving voor binnenstedelijk bouwtransport over water

Monitoring Proeftuin waterstof - Elektrisch Binnenvaart Bouwtransport (PEBB)

Auteurs	Ruben Fransen, Erik Gerritse, Jorrit Harmsen, Ann Delahaye
Exemplaarnummer	2023-STL-RAP-100350540
Aantal pagina's	18 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	Rijksdienst voor Ondernemend Nederland
Projectnaam	PEBB – DKTI Proeftuin H2 binnenvaart
Projectnummer	060.40783

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2023 TNO

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	3
1 Proeftuin waterstof - Elektrisch Binnenvaart Bouwtransport (PEBB).....	4
2 Aanpak monitoring en analyse	5
2.1 Plan van aanpak.....	5
2.2 Data	6
2.2.1 AIS.....	6
2.2.2 Amsterdam Vaart.....	6
2.2.3 Emissiemetingen - PEBB WP1.3.....	7
2.3 Methode.....	7
2.3.1 Analyse van AIS-data tot vaaruren en binnenvaartreizen.....	7
2.3.2 Vergelijking met wegvervoer	8
2.3.3 Vergelijking met alternatieve energiedragers.....	9
3 Operationeel profiel stedelijk bouwtransport	10
3.1 Operationeel profiel uit AIS-analyse	10
3.2 Vergelijking bouwtransport binnenvaart alternatieven met wegvervoer	12
3.3 Inzetbaarheid waterstof- en batterij-elektrisch aandrijving	14
4 Conclusies.....	16
4.1 Discussie	16
4.2 Lessons learned	17
4.2.1 Beperkte beschikbaarheid praktijkdata	17
5 Referenties	18

1 Proeftuin waterstof – Elektrisch Binnenvaart Bouwtransport (PEBB)

Dit rapport is onderdeel van het DKTI project ‘Proeftuin waterstof - Elektrisch Binnenvaart Bouwtransport’ (PEBB). In dit project werken binnenvaartondernemingen Zoev City en City Barging samen met Bouwaanvoerders, H2Consultancy en TNO. Het doel van dit project is het ontwikkelen en testen van hybride, batterij-elektrisch ondersteunde duwboten met een waterstofbrandstofcel als range-extender. Hiermee wordt beoogd om de hybride duwboten zo te ontwikkelen dat het transport van bouw materiaal over water in Amsterdam en de hele regio rondom het Noordzeekanaal en het IJ kan plaatsvinden.

De actieradius van batterij-elektrische schepen, eventueel met waterstof range-extender, is kleiner dan die van schepen met een dieseltank. Het effect hiervan op de logistieke operatie wordt in dit rapport geanalyseerd. Door de batterij-elektrische schepen te monitoren en hun inzet te analyseren wordt geconcludeerd of batterij-elektrische schepen effectief ingezet kunnen worden. Ook vergelijken we de inzet van vervoer over water met vervoer over de weg op haalbaarheid en impact op vervuilende uitstoot.

2 Aanpak monitoring en analyse

In dit hoofdstuk wordt beschreven welke data is gebruikt en hoe deze is geanalyseerd om de inzet, impact en meerwaarde van elektrisch vervoer over water te duiden en de verschillen tussen batterij- en waterstof-elektrisch inzichtelijk te maken.

2.1 Plan van aanpak

Het doel van dit onderzoek is het inzichtelijk maken van de meerwaarde en haalbaarheid van waterstof-elektrisch bouwtransport over water. De meerwaarde wordt inzichtelijk gemaakt door de huidige operatie te monitoren en te vergelijken met alternatieve scenario's.

In deze studie zijn twee stappen uitgevoerd:

1. een analyse van de huidige operatie; en
2. een scenario-analyse

De analyse van de huidige operatie is gedaan door het monitoren van scheepsbeweging van duwboten die actief zijn in bouwtransport. Vervolgens zijn het gemonitorde bouwtransport omgezet naar verschillende alternatieve scenario's. Er is een vergelijking gemaakt met traditioneel bouwtransport over de weg en met scenario's voor de duwboten met verschillende energiedragers als diesel, batterij en waterstof.

De scenario's zijn dan:

1. vervoer over de weg
 - a. diesel
2. vervoer over water
 - a. diesel
 - b. batterij-elektrisch
 - c. waterstof-elektrisch

Het jaar van analyse is 2022, toen was slechts een zeer klein deel van de Nederlandse vrachtwagenvloot elektrisch (volgens CBS waren slechts 261 elektrische N2 en N3 voertuigen in Nederland geregistreerd op 1 januari 2022, in een vloot van 60.000 vrachtwagens is dit marginaal). Hiermee is het vergelijkingsscenario met vervoer over de weg volledig diesel representatief met de toen actuele vrachtwagenvloot.

Het vergelijken van de scenario's gebeurt op volgende indicatoren:

1. aantal verkeersbewegingen en afgelegde afstand;
2. energieverbruik;
3. CO₂-uitstoot;
4. NO_x-uitstoot;
5. verbruikskosten energiedrager.

Het aantal verkeersbewegingen, energieverbruik en uitstoot van CO₂ zijn maatschappelijk relevante indicatoren. De verbruikskosten zijn van belang voor de scheepseigenaar die deze kosten moet dragen om maatschappelijke impact en operationele doelstellingen te behalen.

In de volgende paragrafen wordt eerst beschreven welke databronnen zijn gebruikt om dit plan te realiseren, vervolgens wordt de methodiek beschreven die is toegepast om bovenstaande indicatoren in te schatten.

2.2 Data

In het project is gekeken of het mogelijk was via een digitaal systeem uitgevoerde transporten te registreren en deze gegevens te gebruiken voor monitoring en analyse. Gedurende het project is de koers van het ontwikkelen van het transportplan- en registratiesysteem veranderd en bleek ook het opzetten van een registratiesysteem qua timing en inhoud niet aan te sluiten op de data-behoefte voor monitoring en analyse. Daarom zijn alternatieve databronnen om het (waterstof-)elektrisch vervoer over water te monitoren en te analyseren gebruikt.

Als alternatief is gekozen voor de volgende data:

1. AIS-data (Automatic Identification System);
2. onderzoeksresultaten uit Amsterdam Vaart [1]; en
3. meetgegevens en analyseresultaten uit een eerder PEBB werkpakket 1.3 [2].

Deze data zijn samengebracht om inzicht in het uitgevoerde bouwtransport te analyseren en te vergelijken met de alternatieve transportscenario's. Deze bronnen worden in de paragrafen hieronder toegelicht.

2.2.1 AIS

Als monitoringsdata is AIS-data gebruikt. Automatic Identification System (AIS) is voor alle zeegaande schepen en beroepsmatige binnenvaartschepen verplicht. Een schip deelt elke paar minuten zijn locatie, vaarsnelheid en vaarrichting met het AIS-systeem. Op basis van deze berichten kunnen ook de locaties en daarmee de vaarbewegingen van de schepen voor het bouwtransport over water achterhaald en vervolgens geanalyseerd worden.

Met behulp van de identificatie nummers (MMSI) van de duwboten (zie Tabel 1: Duwboten van Zoev City en City Barging, op pagina 10) is de AIS-data van deze schepen opgehaald uit een AIS-database van TNO.

2.2.2 Amsterdam Vaart

In het Amsterdam Vaart project [1] is onderzocht wat vervoer over water voor bouwlogistiek in de regio Amsterdam kan betekenen. In dit project is voor verschillende projecten ingezet op vervoer over water en is geregistreerd hoeveel transport er over water heeft plaatsgevonden. Vervolgens is dit vergeleken met een inschatting van traditioneel vervoer over de weg om het aantal vermeden wegritten en het verschil in uitstoot van schadelijke emissies te vergelijken. De gegevens over het aantal vermeden wegritten en de gemiddelde afstand van wegritten door het inzetten van bouwtransport over water zijn in deze studie gebruikt om het scenario vervoer over de weg in te schatten.

2.2.3 Emissiemetingen - PEBB WP1.3

In een voorgaand werkpakket in het PEBB project zijn de operationele profielen van de schepen met verschillende aandrijfliijnen en energiedragers onderzocht [2]. Daarnaast zijn metingen uitgevoerd rondom het energieverbruik en de emissies op één schip. De conclusies uit dit onderzoek zijn dat operatie van deze schepen wordt gekenmerkt door veel stand-by-werk en relatief lage vaarsnelheden. Hierdoor is er veel potentie voor energie- en brandstofbesparing door het inzetten van batterij-elektrisch dan wel waterstofbrandstofcel-elektrisch en het voorkomen van stand-by-operatie dan wel opvangen van stand-by energievraag met een accupakket. De metingen van het schip 'de Dorus' uit dit onderzoek geven een beeld van het operationele profiel en het diesilverbruik van de duwbotten in het bouwtransport over water.

2.3 Methode

In deze paragraaf worden de methodische stappen beschreven waarmee de AIS-data is geanalyseerd en vervolgens met aanvullende data is verrijkt tot een scenario-analyse.

2.3.1 Analyse van AIS-data tot vaaruren en binnenvaartreizen.

De inzet van de duwbotten is gemonitord op basis van AIS-data. De AIS-berichten bevatten onder andere het mmsi-nummer en de locatie van het schip en het verzend- en ontvangsttijdstip van het bericht. Op basis van de afstand en tijd tussen de locaties is de vaarsnelheid in de periode tussen berichten berekend.

Vervolgens zijn op basis van de volgende regels binnenvaartreizen onderscheiden:

1. Als de snelheid van het schip tussen AIS-berichten lager is dan 0,72 km/h (0,2 m/s)* dan wordt aangenomen dat het schip stil ligt.
2. Tussen alle punten waar het schip vaart (>0,8 km/h) worden reizen van gemaakt:
 - a. een nieuwe reis begint als een schip langer dan een half uur** heeft stilgelegen.
 - b. de reis daarvoor eindigt dan op de locatie en tijd waar het schip voor het eerst stil lag.
 - c. als er meer dan een uur*** tijdsverschil tussen AIS-berichten zit dan wordt dat gezien als het eind van een reis en start van een nieuwe reis.
 - d. als een reis korter is dan 250 meter dan wordt dit niet als aparte reis geteld, maar gezien als AIS-data afwijking.

* De keuze voor 0,2 m/s als grenswaarde komt voort uit het proberen van meerdere waarden van 0,05 tot 0,5 m/s. Deze waarde 0,2 m/s gaf de meest logische start en eindpunten van reizen (nabij bouwprojecten).

** De keuze voor een halfuur is een expert inschatting, zodanig dat als een schip 10 minuten ergens stilligt, bijvoorbeeld om ander verkeer te laten passeren, dat dit niet meteen wordt gezien als eind en begin van een reis. Daarbij kan het wel voorkomen dat een duwboot zijn duwbak afkoppelt en weer terugvaart, wat als een nieuwe reis gezien moet worden.

*** In sommige gevallen mist er data in de AIS-registratie. Aangezien het onbekend is wat een schip in zulke periodes heeft gedaan is er voor gekozen om deze perioden te negeren.

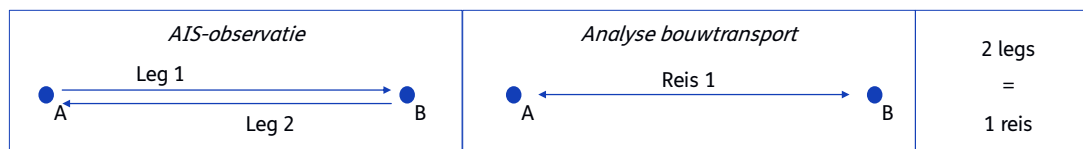
Na bovenstaande regels toe te passen op de AIS-data kunnen scheepsreizen worden herkend, waarbij elke reis een vaarafstand en aantal vaaruren kent. Door deze op te tellen kunnen totale inzet uren en gevaren afstand per schip worden berekend.

Een grote beperking in deze analyse is dat AIS alleen gegevens over de beweging van de duwboot bevat. Het is niet bekend of de gemeten reizen met een volle of lege duwbak of helemaal zonder duwbak zijn afgelegd. Aangezien hier geen inzicht in is verkregen is er aangenomen dat de duwboten elke reis maken met een duwbak (beladen of leeg) en dat er bouwtransport is uitgevoerd. Door deze aanname is de inschatting van het aantal bouwtransportreizen een bovengrens van wat er daadwerkelijke met deze schepen is uitgevoerd.

In de volgende stappen wordt beschreven hoe de binnenvaartreizen worden vergeleken met wegvervoer en wat verschillende energiedragers betekenen voor de operatie.

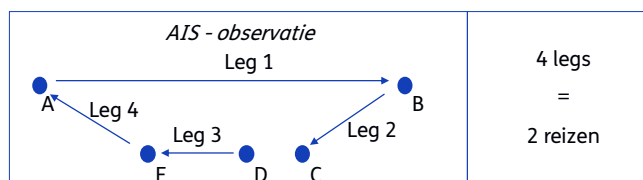
2.3.2 Vergelijking met wegvervoer

De reizen zijn echter nog zogenaamde individuele transportlegs van A naar B. Over het algemeen vaart een duwboot met duwbak van herkomst naar bestemming om lading te brengen en leeg terug, of met enige retourlading (bijvoorbeeld afval of sloopmateriaal).



Figuur 1: Voorbeeld berekening aantal reizen, van twee legs uit AIS naar een binnenvaartreis.

Om het aantal uitgevoerde transporten in te schatten is aangenomen dat elk transport over water bestaat uit een leg met lading naar de bouwplaats en een lege terugvaart. Zie Figuur 1 voor een voorbeeldberekening en toelichting op de aanname hoe een verwachte bouwtransport reis eruit zien. Er zijn veel meer verschillende reisvormen met een groter aantal legs mogelijk, zoals het voorbeeld in Figuur 2. In de gedane analyse zijn niet alle geobserveerde legs gestructureerd en gekoppeld tot complete reizen. Door beperkingen als missende data in tijdsreeksen van de schepen, zoals bijvoorbeeld het gat tussen locatie C en D in voorbeeld 2. De praktische keuze is gemaakt om het totale aantal legs te delen door twee om tot een inschatting van het aantal transportreizen te komen. Hierdoor is ook het aantal ingeschatte reizen een bovengrens van wat er daadwerkelijk is uitgevoerd. Op deze wijze kan het aantal heen- en terugvaarten worden ingeschat en het aantal transporten worden vergeleken met vervoer over de weg. Er wordt vergeleken op vier indicatoren zoals beschreven in paragraaf 2.1.



Figuur 2: Voorbeeld van een reis met meer dan twee legs en een datalacune tussen locatie C en locatie D.

Het aantal vaarten is gebruikt om het aantal vermeden wegtransportritten te berekenen op basis van gemiddelde aantal gereduceerde wegtransportritten per binnenvaartreis uit het onderzoek Amsterdam Vaart [1]. Vervolgens wordt op basis van algemene kengetallen energie- en brandstofverbruik van vrachtwagens en schepen berekend.

Wegens een gebrek aan gegevens is er voor gekozen om geen ondergrens in te schatten, daarbij geeft de bovengrens inschatting een goed eerste beeld van de impact van het vervoer over water en de meerwaarde van een eventuele range extender.

2.3.3 Vergelijking met alternatieve energiedragers

Naast de vergelijking van de huidige operatie, met batterij-elektrische schepen, met traditioneel bouwtransport over de weg, vergelijken we ook de inzet van schepen met alternatieve energiedragers. Als referentie worden traditionele duwboten vergeleken met de huidige batterij-elektrische schepen en met volledig waterstof-elektrische schepen.

Eerst wordt een inschatting gemaakt van de benodigde hoeveelheid energie en brandstof voor de operatie en wordt de impact op brandstofkosten en CO₂-uitstoot vergeleken.

Daarna wordt ook de operationele inzet vergeleken. Dit wordt gedaan door voor werkdagen in te schatten welke laad- dan wel tankpatronen nodig zijn om de operatie uit te voeren met de verschillende energiedragers en aandrijflijnen.

3 Operationeel profiel stedelijk bouwtransport

De AIS-data van acht schepen zijn ontsloten voor de periode juni en juli 2022. De acht schepen die actief zijn bij Zoev City and City Barging staan in onderstaande tabel.

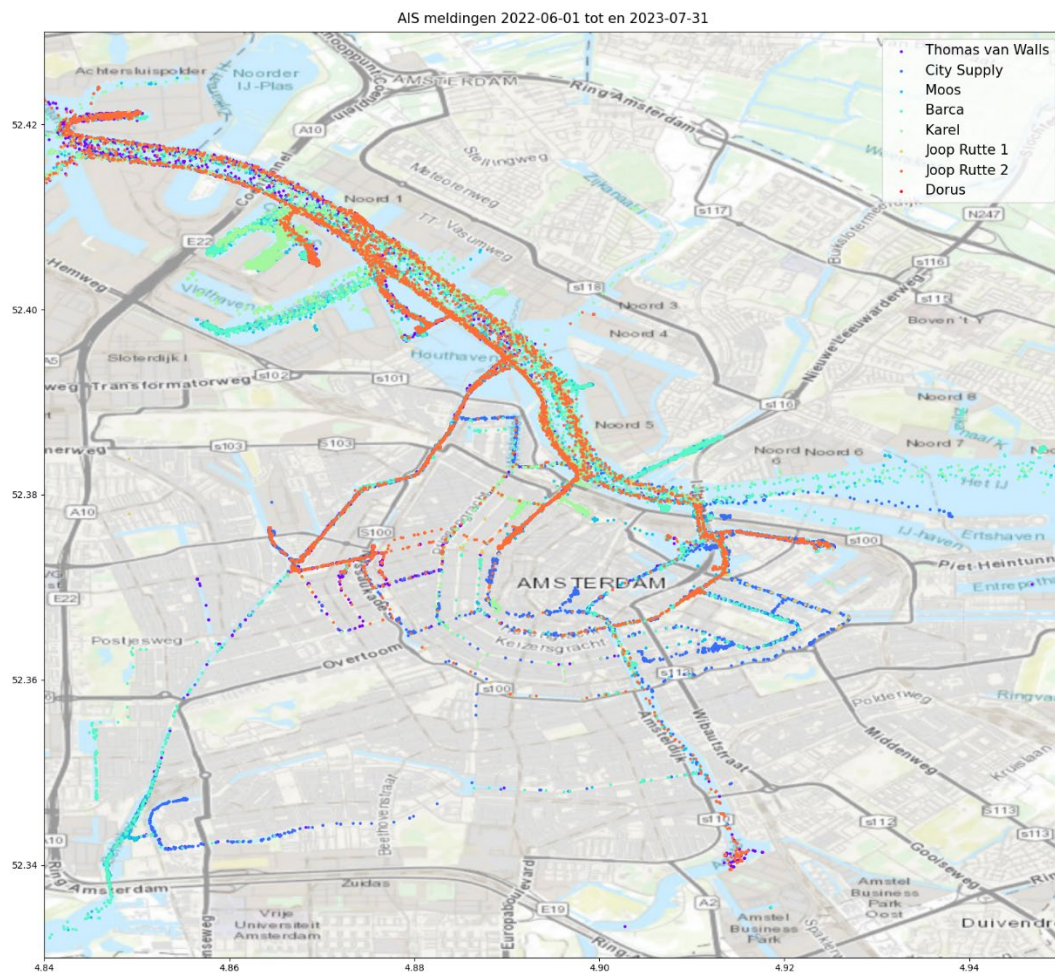
Tabel 1: Duwboden van Zoev City en City Barging.

Naam		Geïnstalleerd Motorvermogen (kWh)	Huidige aandrijflijn
Thomas van Walls		200	Batterij elektrisch
City Supplier		55	Batterij elektrisch
Moos		231	Diesel
Barca		231	Diesel
Karel		150	Diesel
Joop Rutte 1		150	Batterij elektrisch
Joop Rutte 2		150	Diesel
Dorus		90	Batterij & Diesel-elektrisch

3.1 Operationeel profiel uit AIS-analyse

Voor zeven van de acht schepen zijn AIS-meldingen ontsloten voor de periode juni en juli 2022. Voor het schip 'de Dorus' zijn geen AIS-meldingen herkend. Vermoedelijk was dit schip dat moment niet actief en komt ze daarom niet voor in de AIS-data.

Voor de overige zeven schepen zijn de gegevens geanalyseerd. Een beeld van locaties waar de schepen zijn geweest staat in Figuur 3. De gegevens zijn geanalyseerd zoals beschreven in de methodische aanpak 2.3.1, wat in een inschatting van het totale vaarafstand en aantal vaaruren resulteert. Deze staat weergegeven in Tabel 2.



Figuur 3: Locatie van AIS-meldingen voor de duwbotten in juni en juli 2022.

Tabel 2: Aantal actieve dagen en gevaren kilometer en aantal vaaruren per schip op basis van AIS analyse.

Naam	Aantal dagen met actieve AIS	Aantal gevaren km	Gemiddeld aantal km per dag	Gemiddeld aantal vaaruren	Gemiddelde vaarsnelheid (km/u)
Thomas van Walls	32	1.164	36,4	150	7,8
City Supplier	24	435	18,1	97	4,5
Moos	36	933	25,9	151	6,2
Barca	34	1.141	33,6	135	8,5
Karel	39	912	23,4	107	8,5
Joop Rutte 1	10	115	11,5	12	9,6
Joop Rutte 2	22	805	36,6	107	7,5

Op basis van de AIS-locaties, tijdstippen en snelheden is een inschatting gemaakt van het aantal binnenvaartreizen, ook wel legs genoemd, met een duidelijke start- en eindpunt, zoals beschreven in paragraaf 2.3.1. Het aantal transportbewegingen, vaarten, is ingeschat door het aantal legs door twee te delen.

Deze worden in de volgende paragraaf gebruikt om het aantal vermeden wegtransporten in te schatten. Grove aannames hierin zijn dat elke beweging van de duwboot ook een duwbak meeneemt en dat elke heen- en terugvaart, een transportbeweging uitvoert.

Tabel 3: Aantal herkende legs in AIS-data en inschatting aantal reizen.

	Aantal legs	Gemiddelde vaartijd (uren)	Afstand per leg (km)	Inschatting - aantal reizen (heen en terug)
Thomas van Walls	73	2,4	15,9	30
City Supplier	91	1,4	4,8	45
Moos	84	1,9	10,6	42
Barca	90	2,0	12,7	45
Karel	121	1,2	7,6	60
Joop Rutte 1	14	1,0	8,2	7
Joop Rutte 2	63	2,1	12,8	31
Totaal	524			260

3.2 Vergelijking bouwtransport binnenvaart alternatieven met wegvervoer

Op basis van de resultaten uit Amsterdam Vaart [1], zie Tabel 4, is het aantal vermeden wegritten per reis ingeschat op 1,6 ritten per reis. De gemiddelde afstand over de weg die per rit vermeden wordt is 62 km. Deze gemiddelden zijn berekend op de drie bouwprojecten in deze tabel, dit zijn bouwprojecten waar de geanalyseerde schepen onder andere zijn ingezet.

Het is goed om op te merken dat de gemiddelde vaarafstand uit de Amsterdam Vaart projecten met 9 kilometer per leg iets lager is dan de gemiddelde afstand per schip per vaart uit de AIS-analyse, die varieert van 10 tot 32 km per leg. Dit verschil zou verklaard kunnen worden doordat de periode van de AIS-data (juni en juli 2022) niet overeenkomt met de periode van monitoring in het Amsterdam Vaart onderzoek. Daarnaast zijn de schepen voor meer projecten actief dan de drie in Amsterdam Vaart gemonitorde bouwprojecten.

Tabel 4: Resultaten use cases Amsterdam Vaart, vermeden wegtransport door bouwtransport over water.

Bouwproject	Reizen	Km	Km / reis	Wegritten (gereduceerd)	Weg km	Verhouding reis / ritten
Singelgrachtgarage	2.944	23.730	8,06	5.000	227.000	1 : 1,7
Binnengasthuisterrein	483	6.453	13,36	410	90.000	1 : 0,8
Y-Point	36	300	8,33	78	1.100	1 : 2,2
Geldersekade	91	1.500	16,48	341	4.600	1 : 3,7
Oosterdoks Eiland	62	800	12,90	337	4.700	1 : 5,4
De Entrée	110	1.500	13,64	361	5.300	1 : 3,3
Singelgrachtgarage	2.944	23.730	8,06	5.000	227.000	1 : 1,7
Oudezijds Achterburgwal	262	4.700	17,94	645	9.000	1 : 2,5
Recht Boomssloot	142	2.200	15,49	552	7.700	1 : 3,9
	7.074	64.913	9,18	12.724	576.400	1 : 1,8

Er is (tot nu toe) geen inzicht in energie- en brandstofverbruik van de gemonitorde schepen. Idealiter worden directe meetgegevens van gebruik, dan wel van laad- of brandstoftankregistraties hiervoor gebruikt. Voor het schip de Thomas van Walls is een inschatting aangeleverd door City Barging. Daarnaast is een inschatting van het energieverbruik van de schepen gemaakt op basis van het aantal vaaruren, het motorvermogen (zie Tabel 2), en een gemiddelde motorbelasting van 25% tijdens het varen. Dit leidt tot een totale geleverde arbeid van 21,5 MWh tot 36,5 MWh. Het midden van deze bandbreedte, 29 MWh, staat in Tabel 2 als gebruikte acculading voor de reizen en is ook gebruikt om dieselverbruik in te schatten. Door de geleverde arbeid te delen door 4 kWh / liter, wat overeenkomt met een motorefficiëntie van ca. 40%.

In PEBB WP 1.3 [2] is uitgegaan van een waterstofprijs van 8 euro per kg. Dit is een toekomstig prijsscenario dat veel lager ligt dan de huidige prijs van waterstof. De huidige prijs (juni 2023) van waterstof varieert van 20 tot 25 euro per kg. De huidige waterstofproductie gebruikt veelal fossiele energiebronnen en daarmee is het merendeel van de waterstof nog grijze waterstof en hiermee worden beoogde emissiereductiedoelen nog niet bereikt. Tail-pipe uitstoot van de schepen, lokale emissies, wordt met waterstof wel tot nul gebracht.

Tabel 5: Vermeden aantal ritten wegtransport door inzet bouwtransport over water. *Gemiddelde energieprijzen in juni 2023, dieselprijs CBS statline, waterstofprijs van <https://www.rvo.nl/onderwerpen/brandstofprijvergelijking>

	Road - diesel	Barge – diesel	Barge - BEV	Barge H2
<i>Aantal ritten / reizen</i>	389	216	216	216
<i>Brandstofverbruik</i>	35 liter / 100 km	1 liter / 4 kWh geleverde arbeid		
	17.600 km	4.500 km	4.500 km	4.500 km
	6.200 liter diesel	8.400 liter diesel	29.000 kWh acculading	1.700 kg H2
<i>CO₂</i>	21,5 ton	24,6 ton		
<i>NO_x</i>	70 kg	473 kg		
<i>Brandstofkosten per eenheid</i>	1,5 Eur / liter*	1,5 Eur / liter*	0,40 Eur / kWh*	21 Eur / kg*
<i>Brandstofkosten totaal</i>	9,4 kEur	13,1 kEur	11,6 kEur	35,7 kEur

In de twee gemonitorde maanden hebben de zeven duwbotten naar schatting 216 vaarten uitgevoerd en ca. 4.500 kilometer gevaren. Naar schatting zijn daar zo'n 389 wegritten en ruim 20.000 wegkilometers vermeden. Op jaarbasis wordt naar verwachting dan 120.000 km per jaar vermeden, dat is vergelijkbaar met de jaarlijkse inzet van ruim één trekker oplegger (ca. 100.000 km per jaar).

3.3 Inzetbaarheid waterstof- en batterij-elektrisch aandrijving



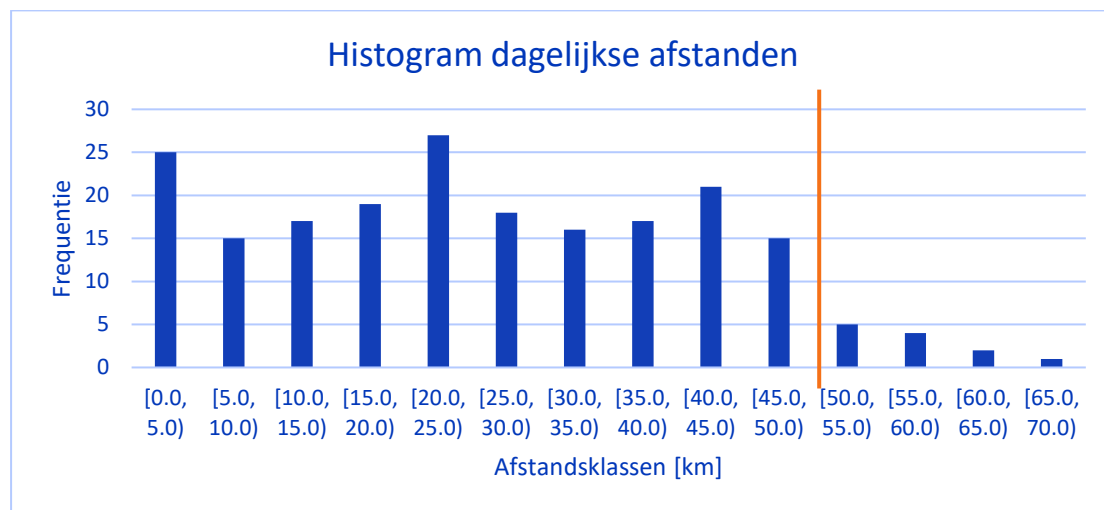
Figuur 4: Duwboot Dorus van Zoev City.

Een belangrijke afweging voor welke aandrijflijn en brandstofoptie geschikt zijn voor een duwboot is de operationele inzetbaarheid. In PEBB WP 1.3 [2] zijn de opties huidig (diesel-elektrisch), waterstofcel-elektrisch en batterij-elektrisch vergeleken voor ‘de Dorus’ (Figuur 4). Voor een daginzet van 49 kilometer varen per dag, zie Tabel 6. Batterijcapaciteit is zo ingeschat dat een standaard dag, waarin 49 kilometer wordt gevaren, kan worden uitgevoerd op één volle accu zonder tussendoor bijladen.

Tabel 6: Vergelijking aandrijflijn opties voor ‘de Dorus’ [1] voor actieradius op basis van 1 volle tank en/of volgeladen batterij.

	Current diesel + battery-electric hybrid	FC 90 kW ~60 kg H2 (700 bar)	Bat 233 kWh
Autonomy	11 full trips (539 km)	5 full trips (245 km)	1 full trip (49 km)
Powertrain - Mass	1,700 kg	1,469 kg	1,480 kg
Powertrain - Volume	2,150 L	1,975 L	698 L
CO2	2,3 kg/km	0	0
NO _x	105 g/km	0	0
NO _x	31,2 g/kWh	0	0
Cost (TCO)	Unknown	396 k€	170 k€

Ook van de gemonitorde dagen van de andere zeven schepen in juni en juli 2022 wordt het merendeel van de dagen niet meer dan 50 kilometer per dag gevaren. Dat zou betekenen dat een batterij-elektrisch schip met 233 kWh laadcapaciteit en dagelijkse laadmogelijkheid voor het merendeel van de dagen geschikt is, zie Figuur 5. 6% van de geanalyseerde dagen betreffen een inzet van meer dan 50 kilometer per dag.



Figuur 5: Histogram van dagelijks gevaren afstand in de periode juni en juli 2022.

4 Conclusies

Met externe bronnen en beperkte data direct uit het PEBB project zijn de volgende inzichten opgedaan.

1. In twee maanden hebben de zeven bestudeerde duwboten ongeveer 216 vaarten uitgevoerd. Hierbij legden ze ca. 4.500 km af. Hiermee zijn naar schatting bijna 400 wegtransportritten en ca. 17.600 km wegtransport vermeden.
2. Als alle zeven duwboten een zero-emissie aandrijflijn hadden gehad in de bestudeerde periode, zou hiermee ruim 24,6 ton CO₂ uitstoot bespaard kunnen zijn ten opzichte van hetzelfde transport over water met alleen diesel aangedreven duwboten (zie Tabel 5).
 - a. Uitstoot van de huidige vloot is al minder dan deze 24,6 ton CO₂, omdat een deel van de schepen, drie van de zeven al batterij elektrische aandrijving hebben.
3. Voor de uitstoot van NO_x geldt een vergelijkbare conclusie, en er zou ten opzichte van volledige diesel aangedreven vervoer over water 470 kg NO_x uitstoot bespaard kunnen worden over deze periode van twee maanden.
4. Als alle zeven duwboten een zero-emissie aandrijflijn hadden gehad in de bestudeerde periode, zou hiermee ca. 17,7 ton CO₂ uitstoot bespaard zijn ten opzichte van hetzelfde transport over de weg met diesel aangedreven vrachtwagens (zie Tabel 5).
 - a. Deze uitstoot zou ook bespaard kunnen worden door vrachtwagens met een duurzame en schone aandrijflijn in te zetten.
5. Een duwboot als 'de Dorus' zal met 90 kW motorvermogen en een batterijcapaciteit van 233 kWh 90% van de dagelijkse operaties kunnen uitvoeren op één volle batterijlading.
6. Een waterstof aangedreven range extender is voor de toepassing van bouwtransport over water in de binnenstad van Amsterdam niet noodzakelijk. De range-extender zou de actieradius en operationele bereikbaarheid kunnen vergroten, maar dit vergt wel significante meerkosten, zowel voor investering van de aandrijflijn als in de brandstofkosten met de huidige waterstofprijzen.

4.1 Discussie

De onderstaande punten brengen onzekerheden in de gepresenteerde resultaten. Wegens gebrek aan praktijkgegevens zijn aannames gedaan om tot een inschatting te komen. De aannames maken dat de inschatting van aantal transportreizen en daarmee het aantal vermeden wegtransportritten mogelijk aan de hoge kant zijn. In vergelijking met deze overschatting zouden traditionele diesel aangedreven schepen meer uitstoot veroorzaken. Kanttekening hierbij is dat ook het berekende energie- en brandstofverbruik van de schepen onzeker is.

Daarnaast dient bij het vergelijken van deze twee transportmodi niet alleen gekeken te worden naar energieverbruik en vervuilende uitstoot, maar ook naar andere voordelen van het vermijden van transport over weg.

Voordelen kunnen zijn betere doorstroming op stedelijke wegen en daarmee verhoogde bereikbaarheid en ook wordt het risico op verkeersongelukken vermoedelijk kleiner (zie ook de resultaten van Amsterdam Vaart [1]). Op jaarbasis betreft dit voor de drie schepen ca. 120.000 kilometer.

De onzekerheden in deze studie komen voort uit:

- Het is niet duidelijk welke bewegingen van duwboten met- en zonder duwbak zijn. Elke beweging is nu aangenomen met duwbak en gekoppeld aan een transportbeweging. Hierdoor is de inschatting van energieverbruik van de duwboten naar verwachting een lichte overschatting.
- Er waren geen gegevens over lading en transport bekend voor dit onderzoek. Om hier een inschatting van te maken is het aantal herkende transport legs met duidelijk start- en eindpunt in AIS vertaald naar het aantal binnenvaartreizen (heen en terug) door het totale aantal legs te delen door twee. Reizen kunnen uit meer dan twee legs bestaan en hierdoor is ook het aantal reizen, naar verwachting, een overschatting.
- Het in dit onderzoek gebruikte getal voor energieverbruik van de schepen is een inschatting op basis van metingen op 'de Dorus', opgegeven energieverbruik van de Thomas van Walls en een ruwweg berekening op basis van aantal vaaruren en bekend motorvermogen. Hierdoor is het energieverbruik niet geheel zeker.

4.2 Lessons learned

4.2.1 Beperkte beschikbaarheid praktijkdata

Bij het monitoren en evalueren van vaartuigen moet bij de start van een project een helder en uitvoerbaar monitoringsplan worden opgesteld. De voor dit rapport uitgevoerde monitoring gebruikt zeer beperkte data en gegevens uit het eigen onderzoeksproject en heeft vooral externe bronnen moeten aanboren om kwantitatief inzicht te verkrijgen. Bij uitvoering van dit project bleek dat de geplande logistieke tooling en registratie van transporten niet realistisch was binnen projecttermijn, ook niet bij verlengen. Hierdoor is er zeer beperkt informatie opgehaald in dit project, waar dit wel het plan was. Dit maakt het moeilijk om conclusies te trekken over de inzet van een waterstof aangedreven range extender.

5 Referenties

[1] TNO, „Amsterdam Vaart!,” TNO R10574, 2023.

[2] TNO, „Zero Emission Power Train Estimation (PEBB WP1.3),” TNO P10748, 2022.

Mobility & Built Environment

Anna van Buerenplein 1
2595 DA Den Haag
www.tno.nl