



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

programma aanbesteding Innovaties in de Kustlijnzorg

kosteneffectiviteit van
duurzaamheidsmaatregelen en
monitoringsplan

presentatie van
onderzoeksgegevens - v01

21 december 2018



Inhoud van dit onderzoek

- Aanleiding
- Deel A: Kosteneffectiviteit van investeringsmaatregelen
 - Aanpak: maatregelen en beoordelingscriteria
 - Resultaten
 - Samenvatting en conclusies
- Deel B: Doelen op duurzaamheid
- Deel C: Monitoringsplan
 - Aanleiding
 - Brandstofverbruik monitoring
 - Monitoring luchtverontreinigende emissies
 - Conclusies
- Deel D: Bijlagen



Aanleiding

Beslisnota 'Duurzaamheid inkopen Kustlijnzorg' [RWS, 2015]:

- wens van directie Rijkswaterstaat om duurzaamheid in projecten en programma's expliciet te maken;
- centrale vraag om:
 - eind 2015 een EMVI-criterium op basis van brandstofverbruik in de aanbesteding te introduceren;
 - eind 2016, in de voorbereiding naar de aanbesteding, te besluiten op welke wijze duurzaamheid via het reguliere inkooptraject van het programma Kustlijnzorg bevorderd kan worden.
- geadviseerd om eerstgenoemde nog niet te doen, o.a.:
 - “..de markt is verdeeld over de te behalen brandstofreductie”;
 - “..er mist nog een langjarig perspectief richting de markt op doelstelling voor duurzaamheid”;
 - “..nog onvoldoende inzicht in het effect op de kosten van de instrumenten om duurzaamheid te stimuleren”.



Doel

Meerjarig perspectief voor duurzaamheid voor het programma Kustlijnzorg:

- Binnen de bestaande inkooppraktijk wordt nu gewerkt aan een vorm van implementatie van duurzaamheid.
- Naar aanleiding van een marktidee van een “zandwin(d)molen” is het meer algemene programma *Innovaties in de Kustlijnzorg* bedacht. Een aanpak voor de middellange termijn waarin vooral ook andere aanbieders dan de bestaande baggeraars alternatieven kunnen aanbieden, of de wijze van uitvoeren van de suppletiebehoefte voor Rijkswaterstaat. Daarin zijn alternatieve oplossingen, duurzaamheid (klimaat èn natuur) en het verbreden van de concurrentie uit het oogpunt van kostenbesparing belangrijke drijfveren.
- Een perspectief dat voor de sector en door de sector is gedragen.



Wat is daarvoor nodig?

(1) Inzicht in kosteneffectiviteit

Inzichtelijk maken van kosteneffectiviteit van verschillende bestaande (innovatieve) duurzaamheidsmaatregelen om uiteindelijk een perspectief richting de markt te kunnen bieden.

(2) Aanpak voor monitoring brandstofgebruik

Betrouwbaar meten van brandstofgebruik voor het uitvoeren van een ketenanalyse op brandstofverbruik vormt daarbij een randvoorwaarde.



Brongegevens (1)

- resultaten uit studie milieuprofielen van scheepsbrandstoffen t.b.v. opname in de NMD [TNO, 2016];
- studie milieuprofielen is aangevuld voor kosten, voor de berekeningen is gebruik gemaakt van de SBK-bepalingsmethode versie 1.8, SimaPro 7.3 en Ecoinvent database 2.2;
- tussen 2016 en 2018 zijn verschillende relevante wijzigingen en verbeteringen in de milieudata en de SBK-bepalingsmethode doorgevoerd, die invloed op de resultaten voor MKI, CO₂, etc. van dit onderzoek hebben:
 - wijzigingen in de methode: wanneer voor dit onderzoek van Ecoinvent 3.3 i.p.v. Ecoinvent 2.2 (versie 2.2 is gebruikt voor dit onderzoek) gebruikt zou worden, Ecoinvent 2.2. is gebruikt voor [TNO, 2016], resulteert dat in een gemiddelde toename in de MKI van 5%;
 - voor sommige stoffen, zoals PAK en HF kan deze gemiddelde toename een toename voor de MKI tot gevolg hebben, deze stoffen zijn per brandstof verschillend, kunnen aanzienlijk lager of hoger uitvallen;
 - focus voor dit onderzoek op de luchtkwaliteit en broeikasgasemissies, stoffen als PAK en HF zijn niet relevant;



Brongegevens (2)

- geen update gedaan [TNO,2016] met de nieuwe Ecoinvent database, de gebruikte milieuprofielen voor dit onderzoek maken onderdeel uit van de huidige NMD (Nationale Milieudatabase), data in de deze database zijn 5 jaar geldig, een update van de milieuprofielen is voor dit onderzoek niet voorzien;
- nieuwe inzichten in verbrandingsemissies: de emissies tijdens de gebruiksfase uit studie TNO [2016] zijn vergeleken met laatste inzichten van experts TNO, dit resulteerde alleen voor LNG en bio-LNG in een sterk afwijkend emissieprofiel, voor dit onderzoek meegenomen door worst-case profiel voor zowel LNG als voor bio-LNG profiel toe te voegen;
- nieuwe inzichten in emissie tijdens LNG productie (artikelje gepubliceerd op internet, onder voorbehoud, wetenschappelijk niet onderbouwd): een nieuw verschenen, niet wetenschappelijk geverifieerd, onderzoek schat de methaan emissie tijdens productie van LNG op 1-9%, in scheepsbrandstoffen studie TNO [2016] is deze met 0,3% onderschat, deze nieuwe informatie is verwerkt in het duurzaamheidsprofiel LNG (worst-case) voor deze studie.



Deel A: Kosteneffectiviteit - aanpak



Opzet onderzoek

- Berekening van de kosteneffectiviteit van verschillende duurzaamheidsmaatregelen toepasbaar op baggerschepen:
 - de duurzaamheidsmaatregelen zijn gericht op:
 - nabehandelingstechnieken (nabehandeling van emissies);
 - duurzame brandstoffen.
 - de resultaten zijn vergeleken met de referentie MDO;
 - de resultaten zijn getoetst met de markt d.m.v. telefonische consult en een tweetal 'rekensessies';
- Extra: kwalitatieve verkenning naar "nieuwe duurzaamheidsmaatregelen":
 - hybride (diesel-elektrisch);
 - elektrificatie;
 - waterstof (duurzaam opgewekt).
- De opzet van een monitoringsplan in de ontwikkeling van een gedragen methode om duurzaamheid voor het reguliere kustonderhoud te monitoren.



Kosteneffectiviteit

Wat is kosteneffectiviteit?

- $[\Delta \text{MKI} / \Delta \text{€}]$ t.o.v. referentie MDO
- de beste ratio tussen reductie milieuimpact $[\Delta \text{MKI}]$ ("milieuwinst") en verandering van kosten voor een duurzaamheidsmaatregel $[\Delta \text{€}]$ gezien over een periode van 20 jaar t.o.v. referentie MDO;
- motivatie om te bezien over een periode van 20 jaar:
 - de maatregelen hebben betrekking op de levensduur van de motor(en) van een baggerschip;
 - als uitgangspunt genomen voor het berekenen van de terugverdientijd van een innovatievoorstel bij het programma aanbesteding *Innovaties in de Kustlijnzorg* (IKZ).



Uitgangspunten berekening kosteneffectiviteit (1)

De totale kosten zijn een som van A en B:

A. Investeringskosten

- de aanschaf kosten (initiële investeringen) van een nieuw schip;
Bijvoorbeeld: aanschaf van GTL tank kost € 3.000.000,- en heeft een levensduur van 20 jaar.
- inclusief de vervangingskosten, de extra investeringen van de nabehandeling;

B. Operationele kosten

- kosten van brandstofverbruik;
Bijvoorbeeld: GTL kost 615 €/ton en verbruik is gemiddeld 482 ton/jaar.
- extra variabele kosten van de duurzaamheidsmaatregel (hier: verbruik voor bijv. Adblue);
- kosten voor onderhoud;
Bijvoorbeeld: Elke 60.000 uur moet een roetfilter worden vervangen (kosten bedragen € 1.675.000,-).



Uitgangspunten berekening kosteneffectiviteit (2)

- periode van 20 jaar (=gemiddelde levensduur van een schip):
 - weergegeven in de eenheid kosten/jaar en kosten/MJ;
 - de kosten voor extra investeringen zijn afgeschreven over een periode van 20 jaar;
 - vervanging van de nabehandeling na 12 jaar (60.000 uur), na rato over de resterende 8 jaar;
 - de 20 jaar levensduur toepassen voor nieuw schip of voor aanpassingen aan schip dat dan nog 20 jaar mee gaat;
 - verdere uitgangspunten zijn bezetting van 5.000 uur/jaar;
 - verbruik van 994 kg diesel per uur;
 - verbruik gemiddeld vermogen 4.972 kW;
- uitgangspunten zijn gebaseerd op expert judgement van TNO;
- de brandstofprijzen zijn gebaseerd op brandstofvisie uit 2014 en afgestemd met de markt (afwijking van de door Rijkswaterstaat aangeleverde getallen);
- voor LNG is uitgegaan van een efficiëntieverlies van 3%.



Duurzaamheidsmaatregelen (1)

(1) Referentie MDO (Marine Diesel Oil), referentieniveau, zie bijlage.

(2) Duurzaamheidsmaatregelen

- Nabehandelingstechnieken voor reduceren van schadelijke luchtverontreinigingsemissies:
 - SCR (selective catalytic reduction, leidt tot reductie van NO_x-emissies)
 - SCR
 - SCR + DPF + EN590 ULSF: combinatie van SCR, roetfilter en gebruik van ultra-low-sulfur diesel (EN 590 ULSF)
- Duurzame brandstoffen:
 - HVO (hydrotated vegetable oil; grotendeels op basis van 2^{de} generatie feedstocks)
 - HVO 30 (80% 2^{de} gen.): as-is situatie (worst case): o.b.v. 80% 2^{de} generatie feedstocks en 30% bijgemengd bij MDO
 - HVO 50 (100% 2^{de} gen.): toekomst visie (best case): o.b.v. 100% 2^{de} generatie feedstocks en 50% bijgemengd bij MDO



Duurzaamheidsmaatregelen (2)

- Duurzame brandstoffen (vervolg):
 - GTL (gas-to-liquid; synthetische diesel o.b.v. aardgas)
 - GTL 100
 - GTL 100 (aangepast): gevoeligheidsanalyse op basis van recentere berekening GTL voor mobiele werktuigen
 - LNG (liquid natural gas; vloeibaar gekoeld (-160°C) aardgas)
 - LNG
 - LNG (worst case): gevoeligheidsanalyse op methaanemissie tijdens productie en extra emissies in de gebruiksfase
 - bio-LNG (LNG o.b.v. biomassa-stromen)
 - bio-LNG
 - bio-LNG (worst case): gevoeligheidsanalyse op extra emissies in gebruiksfase



Extra: kwalitatieve verkenning

(3) Duurzaamheidsmaatregelen die de brandstof (op middellange termijn) vervangen

Verschillende mogelijkheden voor elektrificatie verkend:

- kwalitatieve aanpak, indicatief inzicht in de potentiële milieuimpact (“milieuwinst”);
 - hybride (diesel-elektrisch) varen
 - volledig elektrisch met accu’s
 - elektrisch opgewekt uit waterstof (opslag in waterstof tanks)
 - elektrisch opgewekt middels duurzame energie opwekking op zee
- de kosten van de maatregelen voor deze kwalitatieve verkenning zijn niet bekend, verwacht dat deze worden vastgesteld met de aanbesteding programma *Innovaties in de Kustlijnzorg*.



Indicatoren voor kosteneffectiviteit (20 j.) (1)

Verandering kosten van duurzaamheidsmaatregel [$\Delta\text{€}$]

- Begrip Kosten: verwijs sheet 11, is som van (A) *initiële investeringskosten* + *vervangingskosten* + (B) *brandstofkosten* en *extra variabele kosten* + (C) *reguliere en extra onderhoudskosten*
- Ad A - Investeringskosten (aan schip)
 - **initiële investering** voor toepassen van maatregel t.o.v. referentie, zowel toepasbaar voor een nieuw als gebruikt schip, afschrijving 20 jaar;
 - **vervangingen van de nabehandeling**, na 12 jaar (60.000 uur).
- Ad B - Operationele kosten (per ton brandstof)
 - **brandstofkosten** (zonder accijns);
 - **extra variabele kosten** (bijv. gebruik van Adblue of vergelijkbaar product);
 - **extra onderhoudskosten** per kWh t.o.v. referentie MDO



Indicatoren voor kosteneffectiviteit (20 j.) (2)

Reductie milieuimpact (“milieuwinst”) [Δ MKI]:

- brandstofproductie, transport en verbranding;
- toerekening van gebruik van infrastructuur, schip, motoren en hardware benodigd voor maatregelen;
- is een gewogen som van schade aan verschillende milieu aspecten.

In resultaten wordt de MKI opgedeeld, gerelateerd aan:

- **klimaatverandering/broeikaseffect, uitgedrukt in CO₂- equivalenten**, dit is de embedded broeikasgasemissies over de gehele levenscyclus (niet alleen CO_{2eq} uit de schoorsteen, hier ook over de levenscyclus van de brandstof (winnen, raffinage, transport naar bunker-locatie, hele voortraject voor de schoorsteen, CO_{2eq} niet opgeslagen, te maken met de brandstof op een bepaalde plek te krijgen);
- **NO_x, SO_x en fijnstof (PM) emissies vrijkomend bij de verbranding**, deze emissies dragen bij aan op de navolgende bladzijde genoemde onderstreepte overige milieueffectcategorieën;



Indicatoren voor kosteneffectiviteit (20 j.) (3)

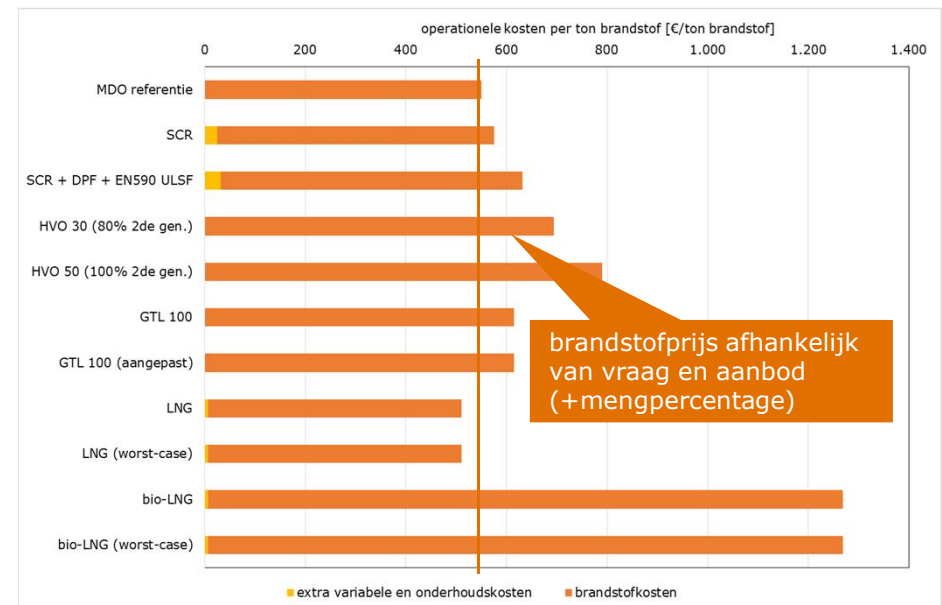
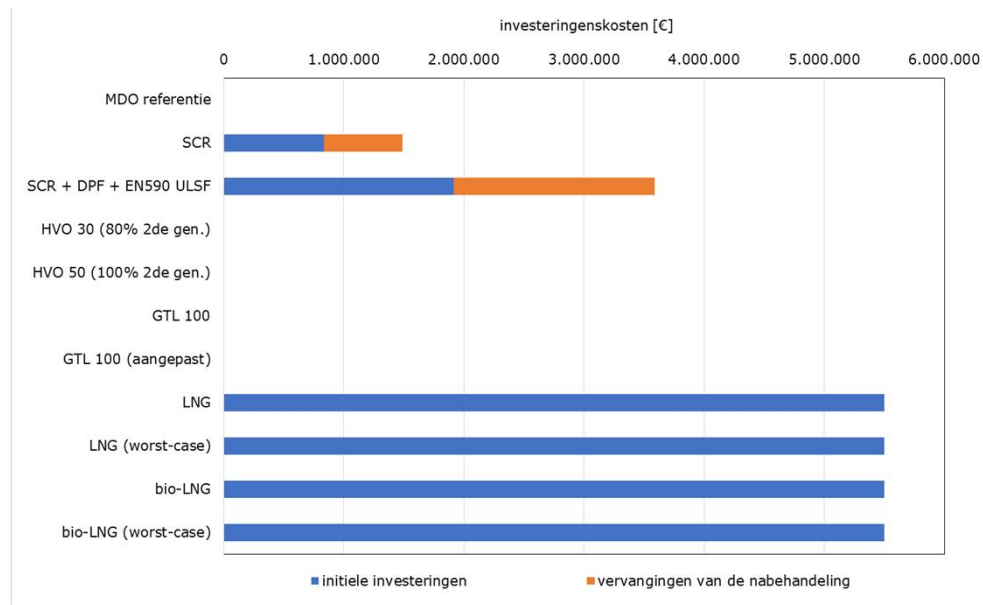
- In resultaten wordt de MKI opgedeeld, gerelateerd aan (vervolg):
 - overige milieueffecten
 - uitputting abiotische grondstoffen
 - uitputting fossiele energie dragers
 - aantasting ozonlaag
 - fotochemische oxidantvorming
 - verzuring
 - vermesting
 - humane toxiciteit
 - ecotoxiciteit (terrestrisch, zoet- en zoutwater aquatisch)



Deel A: Kosteneffectiviteit - resultaten

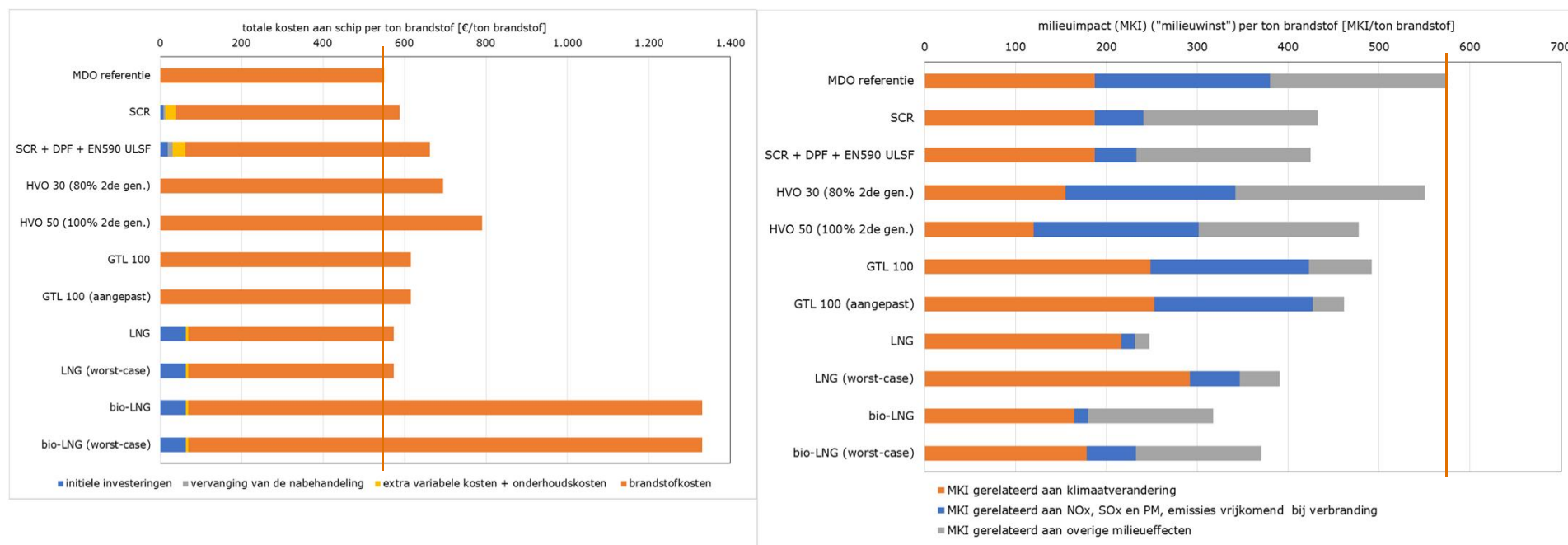


Totale kosten =
investeringskosten + operationele kosten





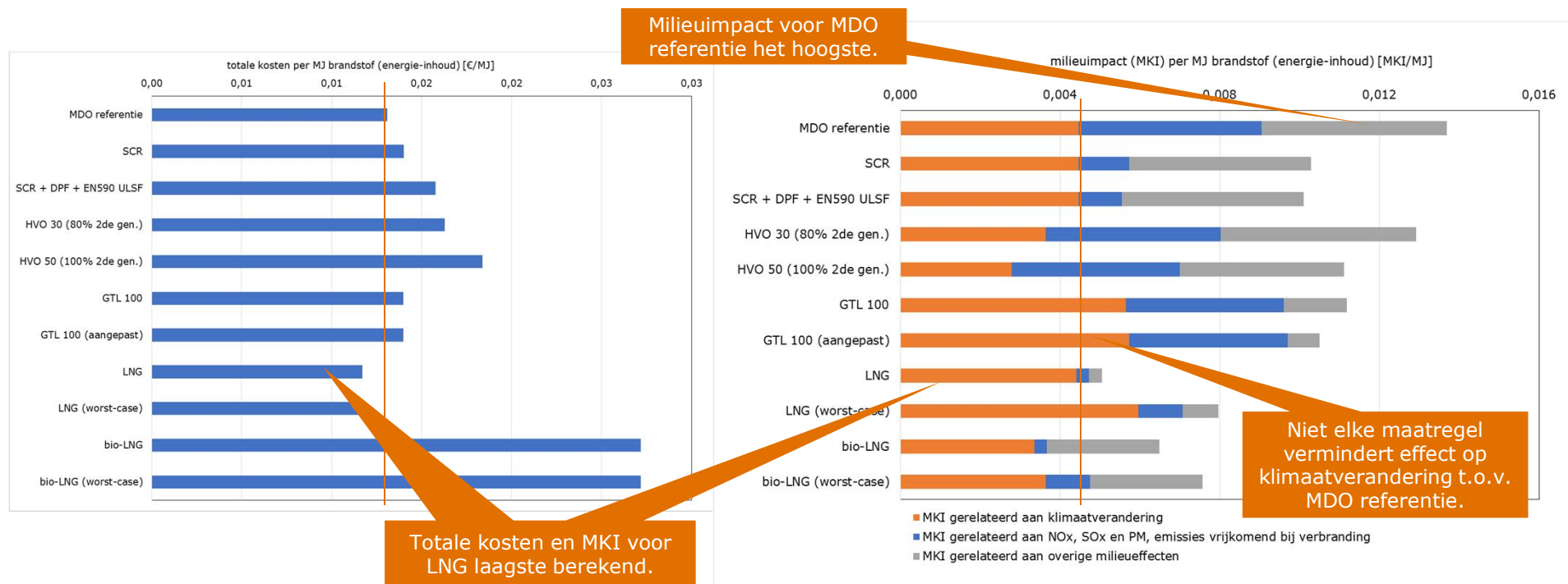
Totale kosten ton brandstof en milieuimpact ("milieuwinst") per ton brandstof



Voor een eerlijke onderlinge vergelijking moeten de totale kosten en de milieuimpact van de duurzaamheidsmaatregelen per ton brandstof naar per MJ brandstof (energie-inhoud) worden omgerekend. Zie volgende sheet en bijlage voor omrekenfactor per brandstof.

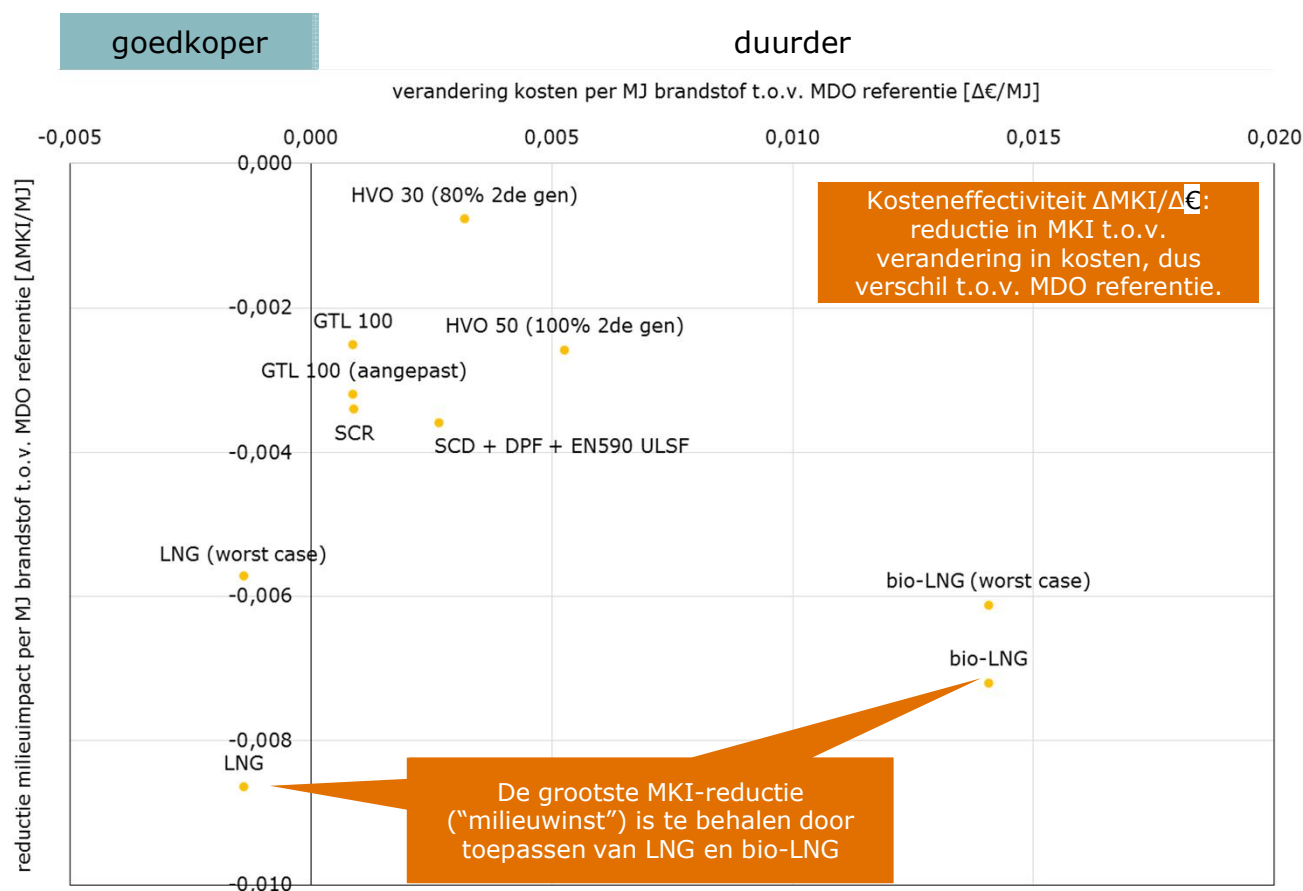


Totale kosten per MJ brandstof en milieuimpact ("milieuwinst") per MJ brandstof (energie-inhoud)



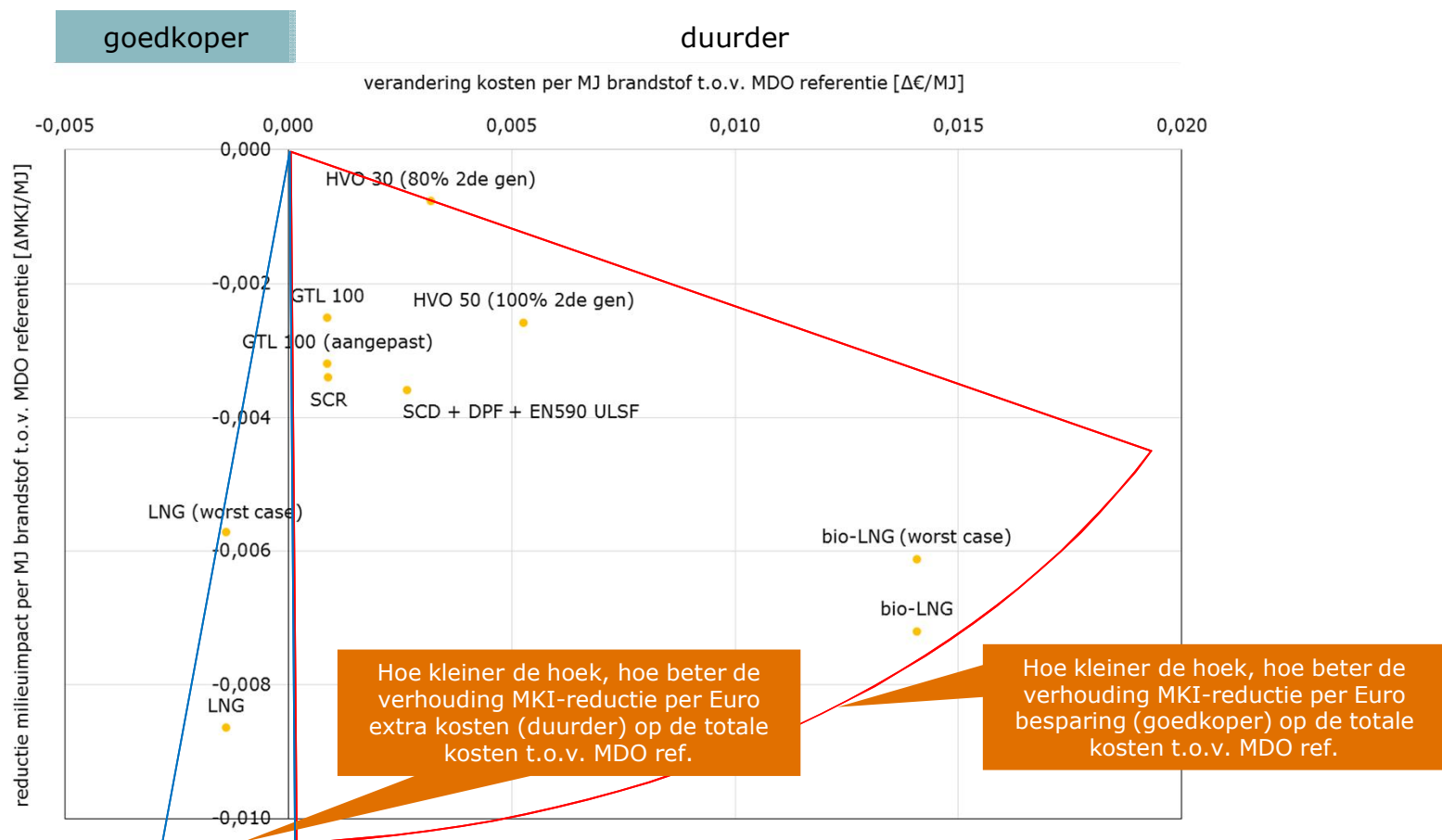


Reductie milieuimpact ("milieuwinst") uitgezet tegen verandering kosten per MJ brandstof t.o.v. MDO ref.



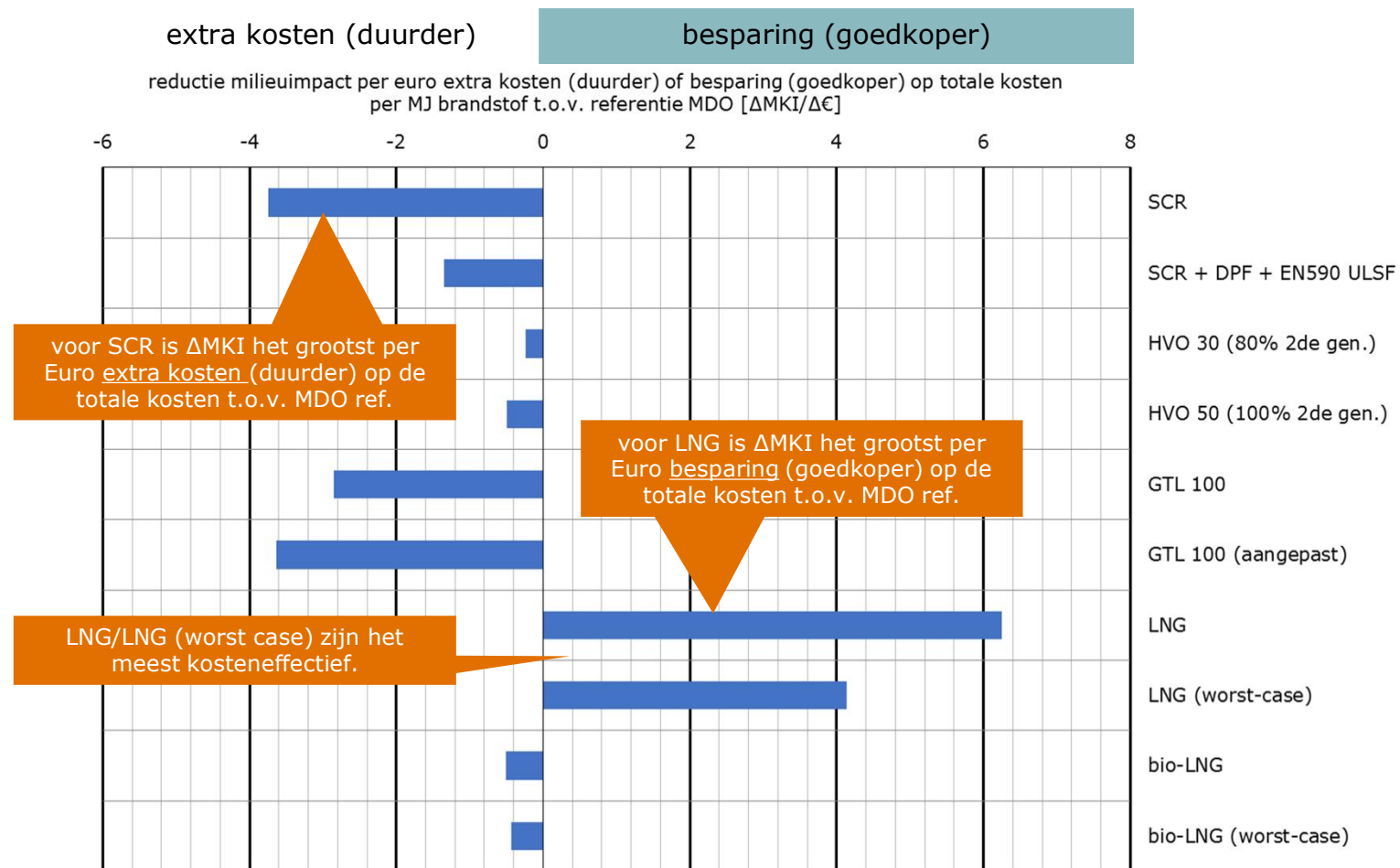


Reductie milieupact ("milieuwinst") uitgezet tegen verandering kosten per MJ brandstof t.o.v. MDO ref.



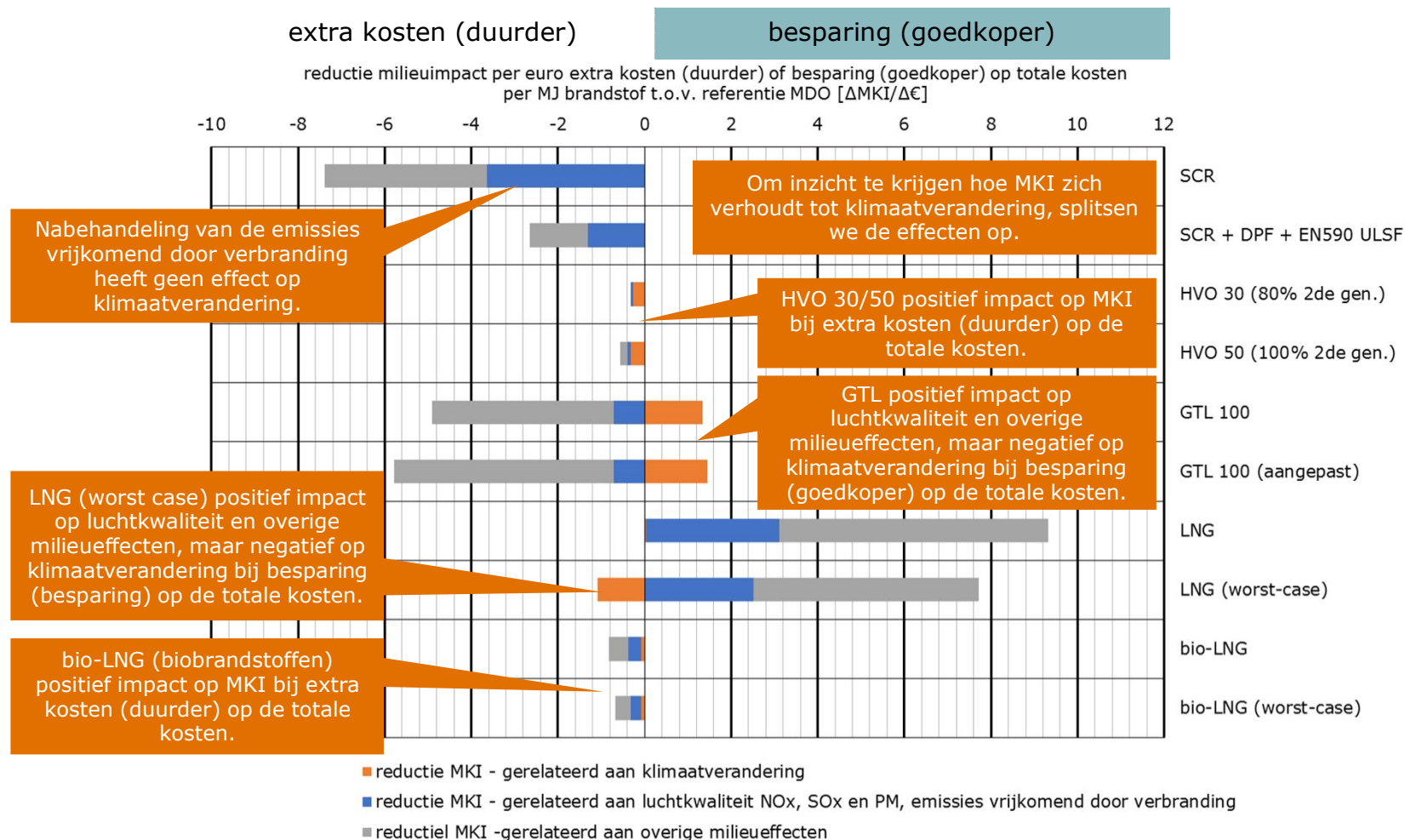


Kosteneffectiviteit t.o.v. MDO ref. [$\Delta\text{MKI}/\Delta\text{€}$]



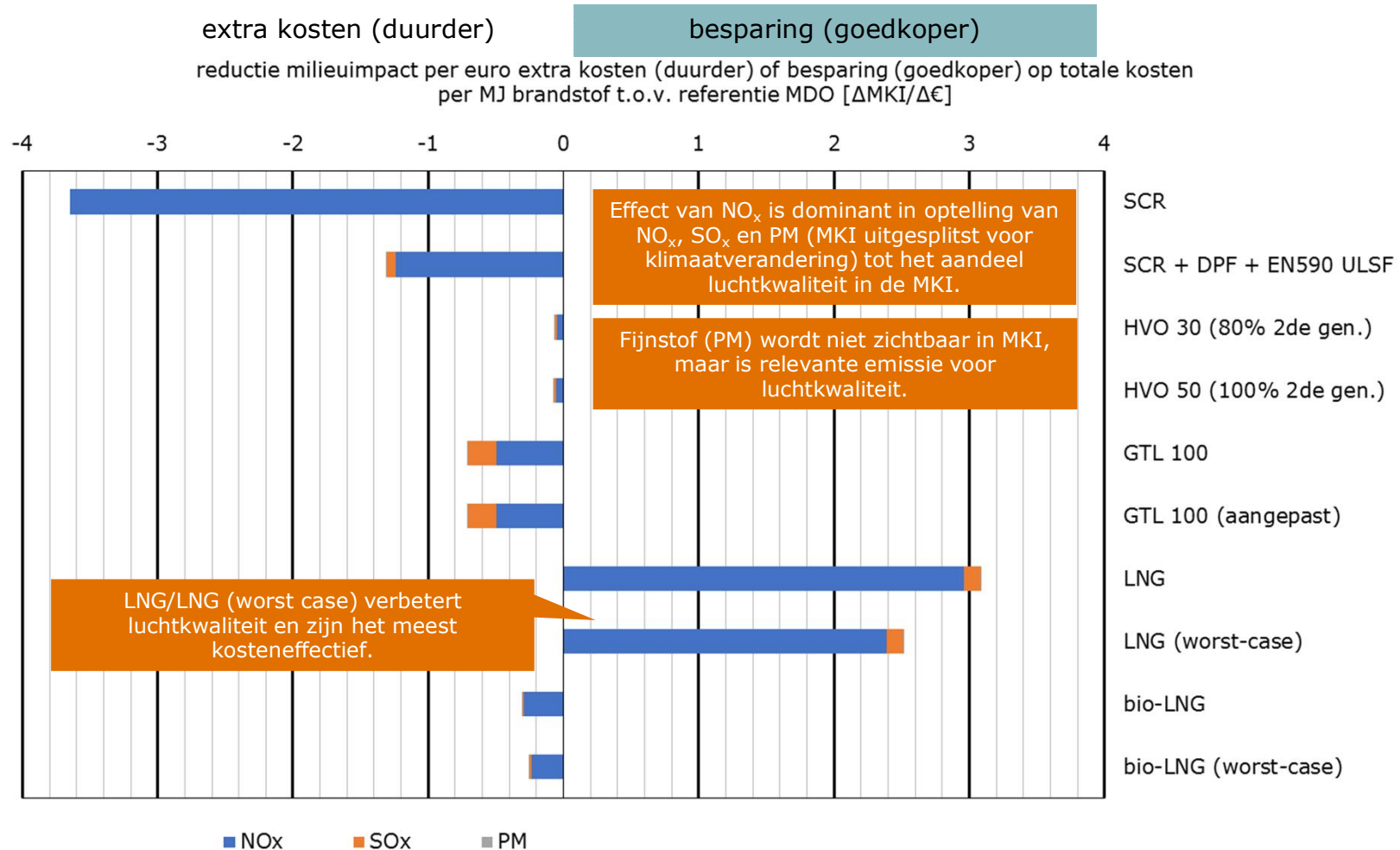


Kosteneffectiviteit t.o.v. MDO ref. [$\Delta\text{MKI}/\Delta\text{€}$]





Kosteneffectiviteit t.o.v. MDO ref. [$\Delta\text{MKI}/\Delta\text{€}$]





Conclusie: Kosteneffectiviteit - resultaten

- Verduurzaming (MKI-reductie, CO_{2eq}-reductie en luchtkwaliteit) van het reguliere kustonderhoud is te behalen middels:
 - transitie naar duurzame brandstoffen;
 - reductie brandstof.
- Potentiele milieuwinst ten opzichte van MDO referentie met:
 - reductie MKI
 - de grootste en meest kosteneffectieve reductie met LNG;
 - hoge investeringskosten, maar lagere kosten over periode van 20 jaar;
 - maximale potentiele MKI-reductie door inzet LNG i.c.m. 20% brandstof efficiency resulteert in een MKI-reductie van 71%;
 - CO_{2eq}-reductie/broeikasgas_reductie
 - de grootste en meest kosteneffectieve reductie met HVO 50 (o.b.v. 2de generatie feedstocks en met 50% bijmenging);
 - maximale potentiele emissie broeikasgassen reductie door inzet HVO 50 i.c.m. 20% brandstof efficiency resulteert in een MKI-reductie van 50%.



Deel A: Kosteneffectiviteit – extra: kwalitatieve verkenning



Elektrificatie

Aanvullend op de eerder genoemde duurzaamheidsmaatregelen, kwalitatieve aanpak voor aannemelijke (diesel-)elektrische oplossingen:

- indicatief inzicht in de potentiële milieu-impact;
- geen inzicht in kosten.

Verskillende mogelijkheden voor elektrificatie verkend, te weten:

- hybride (diesel-elektrisch) varen;
- volledig elektrisch met accu's;
- (elektrisch opgewekt uit) waterstof (opslag in waterstof tanks);
- elektrisch opgewekt middels duurzame energie opwekking op zee.



Elektrificatie: (diesel-)elektrisch

- (Diesel-)elektrisch houdt in dat er gebruik wordt gemaakt van elektrische motoren, waarbij diesel wordt gebruikt om elektriciteit op te wekken.
- Afhankelijk van de inzet van de motor kan er sprake zijn van brandstofvermindering, hoeveel dat is voor het reguliere kustonderhoud, is onbekend en zal uit het programma aanbesteding *Innovaties in de Kustlijnzorg* moeten blijken.
- Gezien het belastingsprofiel van (diesel-)elektrisch varen is er een 0 tot 10% brandstofvermindering mogelijk.



Elektrificatie: volledig elektrisch

- De binnenvaart experimenteert met full-electric schepen waarbij alle benodigde energie aan boord opgeslagen is in een accu.
- Accu-containers geven voor binnenvaart een vaartijd: 5-15h met 2 tot 3 20ft containers van 1.5 MWh. Vervolgens worden accu-containers gewisseld voor opgeladen exemplaren.
- Is een dergelijke accu oplossing ook haalbaar voor het reguliere kustonderhoud? Uitgaande van het soort schepen zoals nu ingezet:
 - 50-100 accu-containers per dag gewisseld;
 - beperkte mogelijk om accucapaciteit te verminderen:
 - ruimtegebrek, uitdagingen aan boord (variant: hulpschip);
 - laden via een kabel is op zee niet mogelijk
- Volledige elektrificatie lijkt geen realistisch scenario.
- In programma aanbesteding *Innovaties in de Kustlijnzorg* zoeken naar andere kleinschaligere (deel)oplossingen?



Elektrificatie: via waterstof en duurzame elektriciteit opgewekt op zee

- Waterstof (H_2) is een brandstof die schoon is in de verbranding (geen andere emissies).
- Is een gas dat onder druk (350 bar) in containers kan worden opgeslagen.
- Is waterstof haalbaar voor het reguliere kustonderhoud? Uitgaande van het soort schepen zoals nu ingezet:
 - dagelijks verbruik aan diesel: 24 ton, ofwel 28 m³ diesel per dag;
 - aan waterstof zou 8 ton per dag nodig zijn (hogere energie-inhoud per ton), onder druk (350 bar) opgeslagen is dat 700 m³ waterstof per dag (volume is gelijk aan = voetbalveld, 1 meter hoog).
- Om waterstof te produceren is elektriciteit nodig.
- Waterstof fungeert als een tijdelijke opslag voor energie (in plaats accu).
- Regulier kustonderhoud volledig op waterstof uitvoeren geeft een uitdaging in opslag van waterstof.
- Met programma aanbesteding *Innovaties in de Kustlijnzorg* zoeken naar oplossingen voor (1) op zee elektriciteit genereren en (2) opslag in waterstof.

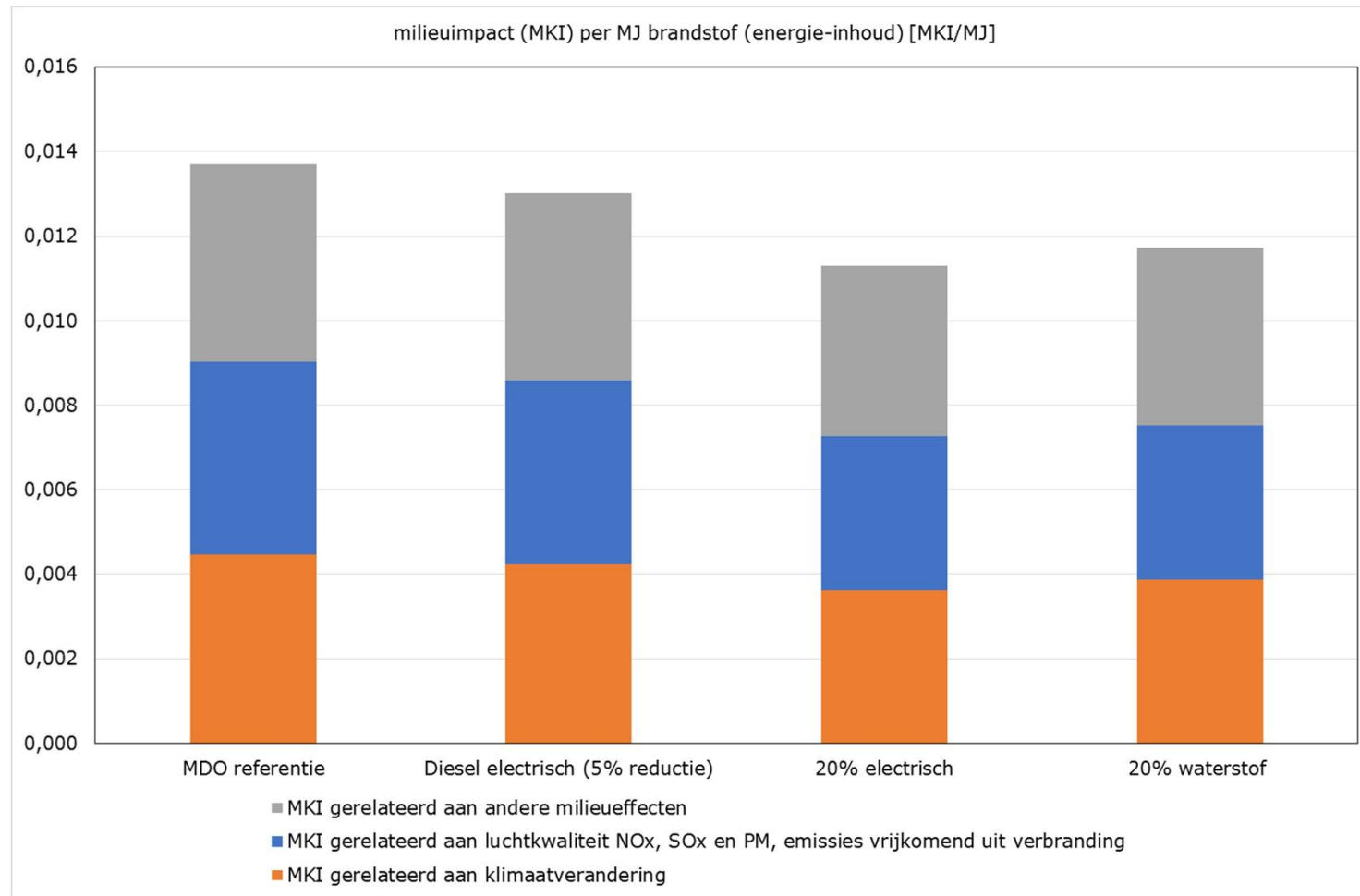


Kwalitatief: milieu-impact (MKI) van elektrificatie (1)

- uitgaande van huidige schepen kan elektrificatie bijdragen aan reductie van het milieuimpact (MKI):
 - (diesel-)elektrisch: efficiëntere omgang met diesel;
 - waterstof en wind: deel-oplossingen in een hybride aanpak.
- indicaties om inzicht te geven in MKI-reductie:
 - (diesel-)elektrisch: 5% reductie t.o.v. referentie MDO;
 - elektriciteit op zee: 20% elektrisch op basis van wind, 80% reductie t.o.v. referentie MDO;
 - waterstof: 20% waterstof (duurzaam opgewekt) 80% reductie t.o.v. referentie MDO;
- niet meegerekend: een correctie voor accu's, conversie verliezen etc.



Kwalitatief: milieu-impact van elektrificatie (2)





Conclusie: kwalitatieve verkenning

- Elektrificatie heeft de potentie om brandstofverbruik te verminderen en kan daarmee bijdragen aan de verduurzaming van het reguliere kustonderhoud.
- De kosteneffectiviteit van elektrificatie is voor verschillende technische oplossingen kwalitatief benaderd en is nader te onderzoeken met het programma aanbesteding *Innovaties in de Kustlijnzorg*.



Deel B: Duurzaamheidsambities



Noodzaak tot duurzaamheidsambities (1)

- LNG is (20 jaar) goedkopere duurzaamheidsmaatregel, maar heeft hogere investeringskosten aan het begin.
- De andere duurzaamheidsmaatregelen zijn bij gelijkblijvend energieverbruik duurder t.o.v. MDO referentie .
- Duurzaamheidsmaatregelen worden niet vanzelf door de markt toegepast, het gevolg is dat duurzaamheidsambities niet door RWS waar kunnen worden gemaakt.
- Het is nodig om voor een langere termijn (20 jaar) duurzaamheidsambities vast leggen:
 - duurzaamheidsmaatregelen zijn (doorgaans) niet over een enkel project af te schrijven;
 - beoordelingskader programma aanbesteding Innovaties in de Kustlijn zorg gebaseerd op LCC- en MKI-systematiek (20 jaar);
 - ambities kunnen doorwerken naar aanbestedingen voor het reguliere kustonderhoud, dat heeft tijd nodig.



Noodzaak tot duurzaamheidsambities (2)

- Onzekerheid in het formuleren van de duurzaamheidsambities zit in de onbekendheid wat er aan brandstofreductie te behalen is en welke kosteneffectiviteit brandstofbesparing dat oplevert, te weten door:
 - brandstofreductie met innovatieve voorstellen van het programma aanbesteding Innovaties in de Kustlijnzorg;
 - nieuwe toepassingen zoals, de verschillende toepassingen van elektrificatie;
 - optimalisatie van projectontwerp met bestaande technologieën (winlocatie, vaarafstanden);
 - brandstofreductie met bestaande technologieën door houding en gedrag -> zie monitoringsplan.



Formulering duurzaamheidsambities

- Onderzochte duurzaamheidsmaatregelen (brandstofcombinaties) dragen verschillend bij aan reductie van:
 - broeikasgasemissies (CO₂, methaan, etc.);
 - emissies relevant voor lokale luchtkwaliteit (NO_x, SO_x en fijnstof)
 - MKI (integrale milieuimpact).
- De wijze waarop RWS in de reductie van milieuimpact gaat sturen, gaat bepalend zijn welke maatregelen gestimuleerd zullen worden:
 - inzicht krijgen in consequenties van (individueel) sturen op 1) MKI, 2) broeikasgasemissies en 3) CO₂ & MKI;
 - luchtkwaliteit (NO_x, SO_x en fijnstof) alleen als afzonderlijk thema meenemen als ambities andere opdrachtgevers van belang zijn.



MKI: maatregelen en reductie potentieel

- MKI is consistent met aanbestedingsbeleid RWS.
- LNG blijkt de maatregel met de grootste reductie MKI indien methaan emissies in productie laag zijn, indien ze hoog zijn, is bio-LNG de maatregel met de grootste reductie MKI.
- Door LNG te gebruiken en 20% brandstof te reduceren (aanname), is een MKI-reductie van 71% t.o.v. MDO referentie mogelijk.
- Meest kosteneffectieve duurzaamheidsmaatregelen op MKI:
 - LNG (goedkoper dan MDO referentie, broeikasgasemissies blijven gelijk of stijgen licht);
 - SCR (geringste extra kosten per MKI-reductie, broeikasgasemissies blijven gelijk);
 - GTL (hogere kosten per MKI-reductie, broeikasgasemissies stijgen);
- Biobrandstoffen (HVO en bio-LNG) zijn minst kosteneffectieve maatregelen voor MKI-reductie door hoge kosten per ton brandstof.



Broeikasgasemissies (CO_{2eq}): maatregelen en reductie potentieel (1)

- Broeikasgasemissies (CO_{2eq}), conform klimaatakkoord Parijs.
- HVO 50 (100% 2^{de} gen.) (50% bijmenging o.b.v. 100% 2^e generatie feedstocks) heeft de grootste CO_{2eq}-reductie.
- HVO 50 (100% 2^{de} gen.) en 20% reductie in brandstofgebruik resulteert in 50% CO_{2eq}-reductie.
- Meest kosteneffectieve duurzaamheidsmaatregelen op CO_{2eq}-reductie:
 - MDO referentie, reductie brandstof
 - is dat wel kosteneffectief (?), we weten wat de brandstofkosten 20% zijn van de totale suppletie, als je langzamer gaat varen, ga je wellicht helft van de brandstofkosten, veel meer tijd, maar is dat wel kosteneffectief?
 - korte termijn: optimalisatie van vaarroute per project, etc.
 - lange termijn: investeringen die tot de reductie van brandstof leiden (zoals voor een deel elektrisch op waterstof of groene stroom, etc.)



Broeikasgasemissies ($\text{CO}_{2\text{eq}}$): maatregelen en reductie potentieel (2)

- Meest kosteneffectieve duurzaamheidsmaatregelen op $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -reductie (vervolg):
 - HVO (dan daalt ook de MKI)
 - bio-LNG (dan daalt ook de MKI)
- Alle andere onderzochte duurzaamheidsmaatregelen resulteren niet in een bijdrage aan $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -reductie.



MKI en CO_{2eq}: maatregelen en reductie potentieel (1)

- Waarderen op reductie van MKI en CO_{2eq}, omdat reductie van MKI alleen niet borgt dat broeikasgasemissies naar beneden gaan.
- Optie 1: sturen op MKI-reductie, en eisen dat CO_{2eq} minimaal gelijk blijven aan referentie MDO:
 - LNG (*meest effectieve en kosteneffectieve* maatregel voor MKI-reductie en gelijke CO_{2eq})
 - vereist dat de methaanemissies tijdens productie van LNG beter worden beheerst
 - SCR (nabehandeling van broeikasgasemissies is tweede meest kosteneffectieve oplossing wat betreft reductie MKI terwijl CO_{2eq} gelijk blijven)



MKI en CO_{2eq}: maatregelen en reductie potentieel (2)

- Optie 2: MKI-reductie en CO_{2eq}-reductie beide waarderen:
 - HVO 50 en bio-LNG reduceren zowel MKI als CO_{2eq}
 - met HVO 50 kan grootste CO_{2eq} reductie worden behaald, met bio-LNG grootste MKI-reductie
 - Mogelijkheid om biobrandstoffen / groene stroom extra te waarderen.
 - brandstofreductie en elektrificatie (diesel elektrisch, 20% windenergie of waterstof) verlagen allen ook de MKI en CO_{2eq}
 - Voor het programma aanbesteding Innovaties in de Kustlijnzorg en voor het reguliere kustonderhoud onderlinge weegfactoren bepalen.
- Schaduw prijzen aanpassen (per project) is geen optie:
 - Op termijn update van de schaduw prijzen, naar verwachting stijgt schaduw prijs voor CO_{2eq}.



Deel C: Monitoringplan – aanleiding



Verschillende doelen voor monitoring

- Uit Beslisnota 'Duurzaam inkopen kustlijnzorg' [RWS, 2015]:
 - Brandstofverbruik is bepalend voor MKI-reductie.
 - Monitoring is nodig om brandstofverbruik vast te stellen, vaststellen of MKI-reductie gehaald is:
 - nu nog onduidelijk in hoeverre de aanbieders (door verandering houding en gedrag) onderscheidend kunnen zijn in reductie brandstofverbruik
- Reguliere kustsuppletie: stellen van doelen MKI-reductie en CO_{2eq}-reductie:
 - Inzicht nodig in brandstofhoeveelheid tot de suppletieprestatie (want verschilt sterk per werk):
 - beperkt inzicht in relatie milieuprestatie & milieuactiviteiten om per werk de ambitie voor MKI-reductie en CO_{2eq}-reductie te kunnen bepalen
 - nog geen optimalisatie op MKI-reductie en CO_{2eq}-reductie als stuurmiddel mogelijk (bijvoorbeeld voor suppletiedieptes/ vaarafstanden etc.)



Verschillende doelen voor monitoring

- Monitoring luchtverontreiniging (NO_x, SO_x, PM):
 - Emissies verschillen afhankelijk van de belasting van de motor (hoge belasting / lage belasting):
 - motor belasting is mede van houding en vaargedrag van schip afhankelijk.
 - Emissies verschillen per brandstof zoals met dit onderzoek blijkt en zijn daarmee een indicatie of een duurzame brandstof is ingezet.
 - Emissie nabehandelingsmaatregelen is mogelijk om uit te schakelen (kostenbesparende maatregelen), advies voor doorvoering van monitoring of nabehandelingsmaatregel goed werkt.



Focus TNO in monitoringsplan: IKZ

- Voor het stellen van duurzaamheidsdoelen en voor inzicht in de potentiële brandstofreductie door houding en gedrag is inzicht nodig in relatie tussen brandstofverbruik en werkprestatie.
- Dit inzicht kan alleen verkregen worden door nauwe samenwerking samen met de markt:
 - een traject als het programma aanbesteding Innovaties in de Kustlijnzorg leent zich er goed voor om samen met de markt aan monitoring van brandstofverbruik te werken;
 - aanvullend: monitoring luchtverontreinigende emissies (NO_x, SO_x en fijnstof (PM)).
- Monitoring voor het reguliere kustonderhoud heeft momenteel nog een meer administratief karakter, bijvoorbeeld:
 - benutten van bunkerbonnen om vast te stellen welk type brandstof is gebruikt in welke hoeveelheid;
 - registreren van motortypen (tiers, dual of single fuel etc.).



Deel C: Monitoringplan - brandstofmonitoring



Brandstofverbruik monitoring – aan boord (1)

Brandstofverbruikmeter(s) zijn per schip verschillend in configuratie en inrichting:

- schepen hebben flink aantal motoren: ca 3 tot 6 afhankelijk van de configuratie;
- complex brandstofsysteem bij gebruik meerdere typen brandstof (afhankelijk milieueisen);
- configuratie per schip verschillend;
- brandstofmeters vaak niet aanwezig;
- per schip een plan maken voor brandstofhoeveelheid monitoring - met onafhankelijke certificering.



Brandstofverbruik monitoring – aan boord (2)

Combinatie van brandstofverbruik, motorparameters en scheepsbewegingen geeft relatie tussen verbruik en activiteiten:

- pompen aan/uit signaal;
- lading hoeveelheid;
- deining;
- optioneel: windrichting, - snelheid, luchttemperatuur;
- motortoerental van alle motoren;
- tijd en datum;
- locatie van het schip (GPS).



Kosten brandstofmonitoring

Investering per schip:

- Brandstofverbruik (MKI-reductie en CO_{2eq}-reductie):
 - brandstofverbruiksmeting: 15-30 kEUR
 - brandstofverbruiksmeting + motorparameters en activiteiten: 30-80 kEUR
 - uitgebreide monitoring incl. koppel, vermogen, stuwkracht: 90-150 kEUR
- Luchtverontreiniging (NOx, SOx, PM):
 - high end systemen: 50-100 kEUR
 - sensor based systemen zijn in ontwikkeling: 15-25 kEUR
- Jaarlijks onderhoud + eventueel hercertificering bedragen 5-10% van de investeringskosten.



Brandstofverbruik monitoring

- Systemen voor combinatie verbruik, emissie en vaarprestatie zijn niet uitontwikkeld.
- Standaardisatie nodig, incl. datatransmissie en automatisering.
- Ontwikkeling pilot project: monitoring in de praktijk met 1 of 2 schepen.
- In samenwerking met markt afspraken maken over:
 - investering in de hardware voor monitoring door de markt, overheid investeert in de dataverwerking en in het opstellen van protocollen;
 - delen van de data;
 - inzicht nodig in relatie met werkprestatie (vaarafstanden, diepte suppletie etc.) ten behoeve van vaststellen duurzaamheidsdoelen per project;
 - monitoringsprotocollen ontwikkelen;
 - standaardisatie van data verwerking, transmissie en presentatie.



Deel C: Monitoringplan - luchtverontreinigende emissies



Luchtverontreinigende emissies monitoren (1)

- De duurzaamheidsmaatregelen zijn van invloed op de luchtverontreinigende emissies, maar er zijn (afhankelijk van de maatregel) nog wel onzekerheden over die emissies:
 - monitoren of de ingeschatte emissies voor de MKI berekening ook kloppen met de praktijk.
- SCR (nabehandelingsmaatregel)
 - nabehandeling is uitschakelbaar: monitoren of de nabehandeling werkt;
 - hoe goed de nabehandeling luchtverontreinigende emissies vermindert, hangt mede af van de motorbelasting, en die is (beperkt) bekend: monitoren effectiviteit van de nabehandeling.
- GTL en HVO
 - kunnen in een 'gewone' dieselmotor worden gebruikt, maar geven veel minder SOx emissies: SOx monitoren om te zien hoe schoon de brandstof was.



Luchtverontreinigende emissies monitoren (2)

- LNG aan boord monitoring van methaan emissies
 - methaanemissies zijn bepalend voor de prestatie op broeikasgassen en daarmee ook op de MKI;
 - methaanemissies zijn mede afhankelijk van de motorbelasting.



Luchtverontreinigende en broeikasgasemissies - overzicht duurzaamheidsmaatregel in relatie tot emissies

Duurzaamheids- maatregel	NOx	PM	SOx	CH ₄
SCR	in by pass is SCR uitschakelbaar, efficiency afhankelijk van motorbelasting		bepaald door brandstofkwaliteit (MDO en ULSF of andere duurzame brandstoffen) en indien aanwezig SOx-scrubber	niet relevant
SCR + DPF (roetfilter) niet met EN560 ULSF (geen/weinig SOx)				
HVO 30 / HVO 50	NOx slechts tot 10% lager → lastig voor monitoring			
GTL 100				
LNG / bio-LNG	afhankelijk van type LNG motor en motorbelasting			methaan-emissie afh. motorbelasting



Luchtverontreinigende en broeikasgasemissies - monitoren

- Net als voor brandstofmonitoring, advies om monitoringsprotocollen te ontwikkelen om emissies aan boord te monitoren, daarbij:
 - standaardisatie van data verwerking, transmissie en presentatie van monitoringgegevens van emissies;
 - vaststellen welke emissie acceptabel, te verwachten is;
 - op termijn ook nodig wanneer monitoring ingezet wordt voor 'goedkeuring of afkeuring', bijvoorbeeld ter verificatie, wordt emissie-reductie of MKI-reductie gehaald die is beloofd
- Monitoring: periodieke of continue vorm:
 - continue meting is een meting die continue wordt uitgevoerd wanneer de motor in bedrijf is;
 - periodieke meting is een meting die in een tijdsinterval wordt uitgevoerd (niet continue)
 - advies per emissie/duurzaamheidsmaatregel;
 - rekening houden met /afkeur criteria voor technische mogelijkheden.



Aanbeveling - continue of periodieke monitoring

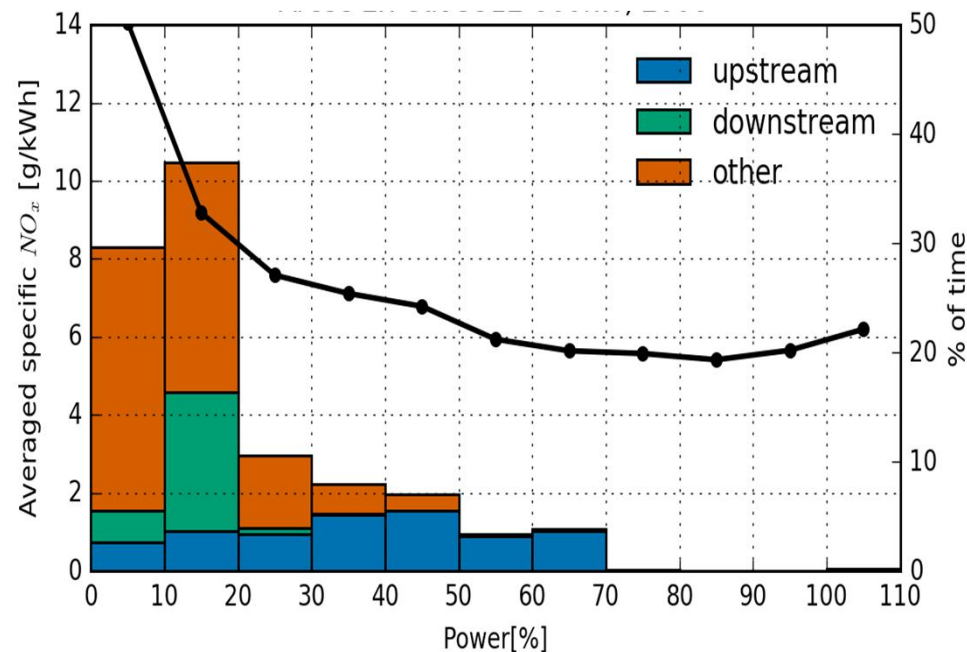
Duurzaamheidsmaatregel	NOx	PM	SOx	CH ₄
SCR katalysator	belangrijk - continue	-	-	
SCR + roetfilter	belangrijk - continue	periodieke + indirect continue	-	
HVO blend 30 / HVO 50	-	-	optioneel: brandstof of SOx-sensor	
GTL 100	optioneel - continue	-		
LNG / bio-LNG	belangrijk - periodieke/continue	-	-	periodieke

- belangrijk = emissie is bepalend voor de milieuprestatie en kan variëren voor de genoemde duurzaamheidsmaatregel (werkt de maatregel of niet, in geval SCR heb je wel of niet aanstaan, bij LNG, dual motoren, ben je wel echter op LNG varen);
- optioneel = meting geeft aanvullende informatie, bijvoorbeeld of de genoemde duurzame brandstof is gebruikt in plaats van MDO referentie.



Voorbeelden - NOx monitoring binnenvaart (1)

Voorbeelden van resultaten uit monitoringemissie voor NOx, de NOx-emissie per kWh motorprestatie nemen af als de motor hoger belast wordt (voor binnenvaartschepen berekening [gemeten waarde [onderzoeksprogramma Prominent 2015/2018], stroomopwaarts - upstream, stroomafwaarts - downstream, other - power niet voor directe varen).





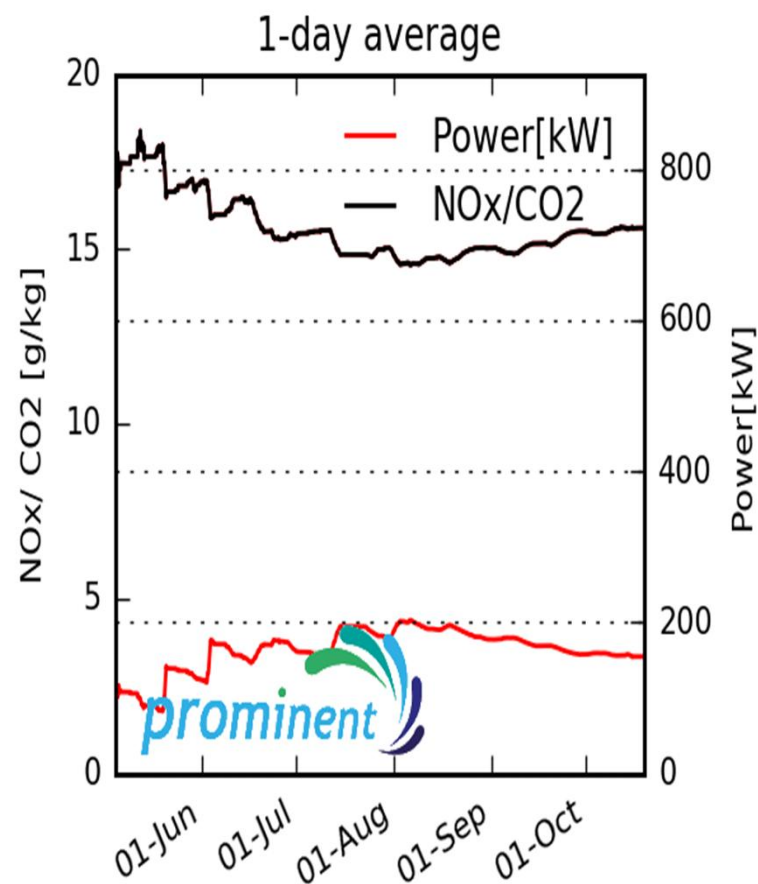
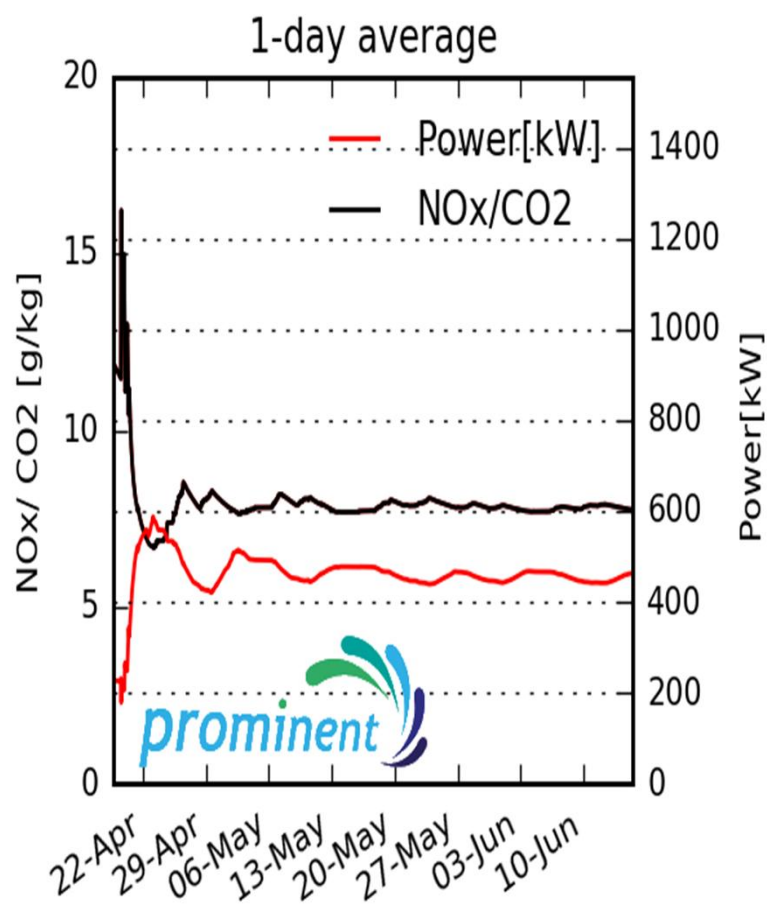
Voorbeelden - NOx monitoring binnenvaart (2)

Voortschrijdend gemiddelde NOx/CO₂ met SCR als duurzaamheidsmaatregel:

- (verwijs naar afbeeldingen op de volgende sheet 63)
- afbeelding links: met SCR (de NOx/CO₂-ratio is veel lager (gunstiger) dan afbeelding rechts zonder SCR (hogere NOx/CO₂-ratio).
- Zo kan een afbeelding eruit zien met en zonder de inzet van een scrubber (SCR). Het gaat daarbij om de maatregelen en niet om de grote van de schepen.
- Je kunt de afbeeldingen vergelijken, daarbij zijn de verschillen in de power niet relevant, het gaat puur om de ratio, en dat er een relatie zit met de powerbelasting (groot in relatie tot de baggerschepen).



Voorbeelden - NOx monitoring binnenvaart (3)





Conclusie - Luchtverontreinigende en broeikasgasemissies

- On board monitoring van brandstofverbruik, broeikasgasemissies en verontreinigende broeikasgasemissies (die tabellen gaan over het meten van methaan, pag 48 en 46):
 - is technisch mogelijk, maar vraagt maatwerk per schip;
 - geeft inzicht in relatie broeikasemissies en activiteiten voor het reguliere kustonderhoud, waardoor deze in de toekomst geoptimaliseerd kunnen worden (inzicht in vrijheidsgraden).
- De belangrijkste maatregelen voor MKI-reductie kunnen met on board monitoring van broeikasgasemissies geverifieerd worden.
- De kosten van continue monitoring >30-150 kEUR investering plus jaarlijks 5-10% van dit bedrag voor onderhoud.
- On board monitoring vereist vervolg overleg met de sector, ontwikkeling van een protocol, demonstratieproject, data analyses, etc.



Deel D: Bijlage I - resultaten – kosteneffectiviteit



Relatie broeikasgasemissies en MKI-waarden

In deze tabel staan de MKI-waarden gerelateerd aan emissie van 1kg CO₂, methaan, NO_x, SO_x en fijnstof (PM).

De MKI-waarde voor een broeikasgasemissie is opgedeeld naar de verschillende milieueffectcategorieën.

Milieueffectcategorieën	MKI (schaduwkosten, €) per emissie van 1 kg emissiestof						
	CO ₂ (biogeen)	CO ₂ (fossiel)	methaan (biogeen)	methaan (fossiel)	NO _x	PM	SO _x
Klimaatverandering (CO _{2eq})	-	0.05	1.00	1.25	-	-	-
Fotochemische oxidantvorming	-	-	-	-	-	-	0.096
Verzuring	-	-	-	-	2	-	4.8
Vermesting	-	-	-	-	1.17	-	-
Humane toxiciteit	-	-	-	-	0.108	0.0738	0.0086



Gevoeligheidsanalyse: HVO 30 en HVO 50

Voor HVO zijn twee alternatieven weergegeven:

- HVO 30
 - momenteel is de mix van HVO gebaseerd op 80% 2^{de} generatie feedstocks (40% dierlijk vet, 40% afgewerkt frituurvet en 20% palmolie);
 - alle motoren zijn geschikt voor een 30% bijmenging van HVO in MDO;
 - as-is situatie;
- HVO 50
 - er wordt gewerkt aan HVO o.b.v. 100% 2^{de} generatie feedstocks en zijn sommige motoren geschikt (en gekeurd) om tot 50% HVO bij te mengen;
 - dit wordt dus gezien als meest waarschijnlijke toekomst scenario, maar het is nog niet duidelijk of alle motoren geschikt zijn voor de specificaties van volledig 2^{de} generatie 50% HVO/MDO mengsel;
- Beide voorgenoemde alternatieven zijn meegenomen in deze kosteneffectiviteitsanalyse

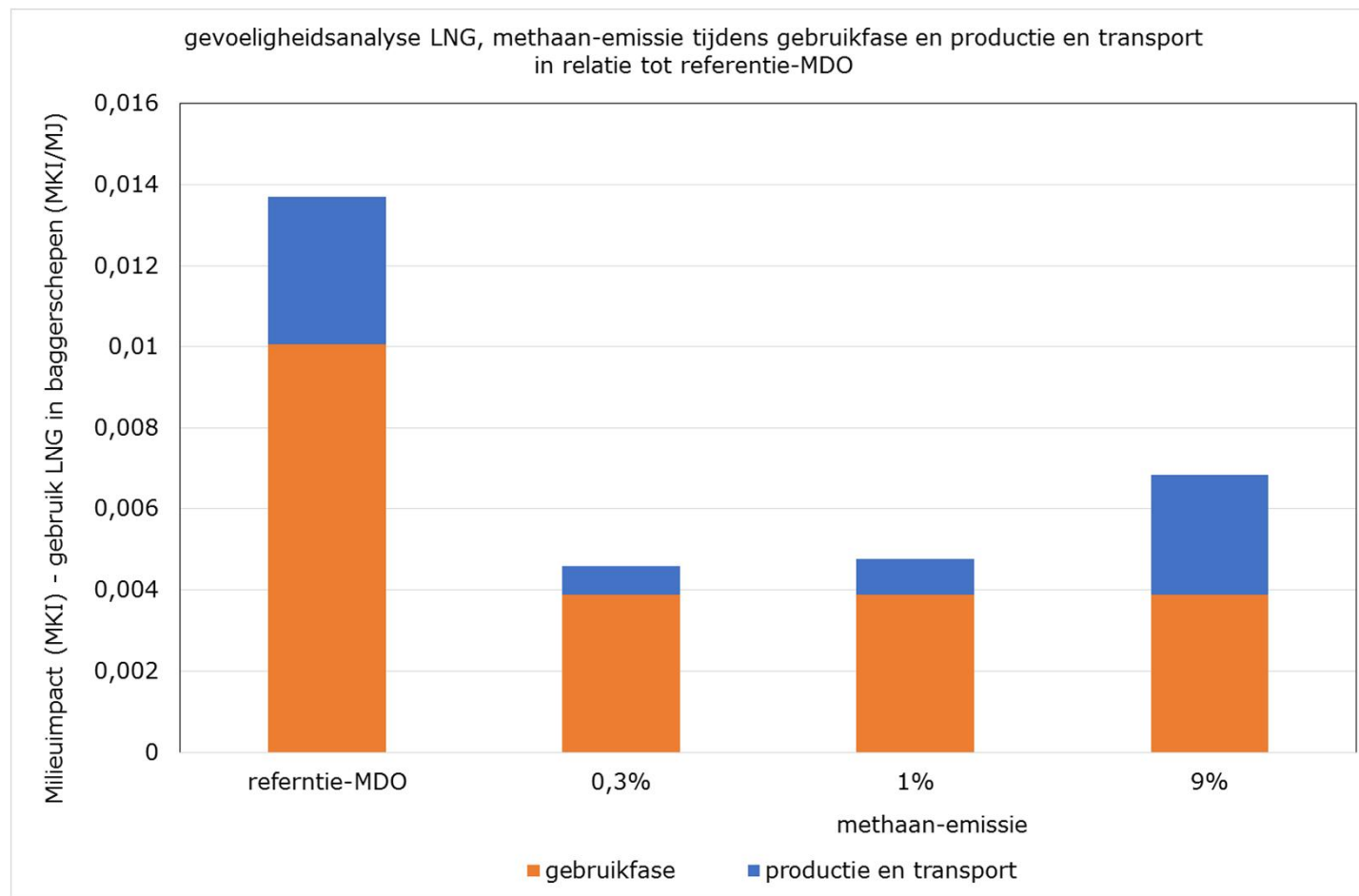


Gevoeligheidsanalyse LNG (1)

- In analyse uit 2016 is uitgegaan van een methaan-emissie tijdens productie van 0,3%. Recente bron gaat echter uit van een emissie tussen de 1 en 9%.
- Er is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om het effect van de methaan-emissie op MKI van LNG te duiden.
- De MKI is 3% hoger bij 1% emissie en 44% bij 9% emissie. Effect van methaan-emissie tijdens productiefase op MKI is dus significant, maar onzekerheid in emissie is tevens zeer groot.
- Meetcampagne op verschillende LNG plant kan uitsluitsel geven.
- In de kosteneffectiviteitsanalyse zijn twee varianten uitgewerkt:
 - LNG = 0,3% methaanemissie
 - LNG (worst case) = 9% methaanemissie



Gevoeligheidsanalyse LNG (2)





Resultaten: kosten (1)

	MJ/kg	duurzaamheidsmaatregel	€/ton brandstof*	extra investeringen t.o.v. referentiemdo (€)	extra onderhoudskosten t.o.v. MDO referentie (€/kWh)	totale kosten per ton brandstof	totale kosten per jaar	totale kosten per MJ
Referentiemdo	42.7	MDO	550	-		550	2.733.500	0.013095
Na-behandeling	42.7	SCR	550	833.000 + 653.000 na 60.000 uur	1	588	2.922.989	0.014003
	42.7	SCR + DPF+ MDO EN590 ULSF	600	1.915.000 + 1.675.000 na 60.000 uur	2.17	662	3.290.862	0.015765
Duurzame brandstoffen	44	HVO 30	694	-		694	3.400.600	0.016291
	44	HVO 50	790	-		790	3.834.991	0.018372
	43	GTL 100	615	-		615	2.917.616	0.013977
	49	LNG	505	5.500.000	1	574	2.519.972	0.011710
	49	bio-LNG	1262		1	1331	5.846.185	0.027167



Resultaten: kosten (2)

Berekening is uitgevoerd voor periode van 20 jaar:

- met bezetting schip van 5.000 uur/jaar;
- verbruik van 994 kg diesel per uur;
- gemiddeld vermogen 4.972 kW;
- kosten voor extra investeringen zijn afgeschreven over periode van 20 jaar;
- vervanging na 12 jaar na rato over de resterende 8 jaar;
- voor LNG is uit gegaan van een efficiëntie verlies van 3%;
- kosten zijn gebaseerd op expert judgement van TNO;
- brandstofprijzen zijn gebaseerd op brandstofvisie uit 2014 en afgestemd met de markt, komen niet overeen met door Rijkswaterstaat aangeleverde getallen.



Resultaten: luchtkwaliteit

Duurzaamheids- maatregel	Bton	NOx		SOx		PM <2.5	
		kg/MJ	g/KWh	kg/MJ	g/KWh	kg/MJ	g/KWh
Referentie MDO	expert judgement TNO	1.48E-03	11.60	3.75E-05	0.29	4.22E-05	0.33
SCR		3.32E-04	2.60	3.75E-05	0.29	4.22E-05	0.33
SCR + DPF + EN590 ULSF		3.32E-04	2.60	3.75E-07	0.00	2.56E-06	0.02
HVO 30 (80% 2de gen)		1.30E-03	10.14	2.64E-05	0.21	3.65E-05	0.29
HVO 50 (100% 2de gen)		1.26E-03	9.84	1.89E-05	0.15	3.39E-05	0.27
GTL 100 / GTL 100 (aangepast)	[TNO 2016]	1.33E-03	10.44	3.75E-07	0.00	2.73E-05	0.21
LNG		9.18E-05	0.72	2.04E-06	0.03	1.63E-06	0.01
LNG (worst-case)		3.32E-04	2.60	3.85E-06	0.03	2.56E-05	0.20
bio-LNG	[TNO 2016]	9.18E-05	0.72	2.04E-06	0.03	1.63E-06	0.01
bio LNG (worst-case)	expert judgement TNO	3.32E-04	2.60	3.85E-06	0.03	2.56E-05	0.20



Resultaten: MKI

Maatregel	Bron	MKI / MJ			Broeikasgassen	
		brandstof-productie en transport	gebruiks-fase	totaal	kg CO ₂ -equivalent /MJ	MKI / MJ
Referentie MDO	[TNO 2016]	3.62E-03	1.01E-02	1.37E-02	0.09	4.52E-03
SCR	[TNO 2016] + expert judgement TNO	3.62E-03	6.75E-03	1.04E-02	0.09	4.52E-03
SCR + DPF + EN590 ULSF		3.62E-03	6.57E-03	1.02E-02	0.09	4.52E-03
HVO 30 (80% 2de gen)	[TNO 2016]	4.53E-03	8.39E-03	1.29E-02	0.07	3.68E-03
HVO 50 (100% 2de gen)		3.84E-03	7.26E-03	1.11E-02	0.06	2.81E-03
GTL 100		2.98E-03	8.19E-03	1.12E-02	0.11	5.64E-03
GTL 100 (aangepast)		2.30E-03	8.19E-03	1.05E-02	0.11	5.74E-03
LNG		1.16E-03	3.89E-03	5.04E-03	0.09	4.41E-03
LNG (worst-case)	[TNO 2016] + expert judgement TNO	2.94E-03	5.03E-03	7.97E-03	0.12	5.96E-03
bio-LNG	[TNO 2016]	5.48E-03	1.00E-03	6.48E-03	0.07	3.64E-03
bio LNG (worst-case)	[TNO 2016] + expert judgement TNO	5.48E-03	2.08E-03	7.56E-03	0.07	3.64E-03



Kentgetallen: referentieschip

Referentieschip	Geopotes 15
9TM410	2x Wartsila TM410
total power	12.445 kW
LxB	132 x 24 m
hopper volume:	9.962 m ³
hopper mass:	15.050 ton
speed (loaded):	15.5 knts

Uitgangspunten voor MKI berekening	
Bezetting	5.000 uur/jaar
afschrijvingsperiode	20 jaar
verbruik MDO	994 kg/uur

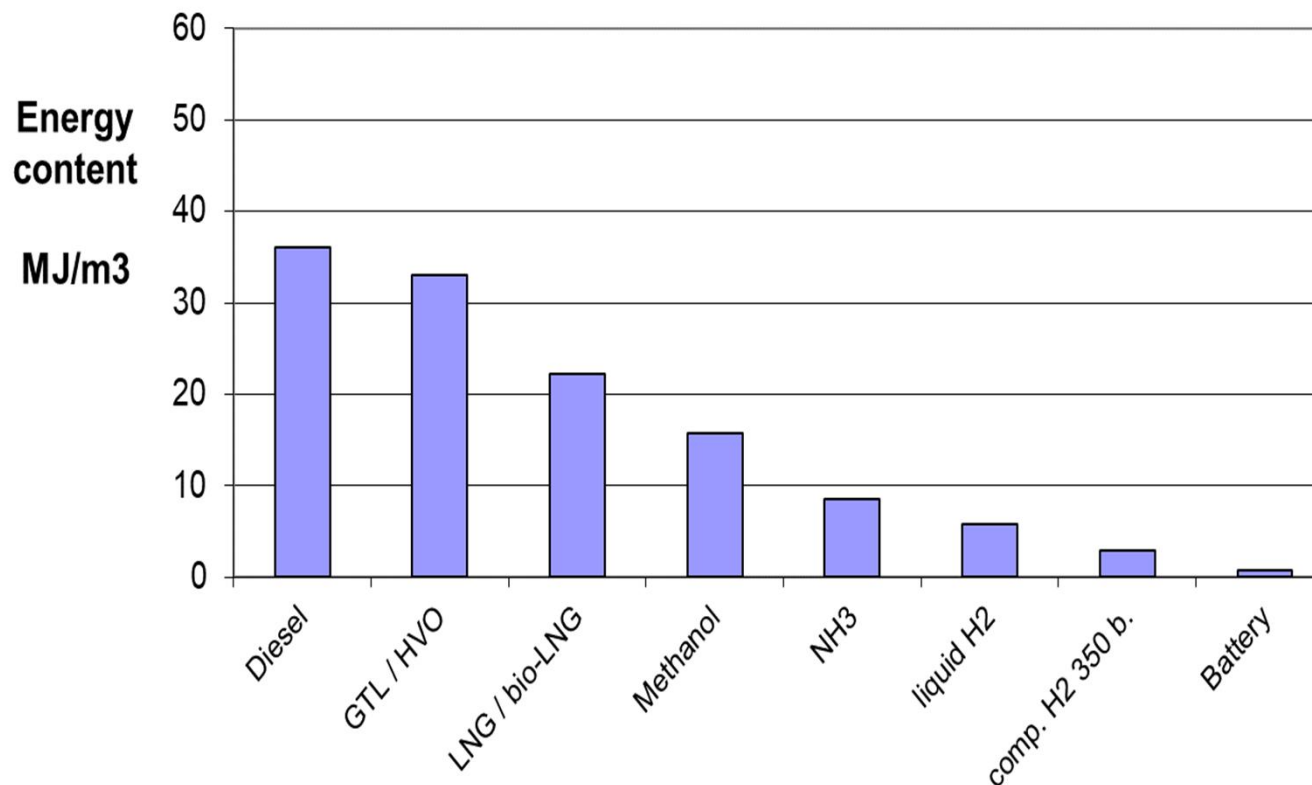
Cyclus	Kentgetal
m ³ /cyclus	5,679
km/cyclus	24
duur (uur)	4.4
ton brandstof/cyclus	4.39
ton brandstof per uur	0.99
ton brandstof per dag	24
Gemiddelde motorbelasting	40%
Bunker frequentie	2 weken



Deel D: Bijlage II - elektrificatie



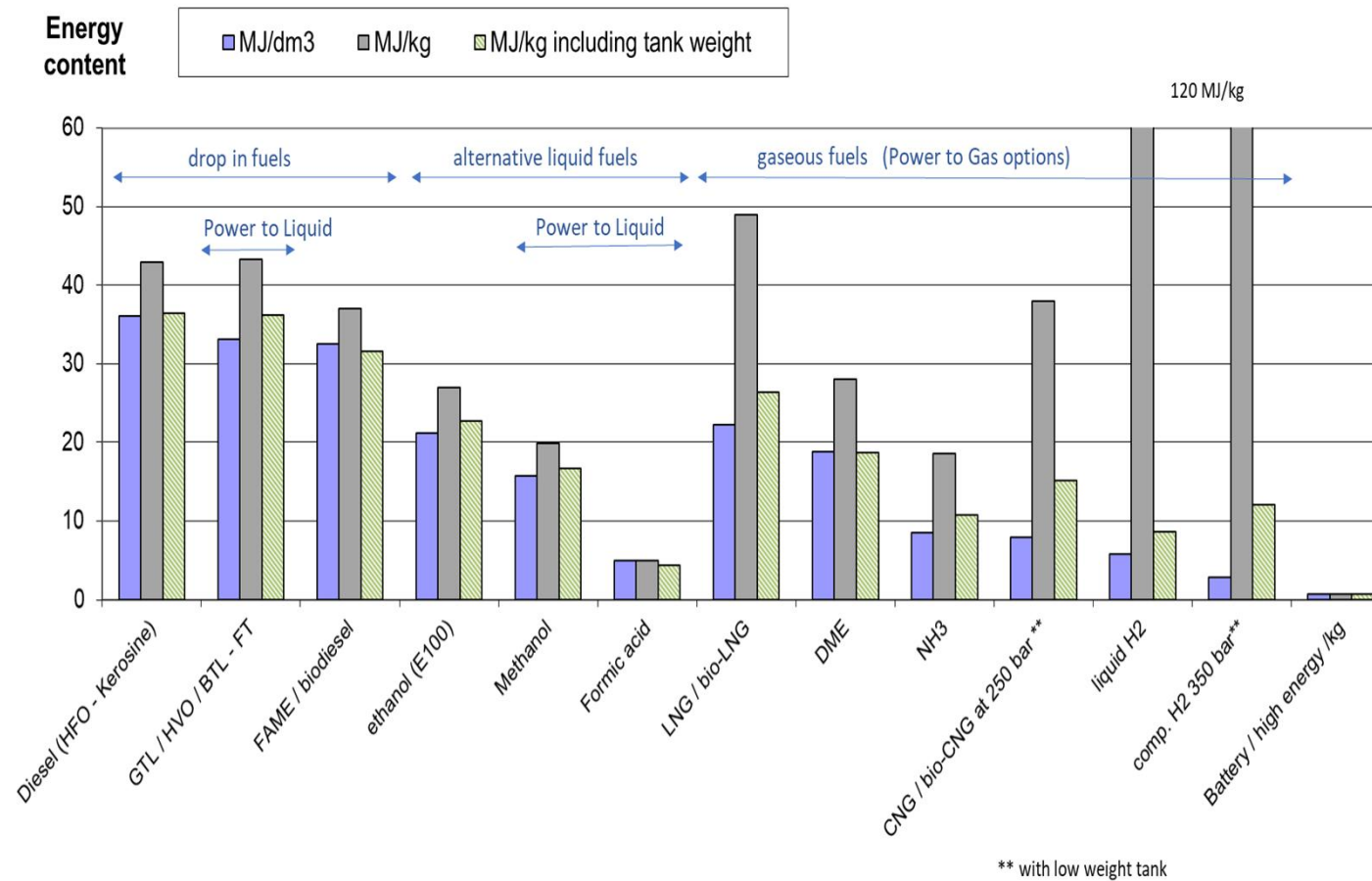
Energiedichtheid brandstoffen



Exclusief packaging factor (voor cilindrische tanks)



Energiedichtheid brandstoffen





Varen op waterstof

In studie TNO [2016] een inschatting gemaakt van de MKI en embedded CO₂ kentallen voor waterstof productie en 'verbranding' in schip. In deze analyse is aangenomen dat er duurzame energie is gebruikt voor waterstofproductie:

	LHV	brandstof kosten	MKI		broeikasgasemissies	
	MJ/kg	€/ton	(€/ton)	(€/MJ)	(kg CO ₂ -eq /ton)	(kg CO ₂ -eq /MJ)
referentie MDO	42	550	575.1	0.0137	187.5	0.0893
H ₂	120	2500 - 10000	468.7	0.0039	179.7	0.0300

- LHV – Lower Heat Value
- Inzet van waterstof verlaagt zowel de MKI als CO₂ t.o.v. diesel.
- Waterstof is 1.5 tot 6x duurder per MJ energie-inhoud.



Deel D: Bijlage III – achtergrond monitoring



Luchtverontreinigende emissies

SOx als monitoring parameter

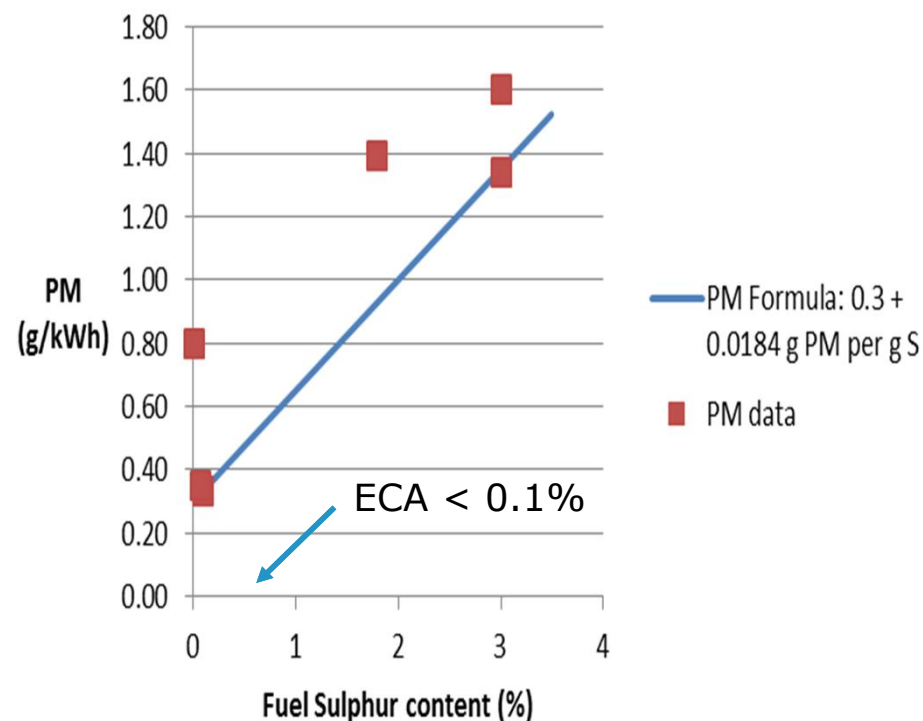
SOx emissie kan gebruikt worden om onderscheid te maken tussen verschillende brandstoffen:

- MGO – LS HFO (voldoet fuel aan $S < 0,1\%$)
- HVO blend
- GTL

Zwavelgehalte heeft ook een direct effect op de PM emissie (binnen de Noordzee Emission Control Area (ECA) $\pm 25\%$)

Bron: Natural gas in transport [2013]

PM estimate based on fuel S content





Brandstofverbruik monitoring

Brandstofverbruikmeter(s): per schip verschillend – configuratie - inrichting

- schepen hebben flink aantal motoren: ca. 4 tot 8, afhankelijk van de configuratie;
- complex brandstofsysteem bij gebruik meerdere typen brandstof (afhankelijk milieueisen);
- niet altijd brandstofmeters aanwezig voor alle motoren;
- per schip een plan maken voor brandstofhoeveelheid monitoring;
- onafhankelijk laten certificeren.

Brandstof – plus monitoring geeft inzicht in de parameters (bijv. vaarafstanden) welke het energieverbruik kunnen verminderen (en daarmee verbeteren van de milieuimpact (MKI)).