

Van Mourik Broekmanweg 6
2628 XE Delft
Postbus 49
2600 AA Delft

www.tno.nl

T +31 88 866 30 00
F +31 88 866 30 10

TNO-rapport

TNO 2016 R10039

Onderzoek verschoningsopties veerverbindingen van het GVB Amsterdam

Datum	14 maart 2016
Auteur(s)	Pim van Mensch, Ruud Verbeek, Jorrit Harmsen
Exemplaarnummer	2016-TL-RAP-0100293106
Aantal pagina's	77 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	9
Opdrachtgever	Gemeente Amsterdam
Projectnaam	Amsterdam Veren
Projectnummer	060.17570

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

De Gemeente Amsterdam wil de veerverbindingen over het IJ en het Noordzeekanaal in de toekomst zo schoon mogelijk maken, met behoud van flexibiliteit van inzet. De Gemeente Amsterdam heeft TNO gevraagd om inzicht te geven in verschoningsopties voor veren.

Hierbij is inzicht gegeven in:

1. het gebruiksprofiel van de veerverbindingen, inclusief het huidige energieverbruik en lokale emissies, zoals CO₂, NO_x en fijnstof (PM₁₀).
2. mogelijk technische verschoningsopties voor stads/regionale veren in het algemeen.
3. geschikte verschoningsopties voor de Amsterdamse veerverbindingen op basis van het gebruiksprofiel, zowel voor nieuwe als bestaande veren. De doelstelling van de gemeente Amsterdam is om zo schoon mogelijke technieken toe te passen, rekening houdend met het gebruiksprofiel van de betreffende veerverbindingen.

Gebruiksprofiel veerdiensten

Op basis van een meting aan boord van de veren en modelberekeningen is inzicht gegeven in het gebruiksprofiel en energieverbruik van de Amsterdamse veren. Uit de analyse komt naar voren dat er drie type veren zijn als het aankomt op het gebruiksprofiel:

- **NZK-veren;** deze veren draaien gemiddeld op een laag motorvermogen (ook wel aangegeven als laag belast). In het onderzoek is het profiel van de NZK-Pont te Velsen representatief gesteld voor de drie NZK veerverbindingen. Het betreft hier vijf veren.
- **Laag belaste IJ-veren,** welke ook gemiddeld op een laag belast profiel draaien en hiermee vergelijkbaar zijn met de NZK veren. Dit betreft het Oostveer, het Buiksloterwegveer en het IJpleinveer. Het betreft zeven veren.
- **Hoog belaste IJ-veren,** die op een hoog vermogen draaien vanwege de lange oversteek. Het gaat hier om de NDSM-veer en de Houthavenveer. Het betreft hier drie veren.¹ Voor alle veren is het Type 50 als uitgangspunt genomen.

Inventarisatie verschoningsopties

Op basis van een literatuuranalyse en een analyse van gebruikte opties bij veerdiensten in Europa is een longlist gemaakt van mogelijke verschoningsopties. In het rapport worden drie hoofdopties voor aandrijflijnen onderscheiden, te weten:

- conventioneel;
- hybride aandrijving, waarbij onderscheid wordt gemaakt naar vier subtypen;
- volledig elektrische aandrijving.

¹ Deze laatste betreft een tijdelijke verbinding. Deze zal worden vervangen door een veerdienst op het traject NDSM – Houthaven – Distelweg. Voor deze dienst zijn geen metingen uitgevoerd. De variant is kwalitatief in het onderzoek meegenomen.

Voor elk van de aandrijfopties geldt dat er additionele technische mogelijkheden zijn die tot verdere verschoning kunnen leiden². Het betreft hier:

- inzet nabehandelingssystemen (schone dieselmotoren);
- inzet van 'schonere' dieselbrandstoffen (GTL, HVO);
- inzet van alternatieve brandstoffen (CNG, LNG);
- inzet van lichtgewicht constructies (in het geval van nieuwe schepen).

Selectie verschoningsopties

De verschillende verschoningsopties zijn beoordeeld aan de hand van de volgende criteria:

- effect op duurzaamheid:
 - zo schoon mogelijke technieken toepassen in de nieuwe en bestaande veren en indien mogelijk uitstootvrij (per 2026).
 - substantiële reductie van (tank-to-propeller) CO₂.
- effect op inzetbaarheid schepen (schepen zijn op meerdere routes inzetbaar)
- implementeerbaarheid van de optie op korte termijn:

Uit de analyse komt naar voren dat de resultaten van deze beoordeling van de verschoningsopties voor de drie verschillende gebruiksprofielen gelden.

Voor nieuwbouw schepen komt voor alle drie onderscheiden gebruiksprofielen plug-in hybride in combinatie met een schone dieselmotor als beste optie naar voren. Hierbij wordt een accupakket van 250 kWh aanbevolen, zodat op de NZK-veren (5 schepen) en de laag belaste IJ-veren (7 schepen) volledig elektrisch gevaren kan worden. Hiervoor dient, bij voorkeur, geïnvesteerd te worden in laadinfrastructuur op één van de oevers van de verbinding. De schepen kunnen tevens worden ingezet op de hoog belaste IJ-veren (3 schepen) of op laag-belaste verbindingen zonder walinfrastructuur. Hierbij wordt dan gebruik gemaakt van de schone dieselmotor. Gebruik van deze plug-in hybride schepen leidt tot een sterke reductie van de emissies (praktisch uitstootvrij voor de NZK veren en laag belaste IJ-veren), wanneer een walstroomvoorziening aanwezig is. Wanneer geen walstroom beschikbaar is op een verbinding zijn de effecten op emissies vergelijkbaar met die van serie-hybride.

Een extra optie voor de IJ-veren is een combinatie van een aantal volledig-elektrische schepen voor de laag belaste IJ-veren aangevuld met een aantal plug-in hybride schepen die flexibel kunnen worden ingezet op de hoog en laag belaste IJ-veren. Voor de reguliere operatie is het voldoende om uit te gaan van zeven volledig-elektrische schepen en drie plug-in hybride schepen. Voor inzet van de veren voor evenementenvervoer bij de NDSM-werf wordt aangeraden om vijf plug-in hybride schepen aan te houden (samen met vijf volledig-elektrische schepen). Deze optie leidt tot iets lagere investeringskosten (ongeveer EUR 130.000 per schip), maar maakt de vloot minder flexibel.

Wanneer het niet mogelijk is om laadinfrastructuur op de wal te installeren dan is inzet van een serie-hybride aandrijflijn (een type hybride aandrijving waarbij het schip niet met walstroom opgeladen wordt), in combinatie met een schone dieselmotor, het beste alternatief voor alle drie de gebruiksprofielen. De veren worden uitgerust met een kleine schone dieselmotor die op een optimale belasting kan draaien. Hierdoor werken nabehandelingssystemen, ook bij een laag belaste verbinding, goed. De effecten op emissiereductie zijn kleiner dan bij een plug-in hybride aandrijving.

² De eerste drie technieken zijn alleen toepasbaar voor conventionele en hybride aandrijflijnen.

Er zijn twee grote onzekerheden in de uitkomsten:

1. Voor ombouw van bestaande schepen is nog onbekend in welke mate er fysieke ruimte in het schip beschikbaar is voor inbouw van een nieuwe aandrijflijn en welke aanpassingen dienen te worden gedaan. Hierdoor zijn ook de kosten voor ombouw onzeker. Waarschijnlijk gaat dat om ten minste EUR 100.000,-- extra per schip ten opzichte van de kosten van de aandrijflijn voor een nieuw schip.
2. Een andere onzekerheid betreft de laadinfrastructuur. Het is nog niet bekend of bij elke veerverbinding voldoende ruimte beschikbaar is op de kade voor laadinfrastructuur. Daarnaast is een belangrijke voorwaarde dat het tussentijds opladen van de veren binnen de operatie past. Praktijkervaring met andere voertuigen (zoals bussen) en maritieme veren leert dat er geautomatiseerde oplossingen mogelijk zijn. Er zal echter maatwerk nodig zijn om bestaande technische ontwerpen geschikt te maken voor de Amsterdamse situatie.

Deze onzekerheden vragen expliciete aandacht in een vervolgtraject.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
Begrippenlijst	6
1 Inleiding	7
1.1 Achtergrond	7
1.2 Doelstellingen	7
1.3 Aanpak	8
1.4 Leeswijzer	9
2 Gebruiksprofiel veerboten Amsterdam	10
2.1 Veerverbindingen in Amsterdam	10
2.2 Gebruiksprofiel van de veren	11
3 Inventarisatie duurzame aandrijflijnopties en eerste kwalitatieve selectie	13
3.1 Inventarisatie duurzame aandrijflijnopties	13
3.2 Selectie van maatregelen voor verdere uitwerking	13
4 Emissieberekening van geselecteerde opties	17
4.1 Inleiding	17
4.2 Vergelijking aandrijflijnopties	18
4.3 Conclusies	21
5 Haalbaarheid en kosten van de geselecteerde verschoningsopties	22
5.1 Inleiding	22
5.2 Effect op operationele inzetbaarheid	22
5.3 Technische haalbaarheid verschoningsopties	24
5.4 Effect op kosten	25
5.5 Conclusies	31
6 Conclusies en aanbevelingen	32
6.1 Conclusies	32
6.2 Aanbevelingen	34
7 Ondertekening	35
Bijlage(n)	
A Gebruiksprofiel per veerboot	
B Inventarisatie veerboten met schone aandrijflijnen	
C Toelichting verschoningsopties	
D Toelichting kwalitatieve selectie opties	
E Afwegingskader inzet alternatieve brandstofsoorten	
F Geoptimaliseerd energiegebruik veren / aangepast vaargedrag	
G Laadinfrastructuur voor elektrische vaartuigen	
H Energieverbruik en emissieberekening per aandrijfoptie	
I Onderdelen TCO berekening	

Begrippenlijst

CO ₂	Carbon dioxide
CNG	Compressed Natural Gas
DPF	Diesel Particulate Filter
GTL	Gas to Liquid (synthetische diesel uit aardgas)
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil (synthetische diesel uit plantaardige olie)
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattuur
li-ion	lithium-ion
LNG	Liquefied Natural Gas
LPG	Liquefied Petroleum Gas
Ni-MH	Nikkelmetaalhydride
NO _x	Stikstofoxide
NZK	Noordzeekanaal
PM	Particulate Matter of Fijnstof
SCR	Selective Catalytic Reduction van NO _x

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In de nota 'Veren 2018'³ wordt een aantal doelstellingen rondom de duurzaamheid van de Amsterdamse veren geformuleerd. De belangrijkste daarvan zijn:

- op stedelijk niveau minimaal 40% CO₂ reductie ten opzichte van het niveau van 1990 in 2025.
- zo schoon mogelijke technieken toepassen in de nieuwe veren en indien mogelijk uitstootvrij (per 2026).
- voor de bestaande veerponten dient inzichtelijk gemaakt te worden met welke technieken maximaal verschoond kan worden.
- de verwachte groei van het reizigersaanbod (60%-120%)⁴ dient zoveel mogelijk opgevangen te worden door het beter benutten van de veren. Dit betekent o.a. dat bestaande en nieuwe veren flexibel op meerdere routes inzetbaar moeten zijn.

Tevens blijkt uit het document dat een deel van de vloot verouderd is. Dit geldt met name voor de Type 30 veren op het IJ en de veren op het Noordzeekanaal welke economisch afgeschreven zijn. Dit is een goed moment om verschoning van de vloot te realiseren.

Om deze doelstelling te kunnen bereiken heeft Gemeente Amsterdam een convenant⁵ getekend met stadsvervoerder GVB. In dit convenant is voorzien in de uitvoering van een onderzoek met als uitgangspunten:

- voor nieuwe veerponten geldt de schoonst mogelijke techniek, bij voorkeur uitstootvrij, voor zover het gebruiksprofiel en de exploitatie dit toelaten.
- voor de bestaande veerponten wordt inzichtelijk gemaakt welke techniek maximaal verschoond kan worden.

Om een keuze te kunnen maken voor de toekomst is inzicht nodig wat de meest geschikte en haalbare schone aandrijflijnopties zijn, zowel voor bestaande als voor nieuwe veerponten. Voor het maken van deze keuze is het belangrijk dat de verschoningsoptie goed aansluit bij het gebruiksprofiel van de veerponten.

1.2 Doelstellingen

Gemeente Amsterdam heeft TNO gevraagd om inzicht te geven in verschoningsopties voor veren. De gemeente wil inzicht in de volgende onderwerpen:

1. het karakteriseren van het gebruiksprofiel van de veerverbindingen, inclusief het huidige energieverbruik en lokale emissies, zoals CO₂, NO_x en fijnstof (PM₁₀).
2. het in kaart brengen van de mogelijk technische verschoningsopties voor stads/regionale veren in het algemeen.

³ Gemeente Amsterdam - Verkeer en Openbare Ruimte: Veren 2018, met een doorkijk naar 2025. Concept Versie 01-04-2015

⁴ Exclusieve effecten van de Noord/Zuidlijn

⁵ 'Duurzaamheidsconvenant GVB – Gemeente Amsterdam 15 april 2015'

3. het identificeren en doorrekenen van geschikte verschoningsopties voor de Amsterdamse veerverbindingen op basis van het gebruiksprofiel, zowel voor nieuwe als bestaande veren. De doelstelling is om zo schoon mogelijke technieken toe te passen, rekening houdend met het gebruiksprofiel van de betreffende veerverbindingen.

De verschoningsopties dienen op korte termijn implementeerbaar te zijn, dat wil zeggen, de komende 5 – 10 jaar. De verschoningsopties worden getoetst aan de hand van voorwaarden en criteria, die met het GVB en Gemeente Amsterdam zijn afgestemd.

De meest geschikte optie kan verschillen per veerverbinding. Het rapport maakt hierbij onderscheid tussen drie gebruiksprofielen:

- **NZK-veren**, deze veren op het Noordzeekanaal (NZK, auto- + fietsen/personen) draaien gemiddeld op een laag motorvermogen (ook wel aangegeven als laag belast). In het onderzoek is het profiel van de NZK-Pont te Velsen representatief gesteld voor de drie NZK veerverbindingen. Het betreft hier vijf veren.
- **Laag belaste IJ-veren**, welke ook gemiddeld op een lage motorbelasting draaien zijn en hiermee vergelijkbaar zijn met de NZK veren. Dit betreft het Oostveer, het Buiksloterwegveer en het IJpleinveer. Het betreft 7 veren.
- **Hoog belaste IJ-veren**, die op een hoog vermogen draaien vanwege de lange oversteek. Het gaat hier om de NDSM-veer en de Houthavenveer. Het betreft hier 3 veren.⁶

Voor alle veren is het Type 50 als uitgangspunt genomen.

Het uitgangspunt is, echter, dat er (indien mogelijk) gekozen wordt voor een verschoningsoptie die inzetbaar is voor elke veerverbinding. Dit is nodig om de vloot flexibel te houden. Mogelijk ontstaat er wel een verschil tussen de meest geschikte verschoningsoptie voor een bestaand vaartuig en voor een nieuw vaartuig. Het doel is dan echter nog steeds om zo flexibel mogelijk te zijn. Verder zijn ook betrouwbaarheid en veiligheid van de aandrijflijnopties belangrijke uitgangspunten.

1.3 Aanpak

Om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden is allereerst een analyse van het gebruiksprofiel en energieverbruik voor de veerverbindingen uitgevoerd. Hierbij is inzicht gegeven in de gemiddelde inzet van de veer, het motorgebruik tijdens verschillende momenten in de operatie en het bijbehorende energiegebruik. Vervolgens is een longlist van mogelijke verschoningsopties en innovatieve aandrijflijnen opgesteld.

Om te komen tot de beste verschoningsopties voor de Amsterdamse veren zijn drie selectiestappen uitgevoerd:

- 1 in een eerste stap zijn de technische opties kwalitatief getoetst op de doelstellingen die zijn genoemd in paragraaf 1.2. Technieken die volgens deze

⁶ Deze laatste betreft een tijdelijke verbinding. Deze zal worden vervangen door een veerdienst op het traject NDSM – Houthaven – Distelweg. Voor deze dienst zijn geen metingen uitgevoerd. De variant is kwalitatief in het onderzoek meegenomen.

kwalitatieve analyse voldoen aan de verschillende doelstellingen zijn geselecteerd voor de vervolganalyse.

- 2 in een vervolgstap zijn op basis van een kwantitatieve technische analyse het energieverbruik en de emissies van de in de eerste stap geselecteerde opties in kaart gebracht. Op basis van deze kwantitatieve analyse is een tweede selectie van opties gemaakt.
- 3 tot slot worden de opties getoetst op de toepasbaarheid voor de Amsterdamse situatie. Hierbij zijn de opties volgens de volgende criteria beoordeeld: effect op operationele inzetbaarheid, technische haalbaarheid en effect op kosten (zowel de investeringskosten als de operationele kosten).

1.4 Leeswijzer

Het rapport is als volgt opgebouwd:

- hoofdstuk 2: beschrijving van het gebruiksprofiel van de veren en randvoorwaarden van de veerverbindingen.
- hoofdstuk 3: inventarisatie duurzame aandrijflijnopties en een eerste kwalitatieve selectie.
- hoofdstuk 4: selectie en doorrekenen van het energieverbruik en de emissies.
- hoofdstuk 5: toets op de haalbaarheid en de kosten.
- hoofdstuk 6: conclusies en aanbevelingen.

2 Gebruiksprofiel veerboden Amsterdam

In dit hoofdstuk wordt het gebruiksprofiel voor de verschillende veerverbindingen in Amsterdam vastgesteld, inclusief de voor de aandrijving belangrijkste parameters (vermogensvraag, benodigde energie, etc.). Met behulp van het gebruiksprofiel is in kaart gebracht hoeveel energie en vermogen een schip gemiddeld nodig heeft over een bepaalde tijdseenheid bij een bepaald type inzet. Dit profiel vormt de basis om te bepalen wat een passende aandrijflijn of verschoningsoptie is.

2.1 Veerverbindingen in Amsterdam

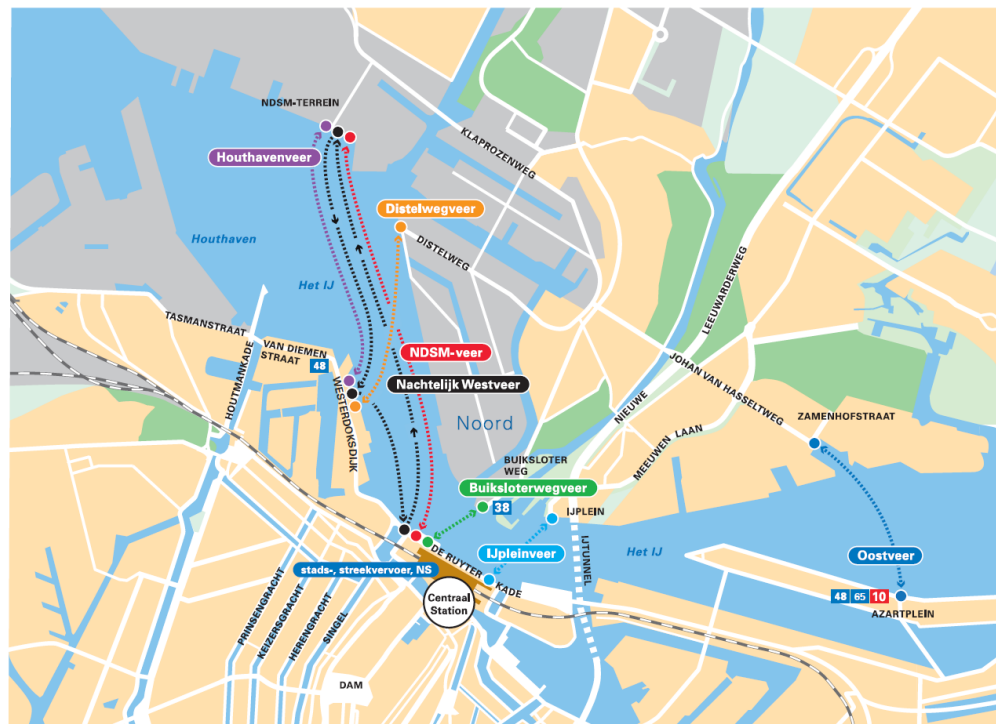
Er worden momenteel 10 IJ-veren en 5 Noordzeekanaal (NZK) veren ingezet. De IJ-veren vervoeren alleen voetgangers, fietsers en brommers. De NZK veren vervoeren ook auto's en vrachtwagens. Er zijn verschillende type IJ-veren, namelijk de "Type 30" en de "Type 50". Dit onderzoek is gebaseerd op de Type 50 veren en de NZK veren.

Het betreft de volgende veerverbindingen:

1. Verbindingen IJ-veren
 - a. Oostveer (Azartplein $\leftrightarrow$ Zamenhofstraat)
 - b. Buiksloterwegveer (Buiksloterweg $\leftrightarrow$ Centraal Station)
 - c. IJpleinveer (IJplein $\leftrightarrow$ Centraal Station)
 - d. NDSM-veer (NDSM $\leftrightarrow$ Centraal Station)
 - e. Houthavenveer (Westerdoksdiijk $\leftrightarrow$ NDSM)
2. Verbinding NZK veer
 - a. NZK-pont (Velsen Noord $\leftrightarrow$ Velsen Zuid) Deze wordt representatief voor de drie NZK-verbindingen geacht.

De Houthavenveer betreft een tijdelijke verbinding. Deze zal worden vervangen door een veerdienst op het traject NDSM – Houthaven – Distelweg. Voor deze dienst zijn geen metingen uitgevoerd. De lijndienst is kwalitatief in het onderzoek meegenomen.

Figuur 1 geeft de verbindingen van de IJ-veren op de kaart weer en Figuur 2 geeft de verbindingen van de NZK-veren op de kaart weer. In dit onderzoek zijn alleen metingen uitgevoerd op de Veerpont omdat deze het meest intensief bezocht wordt. De andere twee verbinding zijn qua gebruiksprofiel gelijk aan de NZK-pont.



Figuur 1: Kaart IJ-veren begin 2015 (GVB)



Figuur 2: Kaart Noordzeekanaalveren begin 2015 (GVB)

2.2 Gebruiksprofiel van de veren

Om het gebruiksprofiel te bepalen is TNO bij alle betreffende veerverbindingen aan boord van de veren geweest. Tijdens de reguliere inzet heeft TNO het gemiddelde toerental (per motor) en tijdsduur voor elke onderstaande mode (handmatig) geregistreerd. Er zijn daarvoor minimaal twee retourreizen per veerverbinding gemaakt. Bij één veerpont (Type 50, IJ-veer) was ook het brandstofverbruik beschikbaar, dit is ook geregistreerd.

Er zijn voor de veren een aantal modes gedefinieerd, zoals het laden van passagiers, afvaren en varen op constante snelheid. Voor elk van deze modes is het motorvermogen berekend op basis van het toerental en het brandstofverbruik. Een uitgebreide beschrijving van de gebruiksprofielen per veerpontverbinding is te vinden in Bijlage A.

Tabel 1 vat de belangrijkste gegevens van het gebruiksprofiel per veerverbinding samen. Qua energieverbruik en vermogens zijn de Oostveer, Buiksloterwegveer, IJpleinveer en NZK-pont redelijk vergelijkbaar. Hetzelfde geldt voor de NDSM-veer en de Houthavenveer. Alle veren hebben intensieve vaarschema's, wat impact heeft op de mogelijkheid voor het implementeren van verschoningsopties.

Tabel 1: Belangrijkste gegevens over het gebruiksprofiel per schip van de Amsterdamse veren¹

Lijn	Inzet per dag	Gemiddeld motorvermogen, excl. hulpmotor	Energiegebruik per dag, incl. hulpmotor (mechanisch)	Dieselvebruik per dag, incl. hulpmotor
	[uur]	[kW]	[kWh]	[liter]
Oostveer	16	80	1.463	394
Buiksloterwegveer	24	66	1.825	494
IJpleinveer	18	70	1.418	386
NDSM-veer	18	203	3.730	981
Houthavenveer	18	170	3.150	814
NZK-pont	24	43	1.617	439
<i>NDSM – Houthaven – Distelweg</i>	<i>18</i>	<i>65</i>	<i>1.241</i>	<i>354</i>

¹ Afgerond op hele getallen

3 Inventarisatie duurzame aandrijflijnopties en eerste kwalitatieve selectie

Dit hoofdstuk omvat een breed overzicht van mogelijke opties om veren te verschonen. Voor deze opties is informatie verzameld rondom kenmerken van de verschoningsoptie, welke zijn samengevat in paragraaf 3.1.

Vervolgens worden deze kenmerken vergeleken met het gebruiksprofiel van de Amsterdamse veren in paragraaf 3.2. Op basis van deze kwalitatieve analyse is een eerste selectie gemaakt van kansrijke opties.

3.1 Inventarisatie duurzame aandrijflijnopties

Als eerste stap in het onderzoek is een overzicht gemaakt van verschillende aandrijfopties en is op basis van literatuur en praktijkervaring van bestaande veren in Europa inzicht gegeven in de belangrijkste karakteristieken. In Bijlage B staat een overzicht van Europese schone aandrijflijnen die worden toegepast op veerdiensten in Europa.

In het rapport worden drie hoofdopties voor aandrijflijnen onderscheiden, te weten:

- conventioneel;
- hybride aandrijving, met daarin onderscheid naar:
 - serie hybride met accu;
 - serie hybride met accu en plug-in;
 - parallel hybride met accu;
 - hybride met vliegwiel; en
- volledig elektrische aandrijving.

Voor elk van de aandrijfopties geldt dat er additionele technische mogelijkheden zijn die tot verdere verschoning kunnen leiden⁷. Het betreft hier:

- inzet nabehandelingssystemen ("schone dieselmotor");
- inzet van 'schonere' dieselbrandstoffen (GTL, HVO);
- inzet van alternatieve brandstoffen (CNG, LNG); of
- inzet van lichtgewicht constructies (in het geval van nieuwe schepen).

Deze additionele technische mogelijkheden zijn als "subvariant" meegenomen,

In deze paragraaf zijn de verschillende aandrijfopties benoemd. Een nadere toelichting van de opties wordt gegeven in Bijlage C.

3.2 Selectie van maatregelen voor verdere uitwerking

In Bijlage C, zijn een aantal technologieën en brandstofopties voor het verlagen van de emissies beschreven. Deze technologieën zijn afkomstig uit de literatuur en uit reeds bestaande toepassingen bij andere veerdiensten in Europa. De tabel op de volgende pagina geeft een kwalitatieve inschatting van het effect van de doelstellingen die zijn geformuleerd in hoofdstuk 1:

- effect op duurzaamheid:
 - zo schoon mogelijke technieken toepassen in de nieuwe en bestaande veren en indien mogelijk uitstootvrij (per 2026); en

⁷ De eerste drie technieken zijn alleen toepasbaar voor conventionele en hybride aandrijflijnen.

- substantiële reductie van (tank-to-propeller) CO₂.
- effect op inzetbaarheid schepen (schepen zijn op meerdere routes flexibel inzetbaar).
- implementeerbaarheid van de optie op korte termijn:
 - kosten van de investering in de aandrijflijn en van de brandstof;
 - gebruikerservaring met optie (kan er worden aangesloten op bestaande kennis en ervaring, of is de optie nog in ontwikkeling);
 - algehele beschikbaarheid van de verschoningsoptie als techniek in de markt; en
 - benodigde aanpassingen aan de infrastructuur.

Het effect van implementeren op de doelstellingen is beoordeeld aan de hand van een multi-criteria analyse, waarbij de doelstellingen als criteria zijn meegenomen. De resultaten van de analyse staan in onderstaande tabel. Per technologie is voor iedere doelstelling aangegeven in welke mate deze aan de doelstelling voldoet. Hierbij is een schaal gebruik die loopt van het volledig voldoen aan de doelstelling (++) tot het niet voldoen aan de doelstelling (- -). Wanneer geen effect wordt verwacht, met name bij kosten, is dit aangegeven met een o.

Tabel 2. Kwalitatieve analyse van verschillende verschoningsopties ten opzichte van de doelstellingen voor nieuwe schepen (zie toelichting in Bijlage D)

Type/ hoofdoptie	Varianten	Effect op duurzaamheid		Effect op Inzetbaarheid	Implementeerbaarheid op korte termijn					Geselecteerd
		Schoon (NOx, PM)	CO ₂ lokaal		Aandrijflijn	Brandstofkosten	Gebruiks- ervaring	Beschik- baarheid	Infrastruc- tuur	
Conventioneel	Schone dieselmotor	+	-	++	+	0	+	++	++	Ja
	Schone diesel brandstof: GTL en HVO	+	-	++	+	-	-	++	++	Nee
	Gasmotor: CNG	+	-	-	-	0 / +	0 / +	-	-	Nee
	Gasmotor: LNG	+	-	-	--	0 / +	0	-	--	Nee
Serie hybride met accu	Standaard dieselmotor	+	--	++	+	0 / +	+	++	++	Ja
	Schone dieselmotor	+	- / +	++	+	0 / +	+	++	++	Ja
	Schone diesel brandstof: GTL en HVO	+	- / +	++	+	0	+	++	++	Nee
	Gasmotor: CNG	+	- / +	-	-	0 / +	+	+	-	Ja
Serie hybride met accu en plug-in	Standaard dieselmotor	+	+	- / +	--	+	0 / +	+	-	Ja
	Schone dieselmotor	++	+	- / +	--	+	0 / +	+	-	Ja
Parallel hybride	Schone dieselmotor	+	- / +	+	-	0 / +	+	+	++	Nee
Hybride met vliegwiel	Schone diesel	+	- / +	+	--	0 / +	0	-	-	Nee
Volledig elektrisch	Batterij-elektrisch	++	++	-	-	++	0	-	-	Ja
	Batterij-elektrisch: alleen 's nachts laden	++	++	-	--	++	0	--	--	Nee
	Batterij-elektrisch; lichtgewicht schip	++	++	-	-	++	0	--	-	Ja
	brandstofcel	++	++	--	--	- / 0	--	--	--	Nee

Uit de tabel komt naar voren dat:

- alle varianten een positieve bijdrage hebben op de verbetering van de luchtkwaliteit, maar dat alleen de batterij-elektrische optie volledig uitstootvrij zijn.
- verbetering van CO₂ met name verwacht wordt bij plug-in hybride en volledig elektrische aansluitingen, aangezien het gebruik van fossiele brandstoffen afneemt. Bij gebruik van een conventionele of "schone" dieselmotor is er geen verwacht effect op CO₂-uitstoot.
- bijna alle opties leiden tot hogere kosten van de aandrijflijn ten opzichte van een conventionele dieselaandrijving. Deze is het hoogst bij LNG, plug-in hybride en volledig elektrisch. Hier staan wel lagere brandstofkosten tegenover.
- voor de meeste opties is in Europa al ruime ervaring met het gebruik voor schepen. Mogelijk bestaat er een technisch risico rondom de laadinfrastructuur bij volledig-elektrische of plug-in hybride aandrijvingen (zie hiervoor hoofdstuk 5).
- voor een aantal opties (LNG, plug-in hybride en volledig elektrisch) zal aanvullend geïnvesteerd moeten worden in laadinfrastructuur aan wal.

In de beoordeling van de criteria in deze eerste selectie is nog geen rekening gehouden met de mogelijkheid voor het inbouwen in bestaande schepen. Dit komt aan bod in hoofdstuk 5.

Op basis van bovenstaande criteria is, in overleg met de Gemeente Amsterdam en het GVB, een selectie gemaakt van opties voor nadere analyse. Deze zijn in de laatste kolom van de tabel weergegeven. Hierbij is de reeds aanbestede optie (serie hybride gecombineerd met GTL en HVO) niet geselecteerd. Dit komt omdat in deze studie de serie hybride wordt gecombineerd met een schone conventionele dieselmotor. De meerwaarde van GTL en HVO is bij het gebruik van een schone dieselmotor (nabehandelingssysteem) zeer beperkt. Wanneer er geen nabehandelingssysteem is geïnstalleerd hebben GTL en HVO bij serie hybride wel meerwaarde.

De selectie van de opties is nader toegelicht in Bijlage D.

4 Emissieberekening van geselecteerde opties

4.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk is een eerste kwalitatieve analyse uitgevoerd, waarbij een groot aantal verschillende technische opties zijn afgezet tegen de gestelde doestellingen. De in het vorige hoofdstuk geselecteerde opties zijn samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 3. Overzicht geselecteerde aandrijflijnopties en varianten

Type/ hoofdoptie	Varianten
Conventioneel	Schone diesel
Serie hybride met accu	Standaard dieselmotor
	Standaard dieselmotor met GTL
	Schone dieselmotor
	Gasmotor
Serie hybride met accu en plug-in	Standaard dieselmotor
	Schone dieselmotor
Volledig elektrisch	Batterij-elektrisch
	Batterij-elektrisch; lichtgewicht schip

In dit hoofdstuk wordt voor deze geselecteerde opties een doorrekening gemaakt, waarbij wordt ingegaan op het energieverbruik en de emissies van de verschillende opties. Hiervoor is de volgende methodiek gevolgd:

1. invulling van de technische specificaties per optie (motorgrootte, accupakket, etc.).
2. berekening van het energieverbruik voor brandstof en elektriciteit per dag voor de verschillende veerverbindingen.
3. bepaling technologie en brandstof afhankelijke emissiefactoren.
4. berekening van de Tank-to-Propeller (ofwel de lokale) emissies op basis van het energiegebruik en brandstof- en technologie afhankelijke emissiefactoren.

Bij het berekenen van de emissies en het energieverbruik is uitgegaan van de volgende uitgangspunten:

- een belangrijke voorwaarde is dat de veren flexibel inzetbaar zijn. Dat betekent dat elk veer, bij voorkeur, op elke veerverbinding ingezet kan worden. Met het doorrekenen van de verschoningsopties is hier rekening meegehouden.
- de regelgeving voor veerponten (bijlage 3.6 in Richtlijn 2006/87/EG) schrijft voor dat er minimaal twee voortstuwingssystemen op het schip dienen te zitten en dat die onafhankelijk van elkaar, in gescheiden afgesloten compartimenten, moeten zitten. Voor elke verschoningsoptie is dit mogelijk.
- in de berekeningen is uitgegaan van het huidige gebruiksprofiel van de verschillende veerboten. Uit een aanvullende analyse komt naar voren dat, met name voor de plug-in hybride en volledig elektrische opties, een extra besparing kan worden behaald bij doorvoer van een aantal veranderingen in het gebruiksprofiel. De omvang van deze besparing is onzeker. Deze analyse is opgenomen in Bijlage F, maar niet meegenomen in de hoofdanalyse.

Tevens is in Bijlage G een overzicht opgenomen van concrete invulling van de walinfrastructuur voor elektrische aansluiting.

4.2 Vergelijking aandrijflijnopties

In Bijlage H zijn de gedetailleerde resultaten voor de verschillende aandrijflijn typen beschreven. In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de resultaten.

Vergelijking energieverbruik

Onderstaande tabel geeft een overzicht van het verwachte energieverbruik van de verschillende hoofdopties. In de tabel zijn alleen de hoofdopties vergeleken, omdat de verschillende varianten slechts marginaal effect hebben op het energieverbruik⁸.

Tabel 4: Vergelijking van het verwachte energieverbruik per dag voor de verschillende verschoningsopties¹

Veerdienst	Conventioneel standaard	Serie Hybride	Plug-in hybride		Volledig-elektrisch
	Diesel-verbruik	Diesel-verbruik	Diesel-verbruik	Elektriciteit-verbruik	Elektriciteit-verbruik
	L	L	L	kWh	kWh
Oostveer	410	411	0	1.603	1.603
Buiksloterwegveer	516	513	0	2.000	2.000
IJpleinveer	403	398	0	1.555	1.555
NDSM-veer	981	1.048	786	1.022	4.088
Houthavenveer	830	885	442	1.726	3.452
NZK-pont	493	454	0	1.772	1.772

¹ NDSM – Houthaven – Distelweg is niet apart berekend. De uitkomsten zullen vergelijkbaar zijn met die van IJpleinveer en Buiksloterwegveer

Op basis van de tabel worden de volgende conclusies getrokken:

- inzet van serie hybride aandrijving leidt tot een vergelijkbaar brandstofverbruik voor de vier laag belaste veren. Voor de hoog belaste veren valt deze variant negatief uit, omdat de veren vrijwel uitsluitend gebruik maken van de dieselmotor.
- een plug-in hybride resulteert in volledig gebruik van het elektrische systeem bij de laag belaste veren. Bij de hoog belaste veren wordt het elektrische systeem 25% tot 50% van de tijd gebruikt.
- volledig elektrisch varen leidt tot een zeer hoog elektriciteitsgebruik op de hoog belaste veren. Om dit mogelijk te kunnen maken bij de bestaande schepen zal goed gekeken moeten worden naar de ruimte voor dergelijk grote batterijen aan boord.

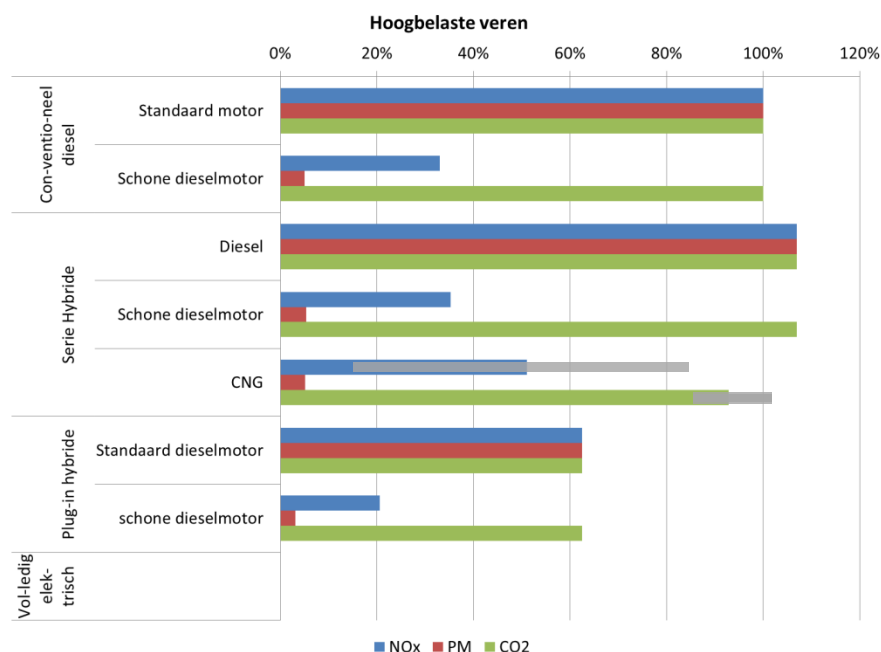
⁸ Uitzondering hierop is inzet van een lichtgewicht schip. Het effect op het energieverbruik voor deze variant geldt ook voor de andere varianten.

Effect op emissies

Voor het effect op emissies is het zinvol onderscheid te maken naar de effecten voor hoog belaste en laag belaste veren.

Allereerst wordt in onderstaande figuur de resultaten voor de hoog belaste veren (3 schepen) gepresenteerd. De figuur laat de volgende resultaten zien:

- installatie van een conventionele schonere dieselmotor leidt tot een aanzienlijke reductie van de luchtkwaliteitsemissies. NO_x neemt af met meer dan 60% en PM zelfs met 95%. Bij de hoog belaste veren wordt ingeschat dat de nabehandelingssystemen goed zullen functioneren.
- serie-hybride aandrijving leidt tot een lichte verslechtering van de emissies ten opzichte van een conventionele motor, vanwege het verlies in de elektrische energieomzetting⁹.
- gebruik van CNG leidt niet tot een extra resultaat voor luchtkwaliteit ten opzichte van een schonere dieselmotor. Daarnaast zijn de uitkomsten erg onzeker, omdat er geen formele strenge normen van toepassing zijn.
- de plug-in hybride aandrijflijn resulteert in een grote reductie van alle emissies. De extra afname is rond de 35%. De resultaten voor de hoog-belaste verbindingen gaan ervan uit dat gedeeltelijk op walstroom gevaren wordt (zie hiervoor Bijlage H).
- met de volledig elektrische aandrijflijn, is de lokale uitstoot van de veren voor alle emissies nul.



Figuur 3: Uitstoot voor NO_x, PM (fijnstof) en CO₂ afhankelijk van de aandrijflijntechnologie voor de hoog belaste IJ-veren (IJ-veer 50).¹⁰

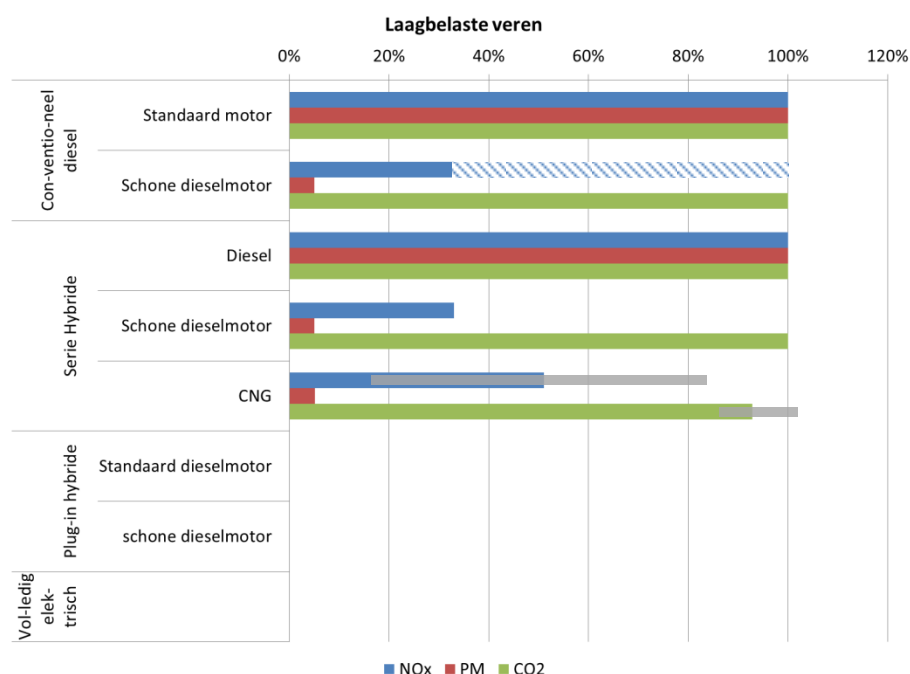
⁹ Bij het relatief gunstige vermogen voor de hoog-belaste verbindingen wordt dit verlies niet geheel gecompenseerd door de gunstigere belasting van de motor bij een hybride.

¹⁰ Bij de serie-hybride met CNG wordt bij CO₂ ook het broeikaseffect van overige emissies als methaan meegenomen (CO₂ equivalent).

Vervolgens wordt in de volgende figuur de resultaten voor de laag belaste veren gepresenteerd (NZK veren (5 veren) en laag belaste IJ-veren (7 veren)).

Uit de figuur blijkt het volgende:

- de resultaten voor de conventionele schone dieselmotoren zijn onzeker voor laag belaste diensten. De effecten op NO_x zijn zeer onzeker. Gebruik van roetfilters (PM) is mogelijk, maar vergt wel extra onderhoud.
- de hybride aandrijflijn is niet of nauwelijks schoner dan de conventionele aandrijflijn, indien een gewone dieselmotor wordt toegepast. Bij gebruik van de schonere dieselmotor in combinatie met een serie-hybride zijn wel goede resultaten te behalen, doordat een continue hoge belasting met een kleinere dieselgenerator kan worden gehaald. Gebruik van CNG leidt niet tot extra resultaten.
- de resultaten voor de plug-in hybride en de volledig elektrische aandrijving zijn voor laag belaste veren gelijk. In beide gevallen wordt volledig op walstroom gevaren en is de lokale uitstoot van de veren voor alle emissies nul.



Figuur 4: Uitstoot voor NO_x, PM (fijnstof) en CO₂ afhankelijk van de aandrijflijntechnologie voor de laag belaste IJ-veren en de NZK veren (Type 50).¹¹

¹¹ Bij de serie-hybride met CNG wordt bij CO₂ ook het broeikaseffect van overige emissies als methaan meegenomen (CO₂ equivalent).

4.3 Conclusies

In dit hoofdstuk, zijn de geselecteerde verschoningsopties in detail doorgerekend op het gebied van energiegebruik en emissiereductie. Op basis van deze analyse worden de volgende aandrijflijsenopties aanbevolen.

Voor de laag belaste veren worden de volgende opties geselecteerd:

- serie-hybride in combinatie met een schone dieselmotor;
- plug-in hybride in combinatie met een schone dieselmotor; en
- volledig-elektrisch.

Conventionele schone dieselmotoren (met nabehandeling) zijn praktisch moeilijk haalbaar bij deze diensten door de lage motorbelasting. Alleen in combinatie met een serie-hybride aandrijving kunnen, door de hoog belaste kleinere motor, positieve resultaten worden bereikt.

Voor de hoog belaste veerdiensten worden de volgende opties geselecteerd:

- conventionele aandrijving met gebruik van een schone dieselmotor.
- serie-hybride in combinatie met een schone dieselmotor;
- plug-in hybride in combinatie met een schone dieselmotor; en
- volledig elektrisch.

In de hierboven geselecteerde opties is nog geen rangorde toegepast. De uiteindelijke selectie van de opties wordt gedaan in het volgende hoofdstuk.

5 Haalbaarheid en kosten van de geselecteerde verschooningsopties

5.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk is aan de hand van een vergelijking van het energieverbruik en emissies van de verschillende verschooningsopties een nadere selectie gemaakt van de meest kansrijke opties. Uit deze selectie komen de volgende technieken naar voren voor de laag belaste IJ-veren en de NZK veren:

1. serie-hybride in combinatie met een schone dieselmotor;
2. plug-in hybride (250 kWh accupakket) in combinatie met een schone dieselmotor; en
3. volledig-elektrische aandrijving (accupakket van minimaal 250 kWh).¹²

Voor de hoog belaste IJ-veerdiensten worden de volgende opties geselecteerd:

1. conventionele aandrijving met gebruik van een schone dieselmotor.
2. serie-hybride in combinatie met een schone dieselmotor;
3. plug-in hybride in combinatie met een schone dieselmotor; en
4. volledig-elektrische aandrijving (accupakket van 600 kWh)¹⁰

Zoals bleek uit het vorige hoofdstuk, hebben deze opties het grootste effect op emissiereductie onder verschillende operationele omstandigheden (hoog en laag belaste veerverbindingen).

In dit hoofdstuk worden deze opties getoetst op de toepasbaarheid voor de Amsterdamse situatie. Hierbij worden de opties volgens de volgende criteria beoordeeld:

1. effect op operationele inzetbaarheid;
2. technische haalbaarheid; en
3. investerings- en operationele kosten.

De drie criteria worden achtereenvolgens in dit hoofdstuk behandeld.

5.2 Effect op operationele inzetbaarheid

Inzetbaarheid aandrijfopties en uitwisselbaarheid

In deze studie wordt een gedetailleerde analyse gepresenteerd van het gebruiksprofiel voor de IJ-veren en de NZK-veren, waarbij rekening is gehouden met het energieverbruik per overtocht en per dag. Evenals bij eerdere onderdelen wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende profielen:

- NZK-veren, welke allemaal een laag belast profiel hebben. Dit betreft 5 schepen.
- IJ-veren met een laag belast profiel. Dit betreft 7 schepen.
- IJ-veren met een hoog belast profiel. Dit betreft 3 schepen.¹³ Hierbij wordt opgemerkt dat bij evenementen op de NDSM-werf extra schepen worden ingezet. Hiervoor zijn in totaal 4 a 5 schepen voor nodig.

¹² Het accupakket voor 600 kWh is voor alle gebruiksprofielen berekend, aangezien deze volledig flexibel inzetbaar is voor alle verbindingen.

Voor de NZK-veren geldt dat conventioneel schone dieselmotoren en volledig-elektrische aandrijvingen niet als goed inzetbare opties worden gezien. Conventionele schone dieselmotoren zijn praktisch moeilijk toepasbaar door de lage motorbelasting. Door de lage motorbelasting op de NZK-veren zal het systeem minder goed functioneren, waardoor ook het effect op emissiereductie onzeker is, en zal relatief veel onderhoud moeten worden gepleegd (zie hiervoor ook hoofdstuk 4 en Bijlage H). Serie hybride aandrijflijnen zijn daarentegen wel goed toepasbaar voor de NZK-veren, doordat de veren zijn uitgerust met een kleine schone dieselmotor die op een optimale belasting kan draaien.

Plug-in hybride aandrijvingen zijn goed toepasbaar bij de NZK-veren. Bij voorkeur wordt dit gecombineerd met een walstroomvoorziening. In dat geval kunnen de schepen voor de dagelijkse operatie gebruik maken van elektrische aandrijving (waardoor ze praktisch uitstootvrij zijn) en overschakelen op de conventionele aandrijving in het geval dat nodig is (bijvoorbeeld voor het varen naar de werkplaats).

Een volledig-elektrische aansluiting is voor de NZK-veren een moeilijk haalbare optie vanuit het oogpunt van flexibiliteit en praktische toepasbaarheid. Met behulp van de metingen wordt de actieradius van de veren met een volledig-elektrische aandrijflijn (250 kWh) geschat op 15 tot 25 kilometer. Door de relatief lange afstand van de plaats van de veerverbindingen ten opzichte van de werkplaats en tussen de veerdiensten onderling zou gebruik moeten worden gemaakt van een sleepboot bij het verplaatsen van de schepen.

Bij de laag-belaste IJ-veren worden conventionele schone dieselmotoren niet als haalbare optie beschouwd vanwege de lage motorbelasting. Serie hybride is goed toepasbaar op de laag belaste IJ-veren. Voor plug-in hybride geldt net als bij de NZK veren dat de optie bij voorkeur gecombineerd wordt met een walstroomvoorziening. Volledig-elektrische aandrijving is eveneens goed toepasbaar, zowel bij het accupakket van 250 en 600 kWh. In dit geval is walstroomvoorziening een absolute voorwaarde.

Bij de hoog belaste IJ-veren is een conventionele schone dieselmotor (en tevens serie hybride) goed inzetbaar, doordat het systeem goed functioneert bij de relatief hoge motorbelasting. Hierdoor is ook plug-in hybride goed te gebruiken in het geval geen walstroom beschikbaar is. Volledig-elektrische aandrijving is alleen mogelijk wanneer het accu-pakket groot genoeg is (600 kW).

Geconcludeerd wordt:

- serie hybride gecombineerd met een schone dieselmotor is volledig uitwisselbaar tussen de verschillende opties (15 schepen).
- ook plug-in hybride is volledig uitwisselbaar (15 schepen). Bij voorkeur wordt deze optie, in ieder geval voor de laag belaste verbindingen op het IJ en het Noordzeekanaal, gecombineerd worden met walstroomaansluiting.
- volledig elektrische schepen zijn uitwisselbaar voor de veren op het IJ (10 schepen) wanneer een accupakket van 600 kWh wordt gebruikt. Investering in walinfrastructuur is bij deze optie noodzakelijk.

¹³ In het huidige operationele profiel zijn 3 schepen nodig voor hoog belaste verbindingen. Eén hiervan betreft een tijdelijke verbinding. wijzigingen is er voor gekozen uit te blijven gaan van 3 schepen.

- volledig-elektrische schepen met een accupakket van 250 kWh zijn alleen in te zetten op laag belaste verbindingen op het IJ (7 schepen). Dit zou gecombineerd kunnen worden met inzet van een aantal schepen met andere aandrijftechnieken (plug-in hybride, serie hybride of conventioneel schone diesel). Investeren in walinfrastructuur is bij deze optie noodzakelijk.

5.3 Technische haalbaarheid verschoningsopties

Technische haalbaarheid aandrijfopties

In Bijlage C van dit rapport wordt een technische toelichting gepresenteerd van de verschillende verschoningsopties. Op basis van de analyse komt naar voren:

- conventionele schone dieselmotoren zijn ruim beschikbaar en worden reeds breed toegepast op schepen. Er worden geen grote technische onzekerheden gezien.
- serie hybride aandrijflijnen zijn relatief eenvoudig en daarnaast breed in de markt beschikbaar. Ook hier worden geen grote onzekerheden gezien.
- plug-in hybride systemen zijn relatief complex. In vergelijking met de andere aandrijfopties bevat deze optie de meeste componenten. Van belang is dat een groot accupakket wordt gekozen (ten minste 250 kWh). Een plug-in hybride met een kleinere accu wordt afgeraden, omdat deze dan op de laag belaste verbindingen niet volledig elektrisch kan varen met een redelijke levensduur van de accu's. Hoewel alle componenten van deze aandrijflijn standaard beschikbaar zijn, dienen de specificaties in vervolgstappen goed te worden uitgewerkt.
- uit berekeningen is gebleken, dat volledig-elektrisch varen technisch haalbaar is. De gekozen accucapaciteit is 250 kWh voor de laag belaste veren en 600 kWh voor de hoog-belaste verbindingen. Dit is meer dan nodig is voor een retour oversteek, maar de capaciteit is belangrijk om een behoorlijke levensduur van de accu te garanderen. Door het zeer frequente laden in Amsterdam, wordt evenwel uitgegaan van een levensduur van ca 5 jaar.

Met elektrische veren worden geen grote technische risico's gelopen. Vrijwel alle componenten van de aandrijving zijn standaard componenten welke al in serie geproduceerd worden (elektromotoren, elektro-regelaars, accu's, gelijkrichters). Hoewel alle componenten van deze aandrijflijn standaard beschikbaar zijn, dienen de specificaties in vervolgstappen goed te worden uitgewerkt.

Technische haalbaarheid voor ombouw

Een belangrijke voorwaarde voor het kiezen van een aandrijfoptie is de mogelijkheid om de verschoningstechniek in te bouwen in bestaande schepen. Uit contact met het GVB blijkt dat dit niet vooraf vast kan worden gesteld, omdat de lay-out van de schepen, ook binnen de typen, sterk verschillen. Zo zijn er drie verschillende inrichtingen van de Type 50 veer. Voor sommige van deze typen is mogelijk onvoldoende fysieke ruimte beschikbaar voor inbouw van opties zoals de plug-in en volledig-elektrische aandrijving. Daarnaast kan veiligheidsregelgeving belemmeringen opwerpen. Bij vervolgstappen zal dit nader onderzocht moeten worden.

Technische mogelijkheden laadvoorzieningen op de wal

Bij het gebruik van plug-in hybride of volledig-elektrische aansluiting zullen op de wal infrastructuurvoorzieningen dienen te worden ontwikkeld.

Dit betreft:

- aansluiting op het elektriciteitsnet.
- een huisje met daarin een transformator en een gelijkricht installatie ('lader'); en
- een laadzuil, -portaal of -interface.

Met name voor het transformatorhuisje is fysieke ruimte nodig. Deze kan waarschijnlijk met enige mate van flexibiliteit rondom het laadportaal (afstand van ca. 100 meter), maar dit moet wel verder onderzocht worden. Voor de verschillende onderdelen dient tevens inzichtelijk worden gemaakt of er een impact is op de veiligheid.

Voor de verbindingen op het Noordzeekanaal en de laag belaste verbindingen op het IJ geldt dat de installatie slechts op één van de twee oevers hoeft te worden aangelegd. Hierbij kan de oever met de meest beschikbare ruimte worden gekozen. Voor de hoog belaste verbindingen op het IJ is het noodzakelijk op beide oevers een installatie te bouwen.

Automatische laadvoorzieningen tussen het schip en de wal zijn voor zover bekend niet direct beschikbaar. In de vereiste vermogensrange zijn wel al laadvoorzieningen beschikbaar voor landtoepassingen (bijvoorbeeld stadsbussen). Deze zijn echter nog niet getest voor schepen en het is onbekend of het meer bewegen bij schepen hierbij een probleem vormt.

Een pantograaf aansluiting aan de zijkant van het schip is toegepast bij de Nordled autoveer in Noorwegen. Dit systeem is voor IJ- en NZK veren te groot en te kostbaar, maar kan mogelijk verkleind worden. Naar schatting kan dit met enig maatwerk of aanpassingen van bestaande ontwerpen opgelost worden.

Een onderdeel wat nog niet mee is genomen in deze studie zijn de laadvoorzieningen in de Ponthaven, waar een gedeelte van de schepen 's nachts worden aangemeerd. Hier zijn reeds walstroom voorzieningen aanwezig, maar in een vervolgtraject zal onderzocht dienen te worden of dit afdoende is.

5.4 Effect op kosten

In de laatste stap van dit onderzoek is een financieel economische doorrekening gemaakt van de verschillende verschooningsopties. Dit is gedaan aan de hand van het berekenen van de Total Costs of Ownership (TCO). Via deze methodiek worden alle kosten gekwantificeerd voor de totale levensduur van de investering en teruggebracht naar jaarlijkse kosten. De verschillende onderdelen van de TCO zijn uitgewerkt in Bijlage I.

Investeringskosten aandrijflijn nieuw en bestaand schip

De kosten voor de aandrijflijn bestaat uit de volgende onderdelen (afhankelijk van het type).

- dieselmotor met nabehandeling;
- elektrische aandrijving met toebehoren;
- accu's; en
- Inbouwkosten.

De berekende investeringskosten zijn samengevat in onderstaande tabel. Voor nieuwe schepen kunnen de investeringskosten met een sterke mate van zekerheid

worden gegeven. De investeringskosten van de verschillende componenten zijn afkomstig van de leveranciers, en zijn reeds op de markt beschikbaar. Uitzondering zijn de kosten voor inbouw van elektrische systemen. De kosten voor deze inbouw zijn geschat op EUR 80.000, en kunnen in de praktijk afwijken.

Voor kosten van inbouw van systemen in bestaande schepen is vooraf moeilijk een raming te geven. Dit hangt sterk af van de specifieke lay-out van het schip, en kan tussen de bestaande schepen sterk verschillen. Een eerste schatting is dat de meerkosten gemakkelijk EUR 100.000 of EUR 200.000 bedragen.

Tabel 5: Investeringskosten schone aandrijflijn

	Nieuw schip	Inbouw bestaand schip
Conventionele schone dieselmotor	241.000	NB
Serie hybride met een schone dieselmotor	450.000	NB
Plug-in hybride met een schone dieselmotor	612.000	NB
Volledig-elektrisch (250 kW)	480.000	NB
Volledig-elektrisch (600 kW)	742.000	NB

Kosten nieuwbouwschip per jaar

In onderstaande tabellen zijn de jaarlijkse kosten (TCO) voor een nieuwbouwschip voor respectievelijk een NZK-veer, een laag belaste IJ-veer en een hoog belast IJ-veer gepresenteerd. Deze bestaan uit:

- investeringskosten schip (exclusief aandrijflijn): Afschrijving, rente en onderhoud van het schip. Hiervoor wordt jaarlijks 8% van de investeringskosten van het schip gerekend. (zie bijlage I).
- investeringskosten aandrijflijn: Afschrijving, rente en onderhoud van de specifieke investering in de aandrijflijn (zie hierboven).
- operationele kosten: Energiekosten (diesel brandstof of elektriciteit). Hierbij is uitgegaan van de huidige energieprijzen (zie bijlage I).

Tabel 6: Totale jaarlijkse kosten voor de verschillende aandrijfopties voor een nieuwbouw NZK-veer, uitgaande van de energieprijzen 2015.

€	Rente, afschrijving en onderhoud vloot	Afschrijving en onderhoud aandrijflijnen	Energiekosten	Totaal
Conventionele schone dieselmotor	368.000	24.000	78.000	470.000
Serie hybride met een schone dieselmotor	368.000	31.000	78.000	477.000
Plug-in hybride met een schone dieselmotor	368.000	65.000	39.000	472.000
Volledig-elektrisch (250 kWh)	368.000	52.000	39.000	459.000
Volledig-elektrisch (600 kWh)	368.000	105.000	39.000	512.000

Tabel 7: Totale jaarlijkse kosten voor de verschillende aandrijfopties voor een nieuwbouw laag belast IJ-veer, uitgaande van de energieprijis 2015.

€	Rente, afschrijving en onderhoud vloot	Afschrijving en onderhoud aandrijflijnen	Energie-kosten	Totaal
Conventionele schone dieselmotor	264.000	24.000	78.000	366.000
Serie hybride met een schone dieselmotor	264.000	31.000	78.000	373.000
Plug-in hybride met een schone dieselmotor	264.000	65.000	39.000	368.000
Volledig-elektrisch (250 kWh)	264.000	52.000	39.000	355.000
Volledig-elektrisch (600 kWh)	264.000	105.000	39.000	408.000

Tabel 8: Totale jaarlijkse kosten voor de verschillende aandrijfopties voor een nieuwbouw hoog belast IJ-veer, uitgaande van de energieprijis 2015.

€	Rente, afschrijving en onderhoud vloot	Afschrijving en onderhoud aandrijflijnen	Energie-kosten	Totaal
Conventionele schone dieselmotor	264.000	24.000	149.000	437.000
Serie hybride met een schone dieselmotor	264.000	31.000	149.000	444.000
Plug-in hybride met een schone dieselmotor	264.000	65.000	149.000	478.000
Volledig-elektrisch (250 kWh)	-	-	-	-
Volledig-elektrisch (600 kWh)	264.000	105.000	83.000	452.000

De tabellen verschillen op de volgende punten van elkaar:

- de investeringskosten voor een NZK-veer (tabel 6) zijn hoger dan voor een laag belast of hoog belaste IJ-veer. Hierdoor is de jaarlijkse afschrijving hoger.
- de investeringskosten voor de laag belaste IJ-veren (tabel 7) en de hoog belaste IJ-veren (tabel 8) zijn gelijk. De hoog belaste IJ-veren hebben echter hogere energiekosten

Voor alle gebruiksprofielen is conventionele schone diesel de goedkoopste optie. De meerkosten van de andere varianten is relatief gering (+/- 10%). Belangrijke constatering is dat de meerkosten van een plug-in hybride systeem ten opzichte van een volledig-elektrisch systeem (250 kWh) voor de NZK-veren en de laag belaste IJ-veren gering zijn.

De gevoeligheid van hogere energieprijzen is tevens in kaart gebracht (zie hiervoor ook Bijlage I). Als voorbeeld worden de resultaten voor een laag belaste IJ-veer gepresenteerd in tabel 9. Dit laat zien dat de kosten voor elektrische veren relatief dalen als de energieprijzen omhoog gaan (in vergelijking met de resultaten uit tabel 7).

Tabel 9: Totale jaarlijkse kosten voor de verschillende aandrijfopties voor een nieuw schip voor een laag belaste IJ-veer, uitgaande van een hogere energieprijz.

€	Rente, afschrijving en onderhoud schip (excl. Aandrijving)	Afschrijving en onderhoud aandrijflijnen	Energiekosten	Totaal
Conventionele schone dieselmotor	264.000	24.000	128.000	416.000
Serie hybride met een schone dieselmotor	264.000	31.000	128.000	423.000
Plug-in hybride met een schone dieselmotor	264.000	65.000	55.000	384.000
Volledig-elektrisch (250 kW)	264.000	52.000	55.000	371.000
Volledig-elektrisch (600 kW)	264.000	105.000	55.000	424.000

Investeren in walinfrastructuur

De totale investering voor het beschikbaar maken van het elektrische vermogen voor het snelladen bij de kades wordt geraamd op ca EUR 451.000 voor een laag belaste verbinding en EUR 1.430.000 voor een hoog belaste verbinding (2 x EUR 715.000).

De kosten voor deze aansluitingen zijn samengevat in onderstaande tabel. Er is uitgegaan van:

- een standaard kabellengte van 150 meter per aansluiting.
- gelijkricht installatie kosten op basis van informatie van leveranciers en gedetailleerde kostenberekeningen van het GVB.
- de kosten voor de aansluiting op het schip (waarschijnlijk pantograaf) zijn meegenomen in de kosten van het schip. Voor de infrastructuur zijn alleen de kosten voor de laadinterface aan de oever meegenomen.

De walinfrastructuur heeft een relatief lange afschrijvingsperiode: 20 jaar.

Tabel 10: Kosten voor aanleg elektrische aansluitingen per aansluiting

Type	Ver-mogen	Project manage-ment	10 kV aan-sluiting	AC kabel	DC kabel, bestrating -	Bouw-kundig	Trans-forma-tor	rand-apparat uur transf.	Gelijk-richt instal-latie	Rand-appara-tuur	Laad-paal + laad-regeling	Totaal
	kVA	EUR	EUR	EUR	EUR	EUR	EUR			EUR	EUR	EUR
AC5a	350	20.000	19.000	17.000	40.000	140.000	13.000	23.000	69.000	70.000	40.000	451.000
AC5	1060	20.000	37.000	17.000	75.000	140.000	43.000	23.000	230.000	70.000	60.000	715.000

Totale investeringskosten voor een veerverbinding

Tot slot wordt in deze paragraaf inzicht gegeven in de kosten voor een NZK veer, voor een laag belaste IJ-veer en een hoog belaste IJ-veer (zie de volgende tabellen). Hierbij wordt uitgegaan van:

- investering in één nieuwbouw schip;
- investering in walinfrastructuur op één oever (bij plug-in hybride of volledig-elektrische aandrijving).

De investeringskosten voor het NZK veer lopen uiteen van EUR 4,8 miljoen voor een conventionele schone dieselmotor tot EUR 5,8 miljoen bij een volledig elektrische aandrijving met een accupakket van 600 kWh (zie tabel 11). Bij de laag belaste IJ-veren is dit respectievelijk EUR 3,5 miljoen en EUR 4,5 miljoen (zie tabel 12) en bij de hoog belaste IJ-veer is dit respectievelijk EUR 3,5 miljoen en EUR 4,8 miljoen (zie tabel 13). De meerkosten in investeringskosten van aandrijflijnen die gebruik maken van walstroom wordt gecompenseerd door lagere energiekosten. Hierdoor is het verschil in de jaarlijkse kosten relatief klein.¹⁴

Tabel 11: Kosten voor een nieuw NZK veer (één schip en één laadverbinding bij energieprijzen 2015)

EUR	Conventionele schone dieselmotor	Serie hybride met een schone dieselmotor	Plug-in hybride met een schone dieselmotor	Volledig-elektrisch (250 kW)	Volledig-elektrisch (600 kW)
Investeringskosten schip (excl. aandrijflijn)	4.600.000	4.600.000	4.600.000	4.600.000	4.600.000
Investering aandrijflijn	241.000	450.000	612.000	480.000	742.000
Investering walvoorziening			451.000	451.000	451.000
Totale investeringskosten	4.841.000	5.050.000	5.663.000	5.531.000	5.793.000
Afschrijving en onderhoud schip per jaar (excl. aandrijflijn)	368.000	368.000	368.000	368.000	368.000
Afschrijving en onderhoud aandrijflijnen per jaar	24.000	31.000	65.000	52.000	105.000
Investering walvoorziening per jaar			23.000	23.000	23.000
Energiekosten per jaar	78.000	78.000	39.000	39.000	39.000
Totale jaarlijkse kosten	470.000	477.000	495.000	482.000	535.000

¹⁴ Voor de jaarlijkse kosten is gerekend met de afschrijftermijnen die zijn gepresenteerd in bijlage I

Tabel 12: Kosten voor een nieuw laag belast IJ-veer (één schip en één laadverbinding bij energieprijzen 2015)

EUR	Conventionele schone dieselmotor	Serie hybride met een schone dieselmotor	Plug-in hybride met een schone dieselmotor	Volledig-elektrisch (250 kW)	Volledig-elektrisch (600 kW)
Investeringskosten schip (excl. aandrijflijn)	3.300.000	3.300.000	3.300.000	3.300.000	3.300.000
Investering aandrijflijn	241.000	450.000	612.000	480.000	742.000
Investering walvoorziening			451.000	451.000	451.000
Totale investeringskosten	3.541.000	3.750.000	4.363.000	4.231.000	4.493.000
Afschrijving en onderhoud schip per jaar (excl. aandrijflijn)	264.000	264.000	264.000	264.000	264.000
Afschrijving en onderhoud aandrijflijnen per jaar	24.000	31.000	65.000	52.000	105.000
Investering walvoorziening per jaar			23.000	23.000	23.000
Energiekosten per jaar	78.000	78.000	39.000	39.000	39.000
Totale jaarlijkse kosten	366.000	373.000	391.000	378.000	431.000

Tabel 13: Kosten voor een nieuw hoog belast IJ-veer (één schip en één laadverbinding bij energieprijzen 2015)

EUR	Conventionele schone dieselmotor	Serie hybride met een schone dieselmotor	Plug-in hybride met een schone dieselmotor	Volledig-elektrisch (250 kW)	Volledig-elektrisch (600 kW)
Investeringskosten schip (excl. aandrijflijn)	3.300.000	3.300.000	3.300.000	-	3.300.000
Investering aandrijflijn	241.000	450.000	612.000		742.000
Investering walvoorziening					715.000
Totale investeringskosten	3.541.000	3.750.000	3.912.000		4.757.000
Afschrijving en onderhoud schip per jaar (excl. aandrijflijn)	264.000	264.000	264.000		264.000
Afschrijving en onderhoud aandrijflijnen per jaar	24.000	31.000	65.000		105.000
Investering walvoorziening per jaar					36.000
Energiekosten per jaar	245.000	245.000	245.000	-	117.000
Totale jaarlijkse kosten	533.000	540.000	574.000		522.000

5.5 Conclusies

Op basis van dit hoofdstuk worden de volgende conclusies getrokken voor nieuwbouwschepen:

- op basis van uitwisselbaarheid en effect op operationele inzet lijken serie hybride en plug-in hybride, in combinatie met een schone dieselmotor de meest aantrekkelijke opties.
Voor de plug-in hybride, wordt een accupakket van 250 kWh aangeraden, zodat op de laag-belaste verbindingen volledig elektrisch gevaren kan worden. Bij voorkeur wordt deze optie, in ieder geval voor de laag belaste verbindingen op het IJ en het Noordzeekanaal, gecombineerd met walstroomaansluiting.
- serie-hybride (in combinatie met een schone dieselmotor) is zeer flexibel inzetbaar, maar zoals bleek uit hoofdstuk 4 is het effect op emissies minder groot.
- andere verschoningsopties zijn minder goed uitwisselbaar, maar kunnen in combinaties tot goede resultaten leiden (bijvoorbeeld volledig-elektrische schepen met een accupakket met 250 kWh en conventionele schone dieselschepen voor hoog belaste verbindingen).
- belangrijk vraagpunt is de beschikbare ruimte op de kade voor de laadinfrastructuur. Deze dient per veerverbinding goed in kaart te worden gebracht.
- technisch zijn de opties haalbaar. Kanttekening daarbij is de laadverbinding tussen de wal en het schip, die niet direct beschikbaar is. Naar schatting kan met enig maatwerk/ aanpassingen van bestaande ontwerpen dit opgelost worden.
- op het gebied van jaarlijkse kosten zijn de verschillen relatief beperkt, met uitzondering van een volledig-elektrische aandrijving met een groot accupakket (600 kW). De overige varianten liggen bij een nieuwbouwschip ca 5% uit elkaar

Voor nieuwbouwschepen lijkt plug-in hybride de beste optie.

- gebruik van plug-in hybride leidt tot een sterke reductie van de emissies (praktisch uitstootvrij), terwijl flexibiliteit gegarandeerd blijft. Voor het grootste effect op emissies dient te worden geïnvesteerd in walstroomaansluitingen. De aandrijfopie is ook goed te gebruiken op trajecten zonder walstroom, maar het effect op emissies is in dat geval gelijk aan die van de serie-hybride.
- wanneer geen walstroomvoorziening kan worden geïmplementeerd op een verbinding is serie-hybride een goede terugvaloptie. Bij Serie-hybride kan een kleine dieselmotor op een hoge belasting draaien, waardoor het nabehandelingssysteem van een schone dieselmotor goed blijft functioneren¹⁵. De effecten op emissiereductie is kleiner dan bij een plug-in hybride aandrijving, maar leidt tot EUR 18.000 lagere jaarlijkse kosten (zie tabellen 11 en 12).

Voor ombouw van bestaande schepen is nog onbekend in welke mate er fysieke ruimte in het schip beschikbaar is voor inbouw van een nieuwe aandrijflijn en welke aanpassingen dienen te worden gedaan. Hierdoor zijn ook de kosten voor ombouw onzeker. Eerste schatting is een meerprijs van EUR 100.000 tot EUR 200.000.

¹⁵ Lage uitstoot van schadelijke emissies en lange levensduur

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

In dit onderzoek is inzicht gegeven in:

1. het gebruiksprofiel van de veerverbindingen, inclusief het huidige energieverbruik en lokale emissies, zoals CO₂, NO_x en fijnstof (PM₁₀).
2. inzicht in mogelijk technische verschoningsopties voor stads/regionale veren in het algemeen.
3. Het identificeren en doorrekenen van geschikte verschoningsopties voor de Amsterdamse veerverbindingen op basis van het gebruiksprofiel, zowel voor nieuwe als bestaande veren. De verschillende verschoningsopties zijn beoordeeld aan de hand van de volgende criteria:
 - effect op duurzaamheid:
 - zo schoon mogelijke technieken toepassen in de nieuwe en bestaande veren en indien mogelijk uitstootvrij (per 2026).
 - substantiële reductie van (tank-to-propeller) CO₂.
 - effect op inzetbaarheid schepen (schepen zijn op meerdere routes flexibel inzetbaar)
 - implementeerbaarheid van de optie op korte termijn:

Uit de analyse komt naar voren dat er drie type veren zijn als het aankomt op het gebruiksprofiel:

- **NZK-veren**; deze veren draaien gemiddeld op een laag motorvermogen (ook wel aangegeven als laag belast). In het onderzoek is het profiel van de NZK-Pont te Velsen representatief gesteld voor de drie NZK veerverbindingen. Het betreft hier 5 veren.
- **Laag belaste IJ-veren**, welke ook gemiddeld op een laag belast profiel draaien en hiermee vergelijkbaar zijn met de NZK veren. Dit betreft het Oostveer, het Buiksloterwegveer en het IJpleinveer. Het betreft 7 veren.
- **Hoog belaste IJ-veren**, die op een hoog vermogen draaien vanwege de lange oversteek. Het gaat hier om de NDSM-veer en de Houthavenveer. Het betreft hier 3 veren.¹⁶

Voor de NZK-veren (5 schepen) komt voor nieuwbouw schepen plug-in hybride in combinatie met een schone dieselmotor als beste optie naar voren:

- Bij plug-in hybride wordt een accupakket van 250 kWh aanbevolen, zodat voor de normale dienstregeling volledig elektrisch gevaren kan worden. Hiervoor dient, bij voorkeur, geïnvesteerd te worden in laadinfrastructuur op één van de oevers van de verbinding. Gebruik van plug-in hybride leidt tot een sterke reductie van de emissies (praktisch uitstootvrij), terwijl flexibiliteit gegarandeerd blijft. Ook wanneer niet wordt geïnvesteerd in walinfrastructuur is de plug-in hybride goed toepasbaar, maar is het resultaat op de emissies geringer (vergelijkbaar met serie-hybride).
- Wanneer geen walstroomvoorziening kan worden geïmplementeerd is serie-hybride een goede terugvaloptie. Bij gebruik van serie-hybride kan een kleine

¹⁶ Deze laatste betreft een tijdelijke verbinding. Deze zal worden vervangen door een veerdienst op het traject NDSM – Houthaven – Distelweg. Voor deze dienst zijn geen metingen uitgevoerd. De variant is kwalitatief in het onderzoek meegenomen.

dieselmotor op een hoge belasting draaien, waardoor het nabehandelingssysteem van een schone dieselmotor goed blijft functioneren¹⁷.

Voor nieuwbouw schepen voor de laag belaste en hoog belaste IJ-veren (respectievelijk 7 en 3 schepen) zijn meerdere oplossingen mogelijk:

- plug-in hybride aandrijving (met een accupakket van 250 kW) in combinatie met een schone dieselaandrijving is de voorkeursoptie. Deze schepen kunnen op laag belaste verbinding (in het geval laadinfrastructuur aanwezig is) gebruik maken van elektrische aandrijving voor de dagelijkse operatie. De aandrijfoplossing is ook goed te gebruiken op trajecten zonder walstroom, maar het effect op emissies is in dat geval gelijk aan die van de serie-hybride.
- alternatief kan een combinatie zijn van een aantal volledig-elektrische schepen voor de laag belaste IJ-veren aangevuld met een aantal plug-in hybride schepen die flexibel kunnen worden ingezet op de hoog en laag belaste IJ-veren. Voor de reguliere operatie is het voldoende om uit te gaan van zeven volledig-elektrische schepen en drie plug-in hybride schepen. Voor inzet van de schepen voor evenementenvervoer bij de NDSM-werf wordt aangeraden om vijf plug-in hybride schepen aan te houden (samen met vijf volledig-elektrische schepen). Dit leidt tot iets lagere investeringskosten (ongeveer EUR 130.000,-- per schip), maar maakt de vloot minder flexibel.
- een derde mogelijke optie is gebruik van serie-hybride systemen (in combinatie met een conventionele schone dieselmotor). Hiervoor geldt wederom dat de effecten op emissies kleiner zijn, maar dat er minder ingrijpende investeringen hoeven te worden gepleegd. De optie is met name geschikt als er geen walstroomvoorzieningen op de laag-belaste verbindingen kunnen worden geïnstalleerd.

Voor ombouw van bestaande schepen is nog onbekend in welke mate er fysieke ruimte in het schip beschikbaar is voor inbouw van een nieuwe aandrijflijn en welke aanpassingen dienen te worden gedaan. Hierdoor zijn ook de kosten voor ombouw onzeker. Waarschijnlijk gaat dat om tenminste EUR 100.000 extra per schip. Een tweede onzekerheid betreft de laadinfrastructuur. Het is nog niet bekend of bij elke veerverbinding voldoende ruimte beschikbaar is op de kade voor laadinfrastructuur. Daarnaast zal voor de automatische laadverbinding tussen het schip en de wal maatwerk nodig zijn om bestaande ontwerpen geschikt te maken voor de Amsterdamse situatie. Dit is een belangrijke voorwaarde, aangezien tussentijds laden noodzakelijk is om de schepen in de dagelijkse operatie elektrisch te laten varen.

¹⁷ Lage uitstoot van schadelijke emissies en lange levensduur

6.2 Aanbevelingen

Op basis van de analyse worden door TNO de volgende aanbevelingen gedaan rondom drie onzekerheden: operatie, techniek en financieel.

Operatie

- in de analyse is uitgegaan van een aantal veerdiensten. Omdat het operationeel profiel tussen de verschillende diensten sterk verschilt kunnen wijzigingen in de diensten sterke impact hebben. Eventuele (mogelijke) veranderingen dienen daarom in kaart te worden gebracht.
- voor een flexibele vloot dienen voldoende schepen ingezet te kunnen worden op hoog belaste verbindingen. Dit dient mee te worden genomen in een vervolg.
- per veerverbinding dient in kaart te worden gebracht of aan de kade voldoende ruimte beschikbaar is voor de laadinfrastructuur.
- Tevens dient in kaart te worden gebracht of de reeds aanwezige walstroom voorziening in de Ponthaven afdoende is voor bijlading van elektrische schepen 's nachts.

Technisch

- het onderzoek heeft gebruik gemaakt van een eenvoudige meting van het gebruiksprofiel. Voordat investeringen worden gedaan in hybride of volledig-elektrische aansluitingen is het aan te bevelen uitgebreidere metingen voor het gebruiksprofiel, inclusief koppelmetering aan de schroefas uit te voeren. Daardoor wordt meer zekerheid verkregen over het precieze energieverbruik.
- er is nog veel onzekerheid rondom de inpasbaarheid van verschoningsopties voor de inbouw op bestaande schepen. Daarnaast kan veiligheidsregelgeving belemmeringen opwerpen. Bij het nemen van vervolgstappen dient dit nader onderzocht te worden.

Financieel

- de meerkosten van de verschoningsopties dienen te worden gevalideerd door leveranciers.
- mogelijk zijn er schaalvoordelen in de kosten te halen bij grootschalige investeringen. Deze zijn nog niet meegenomen in deze rapportage.
- daarnaast bestaat er nog veel onzekerheid rondom de kosten van inbouw van verschoningsopties op de bestaande vloot. Dit dient nader onderzocht te worden.

7 Ondertekening

Delft, 14 maart 2016



Ruud Verbeek
Auteur

TNO



Jorrit Harmsen
Auteur

A Gebruiksprofiel per veerpont

In deze Bijlage wordt het gebruiksprofiel per veerpont gedetailleerd weergegeven. In het algemeen kosten afvaren, varen op constante snelheid en uitwijken het meeste vermogen. Het varen op constante snelheid vraagt meestal de meeste energie (tussen de 24 en 86%) door de relatief lange tijdsduur, behalve bij de hele korte veerverbindingen. Voor het uitwijken voor andere schepen wordt er soms kortstondig veel vermogen geleverd of wordt er juist even gewacht. Het energieaandeel voor uitwijken is meestal relatief laag door de korte tijdsduur. Het laden en lossen van passagiers kost ook energie omdat de veren mede aan wal gehouden worden door voortstuwingskracht van de schroef (naast de aanwezige haak op de laadklep). Bovendien levert de hulpmotor nog vermogen voor energievragers die niet met de voortstuwing te maken hebben. Dit geldt voor alle veerverbindingen. Bij sommige veerverbindingen kan het energieaandeel van aan wal liggen oplopen tot 26%.

Onderstaande tabel geeft de belangrijkste gegevens en aannames van de veerponten weer.

Tabel 14: Specificaties veerponten

Veerponttype	[-]	Type 50	NZK
Vervoersmogelijkheden	[-]	Voetgangers, fietsers, scooters	Idem als Type 50 + motoren, auto's en vrachtwagens
Maximum vermogen hoofdmotor(en) (origineel en teruggesteld)	[kW]	254 / 225 per motor	312
Aantal hoofdmotoren	[#]	2	1
Maximum toerental (origineel en teruggesteld)	[omw/min]	1800 / 1750	730
Maximum vermogen aan de schroef bij teruggestelde motor*	[kW]	169 (75%) per motor	250 (80%)
Maximum vermogen hulpmotor(en)	[kW]	19.6 per motor	48
Belasting hulpmotoren	[%]	50%	50%

*Inschatting op basis van de correlatie met de brandstofverbruiksgegevens

Oostveer

De Oostveer verbinding is gemeten op een 'Type 30' veerpont, dit is een kleinere en oudere variant van de Type 50. Op termijn zal de Type 30 veer plaatsmaken voor een nieuwe veer die qua specificaties op een 'Type 50' gaat lijken. Het gebruiksprofiel is daarom vastgesteld voor een Type 50 veerpont in plaats van een Type 30 veerpont.

Onderstaande tabel geeft het gebruiksprofiel van de Oostveer weer. Voor een retour van 20 minuten is het motorvermogen gemiddeld 80 kWh voor de voortstuwing en ca. 10 kWh voor de hulpsystemen.

In totaal is er voor een retour circa 30 kWh aan energie benodigd. Het meeste vermogen wordt bij deze veerverbinding gebruikt bij het afvaren, constant varen en uitwijken. De meeste energie wordt gebruikt bij constant varen (ca. 53 %). Dit is het gevolg van het hoge geleverde vermogen en de relatief lange tijdsduur. De veer is 40% van de tijd aan het wachten aan wal, wat 13% van de totale energie kost. Het wachten gebeurt alleen aan de Zamenhofstraat. Aan de andere kant ligt de veer slechts 80 seconden stil voor het laden en lossen van passagiers.

Tabel 15: Gebruiksprofiel Oostveer

Mode	Tijdsduur	Tijds-aandeel	Gemiddeld geleverd vermogen voortstuwing	Energie incl. hulpmotor	Energie aandeel
	[s]	[%]	[kW]	[kWh]	[%]
Laden	80	7%	19	1	2%
Afvaren	60	5%	160	3	10%
Varen constante snelheid 1	290	24%	187	16	53%
Varen constante snelheid 2 (ander vermogen)	60	5%	81	2	5%
Afremmen	60	5%	30	1	2%
Aanmeren	50	4%	121	2	6%
Lossen	80	7%	19	1	2%
Overig 1: Uitmijken	40	3%	163	2	7%
Overig 2: Wachten	480	40%	19	4	13%
Totaal	1200	100%	80	30	100%

Buiksloterwegveer

Onderstaande tabel geeft het gebruiksprofiel van de Buiksloterwegveer weer. Voor een retour van 12 minuten wordt gemiddeld 66 kWh gebruikt voor de voortstuwing en ca. 10 kWh voor de hulpsystemen. In totaal is er voor een retour circa 15 kWh aan energie benodigd. Het meeste vermogen wordt bij deze veerverbinding gebruikt bij het afvaren, constant varen en uitwijken. Deze verbinding is qua afstand erg kort. Hierdoor gebruikt het proces van afvaren relatief veel energie gebruikt. De veer is 66% van de tijd aan het laden en lossen aan wal, wat 26% van de totale energie kost.

Tabel 16: Gebruiksprofiel Buiksloterwegveer

Mode	Tijdsduur	Tijds-aandeel	Gemiddeld geleverd vermogen voortstuwing	Energie incl. hulpmotor	Energie aandeel
	[s]	[%]	[kW]	[kWh]	[%]
Laden	240	33%	19	2	13%
Afvaren	60	8%	259	4	29%
Varen constante snelheid 1	50	7%	248	4	24%
Afremmen	60	8%	77	1	10%
Aanmeren	60	8%	51	1	7%
Lossen	240	33%	19	2	13%
Overig 1: Uitwijken	10	1%	266	1	5%
Totaal	720	100%	66	15	100%

IJpleinveer

Onderstaande tabel geeft het gebruiksprofiel van de IJpleinveer weer. Voor een retour van 15 minuten wordt gemiddeld 70 kWh gebruikt voor de voortstuwing en ca. 10 kWh voor de hulpsystemen. In totaal is er voor een retour circa 20 kWh aan energie benodigd. Het profiel is vergelijkbaar met de Buiksloterwegveer. De overtocht is alleen net iets langer. Het meeste vermogen en energie wordt bij deze veerverbinding gebruikt voor het afvaren en constant varen. Op het moment van meten was er geen uitwijkmanoeuvre nodig, uiteraard zal dit af en toe wel het geval zijn. Door de korte verbinding is ook hier een groot aandeel van de tijd (54%) benodigd voor het laden en lossen wat ca. 20% van de energie kost.

Tabel 17: Gebruiksprofiel IJpleinveer

Mode	Tijdsduur	Tijds-aandeel	Gemiddeld geleverd vermogen voortstuwing	Energie incl. hulpmotor	Energie aandeel
	[s]	[%]	[kW]	[kWh]	[%]
Laden	240	27%	19	2	10%
Afvaren	80	9%	182	4	21%
Varen constante snelheid 1	140	16%	164	7	34%
Varen constante snelheid 2 (ander vermogen)	40	4%	106	1	6%
Afremmen	120	13%	77	3	14%
Aanmeren	40	4%	67	1	4%
Lossen	240	27%	19	2	10%
Totaal	900	100%	70	20	100%

NDSM-veer

Onderstaande tabel geeft het gebruiksprofiel van de NDSM-veer weer. Voor een retour van 30 minuten wordt gemiddeld 200 kWh gebruikt voor de voortstuwing en ca. 10 kWh voor de hulpsystemen. In totaal is er voor een retour circa 105 kWh aan energie benodigd. Het profiel wijkt erg af van de hiervoor beschreven verbindingen. De overtocht is de langste die er is waarbij er bovendien een groot deel op maximum vermogen wordt gevaren. Het meeste vermogen wordt bij deze veerverbinding gebruikt voor het afvaren en constant varen. Het energie-aandeel van afvaren is met 7% vele malen kleiner dan de 86% die benodigd is voor constant varen. Het constant varen bestaat uit twee delen. Vanuit het centraal station mag het eerste gedeelte maximaal 12 km/u gevaren worden. Na ruim een kilometer varen wordt er op vol vermogen gevaren. De veerpont gaat dan, afhankelijk van de stroming, ca. 16 km/u. Voor het varen op hogere snelheid wordt ca. 30% meer vermogen gebruikt. Voor het laden en lossen wordt 20% van de tijd gebruikt. Het energie-aandeel is slechts ca. 2%. Uitwijkmanoeuvres zullen op deze verbinding niet erg vaak nodig zijn omdat er met het verkeer mee wordt gevaren, waar de hiervoor beschreven verbindingen het IJ oversteken.

Tabel 18: Gebruiksprofiel NDSM-veer

Mode	Tijdsduur	Tijds-aandeel	Gemiddeld geleverd vermogen voortstuwing	Energie incl. hulpmotor	Energie aandeel
	[s]	[s]	[kW]	[kWh]	[%]
Laden	180	10%	19	1	1%
Afvaren	93	5%	254	7	7%
Varen constante snelheid 1	617	34%	192	35	33%
Varen constante snelheid 2	580	32%	348	58	54%
Afremmen	60	3%	117	2	2%
Aanmeren	90	5%	83	2	2%
Lossen	180	10%	19	1	1%
Totaal	1800	100%	203	107	100%

Houthavenveer

In de inleiding is al aangegeven dat de verbinding van de Houthavenveer tijdelijk is. Op den duur komen er waarschijnlijk weer twee losse verbindingen waarvan de aanmeerpunten nog niet vaststaan. Voor dit onderzoek is uitgegaan van de verbinding Westerdoksdijk $\leftrightarrow$ NDSM, zonder de Distelweg. De eerst genoemde verbinding is, qua energiebehoefte, het meest uitdagend. Hierdoor zal een eventueel verschoonde veer voldoende energie aan boord hebben indien de verbinding wijzigt in de toekomst.

Onderstaande tabel geeft het gebruiksprofiel van de Houthavenveer weer. Voor een retour van 20 minuten wordt gemiddeld 170 kWh gebruikt voor de voortstuwing en ca. 10 kWh voor de hulpsystemen. In totaal is er voor een retour circa 60 kWh aan energie benodigd. Het profiel is enigszins vergelijkbaar met de NDSM-veer, de overtocht is alleen korter. Er wordt met één constante snelheid gevaren, dit is op maximaal vermogen. Het meeste vermogen en energie (86%) wordt bij deze veerverbinding dan ook gebruikt voor het constant varen. Voor het laden en lossen

wordt 35% van de tijd gebruikt, het energie-aandeel is ca. 5%. Uitwijkmanoeuvres zullen op deze verbinding niet erg vaak nodig zijn omdat er met het verkeer mee wordt gevaren.

Tabel 19: Gebruiksprofiel Houthavenveer

Mode	Tijdsduur	Tijds-aandeel	Gemiddeld geleverd vermogen voortstuwing	Energie incl. hulpmotor	Energie aandeel
	[s]	[s]	[kW]	[kWh]	[%]
Laden	240	20%	19	2	3%
Afvaren	55	5%	117	2	3%
Varen constante snelheid 1	545	45%	333	52	86%
Afremmen	100	8%	19	1	1%
Aanmeren	80	7%	78	2	3%
Lossen	180	15%	19	1	2%
Totaal	1200	100%	170	60	100%

NZK-pont

De veerverbinding Velsen is een NZK-veer, deze zijn niet vergelijkbaar met de hierboven beschreven Type 50 veren.

Onderstaande tabel geeft het gebruiksprofiel van de NZK-pont weer. Voor een retour van 20 minuten wordt gemiddeld 43 kWh gebruikt voor de voortstuwing en ca. 24 kWh voor de hulpsystemen. In totaal is er voor een retour circa 22 kWh aan energie benodigd. Op het NZK passeren veel relatief grote schepen, hierdoor zijn er regelmatig uitwijkmanoeuvres nodig. Een uitwijkmanoeuvre kan veel vermogen kosten en daarmee een grote impact (ca. 20%) hebben op de totaal benodigde energie. Verder wordt er ook vrij veel vermogen geleverd voor constant varen, afremmen en aanmeren. Het onderdeel varen op een constante snelheid heeft relatief het hoogste energiegebruik (37%). De veer is 50% van de tijd aan het laden/lossen aan wal wat 24% van de totale energie kost. Afvaren is bij deze verbinding niet apart geregistreerd omdat dit op hetzelfde toerental als constant varen gebeurt.

Tabel 20: Gebruiksprofiel NZK-pont

Mode	Tijdsduur	Tijds-aandeel	Gemiddeld geleverd vermogen voortstuwing	Energie incl. hulpmotor	Energie aandeel
	[s]	[s]	[kW]	[kWh]	[%]
Laden	300	25%	9	3	12%
Varen constante snelheid 1	390	33%	52	8	37%
Afremmen	80	7%	76	2	10%
Aanmeren	70	6%	73	2	8%
Lossen	300	25%	9	3	12%
Overig 1: Uitwijken	60	5%	250	5	20%
Totaal	1200	100%	43	22	100%

NDSM – Houthaven - Distelweg

De huidige Houthavenveer betreft een tijdelijke situatie. Naar alle waarschijnlijkheid wordt deze in de toekomst vervangen door een veer die loopt in een “V” verbinding.

De dienst zal het volgende traject varen:

- Houthaven naar NDSM;
- NDSM naar Houthaven;
- Houthaven naar Distelweg;
- Distelweg naar Houthaven.

Voor deze verbinding is geen meting aan boord uitgevoerd. De tijdsduren zijn geschat door GVB. Voor het berekenen van het gemiddelde motorvermogen is aangesloten bij de waarden van de IJpleinveer. Deze is qua operationeel profiel vrijwel gelijk. Qua operationeel profiel is deze veer vergelijkbaar met de andere laag belaste veerdiensten.

Tabel 21: Gebruiksprofiel NDSM – Houthaven – Distelweg

Mode	Tijdsduur ¹	Tijds-aandeel	Gemiddeld geleverd vermogen voortstuwing	Energie incl. hulpmotor	Energie aandeel
	[s]	[s]	[kW]	[kWh]	[%]
Laden	240	29%	19	2	11%
Afvaren	80	10%	182	4	24%
Varen constante snelheid	115	14%	164	6	32%
Afremmen	120	14%	77	3	17%
Aanmeren	40	5%	67	1	5%
Lossen	240	29%	19	2	11%
Totaal	835	100%	65	17	100%

¹ De berekende tijdsduur betreft 1 gemiddelde overtocht (Houthaven NDSM en terug) en niet de volledige ronde met vier oversteken.

B Inventarisatie veerboten met schone aandrijflijnen

Als eerste stap is een beknopte literatuurstudie uitgevoerd om de karakteristieken van bestaande veerboten met innovatieve aandrijflijnen in kaart te brengen. Er zijn een zestal elektrische en hybride veerboten gevonden. De lijst is waarschijnlijk niet uitputtend. In de tabel op de volgende pagina is hiervan een overzicht gegeven. Hierin zijn nog twee extra schepen opgenomen: de diesel aangedreven Type 50 veerboot van GVB en een Amsterdamse volledig-elektrische rondvaartboot (de Barlaeus). De informatie uit de tabel op de volgende pagina is voor een deel afkomstig via internet. Daarnaast was er mondeling en schriftelijk contact met de eigenaren van de schepen: de Barlaeus, de Movitz en de Ampère. In de tabel is te zien dat geen enkele volledig-elektrische of hybride veerboot overeenkomt met de Amsterdamse veerboot. Ze zijn of (veel) kleiner, zoals Le Ferry Boat en de Movitz, of juist groter zoals de Ampère of de Princess Benedikte. Het schip dat het beste in de buurt komt is de veerboot ontworpen door BMT voor China. Het is echter (nog) niet bekend of dit schip gebouwd en operationeel is.

Voor de niet al te grote elektrische veerboten, komen de volgende specificaties vaak terug:

1. lichtgewicht catamaran ontwerp;
2. relatief laag vermogen en lage snelheid;
3. soms zonnecellen op het dak om de energiebehoefte aan te vullen (10-15% van het totaal aandeel).

Tabel 22: Specificaties van elektrische en hybride veerboten (plus diesel veerboot Amsterdam en elektrische rondvaartboot).

		A'dam	Volledig-elektrisch					Serie-hybride	
Naam		Type 50, nr 55	Le Ferry Boat	Barlaeus	Movitz	(BMT)	Ampère	Princess Benedikte	M/F Finnøy
Plaats		Amsterdam	Marseille	Amsterdam	Stockholm	China	Sognefjord, Noorwegen	Denemarken	
Aantal passagiers		240	45	100	100	150	350		
Auto's							120		
Jaar in service			2003?		2014?	2012?	2015	2013	1999 / 2013
Type veerboot		Diesel	catamaran, batterij elektrisch	rondvaartboot	Veerboot, batterij elektrisch	catamaran, batterij elektrisch	RoRo veerboot, batterij elektrisch, aluminium	RoRo veerboot, hybride elektrisch	RoRo veerboot, hybride elektrisch
Waterverplaatsing (leeg)	Ton	150	15	67					
Lengte	M	ca 29	13	20	23	26	80		
Breedte	M		4.7	4.25		8.5	20.8		
Materiaal		staal	composiet	staal					
Snelheid	km/h	16	7.5	13-14	16.7	18.5			
Afstand oversteek	M		283				6000		
Tijd per trip	Min		3-4	70 min	60		20		
Vaarten per dag				10			34		
Inzet per dag (nominaal)	Uur		12	12			11.3		
<u>Elektrische aandrijving</u>									
Aandrijfvermogen	kW	2x 225	2x15	1x 50	2x 125		2x 450		2x 1000
Type schroef		2x roerpropellor	2x pod	pod	2x pod				
Vermogen bij kruis/max snelheid	kW	2x 160		15	90				
<u>Elektrische aandrijving</u>									
Type			NiCa	Pb-zuur	NiMH	VRB	Li-ion	LiNMC	
Totale capaciteit	kWh		108	250	180		1000	2600	260
Autonomie, max	Uur		18	12	ca 2 uur				
Laadstrategie			s nachts	s nachts	na trip		s nachts + na trip		
Laadduur	Uur		6	12?	10 min				
Laadvoorzieningen		-			300 kWh (600 kW)		bufferaccu - 260 kWh		
<u>Additioneel</u>			zonnecellen			zonnecellen		dieselmotor	dieselmotor

C Toelichting verschoningsopties

In deze bijlage worden de verschillende verschoningsopties nader toegelicht. Achtereenvolgens worden de volgende drie hoofdopties voor aandrijflijnen toegelicht:

- conventioneel;
- hybride aandrijving, met daarin onderscheid naar:
 - serie hybride met accu;
 - serie hybride met accu en plug-in;
 - parallel hybride met accu;
 - hybride met vliegwiel; en
- volledig elektrische aandrijving.

Per hoofdoptie wordt, waar relevant, onderscheid gemaakt naar verschillende subvarianten, die inzicht geven in de meerwaarde van additionele technische opties zoals¹⁸:

- inzet nabehandelingssystemen ("schone dieselmotor") die achter de motor worden geplaatst welke schadelijke emissies reduceren;
- inzet van 'schonere' dieselbrandstoffen (GTL, HVO) die ten opzichte van reguliere diesel specifieke eigenschappen bevatten die leiden tot minder schadelijke emissies;
- inzet van alternatieve brandstoffen (CNG, LNG) welke minder luchtverontreinigende gassen uitstoten; of
- inzet van lichtgewicht constructies (in het geval van nieuwe schepen).

De informatie over schone aandrijvingen is hoofdzakelijk gebaseerd op binnen TNO beschikbare kennis van deze systemen¹⁹ inclusief specifieke ervaring met de invloed van het gebruiks- of belastingsprofiel op het functioneren van deze schone aandrijvingen.

Conventionele aandrijving

Bij gebruik van een conventionele aandrijflijn zijn er drie opties mogelijk:

- inzet van een nabehandelingssysteem of vervanging van de motor door een "schone" dieselmotor;
- inzet van een schonere dieselbrandstof bij het gebruik van de bestaande motor;
- vervanging van de motor door een gasmotor.

¹⁸ De eerste drie technieken zijn alleen toepasbaar voor conventionele en hybride aandrijflijnen.

¹⁹ Relevant zijn bijvoorbeeld de volgende uitgevoerde studies:

- Factsheets van technische mogelijkheden voor het verlagen van de milieubelasting van passagiersschepen in Amsterdam (Factsheets of technical options to reduce the environmental pollution of passenger vessels in Amsterdam). TNO 2012 R10327, 7 december 2012.
- Natural gas in transport: An assessment of different routes. Ruud Verbeek, Norbert Ligterink, Jan Meulenbrugge, Gertjan Koornneef, Pieter Kroon, Hein de Wilde, Bettina Kampman, Harry Croezen, Sanne Aarnink. Joined report CE Delft, ECN, TNO, Publication code: 13.4818.38. May 2013
- Assessment of pollutant emissions with Shell GTL fuel as a drop in fuel for medium and heavy-duty vehicles, inland shipping and non-road machines. TNO report 2014 R10588. Date September 2014

Schone dieselmotor en nabehandelingssysteem

Verschillende typen emissie controle systemen, welke af-fabriek worden toegepast voor wegvoertuigen en mobiele werktuigen, kunnen worden toegepast op nieuwe motoren, maar ook als optie op bestaande motoren worden toegepast (retrofit). Met name uitlaatgasnabehandelingssystemen lenen zich voor retrofit, omdat deze geen of een heel beperkte invloed op de motor hebben.

Uitlaatgasnabehandelingssystemen welke de luchtverontreinigende emissies met meer dan 70% kan terugbrengen zijn:

1. Selective Catalytic Reduction (SCR) deNOx katalysator, met AdBlue injectie in de uitlaat; en
2. gesloten roetfilter, ook wel Diesel Particulate Filter (DPF) genoemd.

Naast inzet van een nabehandelingssysteem kan ook de volledige motor vervangen worden door een nieuwe, schonere dieselmotor. Een optie hierbij is een moderne schonere motor van een mobiel werktuig op een schip te monteren. Dit wordt al sporadisch gedaan, zoals bijvoorbeeld op het kraanschip WN21 van Waternet in Amsterdam. Bij metingen bleek de NOx emissie zeer laag te zijn. Ook het (geïntegreerde) roetfilter functioneert goed.

Inzet van nabehandelingssystemen en schone motoren kan luchtverontreinigende emissies relatief gemakkelijk terugdringen. Een voorwaarde hiervoor is echter dat de uitlaatgassen voldoende temperatuur hebben (200°C of hoger), wat betekent dat de motoren op voldoende vermogen moeten draaien. Gezien het lage gemiddelde vermogen van de motoren bij 4 van de 6 veerverbindingen in Amsterdam (zie hiervoor onderstaande tabel), zal de efficiëntie van de systemen voor deze veren beperkt zijn. Alleen bij de NDSM veer en de Houthavenveer zal het vermogen voldoende zijn voor goed werkende systemen.

Inzet van schonere dieselmotoren leidt niet tot minder CO₂ verbruik. In het geval van een laag gemiddeld vermogen zal het brandstofverbruik zelfs toenemen.²⁰

Tabel : Gemiddeld motorvermogen voor de verschillende veerverbindingen (%).

Lijn	Gemiddeld vermogen %
Oostveer	16%
Buiksloterwegveer	13%
IJpleinveer	14%
NDSM-veer	39%
Houthavenveer	33%
NZK-pont	14%
<i>NDSM – Houthaven – Distelweg</i>	14%

Schonere dieselbrandstof: GTL en HVO

In dit rapport wordt een schonere dieselbrandstof beschouwd als een brandstof die direct als dieselvervanger gebruikt kan worden, zonder enige aanpassingen aan de motor. Deze brandstoffen bevatten ten opzicht van reguliere diesel specifieke

²⁰ De prestatie van de dieselmotor kan verbeteren wanneer een relatief oude motor wordt vervangen door een nieuwe dieselmotor met een beter rendement. Dit staat echter los van het effect van het nabehandelingssysteem op CO₂.

eigenschappen die 'schonere' emissies tot gevolg hebben. Dit zijn eigenschappen als minder zwavel en aromaten en een hoger 'cetaangetal'.

Twee brandstoffen komen in aanmerking²¹:

- GTL (Gas To Liquid): Een synthetische dieselbrandstof welke gemaakt wordt uit aardgas.
- HVO ofwel "Hydrotreated Vegetable Oil": dit is een synthetische biobrandstof, waarbij plantenolie met een waterstofbehandeling wordt omgezet in een hoge kwaliteit synthetische dieselbrandstof.

GTL en HVO verlagen de luchtverontreinigende emissies, NO_x en fijnstof, met zo'n 10% tot 20%. Beide alternatieve brandstoffen hebben een vergelijkbare CO₂ emissie als gewone dieselbrandstof. Als de CO₂ emissie van bron tot schroef bekeken wordt, kan er afhankelijk van de productiemethode sprake zijn van een daling of een stijging van de CO₂ emissies.

De dieselvangers zijn over het algemeen zowel in bestaande als nieuwe schepen heel goed toe te passen. Het is wel van belang om dit met de leverancier van de motor af te stemmen.

De dieselbrandstofvangers zijn allemaal wat duurder dan gewone diesel. Een schone dieselbrandstof kan ook overwogen worden in combinatie met een schone af-fabriek of retrofit dieselmotor.

Schonere alternatieve brandstof

De meest gebruikelijke schonere alternatieve brandstoffen zijn aardgas, LPG, ethanol en methanol. Luchtverontreinigende emissies zoals NO_x en PM (fijnstof), kunnen bij gebruik van alternatieve brandstoffen lager uitkomen dan bij conventionele dieselmotoren. Dit geldt met name voor de twee veren met een hoog gemiddeld vermogen. Bij een laag vermogen is het rendementsverlies groter. Belangrijkste criteria voor het praktische en op relatief korte termijn kunnen toepassen van deze brandstoffen zijn:

1. beschikbaarheid van motoren (in vereiste afmetingen en vermogen);
2. dynamische response, ofwel de vereiste snelheid in variatie in de motorbelasting van de motoren (bij directe schroefaandrijving);
3. grootte van de brandstoftank en beschikbare ruimte aan boord (uitgaande van bijvoorbeeld een tankfrequentie van maximaal eenmaal per dag)
4. praktische locatie van de tankinfrastructuur en aanvoer van de brandstof.

In bijlage E is een beknopte analyse voor het toepassen van alternatieve brandstoffen voor de Amsterdamse veren opgenomen. Uit de analyse komt naar voren dat met name gas (LNG en CNG) kansrijk lijkt, aangezien er voldoende gasmotoren beschikbaar zijn. CNG heeft als nadeel dat een relatief grote tank moet worden geïnstalleerd aan boord van het schip. Gebruik van LNG heeft veel impact op de tankinfrastructuur. Daarnaast zal bij deze variant een investering plaats moeten vinden in walinfrastructuur.

Elektrisch – hybride aandrijving met verbrandingsmotor

Onder hybride aandrijving wordt in dit verband verstaan, de combinatie van een verbrandingsmotor (diesel- of gasmotor) en een elektrische aandrijving.

Een hybride aandrijving kan op een groot aantal manieren geconfigureerd worden.

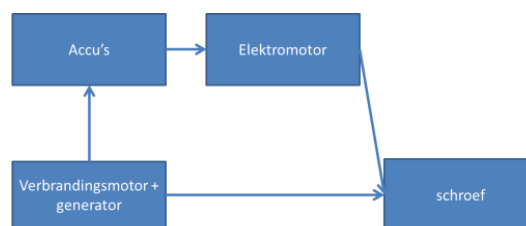
²¹ Andere alternatieve brandstoffen, zoals biodiesel of BTL (Biomass to Liquid), hebben geen impact op luchtkwaliteit, en zijn daarom buiten beschouwing gelaten.

Een verkeerd gekozen configuratie kan leiden tot een toename van het energieverbruik en emissies, terwijl een juist gekozen hybride juist deze parameters verbeterd. Dit is vooral afhankelijk van het gebruiksprofiel.

Bij hybride aandrijving kan onderscheid gemaakt worden tussen de volgende vier type hybriden:

1. parallel hybride:

het vermogen van de verbrandingsmotor wordt verlaagd en voor topvermogen wordt een elektromotor bijgeschakeld. De elektromotor wordt gevoed vanuit een elektrische energieopslag. De elektromotor werkt parallel naast de verbrandingsmotor: vanuit beide motoren wordt naast elkaar vermogen geleverd aan de schroef.

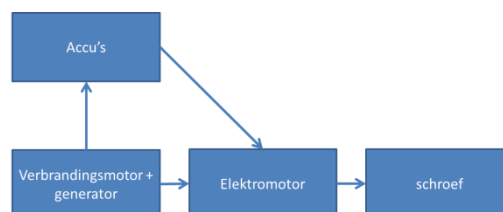


Parallel Hybride

Aangezien bij deze variant meestal alleen kortdurend hoog vermogen nodig is (tientallen seconden tot enkele minuten), kunnen energieopslag systemen overwogen worden die relatief weinig energieopslag hebben, maar een hoog vermogen kunnen leveren. Dit kan bijvoorbeeld een LNG motor zijn. Nadeel van een parallel hybride is dat het een complexe motortechniek is, waarbij de schakeling tussen de twee motoren zeer precies moet worden geregeld.

2. Serie hybride zonder 'stekker'.

Er wordt een relatief kleine verbrandingsmotor toegepast. Deze wordt gedimensioneerd op het gemiddeld benodigd vermogen voor het opladen van de accu's. De verbrandingsmotor drijft de dynamo (of generator) aan en die laadt de accu op, welke de elektrische aandrijving van energie voorziet. Daarnaast is het mogelijk om meerdere (kleine) verbrandingsmotoren in te zetten, waarbij het systeem, al naar gelang, de benodigde vermogen capaciteit kan bijschakelen.

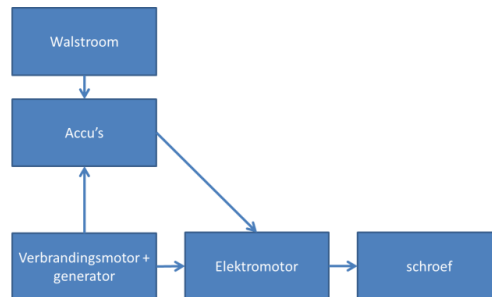


Serie Hybride

Voordeel van een serie hybride schakelsysteem is dat de elektromotor gemakkelijk pieken kan opvangen in het gebruik, waardoor de verbrandingsmotor constant een optimaal vermogen kan draaien.

3. Serie hybride met 'stekker' (plug-in hybride).

Hetzelfde als de serie hybride zonder 'stekker', alleen kunnen de accu's ook vanaf de wal opgeladen worden. Om dit zinvol te maken, moet de energieopslag capaciteit behoorlijk groot zijn. De keuze van het type accu wordt hiervoor geoptimaliseerd.



Serie Hybride met Plug in

Met deze variant is de grootste reductie in emissies mogelijk, aangezien een groot deel (bijvoorbeeld 50% of 75%) van de gebruikte energie elektrisch vanaf de wal komt. In deze variant is het noodzakelijk om investeringen in elektrische laadinfrastructuur aan de wal te plegen.

4. Hybride met vliegwiel

In plaats van accu's, wordt in deze variant een combinatie van een vliegwiel met een verbrandingsmotor of eventueel brandstofcel toegepast, waarbij het vliegwiel zorgt voor het piekvermogen en de snelle respons. Een vliegwiel is vooral nuttig als piek-shaver, waarbij gedurende korte tijd, bijvoorbeeld 30 seconden, een flinke hoeveelheid extra vermogen ter beschikking staat. Voor de Amsterdamse veren is het vliegwiel dus wel geschikt voor ondersteuning van de dieselmotor, maar niet om alleen op een vliegwiel de oversteek te maken. Voor met name de laag belaste veren kan met één of twee vliegwielen het motorvermogen met ca 25% tot 50% gereduceerd worden. Dat zou een aanzienlijke winst opleveren. Voor de hoog belaste verbindingen, zal de vermindering van het motorvermogen echter maar circa 4% tot 8% bedragen. Het is echter onbekend of inzet van een vliegwiel impact heeft op de stabiliteit van de veer.

In onderstaande tabel zijn verschillende opties van een hybride aandrijflijn nader gespecificeerd. Voor deze varianten kan een doorrekening of simulatie overwogen worden.

Tabel 23: Mogelijke specificaties en gebruikskarakteristiek voor verschillende typen hybride aandrijflijn (dieselmotor kan vervangen worden door motor op alternatieve brandstof).

	Specificaties / belangrijkste componenten	Gebruikskarakteristiek verschillende verbindingen
Parallel hybride	– 1 ca 200 kWh dieselmotor via verdeelkast op 2 schroefassen* – Asgeneratoren ca 100 kWh op beiden schroefassen – Generator set ca 150 kW – Accu's: ca 25 tot 50 kWh	– Direct gekoppelde motor levert al het vermogen voor Oostveer, Buiksloterwegveer, IJpleinveer verbindingen. – Het generator set draait continue voor de NDSM veer en Houthavenveer verbindingen.
Serie-hybride	– 2x 100 tot 120 kWh generator sets – Accu's: 50 tot 100 kWh – 2x elektromotor ca 200 kWh op schroefassen	– 1 generator set aan voor Oostveer, Buiksloterwegveer, IJpleinveer verbindingen. – 2 generator sets aan voor NDSM veer en Houthavenveer
	–	–
Plug in hybride	– 2x elektromotor ca 200 kWh op schroefassen – 200 kWh generator set – Laadverbinding 100 kWh elektrisch – Accu's ca 50 tot 100 kWh	– Volledig elektrisch bedrijf met alleen energie van wal voor de Oostveer, Buiksloterwegveer, IJpleinveer verbindingen. – Het generator set staat altijd aan voor de NDSM veer en Houthavenveer verbindingen.
Vliegwiel	– Max vermogen: 200-300 kW – Energieopslag: 2 kWh – Afmetingen: Xbox: 1,83 x 0,83 x 1,00 m	– 1 a 2 vliegwiel voor de Oostveer, Buiksloterwegveer, IJpleinveer verbindingen. – Gebruik bij NDSM veer en Houthavenveer verbindingen lijkt niet zinvol vanwege de beperkte impact op de motorbelasting.

*Wellicht niet haalbaar bij voor- plus achterschroef zoals bij Type 50. Alternatief is één dieselmotor direct op achterste schroef en aandrijving voorste schroef 100% elektrisch.

Voor de in de tabel genoemde motoren en generator sets, kunnen voor de verbrandingsmotoren dezelfde opties worden toegepast die in de vorige paragraaf aan bod zijn gekomen. De werking van de opties kunnen, met name bij het gebruik van serie-hybride geschakelde motoren verschillen ten opzichte van conventionele aandrijving:

1. **schone dieselmotor:** bij een serie-hybride aandrijflijn is toepassing van een schone dieselmotor geschikt voor veerdiensten met een laag vermogen. Voor deze diensten kan met een kleine motor een continue (hoog) toerental gehaald worden. De gemiddelde belasting van de motoren gaat (wanneer deze draaien) sterk omhoog. Ook retrofit emissiecontrole systemen zullen in een hybride configuratie veel beter functioneren.
2. **schone dieselbrandstof:** Het effect op emissies is hetzelfde als bij een conventionele motor, en werkt hiermee aanvullend op het effect van de hybride motor.
3. **alternatieve brandstoffen:** bij een serie-hybride aandrijflijn is toepassing van een schone dieselmotor ook geschikt voor veerdiensten met een laag vermogen.

Volledig elektrische aandrijving

Een volledig elektrische aandrijving kan gerealiseerd worden met verschillende opties voor de energieopslag. Binnen dit project zijn twee opties als energieopslag in overweging genomen:

- 1 accu's (met diverse laadstrategieën, en verschillende accutypen); en
- 2 waterstof in combinatie met brandstofcel.

Beide opties zijn lokaal uitstootvrij. Als de energiebronnen niet duurzaam worden opgewekt komen er luchtverontreinigende- en broeikasgasemissies vrij bij de productie van de energiebronnen.

Batterij-elektrisch

Een batterij-elektrische aandrijflijn kan op verschillende manieren geconfigureerd worden, zowel qua batterij soorten als laadstrategieën. In dit rapport worden de batterij soorten lithium-ion (li-ion), lood-zwavel en Nikkelmetaalhydride (Ni-MH) op hoofdlijnen beschouwd. De keuze voor de juiste batterijsoort hangt af van de benodigde accucapaciteit en de snelheid waarmee moet worden geladen.

Hoe sneller moet worden geladen, hoe hoger de benodigde laadcapaciteit.

- het voordeel van li-ion batterijen zijn de grote stroom- en opslagcapaciteit, en ook nog met een hoog laad- en ontladrendement (ca. 95%). Voor toepassing op voertuigen is onder andere de LFP-batterij (li-ion, ijzerfosfaat) erg 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 redelijke prijs. Zowel hoger vermogen als hogere energiedichtheid accu's zijn fors duurder.
- de opslagcapaciteit van lood-zwavelzuur batterijen is veel lager, ook kan dit type batterij geen hoge laadvermogens aan. Het voordeel van de lood-zwavelzuur batterij is de relatief lage prijs per kWh.
- de Ni-MH batterijen kunnen wel redelijk hoge laadvermogens aan, de energiedichtheid is echter minder gunstig dan bij de li-ion batterijen.

Tabel 21 geeft de belangrijkste specificaties per veerverbinding ten behoeve van een batterij-elektrische aandrijflijn.

Uit de tabel komt naar voren dat het benodigde accupakket afhangt van de toegepaste laadstrategie. Qua laadstrategieën kan er gekozen worden om bijvoorbeeld alleen 's-nachts bij te laden. Ook kan er gekozen worden voor tussendoor bijladen (al dan niet snelladen), of juist een combinatie van de twee. In de tabel staan de opties voor tussendoor bijladen en 's-nachts bijladen. De praktische toepasbaarheid van de batterij-elektrische optie is een uitdaging vanwege de hoge energiebehoefte en de korte beschikbare laadtijd van de veerponten. Door deze omstandigheden is het een uitdaging om voldoende energie aan boord te hebben gedurende een complete werkdag. Als er niet tussendoor bijgeladen wordt is het accupakket van ca 1.500 tot 4.000 kWh onrealistisch groot. Bestaande elektrisch veren maken gebruik van een accucapaciteit van ca 100 tot 1.000 kWh (zie Bijlage B).

Door de korte beschikbare laadtijd dient er echter geladen te worden met zeer hoge vermogens, tussen de 200 en 700 kWh (bij tussendoor bijladen zelfs nog hoger). Dit vergt een flinke investering in de infrastructuur. Door de hoge energiebehoefte en hoge laadvermogens zijn goedkope lood-zwavelzuur batterijen geen optie meer.

Tabel 24: Belangrijke specificaties per veerverbinding ten behoeve van een batterij-elektrische aandrijving²²

Lijn****	Per overtocht (enkele reis)			Per etmaal (alleen 's-nachts bijladen)		
	Minimaal benodigde accugroote**	Beschikbare laadtijd	Benodigd laadvermogen***	Minimaal benodigde accugroote	Beschikbare laadtijd	Benodigd laadvermogen
	[kWh]	[min]	[kW]	[kWh]	[uur]	[kW]
Oostveer*	17	9,3	108	1.619	7,5	220
Buiksloterwegveer	8	4,0	129	2.000	0,0	-
IJpleinveer	11	4,0	169	1.555	6,0	267
NDSM-veer	58	3,0	1204	4.088	6,2	683
Houthavenveer	33	3,5	581	3.452	6,2	577
NKZ-pont	12	5,0	152	1.772	0,0	-

* Opladen geldt alleen voor de Zamenhofstraat

** bij laden aan beiden zijden

*** alleen tussendoor laden

**** NDSM – Houthaven – Distelweg is niet apart berekend. De uitkomsten zullen vergelijkbaar zijn met die van IJpleinveer en Buiksloterwegveer

Er zal goed onderzocht moeten worden wat de meest efficiënte laadstrategie is. Waarschijnlijk wordt dit een combinatie van tussendoor bijladen en 's-nachts bijladen. Ook kan de optie voor het wisselen van batterijen onderzocht worden. Voor het Oostveer wordt uitgegaan van één oplaadpunt, n.l. bij de Zamenhofstraat. De aanlandtijd bij het Azartplein is te kort om de accu's op te laden.

Elektrische aandrijving met brandstofcel als energiebron

Volledig elektrische aandrijving met een brandstofcel is grotendeels vergelijkbaar met batterij-elektrische aandrijving. Het verschil is dat de accuopslagcapaciteit beperkt is en elektrische energie wordt geleverd door brandstofcellen in plaats vanuit het elektriciteits-netwerk.

Waterstof is over het algemeen de energiedrager waar de brandstofcel door binding met zuurstofmoleculen energie uit opwekt. Eventueel kunnen ook aardgas, methanol of dimethyl-ether (DME) gebruikt worden. Dan is wel een omvormer nodig om aan boord waterstof te maken. In deze analyse beperken we ons tot waterstof als energiedrager.

Het belangrijkste voordeel van de brandstofcel is dat geen relatief complex elektrisch laadsysteem voor hoog vermogen nodig is of een zeer groot accupakket. Nadelen zijn echter wel de noodzaak van een waterstof tankstation en aanvoer naar het tankstation van gecompriemd of vloeibare waterstof en de onvoldoende beschikbaarheid van standaard en betaalbare brandstofcellen.

²² De benodigde accugroote is groter dan het energiegebruik bij een conventionele aandrijving (Tabel 8). Dit komt doordat er rekening is gehouden met een aandrijvingsrendement van 91%. De verliezen zijn het gevolg van het ontladen van de accu, de elektromotorverliezen en de verliezen van omvormers. Voor het benodigde laadvermogen is laadrendement van 97% aangenomen. Dit is nodig omdat er energie verloren als er energie in de accu wordt geladen. De betreffende laadvermogens zijn alleen mogelijk via snel laden met gelijkstroom, hierdoor zijn er geen verliezen van een acculader aanwezig.

Daarnaast moet vanwege de zeer lage energiedichtheid van waterstof rekening gehouden worden met een relatief groter volumenbeslag vanwege de ronde vorm van de hogedruk waterstof tanks of met de isolatie van de vloeibare waterstof tanks.

Een schatting voor de NDSM veer komt uit op een tank met een volume van 6.000 tot 7.000 liter.²³

²³ De NDSM veer heeft het hoogste verbruik per dag (950 liter diesel). Indien dagelijks getankt wordt, dat wordt het benodigde volume van de waterstof brandstoftank(s) geschat op 6000 tot 7000 liter, voor vloeibare respectievelijk gasvormige opslag bij 700 bar. Deze schatting gaat uit van een 25% hogere efficiency van de brandstofcel aandrijving t.o.v. de dieselaandrijving en houdt rekening met 50% veiligheidsmarge op het verbruik (de tank is dan nog voor 1/3 gevuld aan het einde van de dag).

D Toelichting kwalitatieve selectie opties

In onderstaande tabel is voor de verschillende verschoningsopties een nadere toelichting gegeven van de kwalitatieve selectie van paragraaf 3.2.

Tabel 25: Selectie van aandrijflijnopties op basis van de kwalitatieve analyse

Type/ hoofdoptie	Variant	Geselecteerd	Toelichting keuze
Conventioneel	Schone dieselmotor	Ja	Goed functioneren emissiecontrolesysteem onzeker vanwege laag belastingspatroon van de meeste veerverbindingen. Voor de hoog belaste veren kan deze optie tot een substantiële reductie van emissies leiden.
	Schone diesel-brandstof: GTL, HVO	Nee	Klein additioneel effect verwacht ten opzichte van de reguliere dieselmotor
	Gasmotor, CNG	Nee	Beschikbaarheid van motoren welke voldoen aan eisen voor directe aandrijving (dynamische respons) is waarschijnlijk te beperkt, CO ₂ reductie is beperkt.
	Gasmotor, LNG	Nee	Beschikbaarheid van motoren is beperkt, CO ₂ reductie is beperkt en een hoge verwachte investering in infrastructuur
Serie hybride met accu	Standaard dieselmotor	Ja	Relatief eenvoudige optie waarbij laadinfrastructuur niet nodig is. CO ₂ reductie kan mogelijk beperkt zijn, dient verder onderzocht te worden.
	Schone dieselmotor	Ja	Als hierboven. Bij schone dieselmotor ook zeer lage schadelijke emissies mogelijk voor de laag belaste veren.
	Schone diesel-brandstof: GTL, HVO	Nee	Klein additioneel effect verwacht ten opzichte van de reguliere serie hybride optie
	Gasmotor, CNG	Ja	Motor op aardgas (CNG) stoot minder schadelijke emissies (met name NO _x en PM) uit dan huidige dieselmotoren. CO ₂ reductie dient nader uitgezocht te worden. De dynamische respons is in serie hybride optie geen probleem. Ruimte voor CNG tanks is een uitdaging.
Serie hybride met accu en plug-in	Standaard dieselmotor	Ja	CO ₂ reductie is afhankelijk van de grootte van het accupakket, dit kan aanzienlijk zijn. Deze optie biedt een goede transitie naar volledig elektrisch. Bovendien wordt ervaring opgebouwd met elektrisch varen en laden.
	Schone dieselmotor	Ja	Additioneel aan standaard plug-in hybride: Bij gebruik schone dieselmotor ook zeer lage schadelijke emissies mogelijk, met name voor de laag belaste veren. De optie is een mogelijke transitie richting volledig elektrisch.
Parallel hybride met accu	Schone dieselmotor	Nee	Redelijke optie met beperkte CO ₂ reductie. Minder geschikt als overgangsoptie naar volledig elektrische aandrijving in de toekomst dan bij serie hybride.

Type/ hoofdoptie	Variant	Geselecteerd	Toelichting keuze
Hybride met vliegwiel	Schone diesel	Nee	Vliegwiel heeft te beperkte opslagcapaciteit en neemt veel ruimte in beslag. Niet geschikt voor alle veerverbindingen, hierdoor zijn de veren niet meer flexibel inzetbaar. De optie is ook redelijk kostbaar.
Volledig elektrisch	Batterij-elektrisch	Ja	Volledig elektrisch is (lokaal) uitstootvrij en dus een hele schone optie. Als er overdag voor elke trip en eventueel 's nachts wordt geladen dan behoeft het accupakket niet groot te zijn. De benodigde infrastructuur voor snelladen is wel een uitdaging, de mogelijkheden hiervoor dienen verder onderzocht te worden.
	Batterij-elektrisch: alleen 's nachts laden	Nee	Een accupakket tussen de 1500 en 4000 kWh is onrealistisch groot. Ook de investering in een dergelijk accupakket is zeer hoog.
	Batterij-elektrisch; lichtgewicht schip	Ja	Als hierboven: In het geval van nieuwe schepen kan extra bespaard worden als in het scheepsdesign wordt uitgegaan voor lichtgewicht constructies. Er moet nader onderzoek worden gedaan naar de haalbaarheid en voor- en nadelen van deze optie.
	brandstofcel	Nee	De optie is ook uitstootvrij. De componenten voor deze zijn nog beperkt beschikbaar en vergen een hoge investering. Ook een waterstof tankstation vraagt een grote investering.

E Afwegingskader inzet alternatieve brandstofsoorten

Belangrijkste criteria voor het praktisch en op relatief korte termijn kunnen toepassen van deze brandstoffen zijn:

1. beschikbaarheid van motoren (in vereiste afmetingen en vermogen);
2. dynamische response van de motoren (bij directe schroefaandrijving;)
3. grootte van de brandstoftank en beschikbare ruimte aan boord (uitgaande van bijvoorbeeld een tankfrequentie van maximaal eenmaal per dag);
4. praktische locatie van de tankinfrastructuur en aanvoer van de brandstof.

De belangrijkste luchtverontreinigende emissies zoals NO_x en PM (fijnstof), kunnen 75% of meer lager zijn dan bij conventionele dieselmotoren.

Bij vier van de zes veerverbindingen is het gemiddeld vermogen van de motoren echter zeer laag (lager dan 20%). Dit kan toch weer leiden tot relatief hoge emissies zoals NO_x en methaanemissie. Het is aan te bevelen om dit goed te checken en zo nodig een hybride aandrijflijn configuratie toe te passen.

Beschikbaarheid motoren

Dit lijkt problematisch omdat voor het maritieme segment in de voor de veren gebruikt vermogensrange (ca 250 kWh per motor), waarschijnlijk geen of zeer beperkt motoren beschikbaar zijn. Dit kan verder onderzocht worden.

Voor vrachtauto's zijn in deze vermogensrange wel motoren beschikbaar voor aardgas en ethanol, maar onzeker is of er varianten voor maritieme toepassing beschikbaar gemaakt kunnen worden. Ook kan onderzocht worden of er in het stationaire motoren of mobiele werktuigen domein motoren beschikbaar zijn. Vaak worden aardgasmotoren afgeleid van stationaire motoren. De dynamische response van die motoren is vaak onvoldoende voor directe schroefaandrijving. Een alternatief is dan een gasmotor-elektrische aandrijving of een hybride aandrijving met energieopslag. Methanol zal zeer waarschijnlijk niet beschikbaar zijn.

Grootte van de brandstoftank

De tankgrootte van de huidige dieseltanks voor het Type 50 veer, varieert van ca. 9.000 tot 22.000 liter. Daardoor is de tankfrequentie laag (1x per 1 tot 4 weken). Bij toepassing van een alternatieve brandstof zal de tankfrequentie doorgaans flink omhoog gaan, omdat de energie-inhoud per liter lager is en omdat bij sommige brandstoffen de tankvorm cilindrisch moet zijn en meer ruimte inneemt.

In onderstaande tabel zijn de vereiste minimale tankgroottes uitgerekend voor de verschillende veerverbindingen. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat er niet meer dan eenmaal per dag getankt wordt. En er is een opsplitsing gemaakt tussen de qua energieverbruik minder intensieve en intensieve veerverbindingen.

Bij de berekening is rekening gehouden met een 25% lager motorrendement dan bij de dieselmotor en tevens met een 50% veiligheidsmarge (het daadwerkelijke dagverbruik is naar verwachting 1/3 deel lager).

De tabel laat zien dat de minimale tankgrootte voor CNG aanzienlijk is, zelfs als eenmaal per dag getankt wordt. De gasvormige brandstoffen CNG, LNG en LPG zullen cilindrische gevormde tanks nodig hebben, waardoor de ruimte-inname relatief ongunstig is. Voor ethanol en methanol zal de tankgrootte geen probleem

oplever, alhoewel de tankfrequentie ten opzichte van diesel gemiddeld met een factor twee omhoog zal gaan. Voor LNG en LPG zal dit een factor van ca vier zijn, vanwege de cilindrische vorm. Voor CNG zal goed gecontroleerd moeten worden of de benodigde ruimte voor vier tot acht m³ CNG tanks aan boord gevonden kan worden. Vanwege de hoge druk, zullen dit een flink aantal cilindrische tanks moeten zijn (bijvoorbeeld 10-30 tanks met een diameter van minder dan ca 50 cm) .

Tabel 26: Berekening van de minimale tankgrootte voor alternatieve brandstoffen, ervan uitgaande dat er voldoende energie is voor 1 dag normale inzet (incl. 50% veiligheidsmarge).

Verbinding	Gemiddeld dieselverbruik per dag (dm3)	Minimale tankgrootte, bij alternatieve brandstof en eenmaal tanken per dag (dm3)				
		CNG, 250 bar	LNG	LPG	Ethanol	Methanol
Oostveer, Buiksloterwegveer, IJpleinveer	220 - 500	4200	1350	1250	1600	2100
NDSM veer, Houthavenveer	730 - 950	8100	2600	2400	3000	4100

Tankinfrastructuur

Voor de meeste alternatieve brandstoffen, zal er meer brandstof moeten worden aangeleverd naar het tankstation dan wanneer diesel wordt gebruikt. Dat komt omdat de energie dichtheid vaak rond een factor 2 lager is en dus meer liters aangevoerd moeten worden. Een uitzondering hierop is aardgas indien dit als CNG gebruikt wordt, omdat het aardgas dan per pijpleiding wordt aangevoerd. Voor CNG en LNG zijn de tankstations relatief kostbaar (1-2 miljoen Euro).

Conclusies alternatieve brandstoffen

Met betrekking tot het toepassen van motoren welke draaien op alternatieve brandstoffen, zijn een aantal kritische aspecten gevonden welke nader onderzoek vergen:

- beschikbaarheid van motoren welke voldoen aan de toepassingseisen voor deze veren, met name in directe schroefaandrijving. Dit geldt voor alle overwogen alternatieve brandstoffen: aardgas, LPG, ethanol en methanol. Voor methanol is vrijwel zeker geen motor beschikbaar.
- voor CNG: de beschikbaarheid van voldoende ruimte aan boord van het schip voor de brandstoftanks. Voor alle alternatieve brandstoffen moet rekening gehouden worden met een veel hogere tankfrequentie.
- de aanvoer van brandstoffen naar het tankstation: voor alle brandstoffen, behalve aardgas/CNG, heeft dit meer impact dan voor dieselbrandstof.
- een gemiddeld laag motorvermogen kan leiden tot verhoogde emissies, zodat de reductie ten opzichte van conventioneel diesel tegenvalt. Aangeraden wordt dit goed te checken en eventueel een hybride aandrijflijn configuratie toe te passen.

De beschikbaarheid van gasmotoren zal naar waarschijnlijkheid geen of veel minder problemen opleveren, indien deze in een gas-elektrische of hybride aandrijflijnconfiguratie worden geplaatst. Dat lijkt de meest voor de hand liggende optie voor nader onderzoek.

F Geoptimaliseerd energiegebruik veren / aangepast vaargedrag

De berekeningen in hoofdstuk 4 zijn primair opgezet voor de geselecteerde opties als retrofit voor de bestaande Type 50 en NZK veren. Voor de elektrische opties is het energiegebruik van de veerverbinding echter een kritische factor voor de haalbaarheid van de optie. De elektrische opties (volledig elektrisch en plug-in hybride) zijn daarom ook geanalyseerd met een geoptimaliseerde inzet met een lager energiegebruik.

Om de verbeterde inzet te kwantificeren zijn de volgende aanpassingen gemaakt in het gebruiksprofiel:

- bij NDSM-veer en Houthavenveer maximum snelheid van 16 km/u naar 12 km/u. Het energiegebruik wordt als gevolg van deze maatregel met ca. 45% gereduceerd voor de gebieden waar nu 16 km/u gevaren wordt.
- tijdens het laden en lossen van passagiers geen schroefvermogen gebruiken, bijvoorbeeld door goed gebruik te maken van de haken op de laadkleppen of door toepassing van zuignappen (in combinatie met robots) om de veer aan wal te houden (wordt gebruikt op een Texelse veer)
- verbetering van vaargedrag tijdens aanmeren en afremmen, met name meer laten 'uitvaren' in plaats van remmen kan een verschil maken. In deze analyse is de reductie ingeschat op 25% tijdens aanmeren en afremmen

Gemiddeld over alle veerverbindingen lijkt een energiereductie van ca. 25% haalbaar als gevolg van de bovenstaande maatregelen. De eerste en de laatste aanpassing hebben echter wel als consequentie dat er meer tijd nodig is voor een overtocht, hierdoor dient mogelijk het vaarschema aangepast te worden. Ook is onderzocht wat een nieuw schip (incl. verbeterde inzet) voor effect kan hebben op de haalbaarheid van deze verschillende verschoningsopties. Hiervoor is gekeken naar een vergelijkbaar schip als de IJ-veren maar dan in catamaran uitvoering met een aluminium romp. Het betreffende schip is ca. 60 á 70% lichter dan de IJ-veren. Het verbruik van de veren zou als gevolg van een dergelijk gewichtsreductie met ca. 50% gereduceerd kunnen worden.

Nader onderzoek zal dienen te worden gedaan om de haalbaarheid in de praktijk te kunnen toetsen.

G Laadinfrastructuur voor elektrische vaartuigen

Voor het elektrisch laden van voer- en vaartuigen zijn diverse mogelijkheden. Voor de veren is snelladen een belangrijke optie om de omvang van het accupakket beperkt te houden. Daarnaast dient er 's-Nachts (kan met lager laadvermogen bijgeladen te worden). Het snelladen kan op diverse manieren, namelijk:

1. stekker verbinding;
2. inductief; en
3. conductief.

De stekkerverbinding lijkt voor de veren een te arbeidsintensieve optie vanwege het aantal keren koppelen/ontkoppelen per dag. Daarnaast zorgt veel koppelen/ontkoppelen voor een snelle slijtage van de verbindingen. De opties inductief en conductief laden worden hieronder verder beschreven.

Inductief laden

Inductief laden werkt via twee draadspoelen, waarbij er één aan de walzijde en de andere aan de vaartuigzijde geplaatst wordt. Het zou zonder of met fysiek contact kunnen, maar in beide gevallen 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 gepositioneerd worden. Voor personenauto's en autobussen zijn wel een aantal toepassingen bekend [van Kerkhof en van Sloten 2014]²⁴. De spoelen zijn dan verwerkt in het wegdek en in de bodem van het voertuig (vaak kan de secundaire laadlus bij stilstand omlaag zakken). Er kan gedacht worden aan twee uitvoeringsvormen:

- een plat vlak, of cilindrische of trapeziumvormig, waar het vaartuig tegenaan vaart en zich vergrendeld. Bij een cilindrische vorm zal waarschijnlijk een flexibele arm nodig zijn.
- een cilindrische of platte inductieve stekker, welke in het vaartuig gestoken wordt (middels een flexibel 'portaal' zodat het weinig krachtinspanning kost en de kabel goed geleid wordt).

Naar verwachting zal er wel een overbrengingsverlies zijn van ca 5%. Bijvoorbeeld bij 275 kWh laadvermogen zou dit ca 14 kWh verlies kunnen zijn, hetgeen een flinke warmteontwikkeling met zich meebrengt rondom de inductieve componenten.

Conductieve verbindingen voor hoog vermogen

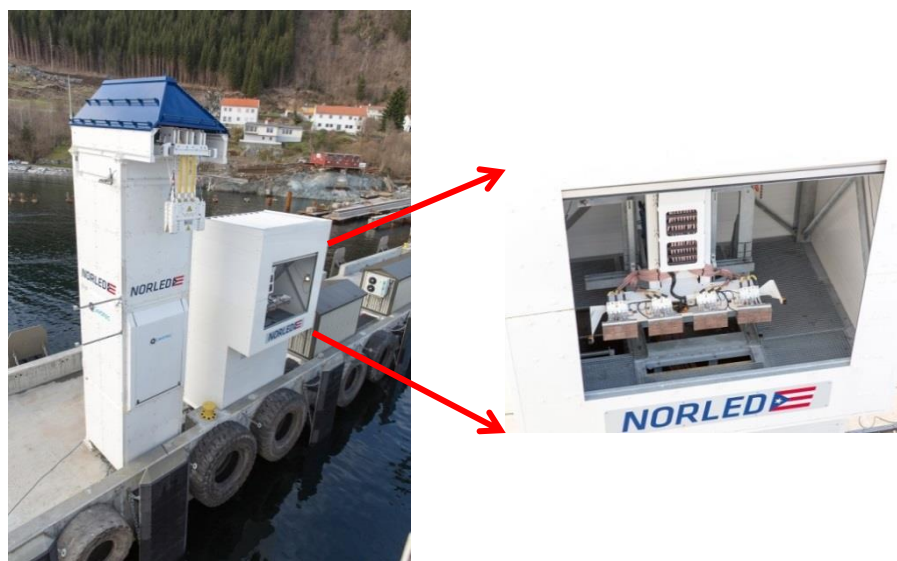
Bij conductieve verbindingen, zijn de contacten vaak spanningsloos als er geen verbinding is. Dit is bijvoorbeeld het geval bij een mode 3 of 4 verbinding. Een stukje elektronica geeft door als er een verbinding is, waarna er pas spanning op de contacten komt. Deze elektronica geeft ook het maximum laadvermogen door.

²⁴ [van Kerkhof en van Sloten 2014] APPM en PRC, "Nederland Inductieland? Een verkennende studie naar de mogelijkheden en potentieel voor inductieladen" November 2014

Een automatisch contact of een pantograaf is vooral bekend van trein en tram. Ook bij elektrische bussen wordt dit soms toegepast bij haltes of aan het einde van de rit om de accu's snel op te laden. Daarnaast worden bij hoog vermogen ook stekkers toegepast. Dit is tot nu toe bij schepen het geval. Onderstaande figuur geeft de laadverbinding van de Norled veerboot weer.



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



Figuur 6: Laadaansluiting -ter grootte van een krantenkiosk- op de steiger. Om het lokale elektriciteitsnet te ontzien zijn op beide oevers accu-buffers van 260 kWh capaciteit geïnstalleerd. Op de uitvergroting rechts, een beeld van de aansluitcontacten.

Overzicht laadverbindingen voor hoog vermogen

In onderstaande tabel wordt een overzicht gegeven van een aantal laadverbindingen voor hoog vermogen. Dit omvat conductieve en inductieve verbindingen in de laadvermogen range van 60 tot ca 900 kW.

Tabel 27: 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

H Energieverbruik en emissieberekening per aandrijfopie

In deze Bijlage staan de gedetailleerde resultaten van de berekening van het energieverbruik en het effect op de emissies van de verschillende verschoningsopties, behorend bij hoofdstuk 4. In onderstaande tabel staat een overzicht van de geselecteerde aandrijflijn.

Tabel 28: Overzicht geselecteerde aandrijflijnopties en sub-opties

Type/ hoofdoctie	Varianten
Conventioneel	Schone diesel
Serie hybride met accu	Standaard dieselmotor
	Standaard dieselmotor met GTL
	Schone dieselmotor
	Gasmotor
Serie hybride met accu en plug-in	Standaard dieselmotor
	Schone dieselmotor
Volledig elektrisch	Batterij-elektrisch
	Batterij-elektrisch; lichtgewicht schip

In deze Bijlage wordt allereerst kort ingegaan op de gehanteerde emissiefactoren. Daarna worden de vier hoofdocties (inclusief de onderliggende varianten) achtereenvolgens behandeld.

Gebruikte emissiefactoren

In deze studie wordt de analyse gebaseerd op het gebruik van het vaartuig, meestal aangeduid met 'Tank to Wheel' of in dit geval 'Tank to Propeller'. Het gevolg hiervan is dat bijvoorbeeld de CO₂ emissie van een volledig elektrisch vaartuig nul is, terwijl de CO₂ emissies van fossiele brandstoffen relatief hoog is. De CO₂ emissies van de fossiele brandstoffen zijn gebaseerd op het brandstofverbruik per veerverbinding, deze zijn bepaald in hoofdstuk 2.

Om de schadelijke emissies (NO_x en fijnstof (PM)) van de verschillende verschoningsopties in kaart te brengen is gebruik gemaakt van emissiefactoren, zie onderstaande tabel. Deze factoren zijn gebaseerd op gemiddelde emissies die bij een bepaald motor- brandstoftype horen. De emissiefactoren zijn vervolgens gekoppeld aan het brandstofverbruik van de verschoningsopties om de totale massa aan emissies uit te rekenen.

Tabel 29: Emissiefactoren

Brandstof-/motortype	NO _x	PM
	g/kWh	g/kWh
Diesel CCRI	9.4	0.3
Diesel CCRII	6	0.2
GTL CCRII	5.45	0.15
Schone dieselmotor (retrofit)	2 - 4	0.01
Aardgas	1 - 5	0.01

Conventionele aandrijving

Voor de conventionele aandrijving wordt uitgegaan van 2 subvarianten: installatie van een nabehandelingssysteem of installatie van een schonere dieselmotor. Bij de subvariant 'installatie nabehandelingssysteem' is uitgegaan van de installatie van twee nabehandelingssystemen, te weten een SCR deNO_x katalysator en een gesloten roetfilter.

Effect op energieverbruik

Uit analyse van de nabehandelingssystemen komt naar voren dat het energieverbruik van een schone dieselmotor gelijk is aan het huidige dieselgebruik. Het verbruik per veer is samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 30. Vergelijking brandstofverbruik voor een conventionele aandrijflijn¹

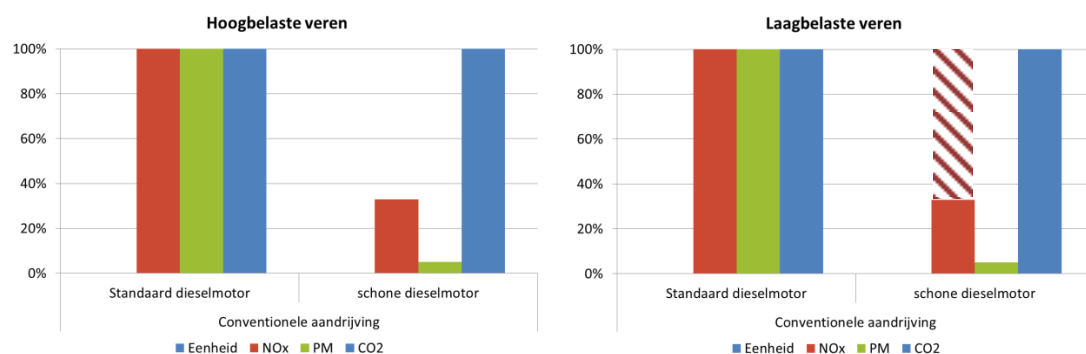
Veerdienst	Conventioneel	
	Dieselvebruik	Elektriciteitsverbruik
	L	kWh
Oostveer	410	0
Buiksloterwegveer	516	0
IJpleinveer	403	0
NDSM-veer	981	0
Houthavenveer	830	0
NZK-Pont	493	0

¹ NDSM – Houthaven – Distelweg is niet apart berekend. De uitkomsten zullen vergelijkbaar zijn met die van IJpleinveer en Buiksloterwegveer

Effect op emissies

Het installeren van een schone dieselmotor leidt tot een substantiële reductie van de emissies. De NO_x emissies nemen (ten opzichte van een standaard dieselmotor) met 60% af, de emissies van fijnstof (PM) met 95%. Dit effect geldt voor de hoog belaste veerdiensten.

Het effect is onzeker voor de laag belaste veren. Door de lage motorbelasting zal de NO_x katalysator niet optimaal werken, waardoor het onzeker wordt welk effect op NO_x gehaald zal worden. Ook de roetfilter zal door de suboptimale verbranding slechter functioneren en meer onderhoud vergen.



Serie hybride met accu

Bij deze configuratie wordt de motorconfiguratie van het schip gewijzigd, waarbij een elektromotor wordt geïnstalleerd die wordt ondersteund door een diesel generator set. De aandrijflijn configuratie staat weergegeven in onderstaande tabel. De stroomvoorziening wordt uitgevoerd via een of enkele diesel generator sets aan boord van het schip. In dit geval is gekozen voor twee generator sets met een motorvermogen van elk 120 kW. Dit is gelijk aan ca 50% van de normale motorgrootte. Er is gekozen voor een dimensionering en regeling van de generator sets waarbij afhankelijk van de veerverbinding één of twee generator sets continue draaien. Dit past goed bij de gebruikskarakteristiek en leidt tot een goede belasting van de motor (ca 60% tot 98% van het motorvermogen).

Tabel 31: Aandrijflijnspecificaties serie hybride

Vermogen elektromotor	2 keer 120 kW
Aantal schroeven	2
Accutype	Lithium accu
Range totale accucapaciteit	120

Effect op energieverbruik

In de onderstaande tabel zijn een aantal gegevens berekend voor de verschillende veerverbindingen. Hieruit blijkt dat het brandstofverbruik voor de hybride en conventionele aandrijflijn vergelijkbaar is. In de tabel is te zien, dat het verbruik afhankelijk van de veerverbinding iets hoger of lager uitkomt dan de conventionele diesel. Met name bij de veerverbindingen die een laag gemiddeld vermogen hebben, is een verbetering mogelijk door de toepassing van een hybride aandrijflijn. Een laag gemiddeld vermogen zorgt namelijk voor een ongunstig motorrendement wat een hoog specifiek brandstofverbruik als gevolg heeft. Bijvoorbeeld de Velsen NZK-veer geeft een verbruikswinst aan. Dit komt echter niet alleen door het lage gemiddelde vermogen maar ook door het relatief grote aandeel van het hulpvermogen. De hulpmotoren hebben doorgaans een lager motorrendement dan de hoofdmotoren. Bij de hybride variant zorgt de generator voor het hulpvermogen waardoor het hulpvermogen efficiënter opgewekt wordt. De NDSM- en houthavenveer komen juist ongunstig uit omdat de motoren al hoog belast worden, het motorrendement is dan hoog. Doordat het vermogen in een hybride aandrijving omgezet moet worden in elektrische energie komt de hybride variant niet gunstig uit voor de NDSM- en Houthavenveer.

Tabel 32: Vergelijking brandstofverbruik voor een serie-hybride aandrijflijn configuratie (met accu's)²⁵¹

Veerdienst	Conventioneel		Serie Hybride	
	Diesel-verbruik	Elektriciteit-verbruik	Diesel-verbruik	Elektriciteit-verbruik
	L	kWh	L	kWh
Oostveer	410	0	411	0
Buiksloterwegveer	516	0	513	0
IJpleinveer	403	0	398	0
NDSM-veer	981	0	1.048	0
Houthavenveer	830	0	885	0
NZK-Pont	493	0	454	0

¹ NDSM – Houthaven – Distelweg is niet apart berekend. De uitkomsten zullen vergelijkbaar zijn met die van IJpleinveer en Buiksloterwegveer

Voor de serie-hybride aandrijflijn is het energieverbruik ook in kaart gebracht voor drie subvarianten:

- schone dieselmotor: even als bij de conventionele motor is er geen extra effect van het gebruik van een schone dieselmotor op het energieverbruik.
- schonere dieselbrandstof (GTL): in deze variant wordt alleen een andere brandstof toegepast. Het energieverbruik blijft gelijk met de reguliere serie hybride variant.
- gasmotor (CNG): in deze variant wordt de dieselmotor alleen vervangen door een aardgasmotor. Gezien het relatief kleine vermogen van de motor (tweemaal 110 kW), is een lean-burn gasmotor met vonkontsteking het meest logisch. Het rendement van een kleine gasmotor is doorgaans wat lager dan van een dieselmotor, waardoor het energieverbruik iets hoger uitvalt

Effect op emissies

In onderstaande figuur staan de resultaten van de variant op emissies. De resultaten van de serie hybride variant verschillen per type veerdienst.

Voor de twee hoog belaste veren leidt gebruik van een serie hybride systeem tot een verhoging van het brandstofgebruik (7% hoger), en hiermee tot minder gunstige uitkomsten dan bij een conventioneel systeem. Ook gebruik van de schone dieselvariant pakt ongeveer 7% minder gunstig uit.

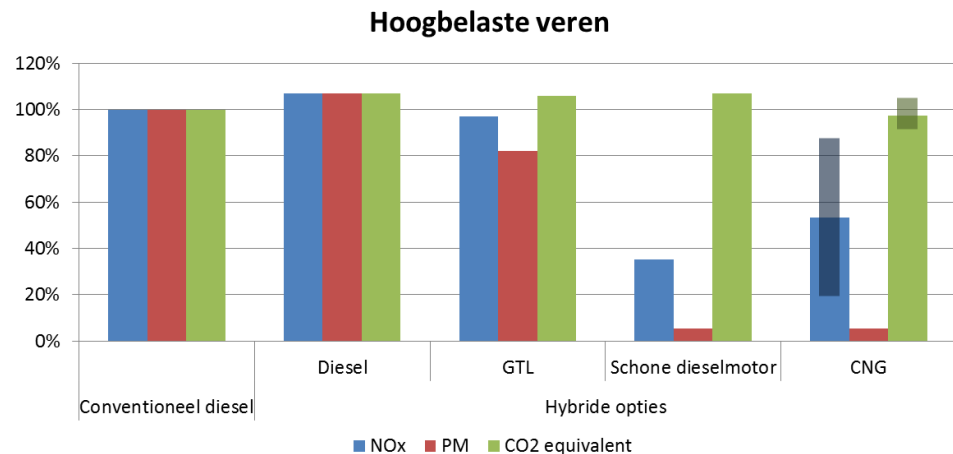
Bij laag belaste verbindingen blijft het brandstofverbruik gelijk. Bij een standaarddiesel betekent dit dat de emissies gelijk blijven. Bij het toepassen van een schone dieselmotor, dat wil zeggen een dieselmotor met SCR en roetfilter, gaan de NOx en fijnstof emissies fors omlaag. Doordat de dieselgenerator goed belast wordt, werken de systemen erg effectief in de praktijk. De bandbreedte voor NOx is in deze variant hierdoor niet van toepassing.

Door in plaats van diesel, GTL te gebruiken als brandstof gaan de NOx en fijnstof emissie voor beide typen omlaag. Ook de CO₂ uitstoot daalt marginaal.

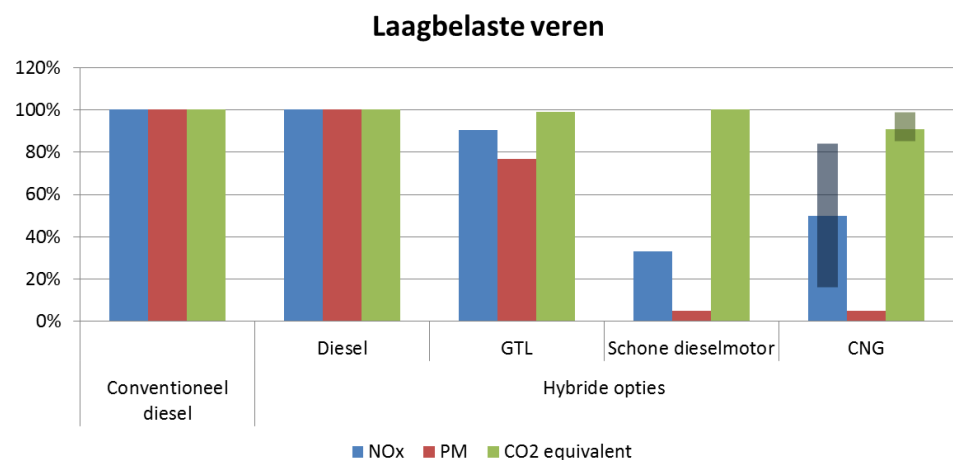
Bij CNG gaan de NOx en fijnstof emissies omlaag. De NOx emissies kunnen nog wel erg verschillen per motor. Daarom staat in het figuur een bandbreedte

²⁵ De veren zijn voorzien van twee diesel generator sets met een max vermogen van 120 kW: brandstofverbruik gemiddeld 210 g/kWh.

weergegeven. Ook de CO₂ emissies kunnen verlaagd worden, mits de methaan emissies niet te hoog worden. Methaan emissies komen bij gasmotoren regelmatig voor. De methaan emissies kunnen nog erg variëren tussen verschillende gasmotoren. De bandbreedte geeft de spreiding tussen een 'goede' en een 'minder goede' lean-burn gasmotor aan.



Figuur 7: Emissies per serie-hybride aandrijflijnoptie voor de hoog belaste veren²⁶



Figuur 8: Emissies per serie-hybride aandrijflijnoptie voor de laag belaste veren

²⁶ In de figuren zijn de CO₂-emissies uitgedrukt in CO₂-equivalenten om rekening te houden met de impact van methaan emissies

Diesel hybride elektrische aandrijving met accu's en plug-in

Voor het plug-in concept zijn de volgende doelstellingen geformuleerd:

- a) zoveel mogelijk energievoorziening vanaf de wal, volledig elektrisch waar mogelijk;
- b) dieselmotor als back-up voor garantie beschikbaarheid veren en soepele transitie naar volledig elektrische aandrijving in de verdere toekomst.

Het meest kritische aspect van de volledig elektrische aandrijflijn (zonder dieselmotoren), is het zeer hoge benodigde laadvermogen voor tussendoor bijladen voor de veerverbindingen NDSM veer en de Houthavenveer. Voorgesteld wordt de diesel generator set(s) zodanig te dimensioneren dat voor deze verbindingen het laadvermogen beperkt kan blijven tot maximaal 300 kWh bij het huidige schip en maximaal 200 kWh bij een nieuw schip. Op deze manier kunnen de meeste veerverbindingen volledig elektrisch ingezet worden.

In de volgende tabel staan de specificaties van de plug-in hybride aandrijflijn weergegeven voor bestaand schip. De accu capaciteit houdt rekening met de maximale laadsnelheid van 2C, maar kan wel kleiner zijn dan bij volledig elektrisch omdat er geen rekening gehouden hoeft te worden met een eventuele stroomuitval door de aanwezige dieselgeneratoren. Er kan indien nodig volledig op de dieselmotor gevaren worden. Voor het elektrisch laden van vaartuigen zijn er diverse mogelijkheden met stekkers of met automatische laadverbindingen zoals een pantograaf. Een overzicht is gegeven in Bijlage G.

Tabel 33: Specificaties plug-in hybride aandrijflijn

Vermogen elektromotor	2 keer 200 kWh (tijdelijk overbelastbaar)
Aantal schroeven	2
Generator bestaand schip	1 keer 180 kW
Accucapaciteit bestaand schip	150 kWh
Accutype	Lithium accu

Effect op energieverbruik

In de volgende tabel is de energieverdeling aangegeven voor de verschillende veerdiensten. Hieruit komt naar voren dat bij veerdiensten de schepen 100% van hun tijd elektrisch zullen varen. Voor deze schepen wordt de dieselmotor alleen maar als back-up optie gebruikt. Bij de NDSM-veer en de Houthavenveer wordt standaard wel een combinatie van diesel en elektriciteit gebruikt. Bij de NDSM-veer neemt het dieselgebruik met 25% af, bij de Houthavenveer met 50%.

Tabel 34: Vergelijking energieverbruik van een conventionele aandrijflijn met een plug-in hybride¹

Veerdienst	Conventioneel		Plug-in hybride	
	Diesel-verbruik	Elektriciteit-verbruik	Diesel-verbruik	Elektriciteit-verbruik
	L	kWh	L	kWh
Oostveer	410	0	0	1.603
Buiksloterwegveer	516	0	0	2.000
IJpleinveer	403	0	0	1.555
NDSM-veer	981	0	786	1.022
Houthavenveer	830	0	442	1.726
NZK-Pont	493	0	0	1.772

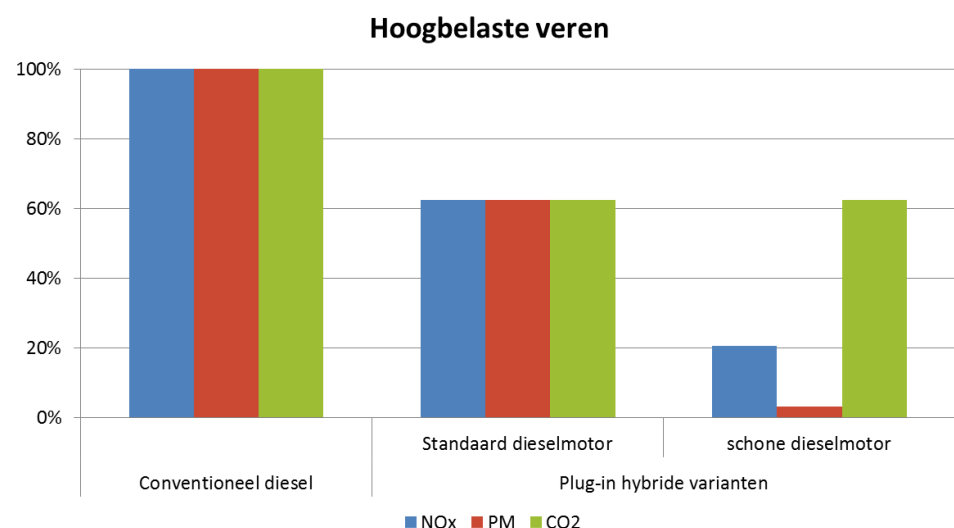
¹ NDSM – Houthaven – Distelweg is niet apart berekend. De uitkomsten zullen vergelijkbaar zijn met die van IJpleinveer en Buiksloterwegveer

Evenals bij de eerder besproken varianten leidt gebruik van een schone dieselmotor niet tot een extra effect in het brandstofgebruik.

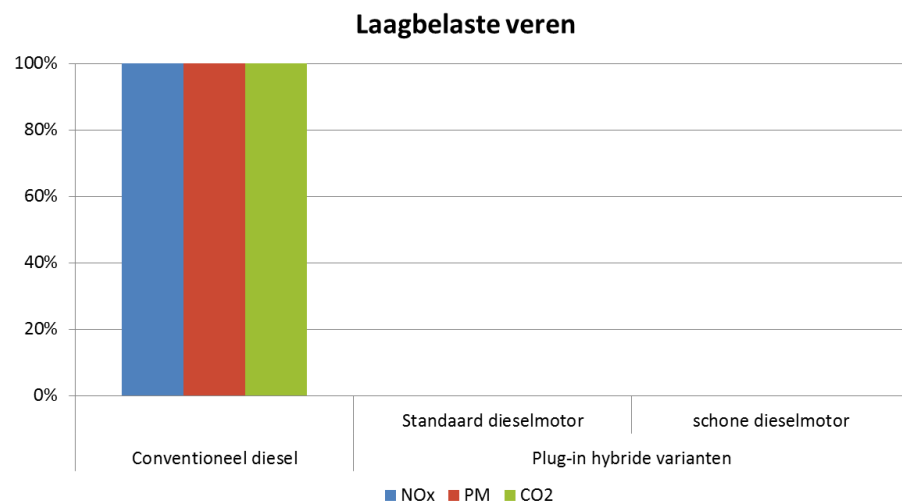
Effect op emissies

Onderstaande figuren geven de emissieprestaties van de plug-in hybride configuraties weer voor de hoog- en laag belaste verbindingen.

Voor de hoog belaste veerdiensten geldt dat het energieverbruik met gemiddeld 37,5% afneemt. Bij gebruik van een schone dieselmotor nemen de emissies verder af, waardoor NOx en fijnstof emissies nog veel verder omlaag gaan. Bij de vier laag belaste veren wordt de dieselmotor onder normale omstandigheden helemaal niet gebruikt, waardoor emissies in beide varianten nihil zijn.



Figuur 9: Emissies per plug-in hybride aandrijflijnoptie voor de hoog belaste veren



Figuur 10: Emissies per plug-in hybride aandrijflijnoptie voor de laag belaste veren

Volledig elektrische aandrijving

De volledig elektrische aandrijflijn is lokaal uitstootvrij en is daarmee de schoonste optie. In onderstaande tabel worden de gekozen aandrijflijnspecificaties weergegeven. De twee elektromotoren hebben beide een vermogen van ca. 200 kW. Dit is 10% minder dan de huidige motoren. Elektromotoren kunnen echter kortstondig overbelast worden, waardoor hetzelfde vermogen alsnog behaald kan worden. In overleg met de motorleverancier kan gekozen worden voor een geschikt model.

Het accutype dient een lithium-ion variant te zijn, of een ander type met gelijkwaardige eigenschappen. Het is belangrijk dat het accutype met hoge laadvermogens kan omgaan en een relatief lange levensduur heeft. De accucapaciteit bepaalt voor een groot deel de prijs van de elektrische aandrijflijn door de hoge prijs van accu's. De accucapaciteit varieert tussen de 120 en 600 kWh wat afhankelijk is van het energiegebruik per dag en het toegepaste laadvermogen, dit wordt hierna verder toegelicht.

Tabel 35: Aandrijflijnspecificaties

Vermogen elektromotor	2 keer 200 kW
Aantal schroeven	2
Accutype	Lithium accu
Range totale accucapaciteit	120 tot 600

Essentiële parameters in een elektrische aandrijving zijn de benodigde accucapaciteit en het benodigde laadvermogen. Deze twee parameters zijn ook direct aan elkaar gekoppeld. Hoe hoger het laadvermogen, hoe kleiner het accupakket kan, en vice versa.

Voor de inzet van de Amsterdamse veren is door TNO de keuze gemaakt om alleen overdag bij te laden, met een enkele uitzondering. Het accupakket kan dan relatief klein blijven en het voorkomt dat er ook in de thuishaven geïnvesteerd moet worden in een uitgebreide laadinfrastructuur. Dit betekent echter wel dat de laadvermogens vrij fors worden. Het is belangrijk dat het maximale of het aanbevolen laadvermogen niet overschreden wordt. De maximum laadsnelheid wordt uitgedrukt

in 'C' en is gedefinieerd als het laadvermogen in kWh gedeeld door de accucapaciteit in kWh. De eenheid is dus 1/h (of uur^{-1}). De gekozen maximum laadsnelheid voor de veren is 2C. Dit is de aanbevolen laadsnelheid voor verschillende li-ion accu's (voor meer achtergrond over accu's zie Bijlage C) is 2 C. Er zijn ook accu's die veel hogere laadsnelheden aankunnen, deze zijn echter ook vele malen duurder. Om de levensduur van een accupakket te verlengen mogen de accu's niet compleet ontladen worden. Meestal wordt er ontlading van maximaal 80% gehandhaafd, ook wel 80% DoD (Depth of Discharge) genoemd. De maximale ontlading van een accupakket heeft sterke invloed op de levensduur van een accu. Het kan daarom mogelijk economisch interessant zijn om een groter accupakket aan te schaffen en deze minder ver te ontladen zodat de levensduur verlengd wordt. Voor de veren is nu uitgegaan van de 'reguliere' 80%.

In onderstaande tabel staan de benodigde accu capaciteit en de maximale laadvermogens weergegeven voor huidige situatie, een verbeterde inzet en een verbeterd schip.

Om de kosten en complexiteit voor de infrastructuur te beperken is ervoor gekozen om slechts aan één kant van de verbinding een laadverbinding te plaatsen, behalve bij de NDSM en Houthavenveer. Deze veerverbindingen hebben een hoog energiegebruik per overtocht en maar kort de tijd om te laden, hierdoor is laden aan beide kanten noodzakelijk.

Alle accupakketten zijn groot genoeg om een stroomstoring van twee uur op te vangen wat belangrijk is omdat er geen dieselgenerator aan boord is.

Voor het bestaande schip is de benodigde accu capaciteit 250 kWh en het laadvermogen maximaal 300 kW. De accu's kunnen technisch wel een hoger laadvermogen aan, de 300 kWh is echter in de meeste gevallen voldoende om het schip van voldoende energie te voorzien. Het laden met 300 kWh is mogelijk maar is hoger dan momenteel toegepast bij bijvoorbeeld elektrische auto's, waar snelladen met maximaal ca. 120 kWh gebeurt. In Bijlage G wordt meer toegelicht over de mogelijkheden voor een elektrische infrastructuur.

Ondanks het laden aan beide kanten zijn voor de NDSM-veer en Houthavenveer het laadvermogen en de accucapaciteit alsnog groter dan bij de andere veren. De accucapaciteit is groter dan bij de andere veren omdat anders de maximale laadsnelheid overschreden wordt. De laadvermogens zijn erg hoog en er zal maatwerk nodig zijn om volledig elektrisch varen voor deze schepen mogelijk te maken.

Tabel 36: Accucapaciteit en laadvermogens¹

Lijn	Bestaand schip, huidige inzet		Nieuw schip (lichter), bestaande inzet	
	Accu-capaciteit	Max. Laadvermogen*	Accu-capaciteit	Max. Laadvermogen*
	[kWh]	[kW]	[kWh]	[kW]
Oostveer	250	300	125	150
Buiksloterwegveer	250	300	125	150
IJpleinveer	250**	300	150	300
NDSM-veer	600	1200	300	600
Houthavenveer	300	600	150	300
NZK-Pont	250	300	150	300

* Laadvermogen kan in sommige gevallen lager zijn

** Moet 's-nachts bijgeladen worden

¹ NDSM – Houthaven – Distelweg is niet apart berekend. De uitkomsten zullen vergelijkbaar zijn met die van IJpleinveer en Buiksloterwegveer

I Onderdelen TCO berekening

Investerings schip

In totaal wordt op 10 schepen van Type 30/50 en op 5 NZK veren de aandrijflijn vervangen. In deze TCO berekening is uitgegaan van de kosten voor een nieuwbouwschip. Er is uitgegaan van jaarlijkse kosten van 8% van de investeringsprijs van het schip (exclusief de kosten van de aandrijflijn). Deze 8% bestaat dan uit afschrijving, rente en onderhoudskosten (ca. 4% voor afschrijving en rente en ook ca. 4% voor onderhoud).

De bouwprijs voor de schepen bedraagt:

- Type 50: 3,3 miljoen → jaarlijkse kosten 8% = 264.000 EUR per schip
- Type NZK: 4,6 miljoen → jaarlijkse kosten 8% = 368.000 EUR per schip

Dit is exclusief de meerkosten voor de schone aandrijving (schoon-diesel, hybride of volledig elektrisch). Voor de totale vloot van 10 IJ-veren en 5 NZK-veren betekent dat in het totaal een post van EUR 4.480.000,-- per jaar.

Investeringskosten verschillende typen aandrijflijnen

De kosten voor de aandrijflijn bestaat uit de volgende onderdelen (afhankelijk van het type).

- dieselmotor met nabehandeling;
- elektrische aandrijving met toebehoren;
- accu's; en
- inbouwkosten.

De berekende investeringskosten zijn samengevat in onderstaande tabel. Voor volledig elektrische schepen wordt uitgegaan van een kleiner accupakket voor de laag belaste schepen dan voor de hoog belaste schepen.

Tabel 37: Investeringskosten schone aandrijflijn

Conventioneel met schone dieselmotor	€ 241.120
Serie hybride met schone dieselmotor	€ 449.500
Plug-in hybride met schone dieselmotor	€ 611.500
Volledig elektrisch laag belast (accu 250 kWh)	€ 479.500
Volledig elektrisch hoog belast (accu 600 kWh)	€ 742.000

De volgende tabellen geven inzicht in de achterliggende uitgangspunten van de berekening. Hierbij worden de verschillende componenten benoemd en de bijbehorende technische specificaties aangeduid. Er bestaat een mate van onzekerheid voor de prijzen van de generatorsets en de inbouwkosten.

Tabel 38: Prijs per kilowattuur van aandrijflijncomponenten

Specificatie	prijs/ kW(h)	min	max	Bronnen
Optie	€/kW(h)	€/kW(h)	€/kW(h)	
Dieselmotor CCRII incl. inbouw	220	170	250	Leveranciers binnenvaart en Waterbus rapport
Generatorset	350	300	400	Leveranciers, rondvaart
Dieselmotor schoon (SCR + DPF retrofit) incl. inbouw	440	380	480	Leveranciers, Waterbus
Generatorset schoon (SCR + DPF retrofit) incl. inbouw	550	500	600	Leveranciers, rondvaart
Elektromotor + toebehoren + regeling	500	450	650	Rondvaart, leveranciers (lagere vermogens)
Accu	750	700	850	Leveranciers, rondvaart, trucks

Tabel 39: Benodigd vermogen per verschooningsoptie

Specificatie	prijs/ kW(h)	conven- tioneel	conv. schoon	Serie- hybride	Plug-in hybride	elektrisch 250 kWh	elektrisch 600 kWh
Optie	€/kW(h)	kW	kW	kW/kWh	kW/kWh	kW/kWh	kW/kWh
Dieselmotor CCRII incl. inbouw	220	500					
Gen.set.	350	48					
Dieselmotor schoon (SCR + DPF retrofit) incl. inbouw	440		548				
Generatorset schoon (SCR + DPF retrofit) incl. inbouw	550			240	240		
Elektromotor + toebehoren + regeling	500			400	400	400	400
Accu	750			50	250	250	600

Tabel 40: Totale investeringskosten per aandrijfsoptie

Kosten	conven- tioneel	conv. schoon	Serie- hybride	Plug-in hybride	elektrisch 250 kWh	elektrisch 600 kWh
Optie	EUR	EUR	EUR		EUR	EUR
Dieselmotor CCRII	110 000					
Gen.set.	16 800					
Dieselmotor schoon (SCR + DPF retrofit)		241 120				
Generatorset schoon (SCR + DPF retrofit)			132 000	132 000		
Elektromotor + toebehoren			200 000	200 000	200 000	200 000
Accu			37 500	187 500	187 500	450 000
Ombouwkosten bestaande schepen	0	0	80 000	80 000	80 000	80 000
Laadverbinding - schip zijde				12 000	12 000	12 000
Totaal	126 800	241 120	449 500	611 500	479 500	742 000

De jaarlijkse afschrijving en onderhoudskosten zijn afhankelijk van de levensduur van de investeringscomponenten.

Er is uitgegaan van de volgende levensduur:

- dieselmotor of generatorset: 10 jaar;
- elektrische aandrijving: 20 jaar;
- accu systeem: 5 jaar;
- ombouwkosten: 20 jaar; en
- snellaadverbinding: 20 jaar

Op basis hiervan zijn de jaarlijkse kosten per aandrijflijn type berekend en weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 41: Jaarlijkse afschrijving + onderhoudskosten aandrijflijn per type.

Aandrijflijn type	Afschrijving + onderhoud aandrijflijn per schip per jaar
Conventioneel met schone dieselmotor	24.000
Serie hybride met schone dieselmotor	31.000
Plug-in hybride met schone dieselmotor	65.000
Volledig elektrisch laag belast	52.000
Volledig elektrisch hoog belast	105.000

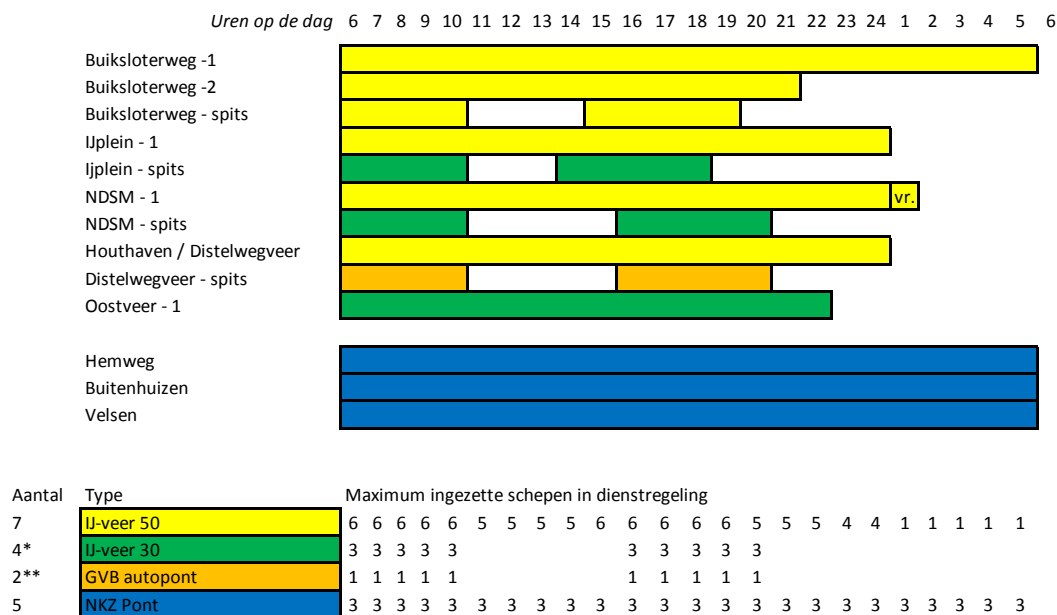
Operationele kosten: energiekosten

De totale energiekosten voor de verschillende varianten worden berekend op basis van het totaal aantal veren (10x IJ-veren en 5x NZK-veren). Hiervoor zijn drie variabelen nodig:

- energiegebruik per schip;
- aantal schepen die worden ingezet per verbinding;
- energieprij.

Het energieverbruik per schip voor de verschillende opties is gepresenteerd in Bijlage H.

De inzet van meerdere veren op dezelfde verbinding is verschillend, omdat een deel van de veren alleen voor de spits ingezet wordt. Op basis van onderstaande figuur (vaarschema) is het aantal nominale veren per verbinding berekend op basis van full-time.



* inclusief 1 gehuurd schip (zie paragraaf 2.2.2)

** waarvan een uit de vaart is genomen

Figuur 11: Huidige toedeling van veren op de verschillende veerverbindingen. Bron: Veren 2018 met een doorkijk naar 2025, Gemeente Amsterdam

Tot slot wordt voor de berekening uitgegaan van de volgende energieprijzen (volgens opgave van het GVB):

Tabel 42: Kosten voor brandstof en elektriciteit

Energiedrager	Eenheid	Prijs 2015	Toeslag
Diesel	€/l	0,43	0,02 ¹
Elektriciteit	€/kWh	0.046	0,0125

¹ toeslag voor gebruik ureum/AdBlue. Dit is reagent voor de SCR katalysator

² Milieubelasting

De drie componenten worden samengevat in de volgende tabel, die het energieverbruik per veerverbinding per dag weergeeft, bij gebruik van diesel of elektriciteit.

Tabel 43: Samenvatting energieverbruik per veerverbinding per dag en energiekosten per jaar op basis van het vaarschema.

Veerverbinding	Elektriciteit per veer	diesel brandstof per veer	Aantal veren, basis full time	Elektrische energiekosten per jaar	Diesel Brandstofkosten per jaar
	[kWh]	[L]		[€]	[€]
Oostveer	1.603	410	1	35.284	67.277
Buiskloterwegveer	2.000	516	2	99.053	190.756
IJpleinveer	1.555	403	1,5	47.052	90.904
NDSM-veer	4.088	981	1,5	132.600	237.346
Houthavenveer	3.452	830	1,5	111.990	201.020
Velsen (NZK veer)	1.772	493	3,5	136.506	283.582

Investeringskosten elektrische walinfrastructuur

De kosten voor de elektrische infrastructuur bestaan uit de volgende onderdelen:

- aansluitkosten voor aansluiting op het elektriciteitsnet. Inclusief aanleg kabel naar locatie (gemiddeld 150m) en bouwkundige voorziening. De aansluitkosten zijn afhankelijk van het vermogen;
- kosten voor een gelijkricht installatie ('lader'); en
- laadzuil/laadportaal/Laadinterface.

De zwaarte van elektrische aansluiting hangt af van het benodigde laadvermogen voor de verschillende veren. Er wordt wederom onderscheid tussen laag en hoog belaste veren. De NDSM en Houthavenveer (hoog belaste veren) hebben een aansluiting nodig van ca 1000 kWh (aan twee oevers). De overige laag belaste veren kunnen af met ca 300 kWh uit de voeten (aan één oever). De bijbehorende elektrische aansluitingen zijn:

- type AC5a: 350 kilovoltampère (kVA) voor laag belaste veren
- type AC5: 1060 kVA voor hoog belaste veren

Analyse van verschillende type aansluitingen toont dat andere opties een aanzienlijke impact hebben op de vaartijden en vaarschema. Het handhaven van het vaarschema is als uitgangspunt voor deze studie genomen. Een eventuele besparing op infra kosten zou bovendien leiden tot een extra investering in extra schepen, aanlegplaatsen en personeel.

De kosten voor deze aansluitingen zijn samengevat in onderstaande tabel. Er is uitgegaan van:

- een standaard kabellengte van 150 meter per aansluiting.
- gelijkricht installatie kosten op basis van informatie van leveranciers en het GVB.
- de kosten voor de aansluiting op het schip (waarschijnlijk pantograaf) zijn meegenomen in de kosten van het schip. Voor de infrastructuur zijn alleen de kosten voor de laadinterface aan de oever meegenomen.

Tabel 44: Kosten voor aanleg elektrische aansluitingen per aansluiting

Type	Ver- mogen	Project manage- ment	10 kV aan- sluiting	AC kabel	DC kabel, bestrati- ng - stelpost	Bouw- kundig	Trans- formato- r	rand- apparat- uur transf.	Gelijkri- cht installat- ie	rand- apparat- uur gelijkric- ht inst.	Laad- paal + laadreg- eling	Totaal
	kVA	EUR	EUR	EUR	EUR	EUR	EUR			EUR	EUR	EUR
AC5a	350	20.000	19.000	17.000	40.000	140.000	13.000	23.000	69.000	70.000	40.000	451.000
AC5	1060	20.000	37.000	17.000	75.000	140.000	43.000	23.000	230.000	70.000	60.000	715.000