

TNO-rapport**TNO 2016 R10481****Elektrische rondvaart in Amsterdam****Earth, Life & Social Sciences**Van Mourik Broekmanweg 6
2628 XE Delft
Postbus 49
2600 AA Delftwww.tno.nl

T +31 88 866 30 00

F +31 88 866 30 10

Datum	11 april 2016
Auteur(s)	Pim van Mensch Ruud Verbeek Mark Bolech
Exemplaarnummer	2016-TL-RAP-0100295822
Aantal pagina's	48 (incl. bijlagen)
Opdrachtgever	VAR
Projectnaam	BIA rondvaart Amsterdam
Projectnummer	060.14514

Alle rechten voorbehouden.

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

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2016 TNO

Samenvatting

Achtergrond

De Amsterdamse binnenstad, met haar smalle grachten en hoge bebouwing, is als UNESCO-werelderfgoed gevoelig voor de vervuiling door uitlaatgassen van voeren vaartuigen. Specifiek kan voor vaartuigen worden gedacht aan schepen voor de uitvoering van overheidstaken (Waternet, Haven Amsterdam, Brandweer Amsterdam), de veren van het Gemeentelijk Vervoerbedrijf (GVB) en de rondvaartsector. De rondvaartsector is met ongeveer 120 grote schepen en 200 kleinere schepen verantwoordelijk voor een groot deel van de uitstoot. Verschoning van deze relatief grote vloot heeft daarom een grote potentie om bij te dragen aan een schonere grachtengordel.

De gemeente Amsterdam heeft in 2013 de 'nota varen Amsterdam 2.1' opgesteld om een bijdrage te leveren aan het verminderen van de uitstoot van verontreinigende stoffen in het centrum van Amsterdam. De nota schrijft voor dat in 2025 de gehele rondvaartvloot in de Amsterdamse binnenwateren 'zero-emissie' ofwel uitstootvrij moet zijn. In de praktijk betekent dit dat deze schepen moeten worden voorzien van een elektrische aandrijving. Vooral voor de ongeveer 120 grote schepen is dit een grote uitdaging; zij worden zeer intensief gebruikt – tot wel 14 uur per dag. Elektrificatie van deze schepen vereist een grote accucapaciteit en goede laadstrategie.

Doel van de studie

In deze rapportage is op het gebied van aandrijflijnspecificaties, gebruiksprofiel, accutechniek, laadinfrastructuur, totale energiebehoefte, veiligheid en economie vastgelegd wat we nu weten en waar behoefte aan is.

Conclusies

In het algemeen wordt geconcludeerd dat een elektrische vloot technisch mogelijk is, maar dat er nog veel ontwikkeld en beproefd moet worden om een redelijk optimale aandrijflijn en infrastructuur op te bouwen. Naast de technische uitdagingen zijn er ook forse financiële investeringen benodigd.

Specificaties gebruiksprofiel en accu's elektrische rondvaartboot

De energiebehoefte voor de aandrijflijn en hulpsystemen kon goed inzichtelijk worden gemaakt, omdat in de afgelopen jaren metingen zijn verricht aan zowel rondvaartboten met een dieselmotor als aan rondvaartboten met een elektrische aandrijving. In de analyses is vastgesteld dat voor het varen gemiddeld 15 kW nodig is, de hulpsystemen ongeveer 2 kW gebruiken en dat de verwarming in de winter gemiddeld ongeveer 15 kW vereist. Deze laatste post kan worden verlaagd tot grofweg 5 kW als in de toekomst een warmtepomp wordt toegepast (uitgangspunt voor vervolg). Uit deze energiebehoefte en de rendementsverliezen is een aantal opties uitgewerkt voor de accucapaciteit en laadstrategie, infrastructuur en totale energiebehoefte. Als de accu's alleen 's nachts geladen worden, dan is een capaciteit benodigd van circa 300 tot 350 kWh. Als tussen de trips ook steeds wordt snelladen, dan kan afhankelijk van het accutype, de accucapaciteit worden teruggebracht tot ongeveer 100 tot 170 kWh. De laadvermogens (per schip) variëren van 22 kW ('s nachts) tot 100 kW voor tussendoor snelladen. Op het gebied van accutechniek moet nog veel worden uitgezocht. De belangrijkste aspecten daarbij zijn levensduurgaranties, mogelijkheden voor snelladen per accutype, rendement en totale gebruikskosten.

Er wordt momenteel al ervaring opgebouwd met lood-zuur accu's en in mindere mate met Li-ion accu's. Met betrekking tot de laadstekker tekent zich al een standaardisatie af. Waarschijnlijk wordt dit de Combo 2, waarmee gewoon laden en snelladen worden gecombineerd. Eventueel kan ook een inductieve, automatische laadverbinding worden overwogen, maar dat vereist nog een behoorlijke ontwikkeling.

Totale energiebehoefte en milieu

De totale Amsterdamse rondvaartvloot (inclusief salonboten, sloepen en andere typen rondvaarboten) bestaat uit ongeveer 310 schepen. Bij elektrische aandrijving is het jaarlijkse totale energieverbruik van die schepen ongeveer 9000 MWh¹. De groep 'grote rondvaarboten' neemt hiervan het grootste gedeelte voor zijn rekening met circa 7300 MWh per jaar. Tegenover het elektriciteitsverbruik van 9000 MWh staat een jaarlijkse besparing van grofweg 2,3 miljoen liter dieselbrandstof.

Veiligheid elektrische rondvaart

Met betrekking tot de veiligheid van elektrische rondvaartboten is een korte analyse uitgevoerd van de mogelijke risico's bij calamiteiten, zoals binnendringen van water of zinken, brand en een ernstige aanvaring. De risico's onder deze omstandigheden zijn vrij uitvoerig onderzocht voor elektrische voertuigen voor het wegverkeer, deze resultaten laten zich goed vertalen naar elektrische vaartuigen. Hieruit blijkt dat de risico's heel beperkt zijn, mits er in de ontwerpfase rekening wordt gehouden met dit aspect.

Business case elektrisch varen

Elektrische energie voor een rondvaartboot is goedkoper dan de dieselbrandstof. Daarom kan de relatief dure elektrische aandrijflijn zichzelf op lange termijn terugverdienen. Een drietal opties zijn in het verleden onderzocht: a) Loodzuur accu's met alleen 's nachts opladen en Li-ion opties met b) alleen 's nachts laden en c) tevens overdag bijladen. Hieruit blijkt dat de terugverdientijd momenteel minimaal ongeveer 12 jaar is (voor de loodzuur accu). Men verwacht dat met de Li-ion accu in de toekomst een kortere terugverdientijd wordt gerealiseerd, als de Li-ion zoals verwacht in prijs dalen. Indien de batterijkosten voor Li-ion zover dalen als verwacht kan de terugverdientijd afnemen tot 6 jaar in 2024. Over de daadwerkelijk accuprijs in 2024 bestaat echter nog veel onzekerheid. De kosten van de laadinfrastructuur zijn hierbij buiten beschouwing gelaten.

Praktijkervaring opbouwen is een must

Elektrificatie van de Amsterdamse rondvaartvloot biedt grote mogelijkheden voor het terugdringen van CO₂, het gebruik van alternatieve energie en energiebesparing. Het is echter complex om de meest geschikte scheepsconfiguratie (e-motor, batterij, verwarming, roer, boegschroef etc.) en laadinfrastructuur te kiezen om elektrisch varen binnen de grachten betrouwbaar en economisch aantrekkelijk te maken. Ook is de kans op kinderziektes nu nog groot. Om het leertraject zo snel mogelijk in te zetten, is het nodig om met een beperkt aantal schepen zo spoedig mogelijk praktijkervaring op te bouwen met verschillende nieuwe technologische opties voor elektrische aandrijflijnen (en de combinatie hiervan met boordvoorzieningen) en daarbij optredende problemen te analyseren en te verhelpen. Vervolgens kan dan een keuze worden gemaakt voor de beste technologische oplossingen voor de gehele vloot. Bij een dergelijk

¹ 9000 MWh komt overeen met het elektriciteitsverbruik van ongeveer 2600 huishoudens.

leertraject is het van essentieel belang om informatie te delen. Dit betekent dat alle opgedane kennis en ervaring, die beschikbaar komen bij proefnemingen met elektrische schepen van de verschillende rederijen, met elkaar moet worden gedeeld en worden gebruikt om de volgende serie te verbeteren.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	7
2	Nota varen in Amsterdam 2.1	9
2.1	Segmenten	9
2.2	Exploitatievergunning voor 'bemand groot' in 'vergunninggebied 1'	9
2.3	Milieu-eisen voor 'bemand groot'	10
3	Vlootsamenstelling	11
4	Specificaties van een rondvaartboot met elektrische aandrijving	12
4.1	Vermogensbehoefte voor aandrijving	12
4.2	Vermogensbehoefte voor hulpsystemen en hotelfuncties	14
4.3	Totale energiebehoefte per vaartuig	16
5	Totale energiebehoefte voor elektrische passagiersvervoer	18
6	Accutechniek voor vaartuigen	20
6.1	Eigenschappen van verschillende accutypen	20
6.2	Levensduurverwachting	22
6.3	Lagere prijs	23
6.4	Specificaties van geschikte accutypen voor de rondvaart	24
6.5	Doorontwikkeling huidige accu's	26
6.6	Nieuwe soorten accu's	27
6.7	Milieu-impact van opslagsystemen	28
6.8	Wet en regelgeving	29
7	Warmtepompsystemen	30
8	Laadverbinding en infrastructuur	32
8.1	Laadprotocol	32
8.2	Laadstekkers	33
8.3	Specifieke verbindingen voor snelladen	34
8.4	Laadinfrastructuur	37
9	Laadstrategieën voor een rondvaartboot	38
10	Veiligheid elektrisch varen	40
10.1	Binnendringen water of zinken	40
10.2	Brand	40
10.3	Ernstige aanvaring	40
11	Business case elektrisch varen	41
12	Bestaande elektrische rondvaartboten en toekomstige benodigdheden	45
12.1	Overzicht bestaande elektrische rondvaartboten	45
12.2	Toekomstige benodigdheden	45
13	Referenties	47

14	Ondertekening	48
-----------	----------------------------	-----------

1 Inleiding

Achtergrond

De rondvaartbranche en de gemeente Amsterdam en Waternet werken al vanaf 1990 samen om een schonere vloot in Amsterdam te realiseren. In de periode 1990 tot nu hebben rondvaartrederijen ervaring opgedaan met een groot aantal brandstoffen zoals aardgas, biobrandstof, GTL en synfuels. Ook zijn in de branche roetfilters toegepast voor de reductie van fijnstofuitstoot en heeft men diesel-elektrische en volledig-elektrische aandrijflijnen en aandrijvingen op waterstof toegepast.

Om de luchtkwaliteit in Amsterdam nog verder te verbeteren en de drukte op de Amsterdamse grachten beter beheersbaar te maken, heeft Waternet voor de passagiers- en pleziervaart een beleidskader opgezet voor het varen in en door Amsterdam. Dit heeft geleid tot de beleidsnota "*nota varen in Amsterdam 2.1*", die op 19 november 2013 definitief is vastgesteld. Deze nota schrijft voor dat de rondvaart in 2025 op (minimaal) het Amsterdamse binnenwater uitstootvrij dient te zijn.

Uit het project Boeggolf (waarbij TNO partner was) blijkt dat (batterij) elektrisch varen de meest reële optie is. Een elektrisch schip dat voldoet aan de specifieke eisen voor gebruik in Amsterdam is echter niet direct op de markt verkrijgbaar en zal ontwikkeld moeten worden.

Het gaat dan onder andere om ontwikkelingen op gebied van:

- aandrijflijnontwerp;
- energieopslag (batterijen);
- laainfrastructuur;
- hulpsystemen/verwarming;
- operationeel gebruik, en;
- kennis, opleiding, en regelgeving.

De ontwikkelkosten/investeringen die gepaard gaan met een dergelijke vlootvernieuwing zijn dermate hoog, dat deze voor een individuele rederij niet op te brengen zijn.

Omdat de stakeholders van het elektrisch varen dezelfde kennisvragen hebben, is voorgesteld om de vereiste kennis gezamenlijk te ontwikkelen en in de praktijk te valideren/testen. Dit kan bijvoorbeeld door met meerdere demonstratieschepen pilots uit te voeren in de praktijk. Deze gezamenlijke aanpak verhoogt de snelheid van innoveren, en vergroot de toegang van de stakeholders tot de innovaties - tegen een acceptabel budget. De gezamenlijke Amsterdamse rondvaartrederijen onderzoeken samen met TNO hoe een dergelijk programma kan worden vormgegeven en opgestart. Dit gebeurt middels een zogenaamd Branche Innovatie Agenda (BIA) project. In deze BIA wordt de onderzoeks- en ontwikkelingsagenda voor de periode 2015-2025 vastgelegd, om op korte en middellange termijn systematisch en onderbouwd de vereiste kennis gezamenlijk te kunnen ontwikkelen en in de praktijk te testen.

Doel en aanpak

Een belangrijke stap in het BIA-project is om te inventariseren wat er tot nu toe bekend is over elektrische rondvaart. Met het elektrisch varen is namelijk reeds ervaring opgebouwd. De resultaten van deze verkenning worden beschreven in deze rapportage. Hiervoor is gebruik gemaakt van beschikbare literatuur en presentaties, maar in belangrijke mate ook van de opgedane kennis van de rondvaartrederijen.

Leeswijzer

Het document begint met een weergave van de belangrijkste punten uit de nota varen. Om een overzicht te krijgen van het commerciële passagiersvervoer over het water wordt in hoofdstuk 3 de vlootsamenstelling per segment weergegeven. In hoofdstuk 4 wordt ingegaan op de specificaties van een rondvaartboot met elektrische aandrijving. Het gaat daarbij met name om de vermogens- en energie behoefte van de voortstuwings- en hulpsystemen. Op basis van hoofdstuk 3 en 4 wordt vervolgens in hoofdstuk 5 de totale energiebehoefte van het commerciële passagiersvervoer ingeschat bij volledige elektrificatie. De accutechniek is een essentieel onderdeel van elektrisch varen. Hoofdstuk 6 beschrijft de eigenschappen van diverse accutypen, de prijs, geschikte types voor de rondvaart en om toekomstige ontwikkelingen. Volgens de nota varen dienen in 2025 ook de verwarmingssystemen zero-emissie te zijn. Warmtepompen, die daar een mogelijke oplossing voor zijn, worden in hoofdstuk 7 toegelicht. Vervolgens wordt in de hoofdstukken 8 en 9 respectievelijk verder ingegaan op de laadinfrastructuur en laadstrategieën, waarna in hoofdstuk 10 de veiligheid bij potentiële calamiteiten nader wordt toegelicht. In hoofdstuk 11 wordt daarna een analyse van de business case voor elektrisch varen beschreven. Als laatste worden in hoofdstuk 12 de specificaties van een rondvaartboot samengevat.

2 Nota varen in Amsterdam 2.1

Waternet heeft een beleidskader opgezet voor het varen in en door Amsterdam voor de passagiers- en pleziervaart. Dit is onder andere gedaan om de luchtkwaliteit in Amsterdam te verbeteren en de drukte op de Amsterdamse grachten beheersbaar te maken. Het beleid is vastgelegd in de beleidsnota "*nota varen in Amsterdam 2.1*" (vanaf hier 'nota varen') die op 19 november 2013 definitief is vastgesteld. Een voor de passagiersvaart belangrijke bijlage is "*bijlage 2. Regeling Passagiersvaart Amsterdam (RPA) 2013*". In de onderstaande paragraaf zijn de belangrijkste punten uit de nota varen en bijlage 2 weergegeven voor de rondvaart.

2.1 Segmenten

Voor vaartuigen is de volgende segmentverdeling gemaakt:

1. **Bemand groot: bemande passagiersvaartuigen groter dan 14x3,75m en kleiner dan of gelijk aan 20x4,25m, en voorzien van een, grotendeels vaste, overkapping;**
2. Bemand gesloten: bemande passagiersvaartuigen kleiner dan of gelijk aan 14x3,75m, en voorzien van een, grotendeels vaste, overkapping;
3. Bemand open: bemande passagiersvaartuigen kleiner dan of gelijk aan 10x3,15m, zonder (vaste) overkapping, en;
4. Onbemand: onbemane passagiersvaartuigen kleiner dan of gelijk aan 5,50x2m.

Deze rapportage richt zich op segment 1.

2.2 Exploitatievergunning voor '*bemand groot*' in '*vergunninggebied 1*'

Om in Amsterdam bedrijfsmatig passagiers te vervoeren is een gemeentelijke exploitatievergunning nodig. Er wordt onderscheid gemaakt in vergunninggebied 1 en 2. Vergunninggebied 1 geldt voor Amsterdam inclusief de centrum-zone; vergunninggebied 2 geldt voor Amsterdam exclusief de centrum-zone. In deze rapportage ligt de focus op vergunninggebied 1.

In het verleden waren de vergunningen voor onbepaalde tijd. Het aantal te verstrekken vergunningen per segment zijn en waren echter niet onbeperkt voor vergunninggebied 1. Om eventuele nieuwe toetreders een kans te geven, zijn de vergunningen van onbepaalde tijd voor vergunninggebied 1 vanaf 2014 komen te vervallen. Deze vergunningen zijn en worden opnieuw verstrekt met een geldigheid tot 2020. Vanaf 2020 vindt een herverdeling van de vergunningen voor een periode van 10 jaar plaats. Er wordt geen ruimte gemaakt voor extra vergunningen, met andere woorden: het volume blijft gelijk. Volgens de nota varen zijn er 123 vaartuigen in het segment 'bemand groot'. De vergunningen worden verstrekt op basis van nog te bepalen criteria. De criteria zullen te maken hebben met duurzaamheid, *past performance*, dienstverleningsconcept en vaargedrag. De criteria worden periodiek herzien.

2.3 Milieu-eisen voor ‘bemand groot’

De nota varen [nota varen] beschrijft de milieu-eisen voor de voortstuwing van grote bemande vaartuigen als volgt:

“De reders met vaartuigen groter dan 14 meter (segment bemande, grote vaartuigen) hebben de keuze: of in 2015 voldoen aan de Fase IIIb norm, of deelnemen aan de weging op emissie in 2020. Het college zal in 2020 een groot wegingvoordeel geven aan vaartuigen die reeds voldoen aan de zero emissie eis. De early adapters die in 2015 voldoen aan de Fase IIIb norm worden bij de weging voor 2020 niet benadeeld t.o.v. reders die [in] 2020 aan striktere milieueisen voldoen. Zo wil het college ondernemers die in een vroeg stadium investeren in schonere vaartuigen, belonen. In 2025 is zero emissie de norm voor vaartuigen groter dan 14 meter. Hiermee bestaat ook voor ondernemers die in 2015 hebben voldaan aan de Fase IIIb eis een prikkel om in de aanloop naar 2025 te innoveren naar zero emissie (elektrisch).”

Het verwarmen van de vaartuigen dient vanaf 2025 ook zero-emissie te gebeuren. Het is momenteel nog onzeker of een hybride configuratie waarmee binnen de grachten zero-emissie kan worden gevaren wordt toegestaan. Op de pleziervaart na dienen de andere segmenten (inclusief verwarming) in 2015 of 2020 aan de zero emissie eis te voldoen, zoals te zien in Tabel 1.

Tabel 1: Doelstellingen uitstoot van vaartuigen op het Amsterdamse binnenwater per segment.

Segment	Doelstelling 2015	Doelstelling 2020	Doelstelling 2025
Bemand/groot Tot en met 20m	Of: Voor 1 januari 2015 voldoen aan Fase IIIb-norm Nieuwbouw of nieuwe toetreders: minimaal fase IIIb-norm	Of: weging op emissie in 2020, met groot wegingsvoordeel voor verschoonde vaartuigen	Zero emissie
Bemand/gesloten Tot en met 14m	Nieuwbouw of nieuwe toetreders: Zero emissie	Zero emissie	
Bemand/open tot en met 10m	Zero emissie	Zero emissie	
Onbemand	Zero emissie	Zero emissie	
Pleziervaart	Verbod op tweetakt buitenboordmotoren in 2017	Nader te bepalen	

* Elektrisch of gelijkwaardig alternatief met zero emissie, zero geluid en minimale overlast van manoeuvreren

Bron: Waternet, nota varen in Amsterdam 2.1

3 Vlootsamenstelling

Om een overzicht te krijgen van het commerciële passagiersvervoer over het water wordt in dit hoofdstuk de vlootsamenstelling per segment weergegeven. Tabel 2 toont het aantal vaartuigen met vergunningsbewijs per segment. De segmenten zijn identiek aan de segmenten volgens de nota varen. Er wordt in de onderstaande tabel geen onderscheid gemaakt tussen typische rondvaarttrips en trips waarbij een boot wordt verhuurd aan een select gezelschap. In totaal zijn nu 398 vaartuigen in het bezit van een exploitatievergunning voor varen in Amsterdam. Een aantal vaartuigen krijgt binnenkort het vergunningsbewijs maar voldoet nu nog niet aan alle eisen. Dit gaat om 89 bemande en 22 onbemane vaartuigen. In dit rapport ligt de focus op de “Bemand/groot” rondvaartboten. Volgens het Register bedrijfsmatige passagiersvaart (RPA) van Waternet zijn dit er 115 en volgens de nota varen 123. Deze groep verzorgt het grootste gedeelte van de commerciële passagiersvervoer over het water. Volgens het onderzoek van SEO ‘het roer moet om [SEO]’ wordt 56% van de capaciteit van het commerciële passagiersvervoer over het water geboden door de traditionele rondvaarttochten.

Tabel 2: Aantal vaartuigen met vergunningsbewijs volgens de RPA.

Segment	Type boot	# vaartuigen*	# passagiers** (maximaal)
Bemand/groot tot en met 20 x 4,25 meter	Rondvaart	115***	40 t/m 115****
	Salonboot	16	30 t/m 60
	Overig	10	40 t/m 90
	Totaal	141	30 - 115
Bemand/gesloten tot en met 14 x 3,75 meter	Rondvaart	2	12 en 32
	Salonboot	9	18 t/m 28
	Overig	5	12 t/m 25
	Totaal	16	12 t/m 36
Bemand/open tot en met 10 x 3,15 meter	Salonboot	17	6 t/m 12
	Sloep	120	5 t/m 45
	Overig	4	4 t/m 12
	Totaal	141	4 t/m 45
Onbemand 5,5 x 2 meter	Waterfiets	100	5
	Totaal	100	5

Bron: Register bedrijfsmatige passagiersvaart (RPA) van Waternet, 9 juni 2015, bewerkt door TNO.

* Inschatting van segment op basis van het maximaal aantal passagiers aan boord.

** Bij sommige segmenten wijkt het maximaal aantal passagiers af van het RPA (tot circa 20% minder passagiers) om voldoende comfort te behouden voor de passagiers.

*** Omvat ook grotere vaartuigen.

**** Bij grotere rondvaartboten (langer dan 20 meter) tot 140 passagiers.

4 Specificaties van een rondvaartboot met elektrische aandrijving

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de specificaties van een rondvaartboot met elektrische aandrijving. Dit kan zowel gelden voor een volledig-elektrische aandrijflijn als voor een (serie)hybride. De volledig-elektrische aandrijflijn en de hybride aandrijflijn zijn vergelijkbaar, alleen bij de hybride is er een extra generator aan boord (een verbrandingsmotor of een brandstofcel in combinatie met waterstof) die zorgt voor extra range in specifieke situaties, zoals het varen naar de werf en/of tochten die ver buiten de Amsterdamse grachten gaan. De generator zal tijdens reguliere inzet niet benodigd zijn.

4.1 Vermogensbehoefte voor aandrijving

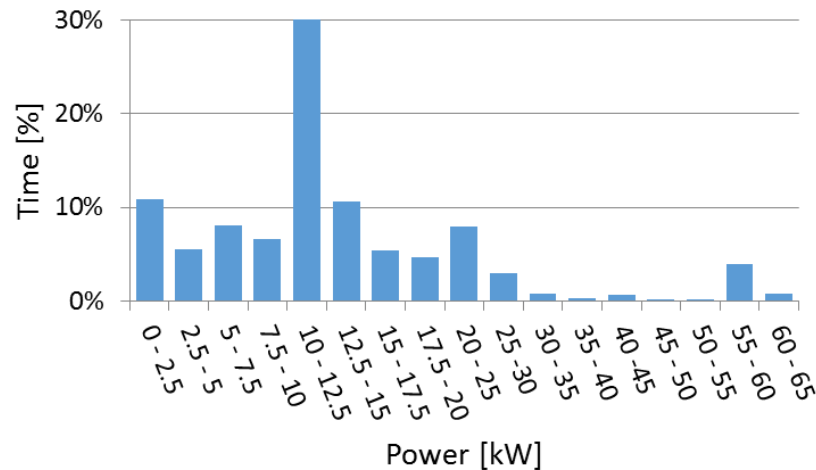
In 2014 heeft TNO met metingen het vaarprofiel van een typische rondvaartboot uit het segment 'bemand groot' bepaald. Het ging om de Barlaeus van Blue Boat Company. De Barlaeus is een elektrische rondvaartboot van 20 meter lang met een elektromotor van 50 kW. Met behulp van het vaarprofiel wordt vastgesteld hoeveel energie het vaartuig gemiddeld nodig heeft over een bepaalde tijdseenheid bij een bepaald type inzet. Daarnaast kan ook in kaart worden gebracht hoeveel procent van het geïnstalleerde motorvermogen daadwerkelijk gebruikt wordt. Een dergelijke meting is belangrijk indien een vaartuig geëlektrificeerd dient te worden. Er kan dan onderbouwd worden gekozen voor een passende aandrijflijn en een geschikt accupakket en, indien nodig, een extra dieselgenerator.

Uit de metingen is gebleken dat er tijdens de inzet gemiddeld ongeveer 15,5 kWh per uur nodig is aan de schroef voor de voortstuwing bij een vol vaartuig. Aan de batterij is het energiegebruik hoger door rendementsverliezen in de aandrijflijn en het ontladen van de batterij. In totaal bedraagt het rendementsverlies tussen de 10% en 20%, afhankelijk van het type batterij (zie hoofdstuk 6 voor meer informatie hierover). De Barlaeus heeft lood-zuur batterijen, met een typisch rendementsverlies van ongeveer 20%. Hiermee komt energiegebruik aan de accu op ongeveer 19,4 kWh.

Dit komt goed overeen met eigen metingen van Blue Boat Company. Uiteraard zal het benodigde energiegebruik per rondvaartboot en per type trip verschillen. Bovendien kunnen weerscondities, het aantal passagiers et cetera ook het energiegebruik beïnvloeden. Naar verwachting zullen de meeste typische rondvaartboten in het segment 'bemand groot' aan de schroef een energiegebruik hebben van tussen de 13,5 en 17,0 kWh per uur. Dat komt neer op tussen de 15 en 21 kWh energiegebruik aan de batterij. Metingen van de TU Delft en Damen resulteren in ongeveer dezelfde waarden. Deze waarden zijn exclusief het gebruik van de boegschroef, hotelverbruik (beide minimaal) en verwarming.

De onderstaande figuren geven een gedetailleerder inzicht in meetresultaten van de Barlaeus. Figuur 1 laat de tijdsverdeling per vermogensklasse zien. Het grootste gedeelte van de tijd opereert de rondvaartboot in de vermogensklasse tussen de 10,0 en 12,5 kW. Dit vermogen is typisch nodig voor het varen binnen de grachten van Amsterdam. Ook valt op dat de vermogensklasse van 55 tot 60 kW regelmatig voorkomt. Vermoedelijk worden deze vermogens gebruikt voor haakse bochten en manoeuvreren.

Dit vermogen is hoger dan het maximum continu vermogen van de elektromotor. Elektromotoren kunnen echter kortstondig hoger belast worden. Het maximum vermogen kan ook benodigd zijn om de wettelijk eis voor noodstops te kunnen halen, namelijk het binnen twee scheepslengtes stil kunnen liggen met een vol vaartuig vanuit maximale snelheid.



Figuur 1: Tijdsverdeling per vermogensklasse.

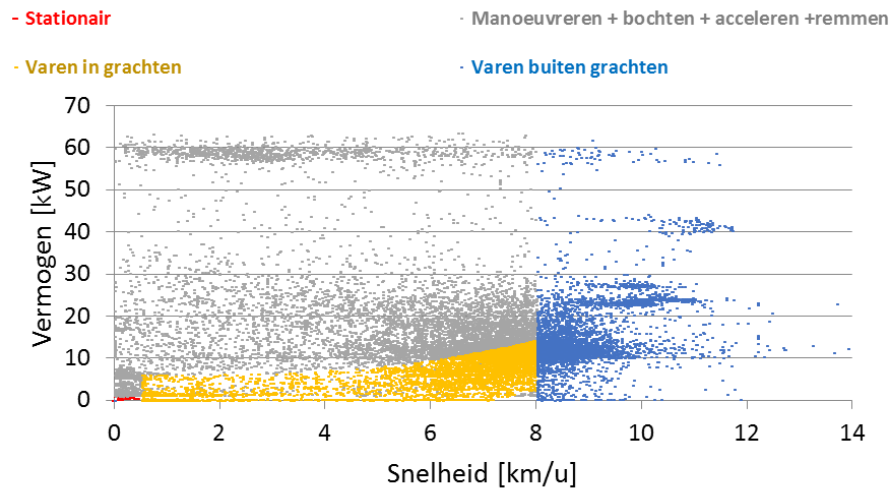
Tijdens de metingen is het vermogen en de snelheid per seconde gemeten. Figuur 2 geeft het benodigd vermogen per type inzet als functie van de snelheid van elk meetpunt weer.

Voor het type inzet wordt onderscheid gemaakt tussen:

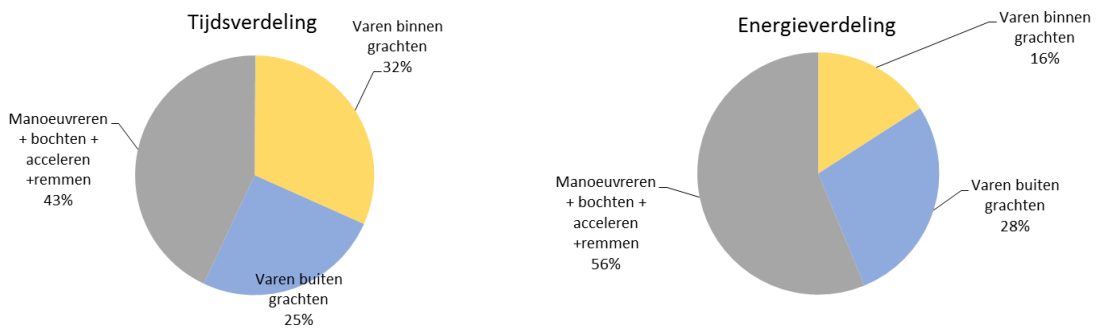
1. Varen in de grachten (geel)
 - a. Meetpunten onder de 8 km/u (vanwege snelheidslimiet van 7,5 km/u);
2. Varen buiten de grachten (blauw)
 - a. Meetpunten van 8 km/u of hoger;
3. Manoeuvreren, bochten, accelereren en remmen (grijs)
 - a. Meetpunten met een substantieel hoger vermogen dan de schroefascurve met een snelheid lager dan 8 km/u (er wordt vanuit gegaan dat dit alleen binnen de grachten gebeurt).

Deze aanpak is relatief eenvoudig maar geeft toch een goede eerste indruk van het vaarprofiel. Het kan echter voorkomen dat bepaalde meetpunten aan het verkeerde type inzet worden toegewezen. Vooral bij de gele en grijze gebieden kan dit het geval zijn.

Figuur 3 is gemaakt op basis van Figuur 2. Links staat de tijdsverdeling en rechts staat de energieverdeling per type inzet weergegeven. Opvallend is dat 32% van de tijd binnen de grachten wordt gevaren, maar dat dit slechts 16% van het energiegebruik kost. Het manoeuvreren kost daarentegen juist veel energie in een beperkte tijd. TU Delft heeft op basis van eigen metingen aan een andere vergelijkbare rondvaartboot ook het vaarprofiel in kaart gebracht. Dat vaarprofiel komt grofweg overeen met Figuur 3 [TUD].



Figuur 2: Benodigd vermogen per type inzet als functie van de vaarsnelheid.



Figuur 3: Tijds- en energieverdeling per type inzet.

4.2 Vermogensbehoefte voor hulpsystemen en hotelfuncties

Niet alleen de voortstuwing, maar ook de hulpsystemen, hotelfuncties en de verwarming vragen energie. Deze energieverbruikers zijn niet gemeten. Wel heeft TU Delft [TUD] een inventarisatie gemaakt van de aanwezig componenten, inclusief het maximum vermogen van deze componenten. TNO heeft deze waarden deels overgenomen en waar nodig aangevuld. Ook heeft TNO een grove inschatting gemaakt van het percentage van het vermogen dat gemiddeld wordt gebruikt en hoe lang dit gebruikt wordt. Uiteindelijk resulteert dit in de benodigde energie per uur, zoals te zien in Tabel 3. Uit Tabel 3 blijkt dat er per uur circa 2 kWh benodigd is voor de elektrische verbruikers met een mogelijke piekbelasting van 7,1 kW - als alles tegelijkertijd aan staat.

Tabel 3: Inventarisatie en inschatting van benodigde energie van elektrische verbruikers aan boord van het vaartuig.

Groep	Component	Aansluitwaarde	Percentage vermogen	Tijdsduur per uur	Energie
		[W]	[%]	[min]	[kWh]
Technische ruimtes	Stuurmachine	1000	50%	15	0.13
	Koelwaterpomp E-motor	800	50%	60	0.40
	Ventilatie accuruimte	300	100%	60	0.30
Instrumentatie	Speakers omroepsysteem	420	50%	20	0.07
	Verlichting	300	100%	10	0.05
	Audio systeem	60	100%	60	0.06
	Marifoon	60	100%	60	0.06
	AIS	12	100%	60	0.01
	Camera	10	100%	60	0.01
	Hoofdtelefoons	10	100%	60	0.01
Hotel	Waterkoker	2200	100%	5	0.18
	Koffiemachine	900	100%	10	0.15
	Toilet	500	100%	2	0.02
	Vriezer	50	100%	60	0.05
Overig	Overig	500	100%	60	0.50
Totaal		7122	-	-	2.00

Bron: TU Delft [TUD], bewerkt door TNO.

Tabel 4 geeft een inschatting van de benodigde energie per seizoen voor verwarming van de passagiersruimte van een rondvaartboot. Een rondvaartboot maakt in de meeste gevallen geen gebruik van een airco. In de huidige situatie is een verwarmingsinstallatie geplaatst die rond de 20 kW levert. De aanname is dat dit ook mogelijk is met een warmtepomp. Warmtepompen hebben als voordeel dat er een factor 3 tot 4 minder energie benodigd is ten opzichte van een conventioneel elektrisch systeem. Deze factor wordt Coëfficiënt of Performance (CoP) genoemd.

Voor verwarmingsinstallaties voorzien van een warmtepomp wordt uitgegaan van een CoP van 3,3. Dat wil zeggen dat er circa 6 kW benodigd is voor een 20 kW verwarmingsoutput. In Tabel 4 wordt het gemiddeld benodigde vermogen per seizoen ingeschat. Ook is een schatting gedaan van de gemiddelde duur dat de warmtewisselaar is ingeschakeld. De benodigde energie is in de winter het hoogst, met ongeveer 4,5 kWh per uur. Het is belangrijk om in de toekomst verder onderzoek te doen naar het exacte benodigde vermogen in de winter. In hoofdstuk 7 worden de eigenschappen van een warmtepomp nader toegelicht.

Tabel 4: Inschatting benodigde energie per seizoen voor verwarming en koeling van de passagiersruimte uitgaande van het gebruik van een warmtepomp.

Warmtewisselaar met CoP van 3,3 met 20 kW <u>output</u>	Maximum vermogen	Percentage vermogen	Ingeschakeld per uur	Energie per uur
	[W]	[%]	[min]	[kWh]
Voorjaar	6000	75%	30	2.25
Zomer	6000	20%	15	0.30
Najaar	6000	75%	30	2.25
Winter	6000	100%	45	4.50
Gemiddeld	6000	-	-	2.33

4.3 Totale energiebehoefte per vaartuig

Uit de voorgaande paragrafen blijkt dat in totaal ongeveer 22 kWh (15,5 + 2 + 4,5 kWh) benodigd is om in de winter een rondvaartboot één uur te laten varen (incl. hulpssystemen). Het komt bij diverse rondvaartrederijen voor dat een rondvaartboot tot wel 12 uur op een dag wordt ingezet. In deze paragraaf wordt ervanuit gegaan dat dit 10 rondvaarten van een uur zijn, waarbij er tussen de trips 12 minuten wordt gebruikt voor het op- en afstappen van passagiers. Dit betekent dat het vaartuig in totaal 10 uur vaart en 2 uur aan de wal ligt. Tijdens die 2 uur aan de wal worden hulp- en hotelsystemen waarschijnlijk grotendeels gebruikt. Met deze informatie kan de totale energiebehoefte worden uitgerekend.

De benodigde accucapaciteit wijkt echter af van de energiebehoefte. Er dient namelijk rekening gehouden te worden met het laad- en ontladrendement van de accu's, dat verschilt per accutype, en het rendement van de diverse elektrische componenten aan boord. Tabel 5 toont de rendementen van diverse componenten.

Tabel 5: Inschatting van rendementen van componenten.

Component	Rendement	Lithium ion_LFP	Lood-zuur_Pb-H ₂ SO ₄
Laden accu	%	97%	82%
Ontladen accu	%	98%	85%
Elektrische motor	%	95%	95%
Inverter / regelaar	%	99%	99%
Acculader	%	93%	93%
Dynamo deel van generator	%	98%	98%

Om de levensduur van een accupakket te verlengen mogen de accu's niet compleet worden ontladen. Meestal wordt een maximale ontlading van 80% gehandhaafd, ook wel 80% DoD (Depth of Discharge) genoemd.

Tabel 6 geeft een overzicht van de totale energiebehoefte en de benodigde accucapaciteit indien er niet tussendoor wordt bijgeladen voor één dag varen in de winter met een elektrische rondvaartboot, rekening houdend met de rendementsverliezen en de DoD. Bij een werkdag van 12 uur en een maximale DoD van 80% moet het accupakket een capaciteit hebben van ongeveer 316 kWh.

De nuttige gebruikte energie per dag is dan 253 kWh, ofwel gemiddeld 21,1 kWh per uur. Dit is lager dan de eerder genoemde 22 kWh per uur omdat hier ook het aan wal liggen is meegenomen.

Tabel 6 gaat nu uit van een lithium-ion batterijpakket. Indien een lood-zuur batterij pakket wordt gebruikt dient het accupakket groter (357 kWh i.p.v. 316 kWh) te zijn door het lagere rendement bij ontladen.

Tabel 6: Overzicht van energiebehoefte en benodigde (li-ion) accupakket voor één dag varen in de winter met een rondvaartboot.

	Energiebehoefte per uur	Uren inzet per dag	Uren varen per dag	Totaalrendement elektrische componenten	Energiebehoefte accupakket	Grootte accupakket bij 80% DoD*
	[kWh]	[uur]	[uur]	[%]	[kWh]	[kWh]
Voortstuwning	15,5	12	10	90%	172	215
Verwarming/koeling	4,5			97%	56	70
Elektrische apparatuur	2			97%	25	31
Totaal	22	12	10	-	253	316

* Depth of Discharge

5 Totale energiebehoefte voor elektrische passagiersvervoer

Voor de energieleveranciers is het relevant om te weten hoeveel energie er jaarlijks door de rondvaart en overig passagiersvervoer afgenomen gaat worden, als de hele sector geëlektrificeerd wordt.

Voor een inschatting van de totale energiebehoefte zijn de onderstaande gegevens per segment (de segmenten als benoemd in Tabel 2) benodigd:

1. aantal vaartuigen;
2. uren inzet per jaar;
3. gemiddeld energieverbruik .

Het aantal vaartuigen per segment is al eerder aangegeven in Tabel 2. De ingezette uren per jaar zijn met behulp van meerdere grote rondvaartrederijen ingeschat. Bovendien heeft het Programmabureau Luchtkwaliteit [PL2012] onderzocht hoeveel uur per jaar een rondvaartboot gemiddeld wordt ingezet. Met 2500 uur per jaar komt dit overeen met de inschattingen van de reders. Het gemiddeld energiegebruik voor een rondvaartboot in het segment 'bemand groot' is in het voorgaande hoofdstuk uitgebreid aan bod gekomen.

Voor de andere segmenten is door TNO een grove inschatting gemaakt van het gemiddeld energiegebruik per uur. Het resultaat van de bovenstaande exercitie staat weergegeven in Tabel 7. Voor de gemiddelde energiebehoefte per jaar (vanuit de laadpaal) is ook rekening gehouden met het laadrendement van de accu's (verschilt per accutype, zie Tabel 5) en het rendement van de acculader (tussen de 90 en 95%). In Tabel 7 wordt er vanuit gegaan dat 50% van de schepen lood-zuur batterijen heeft en 50% lithium-ion batterijen. Als alle vaartuigen van alle segmenten elektrisch zouden zijn en hetzelfde aantal vaaruren per jaar zouden maken is de energiebehoefte per jaar ca. 9105 MWh. Daartegenover staat een besparing van ca 2,3 miljoen liter dieselbrandstof per jaar.

Voor een energieleverancier kan dit erg interessant zijn, aangezien de omzet bij 0.12€/kWh ongeveer 1.1 M€ is.

Ter vergelijking: een gemiddeld huishouden verbruikt gemiddeld ca. 3500 kWh aan elektriciteit. Bij het volledig elektrificeren van de schepen gebruikt de gehele sector evenveel elektriciteit als ca. 2600 huishoudens. Ten opzichte van het totale elektriciteitsverbruik van geheel Nederland zou het verbruik minder dan 0,01% zijn.

Tabel 7: Gemiddeld energieverbruik per jaar per segment

Segment	Type vaartuig	Aantal vaartuigen [#]	Aantal personen [#]	Gemiddeld energiegebruik per uur [kWh]	Inzet p/j [uur]	Gemiddelde energiebehoefte per jaar vanuit laadpaal [MWh]
Bemand/groot tot en met 20 x 4,25 meter	Rondvaart	115	40 t/m 115	21,1	2500	7.340
	Salonboot	16	30 t/m 60	15	1250	363
	Overig	10	40 t/m 90	20	1250	302
Bemand/geslot en tot en met 14 x 3,75 meter	Rondvaart	2	12 en 32	12	1250	36
	Salonboot	9	18 t/m 28	12	1250	163
	Overig	5	12 t/m 25	12	1250	91
Bemand/open tot en met 10 x 3,15 meter	Salonboot	17	6 t/m 12	8	1500	247
	Sloep	120	5 t/m 45	2,5	1500	544
	Overig	4	4 t/m 12	2,5	1500	18
Totaal						9.105

6 Accutechniek voor vaartuigen

In dit hoofdstuk wordt de voor toepassingen op het water meest relevante batterijtechniek beknopt beschreven. Daartoe wordt eerst de huidige stand van de techniek van batterijen bekeken. Daarin zijn de traditionele lood-zwavelzuuraccu en de lithium-ion-accu of de Nikkel-metaal-hydride het meest interessant.

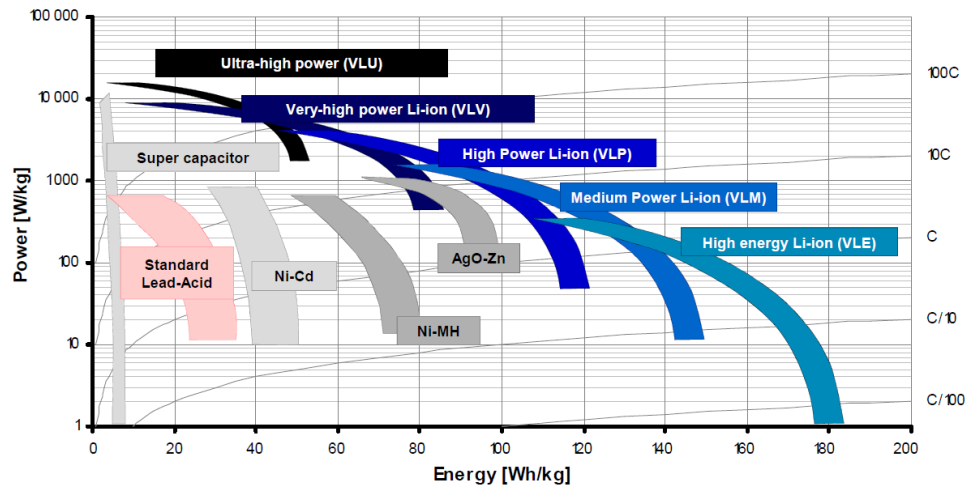
Verder wordt gekeken naar de levensduurverwachting van batterijen, omdat daar in de praktijk vaak vragen over worden gesteld. Na een paragraaf met zowel korte- als langetermijnverwachtingen over accu's gaan paragraaf 6.7 en 6.8 in op de milieuaspecten en wet en regelgeving op het vlak van accu's.

6.1 Eigenschappen van verschillende accutypen

Lithium-iontechniek levert accu's met relatief grote stroom- en opslagcapaciteit, en ook nog met een hoog laad- en ontladrendement (ca. 95%). Dat is het geheim achter de veelbesproken Lithium-ion-accu's (Li-ion). Complicerende factor is daarbij dat er diverse families aan Li-ion-techniek zijn te onderscheiden, die nogal afwijkende specifieke eigenschappen hebben. Een gedetailleerde beschrijving van alle types voert te ver voor deze studie. Daarom wordt hier in vereenvoudigde vorm een Ragone-plot gepresenteerd waarbij de verschillende families Li-ion-accu's qua specifiek vermogen en dito energie in de blauwe velden passen (zie Figuur 4).

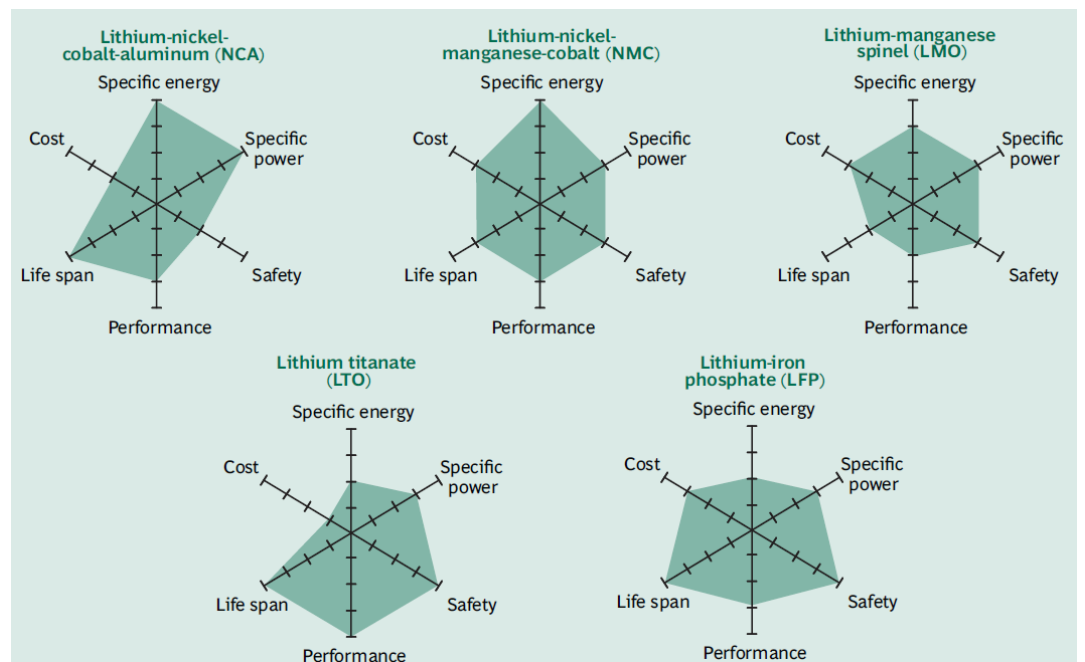
Voor toepassing op vaartuigen zijn typisch medium-power-accu's het meest interessant. Dat komt door de combinatie van goede specifieke energie en vermogen in combinatie met hoge stabiliteit (veilig en makkelijk in te zetten) en een gematigde prijs. Voor de rondvaart is het motorvermogen relatief klein en is een hoog specifiek vermogen van de accu niet belangrijk.

Het roze ingekleurde veld in Figuur 4 geeft het typische gebied aan waarbinnen de specifieke energie en dito vermogen van lood-zwavelzuuraccu's zitten. Voor dezelfde prestaties heeft dat type accu dus meer gewicht. Gewicht is voor een rondvaartboot echter geen probleem. Er moet zelfs voldoende gewicht in het vaartuig aanwezig zijn om onder de bruggen door te kunnen. Het rendement van lood-zwavelzuur over een laad- en ontladcyclus is met ongeveer 70% duidelijk lager dan bij Li-ion mogelijk is. Ook de zelfontlading (het verlies van lading zonder dat er stroom van de accu wordt gevraagd) is met circa 5% per maand duidelijk hoger dan bij Li-ion (ongeveer 1% per maand). Voorlopig is de lood-zwavelzuuraccu techniek door de brede toepassing als start-accu voor allerlei voertuigen evenwel aanzienlijk goedkoper.



Figuur 4: Zogenoemde Ragone-plot van verschillende opslagtypes. In het diagram wordt specifiek vermogen uitgezet tegen specifieke energie. Het quotiënt van beiden geeft de piek-laad of ontladaansnelheid (rechter as; $1C = 1 \times$ de ladingscapaciteit per uur)² (de aanduidingen (VLX) zijn Li-ion serie-aanduidingen van fabrikant SAFT).

Een tweede figuur (Figuur 5) geeft een overzicht van verschillende soorten Li-ion-families - nu aangeduid met de elektrode-chemie als familienaam - met hun respectievelijke sterktes en zwaktes.



Figuur 5: In sterdiagrammen uitgezette eigenschappen van de belangrijkste vijf soorten Li-ion-techniek. De soorten NCA, NMC en LMO zijn typische representanten van de high-energy familie, LFP is medium high power, en LTO very high power³.

² Anne de Guibert "Advances of Li-ion use in industrial applications" SAFT (2013)

³ Boston Consultancy Group "Batteries for electric cars" (2010)

Van elk van de genoemde Li-ion-accu's, ingedeeld naar elektrodematerialen, kan een afgeleide vorm worden gemaakt door in plaats van een vloeibaar elektrolyet (meestal ether-achtig) een polymeer te gebruiken. De technische eigenschappen van de dan verkregen Li-polymeeraccu's worden dan iets minder goed, maar veiligheid en vormvrijheid van het accu-ontwerp nemen hierdoor toe. Dat soort accu's wordt vaak in draagbare elektronische apparaten gebruikt, zoals tablets en telefoons. Naast Li-ion-accu's worden momenteel ook NiMH-accu's aangeboden voor industriële toepassingen met eigenschappen die tussen Li-ion- en lood-zuuraccu's in liggen.

Voor industriële toepassing van systemen zijn betrouwbaarheid en voorspelbare levensduur van eminent belang. Om die reden worden zeer hoge eisen gesteld aan een energieopslag die van vitaal belang is voor de systeembeschikbaarheid. In dat kader is het nuttig kort stil te staan bij de problemen die optraden bij de ontwikkeling van een energiebuffer aan boord van een vliegtuig. Strengere luchtvaartseisen voor bewezen track record maakten dat bij de ontwikkeling van de deels elektrisch aangedreven Boeing 787 ("dreamliner") werd gekozen voor een relatief oud soort lithiumionaccu (lithium-kobaltoxide) dat een hoge specifieke energie heeft en dus een relatief laag gewicht, maar een povere stabiliteit. Er is uitgebreide bewaking van dit soort accu's nodig. Dat bleek in een boordnet van een vliegtuig met sterk wisselende omstandigheden (luchtdruk, spanningsniveau, temperatuur etc.) een ongelukkige keuze. Er traden enkele incidenten op met brand in de accupakketten tot gevolg. Met een moderner, stabielere soort accu (LTO of LFP) waren er waarschijnlijk geen problemen ontstaan.

In het algemeen is (brand)veiligheid voor lithiumionaccu's op een vaartuig net zo min een probleem als bij onbrandbare lood-zwavelzuuraccu's. Wel is voor toepassing van Li-ion een batterij-managementsysteem nodig om de accu in een stabiel en betrouwbare toestand te houden. Ook verdient het aanbeveling de temperatuur te controleren (koeling). Dat is niet alleen goed voor de veiligheid, maar verlengt ook de levensduur. Bij een zeer ernstig incident zou toch brand kunnen ontstaan, die dan met overmaat water of zand bestreden kan worden. De kans op zo'n ernstig ongeval is bij een wegvoertuig al zéér klein⁴. Binnen de grachtengordel is het onwaarschijnlijk dat beschadigingen aan de accupakketten ontstaan. Buiten de grachtengordel zou dat door aanvaring met een groot schip eventueel wel kunnen gebeuren. Een schip zou water kunnen maken of zelfs kunnen zinken. Er moet rekening worden gehouden met een calamiteit door brand en het binnendringen van water. Dit mag niet leiden tot explosie, brand of eventueel elektrocutie.

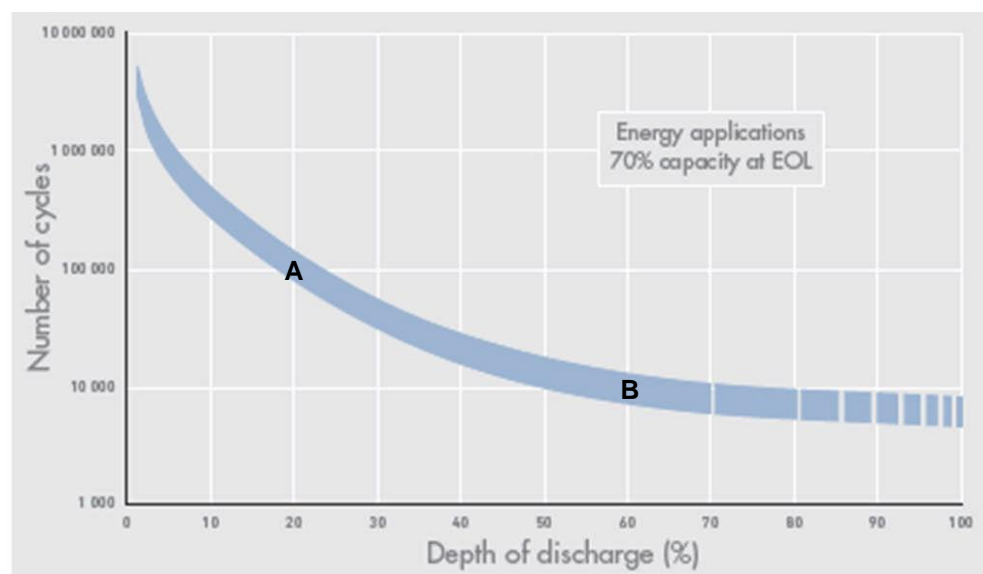
6.2 Levensduurverwachting

Over de levensduurverwachting van accu's heerst nog veel onzekerheid. Dat heeft eerder te maken met onbekendheid dan met de onmogelijkheid om deze met een goede nauwkeurigheid te voorspellen. Als het soort inzet bekend is (met hoeveelheid lading die per inzetactie van de module afgegeven of opgenomen moet worden binnen een bepaalde tijd), kan de levensduurverwachting zeer goed worden voorspeld. Gedurende de levensduur zal door diverse effecten de capaciteit

⁴ [Factsheet Elektrische voertuigen en veiligheid](#)

geleidelijk afnemen. Afhankelijk van de toepassing wordt 70 of 80% van de oorspronkelijke capaciteit als technisch levensduureinde gedefinieerd. De strengere 80%-grens wordt vooral bij mobiele en high-tech toepassingen gebruikt omdat daarbij de energiedichtheid maatgevend is.

Figuur 6 laat zien dat de maximale ontlading van een accupakket sterke invloed heeft op de levensduur van een accu. Als voorbeeld: Bij lagere DOD (Depth of Discharge, ofwel, maximale ontlading) heeft een accu een langere levensduur: punt A in Figuur 6 kent bij een DOD van 20% een levensduur van 100.000 cycli; punt B, bij een DOD van 60% kent een levensduur van 10.000 cycli. De getoonde figuur zou bijvoorbeeld kunnen gelden voor een lithiumionaccu. Het kan daarom mogelijk economisch interessant zijn om een groter accupakket aan te schaffen en deze minder ver te ontladen zodat de levensduur wordt verlengd. Ook het laad- en ontladvermogen en chemisch verval heeft effect op de levensduur.



Figuur 6: Levensduurverwachting in aantallen cycli (op logaritmische y-as) bij vaste ontlad-diepte (lineaire x-as).

6.3 Lagere prijs

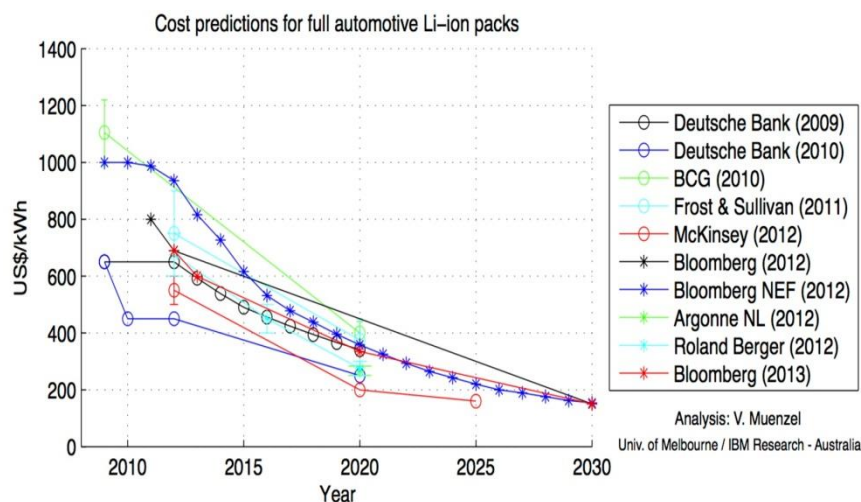
Bij lithium-ion techniek is de prijs voor de losse accu's nog aan de hoge kant (ca. € 500 tot € 750 per kWh). Ondanks optimistische inschattingen over snelle prijsdaling enkele jaren geleden, blijken deze voor hoogwaardige Li-ion-accu's nog niet te worden gehaald. Een studie als die van McKinsey⁵ voorspelt voor een Li-ion-accu een prijs van € 450/kWh voor het jaar 2015. Dat soort inschattingen worden ook graag aangehaald in strategische overzichtsartikelen⁶, maar zo'n laag prijsniveau voor hoog kwalitatieve Li-ion-accu's is vooralsnog alleen voor grote afnemers als Renault-Nissan of Tesla haalbaar. Bij kleinere afnemers, zoals een bescheiden werf of ombouwer, wordt zo'n prijs niet gehaald (eerder €750 per kWh voor kale cellen). Dat is vooral te wijten aan het kip-ei probleem dat marktvolume voor lagere prijzen moet zorgen, en de massale toepassing nog wacht tot de prijzen

⁵ "A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis," McKinsey (2010)

⁶ B. Nykvist en M. Nilsson, "rapidly falling costs of battery packs" Nature climate change, **5**, 329-332 (2015)

duidelijk lager zijn geworden. Al zijn de mogelijkheden nog zo fantastisch, en groeit in het bijzonder de *automotive* accu-markt snel, toch gaat het nog steeds om een beperkte markt.

Het feit dat één speler - automaker Tesla - samen met toeleverancier Panasonic de wereldwijde productiecapaciteit van Li-ion-accu's in één keer kan verdubbelen (al kost het € 3,9 miljard) is wat dat betreft veelzeggend⁷. Figuur 7 vat verschillende studies samen waarin de prijs per kWh van Lithium-ion-batterijen is ingeschat. Alle studies laten een forse daling in de toekomst zien.



Figuur 7: Prijsinschattingen van lithium-ion-batterijen voor de automotieve markt [University of Melbourne].

6.4 Specificaties van geschikte accutypen voor de rondvaart

Op basis van de voorgaande paragrafen worden zowel lithium-ion-, nikkel-metaal-hydride- als lood-zuur-batterijen geschikt geacht voor de rondvaartbranche. De meest geschikte lithiumionbatterij is van het type LFP (lithium-ijzer-fosfaat). In Tabel 8 zijn de specificaties van de li-ion- en lood-zuur-batterijen globaal ingeschat.

De prijs van een accu zal mogelijk afhangen van de garantieperiode die met de leverancier wordt overeengekomen. Hierbij is het wellicht nodig om het belastingspatroon nauwkeurig te omschrijven en gedurende de levensduur te monitoren. Het is belangrijk om na te gaan of de leverancier voldoende kapitaalkrachtig is om garantieverplichtingen na te komen of daarvoor verzekerd is. Eveneens kan men overwegen om het levensduuronderzoek van de leverancier te laten reviewen.

⁷ "Nevada wint slag om Tesla", NRC Handelsblad, 2014-09-09

Tabel 8: Specificaties van geschikte accutypen voor de rondvaart.

	Prijsinschatting 2015	Prijsinschatting 2025	Max. ontlading	Levensduur*	Massa/opslag	Aanbevolen laadsnelheid	Laad-/ontlaad cyclus rendement
	[€ /kWh]	[€ /kWh]	[%]	[# cycli]	[kg/kWh]	[c]	[%]
Li-ion (LFP)	750 – 1000	250	80	3000	10	2	95%
Lood-zuur	140	140	80	1500	30	0.1 – 0.3	70%

* Sterk afhankelijk van maximale ontlading (DoD) en batterijkwaliteit.

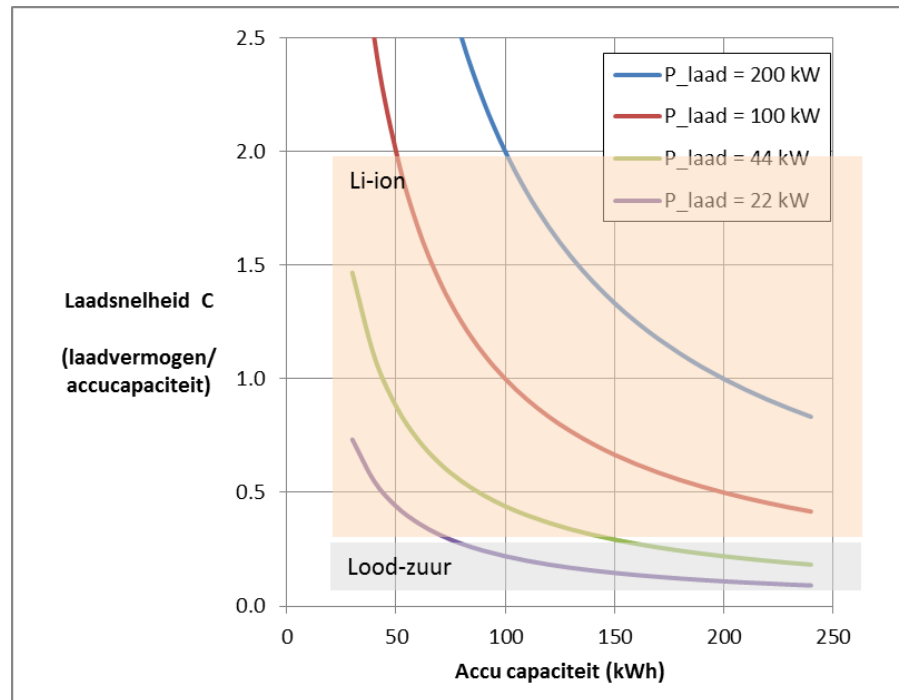
Ook de kwaliteit van de koeling is belangrijk voor het uniform presteren van de cellen in de accu's. In de praktijk wordt een zo uniform en laag mogelijke temperatuur nagestreefd. Waterkoeling zal dan meestal wat beter scoren, vooral als per cel gekoeld wordt. Waterkoeling heeft daarnaast als voordeel dat de afgevoerde warmte gemakkelijk gebruikt kan worden voor ruimteverwarming (als dan niet middels een warmtepomp).

6.4.1 Keuze van accugrootte

De keuze van de accugrootte hangt samen met de gewenste laadstrategie en levensduur van de accu. Met name indien gebruik wordt gemaakt van overdag snel bijladen is het belangrijk dat de maximale of het aanbevolen laadvermogen niet wordt overschreden. De maximum laadsnelheid wordt uitgedrukt in 'c' en is gedefinieerd als het laadvermogen in kW gedeeld door de accucapaciteit in kWh. De eenheid is dus 1/h (of uur^{-1}). Met andere woorden: als de maximale laadsnelheid 1 is ($c=1$), dan mag de accu in 1 uur worden opgeladen.

Figuur 8 geeft een overzicht van de laadsnelheid c als functie van de accucapaciteit en het laadvermogen van het laadstation. De figuur laat bijvoorbeeld zien dat bij een lood-zuur-accu van 200 tot 250 kWh capaciteit het maximum laadvermogen ongeveer 44 kW is. Dat betekent dat minimaal een uur of vijf nodig is om de accu geheel op te laden.

De figuur kan ook andersom gebruikt worden. Als snelladen met 100 kW toegepast dient te worden, dan lukt dat niet met lood-zuur-accu's. Met Li-ion-accu's zou je minimaal 50 kWh accucapaciteit nodig hebben om dit vermogen te mogen laden.



Figuur 8: Berekening van de (specifieke) laadsnelheid 'C' (1/h) als functie van de accucapaciteit in kWh en het laadvermogen in kW.

6.4.2 Hybride accu

Er kan ook gekozen worden voor een combinatie van een Li-ion- en lood-zuur-accu's om aan de eisen van snelladen en voldoende range te voldoen.

Men kan bijvoorbeeld de volgende twee opties overwegen:

- *50 kWh Li-ion accu en 150 tot 200 kWh lood-zuur accu:*
Daarmee heb je in principe voldoende energie om de dag door te komen, maar kun je in geval van nood tussendoor snelladen tot 100 kW. 15 min laden is dan voldoende voor 1 rondvaart (van ca. 1 uur).
- *100 kWh Li-ion accu en 100 tot 150 kWh lood-zuur accu:*
Eveneens voldoende energie voor een normale vaardag, en in geval van nood kun je snelladen tot 200 kW. 15 Minuten laden is dan voldoende voor twee rondvaarten.

6.5 Doorontwikkeling huidige accu's

Het komende decennium zal lithium-ion-techniek dominant blijven voor elektrische auto's, en dat *worden* voor elektrische vaartuigen. Er is zeker wel nog een flink ontwikkelingspotentieel van deze accusoort.

Bij de doorontwikkeling van bestaande Li-ion-techniek valt in het bijzonder te denken aan verbeteringen in elektrodematerialen. Het bereiken van een veel hogere energiedichtheid voor Li-ion-accu's is echter onwaarschijnlijk: boven ongeveer 400 Wh/kg zijn Li-ion-accu's met gewone materialen waarschijnlijk niet veilig stabiel te krijgen. Een hogere celspanning (nu circa 3V) met relatief nieuwe materialen zoals LiCoPO_4 of LiMn_2O_4 is wel mogelijk. Naar verwachting zal (alleen

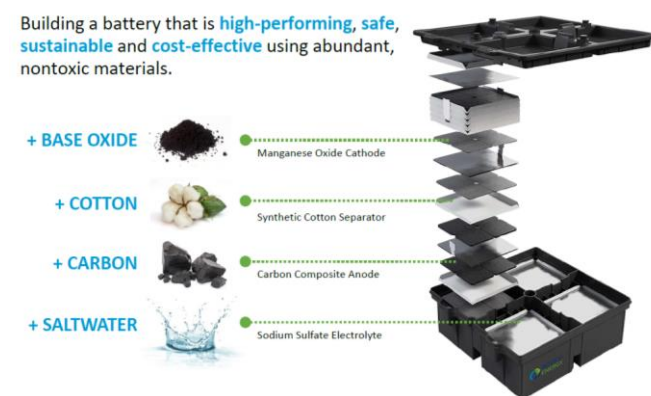
al) hierdoor binnen tien jaar de maximale specifieke energie van gewone commerciële lithiumionaccu's toenemen tot ongeveer 300 Wh/kg.

6.6 Nieuwe soorten accu's

Korte termijn

De behoefte aan betaalbare opslagcapaciteit wordt door snel toenemende opwekking van duurzame energie met wisselend aanbod (zon, wind en ook recuperatie van remenergie) steeds interessanter. Om die reden wordt op veel plaatsen gewerkt aan beter betaalbare en toch robuuste elektrische energieopslag. Een opslag met beperkte capaciteit dicht bij de plek waar de variatie in aanbod en vraag het grootst is, is daarbij het interessantst. Die maakt het namelijk mogelijk dat veel minder of helemaal niet meer hoeft te worden teruggeleverd en gesaldeerd, en dat een veel lagere piekbelasting optreedt waarvoor een 'dunnere' verbinding met het elektriciteitsnet nodig is (minder of kleinere substations) en lagere tarieven mogelijk worden.

Een kosteneffectieve accu-oplossing is dus bijzonder interessant, en daar wordt door veel spelers naar gezocht. Firma's als Aquion of Dr. Ten - het Nederlandse bedrijf met zijn zeezoutbatterij - zijn voorbeelden van fabrikanten die specifiek mikken op een aantrekkelijke prijs, door 'eenvoudige' en veel voorkomende materialen te gebruiken. Daardoor zijn dat soort producten ook meteen ecologisch verantwoord. De resulterende accu's zijn door hun relatief hoge gewicht niet direct interessant voor toepassing op de weg, maar juist zeer interessant voor diverse soorten vaartuigen. De (voorspelde) lage prijs - beneden €250/kWh - maakt dit soort accu's zeer interessant voor toepassing op schepen zodra ze op ruimere schaal beschikbaar komen. En door de toegepaste elektrodes, waarop geen materiaal kristalliseert (zoals bij lood-zwavelzuur) maar waar ionen in opgenomen worden (zogenoeten intercalatie-electrodes –denk aan een "ionen-spons" zoals ook bij Li-ion accu's het geval) is een groot aantal cycli mogelijk (ca. 5000 tot 8000). Verder is desgewenst ook snelladen mogelijk met dit type elektrodes.



Figuur 9: Opbouw van de ecologisch verantwoorde, goedkope ionen-intercalatie-accu van Aquion⁸ met water (Aqua) als elektrolyet.

⁸ "Large Format Aqueous Electrolyte Polyionic Devices for Low Cost, Multi-Hour Energy Storage", Aquion Energy (2014)

Langere termijn

Bij het kijken naar langetermijnontwikkelingen in accutechniek is het belangrijk om aan te geven dat er relatief lange trajecten worden doorlopen voor nieuwe accu's in belangrijke industriële toepassingen terechtkomen. Eerst moet robuustheid en betrouwbaarheid op een geschikt niveau zijn gekomen. Dat betekent dat de in deze paragraaf beschreven techniek pas over een aantal jaren in nieuwe industriële accu's mag worden verwacht. Er is daarnaast ook nog een kans dat de techniek tijdens verdere ontwikkeling toch ongeschikt blijkt, bijvoorbeeld omdat de levensduur van het accutype niet op het gewenste niveau kan worden gebracht.

Betere energiedichtheid

Magnesium-ion-techniek:

Lijkt kansrijk op de langere termijn, maar heeft op dit ogenblik nog veel te beperkt cycle-leven (circa 300 volledige cycli laadbaar).

Metaal-luchtcellen (eigenlijk brandstofcellen):

Deze cellen hebben bijvoorbeeld voor lithium of aluminium een zéér hoge mogelijke specifieke energie (voorbeeld 1 kWh/kg), maar de grote moeilijkheid is om ze vaker herlaadbaar te maken (momenteel nog beperkt tot een paar honderd cycli). Bovendien is een kostbare katalysator nodig aan de zuurstof-elektrode, die platina of ten minste kobalt bevat. Al met al lijkt nog een lange weg te gaan voor er accu's met deze techniek op de markt komen.

Lithium-zwavel-batterijen:

Deze batterijchemie maakt specifieke energie tot ongeveer 300 Wh/kg mogelijk. Van de drie in deze paragraaf beschreven batterijsoorten is deze soort het verst ontwikkeld. Wel is er nog een groot probleem met veroudering (te laag aantal laadcycli). Ook kan onder bepaalde omstandigheden giftig H₂S ontstaan. Om dat te voorkomen is goed batterijmanagement vereist.

Betere vermogensdichtheid

Voor een hogere energiedichtheid kunnen cellen met een hogere spanning worden gebruikt, of kan een compactere opbouw van bestaande accu's worden toegepast. Betere contactoren tussen de elektrodematerialen en de uitvoercontacten kunnen ervoor zorgen dat de hele opbouw veel kleiner (dunner) kan worden uitgevoerd. Een materiaal dat pas kort op grotere schaal toepasbaar is, is het zogenoemde grafeen. Er zijn nog niet veel commerciële toepassingen van grafeen, maar er wordt voor de nabije toekomst veel van verwacht.

6.7 Milieu-impact van opslagsystemen

Met de toegenomen belangstelling voor duurzaam en maatschappelijk verantwoord ondernemen moet ook de totale impact van systemen bekeken worden. Het gaat dan niet alleen om de mogelijke besparingen maar ook om gebruik van schaarse hulpbronnen en mogelijke milieuschade bij productie of bij einde levensduur. Bij Li-ion-accu's is de beschikbaarheid van lithium in elk geval geen probleem. Er zijn enorme winbare voorraden zout in Zuid-Amerika, en daarnaast is lithium winbaar uit zeewater. In Zuid-Korea gebeurt dat ook op commerciële schaal.

Voor de zogenoemde levenscyclusimpact van een product of systeem is het gunstig wanneer het volledig gerecycleerd kan worden. Bijvoorbeeld voor loodzwavelzuuraccu's - de startaccu's in vrijwel alle auto's op de wereld - is de cyclus vrijwel volledig te sluiten (in Europa ruim 99%). Bij lithium-ion-accu's en ook voor supercaps is dat nog niet het geval. Er is echter geen reden om aan te nemen dat wanneer de markt - en dus de massastromen – toenemen, ook hier niet een volledige recycling van (kostbare) grondstoffen zal ontstaan. Technisch is volledige recycling vandaag de dag al mogelijk. Los daarvan is het milieuvoordeel dat de buffering gedurende zijn technische levensduur oplevert (doordat minder vervuiling optreedt ten gevolge van minder stroomafname) voorlopig een veelvoud van de eventuele schade bij volledige dumping van de accu bij einde levensduur (!) doordat een deel van de opwek fossiel en vervuilend is.

6.8 Wet en regelgeving

Op het moment van schrijven bestaat er alleen regelgeving voor lood-zuur-batterijen in de binnenvaart. De regelgeving is terug te vinden in het ROSR en in EU directive 2007/87/EG in hoofdstuk 9 (elektrische installaties). Voor Li-ion- en nikkel-metaal-hydrdebatterijen in de scheepvaart bestaat nog geen regelgeving.

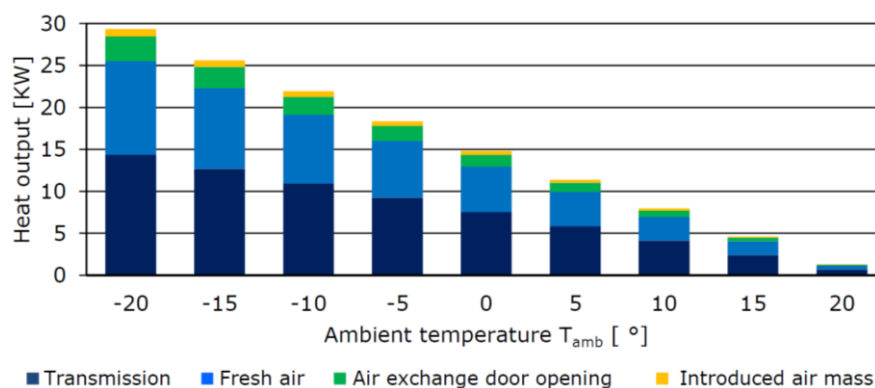
7 Warmtepompsystemen

Volgens de nota varen mag in de toekomst voor de ruimteverwarming van de rondvaartboot geen diesel-verwarmingssysteem meer worden gebruikt. Er bestaat nu ook conventionele elektrische verwarming, maar het stroomverbruik daarvan is erg hoog: tot circa 20 kWh per uur. Daarmee zouden de accu's tweemaal sneller dan normaal ontladen, waardoor de inzet sterk vermindert.

Een warmtepompsysteem is hiervoor wellicht een oplossing. Met een warmtepompsysteem kan het stroomverbruik bij gelijke warmteafgifte met ongeveer een factor drie dalen. De precieze mogelijkheden moeten nog worden onderzocht.

Voor elektrische wegvoertuigen worden op dit moment warmtepompsystemen ontwikkeld. Dit geldt voor zowel personenauto's als voor openbaarvervoersbussen. Een systeem voor een bus is waarschijnlijk voor wat betreft het vermogen redelijk vergelijkbaar met dat van een rondvaartboot. In een bus spelen vergelijkbare aspecten, zoals de behoefte aan ventilatie en het warmteverlies als het gevolg van openen van deuren voor in- en uitstappen.

Voor deze rapportage zijn enkele publicaties over warmtepompsystemen bestudeerd. **Basile 2015**⁹ beschrijft de warmtebehoefte van een bus als functie van de buitentemperatuur (Figuur 10). De energiebehoefte of warmtevermogen van de bus varieert van bijna 30 kW bij -20°C buitentemperatuur tot ca 5 kW bij 15°C. Waarschijnlijk wordt hierbij geen rekening gehouden met het positieve effect van zoninstraling. Dat zal de warmtebehoefte aanzienlijk doen afnemen.



Figuur 10: Warmtebehoefte van een bus als functie van de buitentemperatuur (als voorbeeld voor grootteorde en verdeling voor een rondvaartboot). Bron: Basile 2015.

Ho-Seong, 2012¹⁰ beschrijft vooral de technische layout van het systeem en de afhankelijkheid van de Coefficient of Performance (CoP) bij maximaal vermogen als

⁹ Challenges for air conditioning and heating solutions in Electrobus; Dr.-Ing. Robert Basile, Director R&D Spheros GmBh.

¹⁰ Measurement and Evaluation of Heating Performance of Heat Pump Systems Using Wasted Heat from Electric Devices for an Electric Bus; Chung-Won Cho, Ho-Seong Lee, Jong-Phil Won and Moo-Yeon Lee, Korea Automotive Technology Institute, Energies 2012, 5, 658-669; doi:10.3390/en5030658.

functie van diverse systeemp parameters, zoals de *flow rate* van het koelmedium en de buitentemperatuur.

De belangrijkste technische parameters van de twee publicaties zijn samengevat in Tabel 9. Hierin is te zien dat voor autobus-toepassing wordt uitgegaan van een CoP van ongeveer 3. Dit betekent dat het verbruikte elektrische vermogen een factor 3 lager is dan het warmteafgifte-vermogen. Het kan beter, zoals te zien is in het 3^e voorbeeld in de tabel. Dit zijn de normale specificaties van een warmtepomp voor een groot woonhuis of kantoor (bron Nibe/Vaillant). De CoP heeft een waarde van 4,5 tot 5. Dat betekent dat 4,5 tot 5 keer minder elektrische energie nodig is dan het warmtevermogen. Deze gunstige waarde kan worden bereikt doordat het temperatuurverschil tussen warmteonttrekking en warmteafgifte kleiner is: respectievelijk 0° C en 35° C (35° C verschil). Indien voor dit type warmtepomp de temperatuur voor warmteafgifte wordt verhoogd tot 45° C, dan daalt de CoP tot ongeveer 3,5.

Voor een rondvaartboot kan waarschijnlijk een CoP worden gehaald die tussen die van een autobus en woonhuis in ligt. Voor een boot kan het kanaalwater als warmtebron worden gebruikt, hetgeen doorgaans gunstiger en simpeler is dan het gebruik van buitenlucht als warmtebron. Daarnaast kan de warmteafgifte van de elektrische componenten (elektromotor, elektronica en accu's) worden gebruikt om de brontemperatuur verder te verhogen. Dit wordt bijvoorbeeld beschreven in Ho-Seong, 2012.

Tabel 9: Technische parameters voor een warmtepompsysteem voor verwarming van een autobus en een woonhuis.

Bron		Basile 2015	Ho-Seong, 2012	Nibe, Vaillant
Ontworpen voor		autobus	autobus	woonhuis
Warmte uitwisseling koude / warme zijde (verdampers/condensator)	-	lucht-water / water-lucht	lucht-water / water-lucht	water-water / water-lucht
Warmte vermogen	kW	max 30	max 25 - 30	max 22 - 30*
Bij buitentemperatuur	°C	-20	0 tot 20	-
Inputvermogen	kW	10 tot 15	10	5 tot 14
CoP	-	1.8 tot 3.4	2.8 tot 3	4.5 – 5
Verdampers-temperatuur	°C	-25 tot 20	n/a	0
Warmte-afgifte:				
- water door heater/condensator	°C	-	55	35
- verwarmingslucht	°C	-	42	(ca 25-30)

De praktische installatie van een warmtepomp is niet heel ingewikkeld, vooral als uitgegaan wordt van een woonhuisunit (380 V 3-fasen).

De ruimte inname voor de warmtepomp zelf zal waarschijnlijk ca. 60 x 60 x 60 cm zijn, exclusief de warmtewisselaar voor warmteafgifte. Dit kan een of meerdere water-lucht warmtewisselaars zijn of eventueel een combinatie van wand-vloer- en luchtverwarming. De warmtepomp zelf is een standaard unit, de kwaliteit van de installatie wordt met name bepaald door het ontwerp van de warmteafgifte- en de warmteopnamezijde, inclusief eventueel de combinatie met koeling van de aandrijflijncomponenten en slimme combinatie met ventilatielucht.

8 Laadverbinding en infrastructuur

8.1 Laadprotocol

Voor het elektrisch laden van voer- en vaartuigen bestaan diverse mogelijkheden. De internationale standaard is vastgelegd in de IEC 62196. Deze standaard beschrijft vier mogelijke 'modes' voor het laden. Tabel 10 geeft een beschrijving van de verschillende modes.

Voor de rondvaart adviseert TNO om volgens mode 3 (normaal laden) en/of mode 4 (snelladen) te laden. Er kan dan worden aangesloten bij de laadpalen van het wegverkeer. De meest geschikte stekker is de Mennekes (Figuur 11) of Combo 2 (Figuur 12) stekker. Wel moet nog worden geverifieerd of deze stekkertypen (spat)waterbestendig zijn.

Tabel 10: Overzicht laadprotocollen volgens de internationale standaard IEC 62196.

Mode	Aansluiting	AC/ DC	Spanning	Stroom	Ver- mogen	Type stekker	Opmerking
Mode 1	Regulier stopcontact of 3-fase-aansluiting	AC	230 of 400 V	16A 32A 63/70A	3.7kW 11 kW 22 kW 44 kW	Standaard stekker (Schuko, CEE 7/1) of CEE 3-polig, of CEE 5-polig	Geen communicatie tussen laadpunt en voertuig, daardoor afhankelijk van laadelektronica aan boord. 3-fase-aansluiting moet speciaal worden aangelegd indien niet aanwezig.
Mode 2	Regulier stopcontact of 3-fase-aansluiting	AC	230 of 400 V	16A 32A 63/70A	3.7 kW 11 kW 22 kW 44 kW	Standaard stekker (Schuko, CEE 7/1) of CEE 3-polig, of CEE 5-polig	Extra aardlekfunctie en stroombegrenzer in stekker of kabel toegevoegd als extra beveiliging voor onbekende stopcontacten. Geen communicatie tussen laadpunt en voertuig, daardoor afhankelijk van laadelektronica aan boord. 3-fase-aansluiting moet speciaal worden aangelegd indien niet aanwezig.
Mode 3	Laadpaal	AC	230V of 400V	16A 32A 63/70A	3.7 kW 11 kW 22 kW 44 kW	IEC62196-2 type 2 (Mennekes) of Combo 2	Voertuig communiceert met laadpunt
Mode 4	Laadstation/ Laadpaal	DC	500V kan evt. hoger	125A 200A	50 kW tot 170 kW	Combo 2, CCS, Chademo of Tesla Supercharger	Lader zit in laadpaal

8.2 Laadstekkers

In onderstaande figuren zijn de uitvoeringsvormen van connector opties gegeven. De Mennekes-stekker (Figuur 11) is ontwikkeld voor laden tot 44 kW, hetgeen over het algemeen 's nachts zal zijn. Bij de Combo-2-stekker (Figuur 12), ook wel aangeduid met CCS (Combined Charging Standard), wordt de layout van de Mennekes-stekker gecombineerd met een snellaadoptie door 2 extra polen aan te brengen (gelijkspanning tot 170 kW).

De Tesla- of Chademo-stekkers kunnen worden gebruikt voor snelladen tot 48 respectievelijk 100 kW, zie Figuur 13 en Figuur 14. Bij personenauto's is van standaardisatie in snellaadstekkers nog weinig sprake. Zowel de Mennekes-, Chademo- alsook de Combo2/CCS-stekker worden gebruikt. Vanaf herfst 2017 moeten snelladers in Europa tenminste een CCS-aansluiting hebben. Het staat exploitanten vrij ook na die datum andere snellaad-connectoren te blijven aanbieden. CCS lijkt daarmee de meest logische standaard, welke tot 170 kW DC te gebruiken zou zijn.



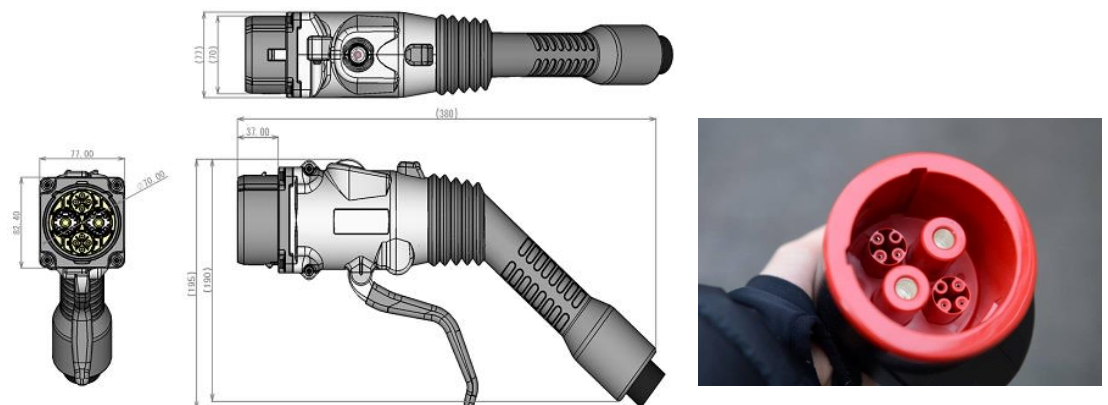
Figuur 11: IEC 62196 Type 2, of "Mennekes"-stekker.



Figuur 12: Combo-2- of CCS-stekker (en contactdoos).



Figuur 13: Tesla-connector (48 kW DC).



Figuur 14: Chademo-connector .

8.3 Specifieke verbindingen voor snelladen

8.3.1 Inductief laden

Inductief laden werkt via twee draadspoelen; een aan de walzijde en een aan de vaartuigzijde. Inductief laden kan zonder of met fysiek contact, maar in beide gevallen vindt het laden plaats zonder een directe elektrische verbinding. Voor schepen zijn nog geen toepassingen met een inductieve koppeling bekend.

De belangrijkste aspecten van een inductieve verbinding zijn aanraakveiligheid, het door te leiden laadvermogen, het rendement en de fysieke uitvoering waarbij de spoelen goed ten opzichte van elkaar geïdentificeerd worden. Voor personenauto's en autobussen is wel een aantal toepassingen bekend [van Kerkhof en van Sloten 2014]. De spoelen zijn dan verwerkt in het wegdek en in de bodem van het voertuig. Vaak kan de secundaire laadlus bij stilstand omlaag zakken.

Een systeem voor een autobus is qua vermogen redelijk vergelijkbaar met die van een rondvaartboot. De systemen zijn echter erg groot en voor een rondvaartboot niet praktisch realiseerbaar.

Er kan wel gedacht worden aan twee uitvoeringsvormen:

- een plat, cilindrische of trapeziumvormig vlak, waar het vaartuig tegenaan vaart en waarmee het zich vergrendelt. Bij een cilindrische vorm is waarschijnlijk een flexibele arm nodig.
- een cilindrische of platte inductieve stekker, die in het vaartuig wordt gestoken. Daarvoor is een zogenaamd flexibel 'portaal' nodig, dat het mogelijk maakt de stekker met geringe krachtinspanning aan te brengen en ervoor zorgt dat de kabel goed wordt geleid.

Men moet bij inductief laden wel rekening houden met overbrengingsverlies, dat naar verwachting ongeveer 5% bedraagt. Laden met bijvoorbeeld 100 kW levert bijvoorbeeld 5 kW overbrengingsverlies op. Dit verlies gaat bovendien gepaard met een flinke warmteontwikkeling rondom de inductieve componenten. Tabel 11 geeft een aantal voorbeelden van laadverbindingen met hoog vermogen.

8.3.2 *Conductieve contacten voor hoog vermogen*

Een automatisch contact of een pantograaf zijn vooral bekend van trein en tram. Ook bij elektrische bussen wordt dit soms toegepast om bij haltes of aan het einde van de rit de accu's snel op te laden.

Daarnaast worden bij hoog vermogen ook stekkers toegepast. Dit is tot nu toe bij schepen het geval. Figuur 16 geeft de laadverbinding van de Norled-veerboot weer.



Figuur 15: Volledig elektrisch autoveer tussen Lavik en Oppedal (N). Vaarafstand 5,6 km en benodigde energie circa 150 kWh per enkele reis.



Figuur 16: De laadverbinding van de Norled-veerboot. De laadaansluiting op de steiger is ongeveer zo groot als een krantenkiosk. Om het lokale elektriciteitsnet te ontzien zijn op beide oevers accu-buffers van 260 kWh capaciteit geïnstalleerd. Op de uitvergroting rechts zijn de aansluitcontacten te zien.

8.3.3 Overzicht laadverbindingen voor hoog vermogen

Tabel 11 geeft een overzicht van een aantal laadverbindingen voor hoog vermogen. Dit omvat conductieve en inductieve verbindingen in een laadvermogenbereik van 60 tot ongeveer 900 kW.

Tabel 11: Voorbeelden van laadverbindingen voor enkele toepassingen met hoog laadvermogen.

Toepassing	Leverancier	Type	P (kW)
Veer Lavik-Oppedal	Siemens	Conductief, stekker(s)	~ 900
Bus Shanghai China	Aowei	Conductief, bovencontacten	300
Bus Braunschweig	Bombardier	Inductief	200
Lijn 2 Utrecht	Proov	Inductief	60
Bus, div. locaties Europa & Canada PHEV bus Hamburg	Siemens + Volvo	Conductief, bovencontacten	150 – 450 kW
TOSA Genève	ABB Epyon	Conductief, bovencontacten	tot 400

Bij conductieve verbindingen zijn de contacten vaak spanningsloos als er geen verbinding is. Dit is bijvoorbeeld het geval bij een mode 3 of 4 verbinding. De aanwezige elektronica geeft een signaal als een verbinding tussen vaartuig en laadpunt tot stand is gebracht. Daarna komt er pas spanning op de contacten. De elektronica geeft ook het maximum laadvermogen door.

8.4 Laadinfrastructuur

Tabel 12 geeft een overzicht van de huidige ligplaatsen en op- en afstapplaatsen van de betrokken grote rondvaartrederijen in Amsterdam. Bij elektrificatie van de rondvaartboten dienen er op deze plaatsen laadvoorzieningen te komen. Daarnaast bestaan er ook nog diverse openbare ligplaatsen.

Tabel 12: Overzicht bestaande ligplaatsen en op- en afstapplaatsen in Amsterdam.

Type plaats	Locatie	Aantal reders	Ligplaats	Op- en afstappunt	Aantal schepen - bemand gesloten groot
Cluster	Stadhouderskade	3	ja	ja	18
	Damrak	2	ja	ja	15
	Prins Hendrikkade	2	ja	ja	27
Individueel	Rokin	1	ja	ja	16
	Open Haven front West / Stationseiland	1	ja	ja	3
	Amstel	1	ja	ja	6
	Singelgracht	1	ja	ja	3
	Europarking schippersark	1	ja	nee	12
	Leidse bosje	1	nee	ja	1

Waarschijnlijk zullen de meeste rondvaartboten 's nachts worden opgeladen. Dit kan dan met een laadvermogen van maximaal 22 of 44 kW. Afhankelijk van de totale capaciteit aan laadvermogen per locatie kan het maximaal vermogen worden gevarieerd. Het minimaal noodzakelijke laadvermogen per locatie zal per seizoen en afhankelijk van het aantal rondvaarten variëren. Dit kan in de toekomst nog precies berekend worden.

Een mogelijke laadstrategie is om overdag bij te laden. Vanwege de beschikbare tijd tijdens in- en uitstappen is daarvoor een hoog laadvermogen nodig van 100 tot 200 kW (minimaal 100 kW). De meeste economische optie is waarschijnlijk het realiseren van enkele algemene snellaadlocaties. Deze kunnen dan ook gebruikt worden voor andere categorieën elektrische schepen (rondvaart, bedrijfs- en particulier). Een andere optie is om snellaadpunten in te richten bij de opstapplaatsen van de verschillende rederijen.

9 Laadstrategieën voor een rondvaartboot

Eerder in deze rapportage is beschreven hoeveel accucapaciteit nodig is er als er niet tussendoor wordt bijgeladen voor een inzet van 12 uur. Het voorgaande hoofdstuk beschrijft de opties voor laden. Tabel 13 geeft aan wat de tijdsduur en laadenergie is bij verschillende laadvermogens voor een rondvaartboot. Dit scenario gaat uit van 10 uur varen, waarbij het vaartuig tussen de trips door 12 minuten aan wal ligt. De rendementsverliezen die optreden tijdens het laden zijn hierin meegenomen. Voor het snelladen met gelijkstroom is geen acculader in het vaartuig benodigd. Dat scheelt in laadtijd en laadenergie.

Opvallend is dat als met 22 kW wordt geladen er voor een installatie met lood-zuur-accu's ruim 17 uur benodigd is voor het laden van het batterijpakket. In veel gevallen is dat niet snel genoeg.

Tabel 13: Benodigde accucapaciteit en laadtijd en energie bij verschillende laadvermogens.

		Li-ion	Lood-zuur
Benodigde accucapaciteit	[kWh]	253	286
Benodigde accucapaciteit 80% DoD	[kWh]	316	358
Tijdsduur laden 22 kW (AC)	[uur]	12.9	17.2
Tijdsduur laden 44 kW (AC)	[uur]	6.4	8.6
Tijdsduur laden 100 kW (DC)	[uur]	2.6	3.5
Energie geladen in 12 minuten bij 22 kW (AC)	[kWh]	3.9	3.3
Energie geladen in 12 minuten bij 44 kW (AC)	[kWh]	7.9	6.6
Energie geladen in 12 minuten bij 100 kW (DC)	[kWh]	19.2	16.2

Tabel 14 geeft de minimaal benodigde batterijcapaciteit voor diverse laadvermogens en accutypes weer. Opvallend is dat een lood-zuur-batterijpakket een capaciteit moet hebben van ongeveer 500 kWh om snelladen aan te kunnen. De aanbevolen laadsnelheid is mogelijk wat aan de voorzichtige kant. Als 0.3C wordt aangenomen moet het accupakket alsnog een capaciteit hebben van 333 kWh.

Tabel 14: Minimaal benodigde accucapaciteit per laadvermogen.

Batterij type	[-]	Lithium-ion			Lood-zuur		
Aanbevolen laadsnelheid	[c]	2			0.2		
Laadvermogen	[kW]	22	44	100	22	44	100
Minimaal benodigde accucapaciteit	[kWh]	11	22	50	110	220	500

Tabel 15 geeft de minimaal benodigde batterijcapaciteit voor diverse laadstrategieën en accutypes weer.

De volgende laadstrategieën zijn geanalyseerd:

1. in de nacht compleet batterijpakket opladen (li-ion en lood-zuur);
2. tussen de trips door en 's nachts bijladen met 44 kW wisselstroom (li-ion en lood-zuur), en;
3. tussen de trips door en 's nachts snelladen met 100 kW gelijkstroom (li-ion en lood-zuur).

Het snelladen met 100 kW met lood-zuur batterijen lijkt, gegeven de hoge laadbelasting van 0.6C, geen goede optie. Een laadbelasting tussen de 0.1 en 0.3C wordt aanbevolen voor dit type batterij. Door de accucapaciteit te vergroten kan de laadbelasting nog wel omlaag. Een snellaadinstallatie is echter relatief duur en de lood-zuur-accu's zijn juist relatief goedkoop. Hierdoor lijkt de optie van snelladen met li-ion-batterijen geschikter. Deze kunnen ook hogere laadvermogens aan. De optie van tussendoor opladen met lood-zuur-batterijen lijkt wel mogelijk: het accupakket kan daarmee kleiner worden gehouden.

De genoemde opties met li-ion-batterijen in de tabel lijken verder allemaal mogelijk. Hoe hoger het laadvermogen voor tussendoor bijladen is, hoe kleiner het accupakket kan zijn. Dat kan een flinke invloed hebben op de investering en daarmee de business case (zie hoofdstuk 11).

Het kan mogelijk nog gunstig zijn om het accupakket te vergroten om de levensduur van het pakket te verlengen. Dat moet echter nog verder worden uitgewerkt. Indien het accupakket groter wordt gemaakt is het ook mogelijk om met hogere laadvermogens te werken. Daarmee wordt snelladen met lood-zuur-accu's wellicht ook een haalbare optie.

Tabel 15: Minimaal benodigde batterijcapaciteit (80% DoD) bij verschillende laadstrategieën.

Batterij type	[-]	Lithium-ion			Lood-zuur		
		Nacht laden	Tussen trips door laden + nacht	Tussen trips door snel-laden + nacht	Nacht laden	Tussen trips door laden + nacht	Tussen trips door snelladen + nacht
Laadvermogen	[kW]	22	44	100	22	44	100
Minimaal benodigde accucapaciteit (incl. 80% DoD)	[kWh]	316	225.8	98.1	357	280.3	172.3
Laadbelasting	[c]	0.07	0.19	1.02	0.06	0.16	0.58

10 Veiligheid elektrisch varen

Er zijn drie mogelijke calamiteiten waarbij gevaar kan optreden:

- binnendringen van water of zinken;
- brand, en;
- ernstige aanvaring.

De onderstaande toelichting is vooral gebaseerd op die van elektrische voertuigen [TNO 2015].

10.1 Binnendringen water of zinken

Voor elektrische voertuigen is redelijk goed gekeken naar onder water gedompelde voertuigen [MGS 2015]. Hieruit blijkt dat het risico op elektrocutie nihil is. Wel bestaat een kleine kans dat door elektrolyse waterstof- en zuurstofgas ontstaat. Bij ophoping zou dit een explosief mengsel kunnen worden. Hulpverleners moeten hier rekening mee houden.

Rondvaartschepen zullen een drie tot tienmaal grotere accucapaciteit hebben dan personenauto's, maar waarschijnlijk is eerder de spanning en contactoppervlak maatgevend voor de hoeveelheid elektrolyse dan de energie-inhoud.

10.2 Brand

Uit proeven en langzaam groeiende praktijkervaring, wederom bij voertuigen, blijkt geen additionele onveiligheid t.o.v. conventionele voertuigen. Voor het blussen van een brandend elektrisch voertuig of accupakket is een overvloed aan water geschikt. Ook zand kan een goede optie zijn.

10.3 Ernstige aanvaring

Bij een aanvaring bestaat bij elektrische vaartuigen het gevaar dat delen onder stroom staan of dat er door kortsluiting brand ontstaat. Vanuit de constructie moet men hiermee rekening houden, bijvoorbeeld door kabels en andere elektrische delen buiten de waarschijnlijke kreukelzones te houden en ervoor te zorgen dat kabels niet bekneld kunnen raken. Voor hulpverleners zijn er cursussen technische hulpverlening bij ongevallen met alternatief aangedreven voertuigen. Daarin komen zaken aan bod als het benaderen, veiligstellen en afhandelen van elektrische en hybridevoertuigen bij incidenten.

11 Business case elektrisch varen

Het elektrificeren van de rondvaart vermindert de lokale luchtverontreiniging en heeft zodoende een positief effect op de lokale luchtkwaliteit. Voor ondernemers is het echter ook van belang dat de rondvaartboot rendabel is. In 2014 heeft TNO businesscaseberekeningen uitgevoerd met diverse batterij- en laadconfiguraties. Ook staat de aangehouden 'nuttige' batterijcapaciteit weergegeven. Dat houdt in dat de 80% DoD (Depth of Discharge, ofwel, maximale ontlading) niet is meegenomen. Er werd in 2014 uitgegaan van een afwijkende inzet en gedeeltelijk geoptimaliseerde rondvaartboten. Hierdoor wijken de genoemde capaciteiten af van het voorgaande hoofdstuk.

Tabel 16: Batterij en laadconfiguraties gebruikt in de eerdere businesscaseberekeningen.

Configuratie	Nuttige batterijcapaciteit
1. Lithium-ion batterijpakket die 's nachts wordt bijgeladen	211 kWh
2. Kleinere lithium-ion batterijpakket die tussen de trips door en 's nachts wordt bijgeladen	119 kWh
3. Klein lithium-titanaat batterij pakket (geschikt is voor snelladen) die tussen de trips door gebruik maakt van snelladen.	35 kWh
4. Lood-zuur batterijpakket die 's nachts wordt bijgeladen	243 kWh

Tabel 17 en Tabel 18 geven de aannames weer voor de businesscaseberekeningen. De aannames zijn afgestemd met reders en component- en systeempleveranciers. De toekomstige li-ion-batterijen zijn onder andere gebaseerd op een uitgevoerde studie van de University of Melbourne [University of Melbourne], zie ook Figuur 7 in hoofdstuk 6. De externe kosten voor emissies zijn bepaald aan de hand van het CE Delft rapport "Berekening van externe kosten van emissies voor verschillende voertuigen" [CE Delft].

Tabel 17: Geschatte batterijprijzen in 2014 en 2024 per nuttige kWh.

Type batterij		Kalenderjaar		Levensduur
		2014	2024	#cycli
Lithium-ion LFP	[€ /kWh]	750	250	3000
Lithium-titanaat	[€ /kWh]	1100	350	15000
Lood-zuur	[€ /kWh]	140	140	1500

Tabel 18: Aannames voor businesscaseberekeningen.

Inzet per jaar	[uur/jaar]	3000	-
Brandstofprijs	[€/liter]	1.05	4% stijging per jaar
Elektriciteitsprijs	[€/kWh]	0.12	2% stijging per jaar
Gemiddelde elektriciteitsprijs voor snelladen	[€/kWh]	0.30	Inclusief afschrijving snellaadstation (10 jaar)
Kosten voor diesel-aandrijflijn ombouw	[€]	55000	Motor die voldoet aan fase IIIb norm, is retrofit motor, zou ook een gasmotor kunnen zijn. Voor 2024 worden de kosten geschat op ca. €28.000,- omdat de dieselmotoren dan niet meer retrofit hoeven te zijn (schonere motoren komen waarschijnlijk beschikbaar)
Kosten voor elektrische aandrijflijn ombouw, exclusief accu's	[€]	70000 to 85000	Afhankelijk van configuratie en jaar van investeren
Financiële verliezen door stilstand rondvaartboot	[€]	50000	Voor de dieselconfiguratie wordt €25.000,- aangenomen
Rentevoet	[%]	5	
Externe kosten voor emissies:			
CO ₂	[€/ton]	40	[CE Delft]
NO _x	[€/kg]	9.8	
PM	[€/kg]	632	

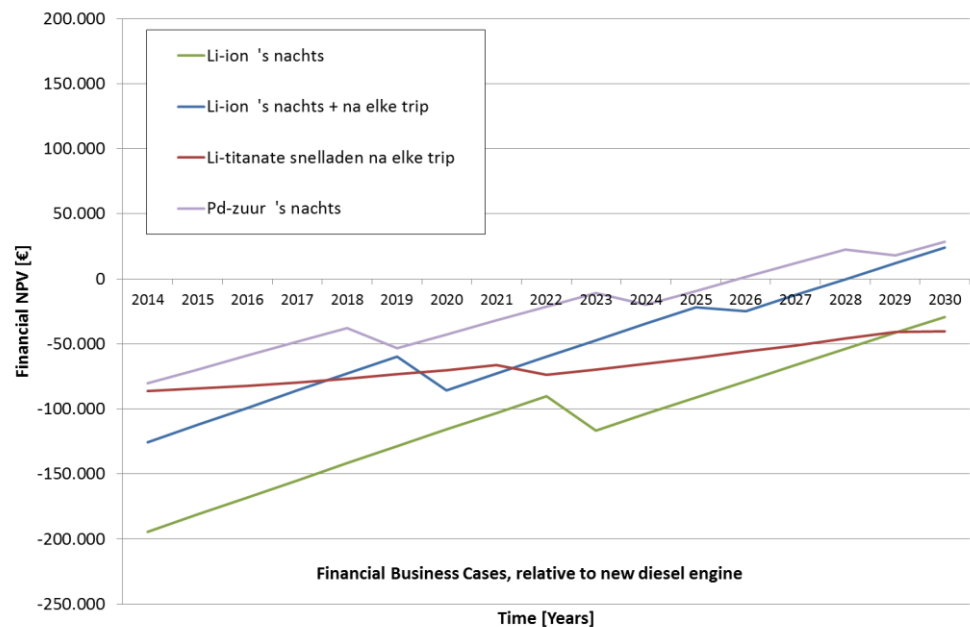
Figuur 17 laat de resultaten van de businesscaseberekeningen zien als het jaar van investeren 2014 was. De terugverdientijd is gerelateerd aan een 'schone' dieselconfiguratie, dat wil zeggen een dieselmotor die de emissie-eisen van Amsterdam haalt. Vanaf moment dat de investering is terugverdiend, levert de elektrische aandrijflijn winst op ten opzichte van de diesel-aandrijflijn. Een volledig elektrische aandrijflijn behoeft een significant hogere investering dan een diesel-aandrijflijn in dit segment, met name als gevolg van de batterijkosten. De kosten voor elektriciteit zijn echter wel lager dan voor diesel. Indien er nu geïnvesteerd moet worden lijkt de configuratie met lood-zuur-batterijen economisch het meest interessant. Deze optie heeft momenteel de kortste terugverdientijd: ongeveer 12 jaar. De optie van een lithium-ion-batterijpakket dat 's nachts en na elke trip wordt bijgeladen heeft een terugverdientijd van circa 14 jaar. Deze configuratie is gunstiger dan de optie met een lithium-ion-batterijpakket dat alleen 's nachts wordt opgeladen doordat het batterijpakket kleiner is. Door de hoge kosten voor lithium-ion-batterijen is het gunstig om het batterijpakket zo klein mogelijk te houden. De optie met lithium-titanaat heeft nu een terugverdientijd van ongeveer 16 jaar. Dit is vooral het gevolg van de hoge kosten van de snellaad-installatie.

Figuur 18 laat zien dat de lithium-ion-opties in de toekomst interessanter worden. Dat is het gevolg van de verwachte dalende prijs van li-ion-batterijen. Indien de batterijkosten voor li-ion zo ver dalen als verwacht, kan de terugverdientijd afnemen tot 6 jaar in 2024. Over de daadwerkelijk accuprijs in 2024 bestaat echter nog veel onzekerheid. De configuratie waarbij na elke trip wordt bijgeladen zou enkele jaren sneller terugverdiend zijn dan de lood-zuur-configuratie.

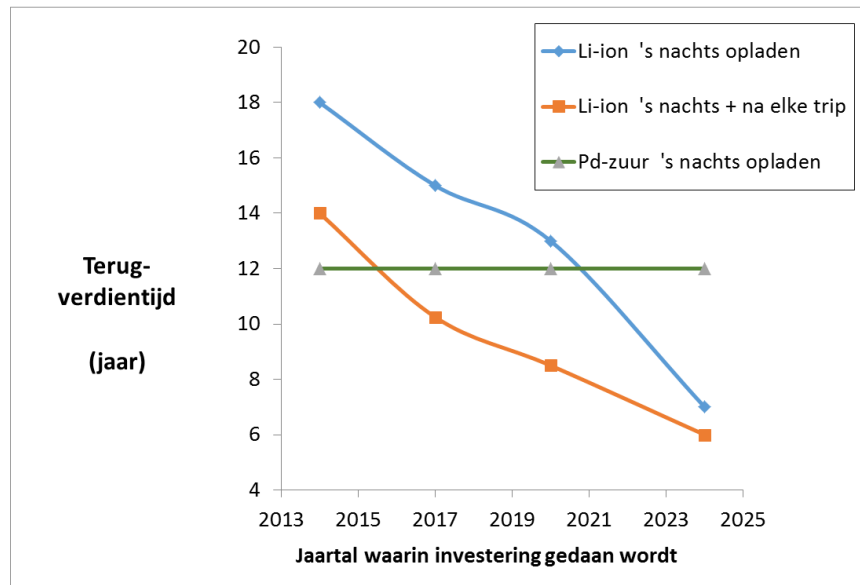
Voor lood-zuur-batterijen is een gestabiliseerde prijs aangenomen. De terugverdientijd van deze optie blijft dan ook 12 jaar. Voor lood-zuur-batterijen is het mogelijk ook interessant om na elke trip bij te laden.

Een lager energiegebruik per uur heeft een positief effect op de business case. Om het energiegebruik te verlagen, kan men denken aan de volgende maatregelen en/of opties:

- betere isolatie van de binnenruimte zodat minder verwarming nodig is;
- geoptimaliseerde warmtepomp met een lage CoP;
- schip verwarmen als het aan wal ligt;
- schip optimaliseren voor manoeuvreren;
- rendementsverbeteringen van de componenten, en;
- verbeterd vaargedrag, met name tijdens afremmen en manoeuvreren.



Figuur 17: Financiële business case met als investeringsjaar 2014, terugverdientijd is ten opzichte van een diesel-aandrijflijn.



Figuur 18: Verwachte terugverdientijd van diverse elektrische configuraties per investeringsjaar.

12 Bestaande elektrische rondvaartboten en toekomstige benodigdheden

12.1 Overzicht bestaande elektrische rondvaartboten

Met het elektrisch varen wordt reeds ervaring opgebouwd door de Amsterdamse reders. De betrokken reders binnen dit project hebben een inventarisatie gemaakt van de nu beschikbare volledig elektrische rondvaartboten uit het segment 'bemand groot'. Tabel 19 geeft een samenvatting van deze inventarisatie.

Tabel 19: Overzicht van de nu beschikbare elektrische rondvaartboten.

Naam vaartuig	Eenheid	Barlaeus & Vossius	Lido	Jan van Riebeeck	Andre van Duin & BZN 5 en 6
Type vaartuig	-	Rondvaartboot >80 personen	Rondvaartboot >80 personen	Rondvaartboot >80 personen	Rondvaartboot >80 personen
Jaar in gebruiknaam aandrijflijn	jjjj	2012	2014	2014	2014 en 2015
Type motor	-	DC 400V	DC 560V	AC 460V	144V
Vermogen motor	kW	50	108	50	40
Schroeftype	-	Pod	Schottel	Schroefas	Schroefas
Reductie		n.v.t.	1:3	direct drive	1 op 3
Boegschroef	-	Ja	Ja	n.b.	n.b.
Type batterij	-	Lood-zuur	Lood-zuur	Lithium-ion (polymeer)	Lood-zuur
Voltage batterij	V	400	560	675	144
Energiecapaciteit accupakket	kWh	248	210	68	223

De tabel toont aan dat er momenteel veel ervaring opgebouwd wordt met lood-zuur accu's en in mindere mate ook met Li-ion accu's. Het valt op dat de gekozen configuraties (accucapaciteit, type motor, voltage, type schroef) erg van elkaar verschillen.

12.2 Toekomstige benodigdheden

Praktijkervaringen en gericht onderzoek zal moeten aantonen welke configuraties het meest efficiënt en betrouwbaar zijn. Afhankelijk van de inzet van een rondvaartboot en de daadwerkelijke energiebehoefte dient een optimale accucapaciteit en laadstrategie gekozen te worden. Hiervoor is het nodig om meer ervaring op te doen met snelladen. Voordat alle rondvaartboten volledig elektrisch varen is het ook belangrijk om goed na te denken over een goede laadinfrastructuur. Daarnaast zullen er nieuwe componenten toegevoegd moeten worden aan de schepen. Bijvoorbeeld de verwarming dient in 2025 volledig 'zero

emissie' uitgevoerd te zijn, hier is nog geen ervaring mee opgebouwd. Tot slot is het belangrijk om de kans op kinderziektes te verkleinen, hiervoor is standaardisatie van componenten in de toekomst een belangrijk punt.

Om het leertraject zo snel mogelijk in te zetten, is het nodig om met een beperkt aantal schepen zo spoedig mogelijk praktijkervaring op te bouwen met verschillende nieuwe technologische opties voor elektrische aandrijflijnen (en de combinatie hiervan met boordvoorzieningen) en daarbij optredende problemen te analyseren en te verhelpen. Vervolgens kan dan een keuze worden gemaakt voor de beste technologische oplossingen voor de gehele vloot. Bij een dergelijk leertraject is het van essentieel belang om informatie te delen. Dit betekent dat alle opgedane kennis en ervaring, die beschikbaar komen bij proefnemingen met elektrische schepen van de verschillende rederijen, met elkaar moet worden gedeeld en worden gebruikt om de volgende serie te verbeteren.

13 Referenties

[Nota varen] Varen in Amsterdam 2.1, *beleidskader voor het varen en afmeren in en door Amsterdam, voor passagiersvervoer en pleziervaart*, oktober 2013

[SEO] Prof. dr. B.E. Baarsma et al., SEO-rapport nr. 2012-70, Het roer moet om; *Naar een betere marktordening van bedrijfsmatig passagiersvervoer in de Amsterdamse grachten*, september 2012

[TUD] F.A.G. Jacobs, TU Delft document SDPO.15.015.m, Zero emission concept of a future Amsterdam canal boat, *Energy reduction and system integration coupled with an operational profile and environmental comparison method*, april 2015

[PL2012] E. Regterschot, Programmabureau Luchtkwaliteit presentatie, Inventarisatie rondvaart, 2012

[Basile 2015] Challenges for air conditioning and heating solutions in Electrobuses; Dr.-Ing. Robert Basile, Director R&D Spheros GmbH

[Ho-Seong, 2012] Measurement and Evaluation of Heating Performance of Heat Pump Systems Using Wasted Heat from Electric Devices for an Electric Bus; Chung-Won Cho, Ho-Seong Lee, Jong-Phil Won and Moo-Yeon Lee, Korea Automotive Technology Institute, *Energies* 2012, 5, 658-669; doi:10.3390/en5030658

[TNO 2015] Verbeek r.p., Mark Bolech, Rene van Gijlswijk en Jordy spreen, TNO rapport TNO 2015 R10386, *Energie- en milieuaspecten van elektrische personenvoertuigen*, 2015

[MGS 2015] <http://www.mgstech.net/new-vehicle-technology-awareness-for-public-safety-divers>

[van Kerkhof en van Sloten 2014] APPM en PRC, "Nederland Inductieland? Een verkennende studie naar de mogelijkheden en potentieel voor inductieladen" November 2014

[Univ. Of Melbourne] V. Muenzel, University of Melbourne/IBM research – Australia, *Cost predictions for full automotive Li-ion packs*: <http://theconversation.com/affordable-batteries-for-green-energy-are-closer-than-we-think-28772>

[CE Delft] H.P. van Essen et. Al., CE Delft rapport, *Berekening van externe kosten van emissies voor verschillende voertuigen*, November 2008

14 Ondertekening

Delft, 11 april 2016

TNO



Arjan Zwamborn
Projectleider



Pim van Mensch
Auteur